

# המחלקה לחשמל קירור ומיזוג אוויר מתקני חשמל ורשת חשמלאי ראשי

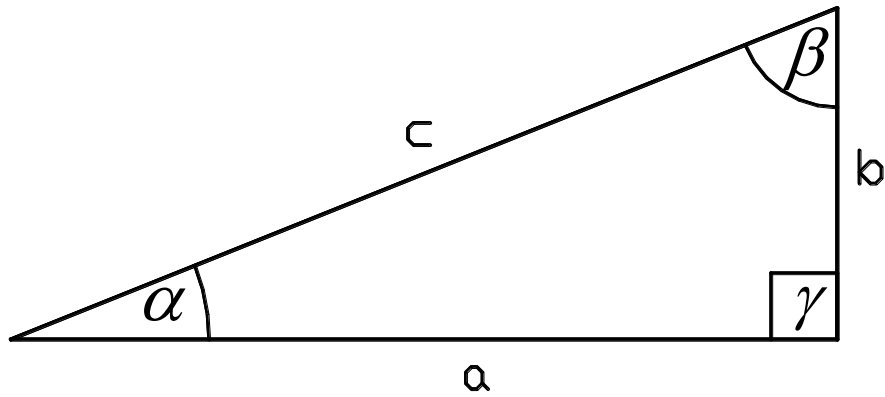
נכתב ונערך ע"י ארנון בן טובים  
2011

## **תוכן עניינים:**

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

פרק 1- זרמים והספקים בזרם חילופין

מבוא-משפט פיתגורס



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### זרמים והספקים בזרם חילופין

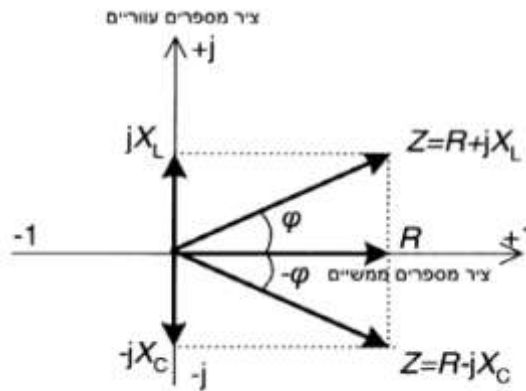
באופן כללי צרכן הזרם חילופין מאופיין ע"י העכבה Z. העכבה בנויה מ-2 רכיבים:

הרכיב האפקטיבי R הוא התנגדות האומית הנובעת מהתנגדותם האומית של מוליכי הצרכן  
הרכיב הראקטיבי X הוא ההיגב שמבטא את השפעות השדות המגנטי והחשמלי המופיעים בצרכן.

ההיגב X יכול להיות אחד מ-2 הסוגים הבאים:

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

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



עבור צרכן בעל אופי השראי-

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

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

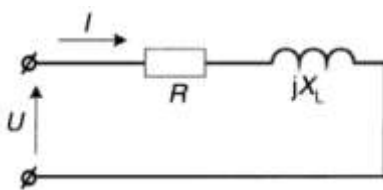
$$\varphi = \sin^{-1}\left(\frac{XL}{Z}\right)$$

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

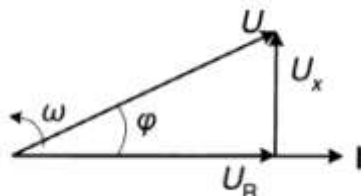
מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו :

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

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי השראי:



את הזרם נחשב בהתאם לחוק אום:  $\vec{I} = \frac{\vec{U}}{Z}$  כאשר העכבה מושבת לפי:  $Z = R + jX_L$ .  
מפל מתח במעגל טורי מתחלק ביחס ישר להתנגדותם של רכיבי המעגל ומחושב בהתאם לחוק אום:  $U_R = I * R$ ,  $U_X = I * jX_L = j * I * X_L$ .  
כיוון שווקטור המתח  $U_R$  זהה לכיוון וקטור הזרם  $I$  וווקטור המתח  $U_X$  מקדים את הזרם בזווית של  $90^\circ$ , 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  $\omega$ :  $\omega = 2\pi f \text{ (rad/sec)}$   
מהדיאגרמה ניתן לראות שבמקרה של עכבה אומית-הרשאית וקטור הזרם מפגר אחרי וקטור המתח באותה זווית  $\phi$  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  $\phi$  מתקבלת לפי הביטויים:

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

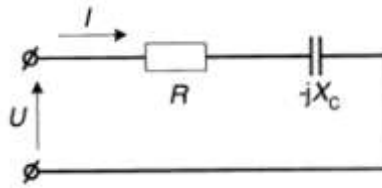
$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{-X_C}{Z}\right)$$

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

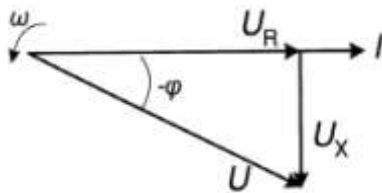
מתייחסים לחיבור 2 הרכיבים R ו-X כאל חיבור טורי ולכן ניתן להציגו:

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

ניתן לראות זאת המעגל תמורה של צרכן אומי קיבולי:



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



בדיאגרמה פאזורית וקטור הזרם מקדים את וקטור המתח וצרכן מסוג זה נקרא "עומס מקדים".  
 \*בדרך כלל בחישובים ומדידות משתמשים בערכים אפקטיביים (rms) של זרמים ומתחים.

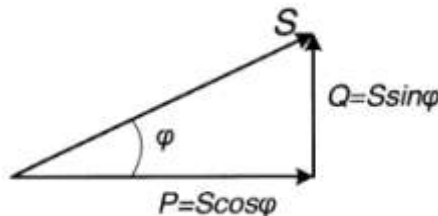
### משולש הספקים

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

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

הביטוי  $S = U * I$  מסמן הספק מדומה (מלא) של הצרכן והוא שווה לסכום הקומפלקסי של שני סוגי ההספקים:  $S = P + jQ = U * I \cos \varphi + j * U * I \sin \varphi = \vec{U} * \vec{I}^*$

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



ההספק המדומה נמדד ביחידות (VA).

ניתן על-פי משפט פיתגורס לקבוע את הביטויים הבאים

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

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

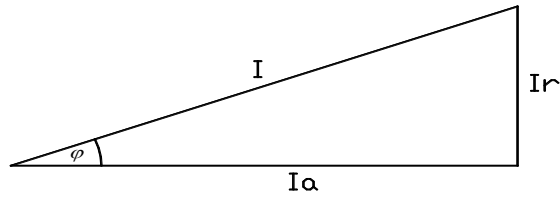
$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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



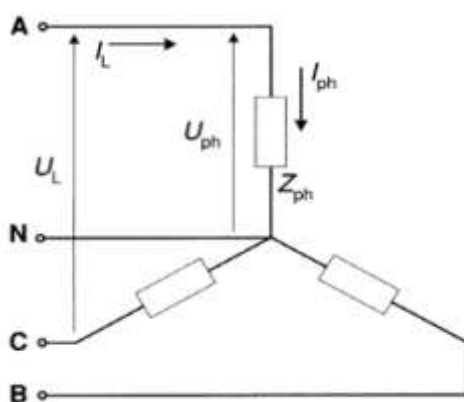
## מערכת תלת מופעית חיבור צרכן בחיבור כוכב ובחיבור משולש

### חיבור צרכן בחיבור כוכב

במערכת תלת פאזית ישנם 2 סוגי מתחים:

- מתח פאזי  $U_{ph}$  והוא המתח על כל צרכן בנפרד:  $U_A, U_B, U_C$ .
- מתח קווי (שלוב)  $U_L$  והוא המתח בין 2 מוליכים פאזיים של הרשת:  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$ .

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



כאשר:

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

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

לפי חוק מפלי מתח של קירכהוף ניתן לרשום:

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

הספקים נחשב:

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

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

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

מכאן שגם הזרמים שווים:

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

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

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

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

### תרגיל דוגמא

ברשת תלת פאזית 400V שלושה צרכנים אומים מחוברים בכוכב:

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

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא:

א. נחשב את הזרמים הפאזיים-

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

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

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

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

ב. נחשב את העכבות הפאזיים-

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

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

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

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

חישוב המתח בנקודת הכוכב-

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

חישוב מתחים הפאזיים-

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

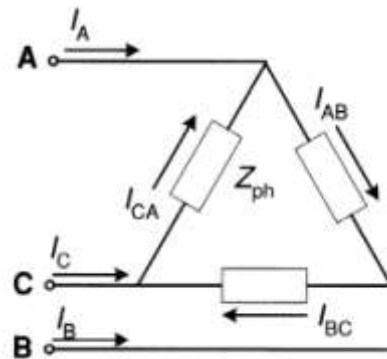
$$\vec{U}'_{B_{ph}} = \vec{U}_{B_{ph}} - \vec{U}_N = \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^{\angle -120^\circ} - 121.628^{\angle 139^\circ} = 122.514^{\angle -101.14^\circ} V$$

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

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

### חיבור צרכן בחיבור משולש

בחיבור משולש פאזות הצרכן מתחברות בין המוליכים הקווים.



בחיבור זה המתחים הפאזיים שווים למתחים הקווים:

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

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

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

זרמים יחושבו לפי חוק אום:

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

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

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

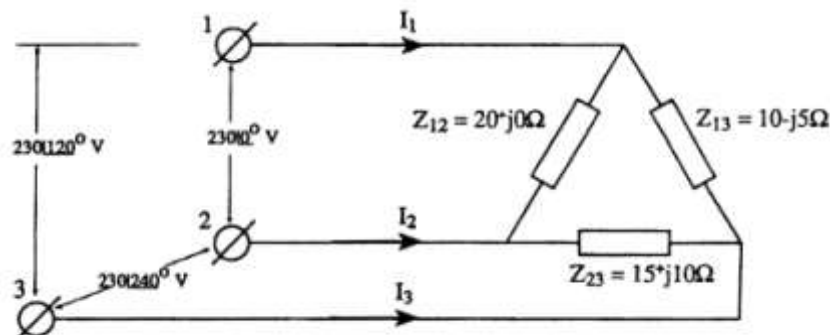
הספקים נחשב:

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

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

### תרגיל דוגמא:

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



- א. חשב את הזרמים הקווים.
- ב. חשב את סכום הזרמים הקווים.
- ג. חשב את ההספקים הראקטיבי והאקטיביים בכל מופע ואת ההספק העומס הכולל.
- ד. חשב את מקדם ההספק של העומס.

פתרון לתרגיל דוגמא

א. חישוב הזרמים הפאזיים:

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

נחשב את הזרמים הקווים לפי הפרש הזרמים הפאזיים:

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

ב. חישוב סכום הזרמים הקווים:

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

ג. חישוב הספקים:

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

ד. חישוב מקדם ההספק של העומס:

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

## פרק 2-חישובי רשתות

קיימים שיקולים שונים לבחירת שטח חתך מוליכים:

1. שיקול חוזק מכני.
2. שיקול העמסת יתר.
3. שיקול מפל מתח מותר.
4. שיקול הפסדי הספק.

בבחירת שטח חתך של מוליכים יש להתחשב במספר השיקולים הנ"ל, אך לא בכולם יחד, כאשר השיקולים 1-3 הם חובה.

### בחירת שטח חתך המוליכים לפי שיקול חוזק מכני

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

בתקנות החשמל מוגדרים החתכים המינימאליים של המוליכים במתקן מתח נמוך:

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

### חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול מפל מתח מותר

תקנות:

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

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

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

### מבוא

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

- א. מרכיב אקטיבי  $R_L$  הנובע מהתנגדותם האומית של מוליכי הרשת.
- ב. מרכיב היגבי  $X_L$  הנובע מתדירות של זרם חילופין והשראות בין המוליכים.

ההיגב השראי  $X_L$  תלוי במרחק בין מוליכי הפאזות ברשת.

בתדירות של 50Hz ההיגב לקילומטר של קו  $X_0$  שווה:

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

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

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

כבל מתח נמוך:  $X_0=0.07 \Omega/Km$

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

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

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

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

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

א. עבור רשת חד פאזית-

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

ב. עבור רשת תלת פאזית-

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

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

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

בעומס השראי הזרם מפגר אחרי המתח ולכן יש להפוך את הסימן לפני המרכיב הראקטיבי של מפל המתח:  $\Delta U_r = -XL * \sin \varphi_2$  כך שהמרכיב הראקטיבי יהיה חיובי בעומס השראי ושליילי בעומס קיבולי.

שלב חישוב שטח חתך אחיד.

א. הצגת זרמי הקטעים או ההספקים ברשת בצורה קרטזית.

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

הערות:

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

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

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

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

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

4. מפל מתח הראקטיבי שווה לאפס או ניתן להזנחה במקרים הבאים:  
רשת לזרם ישר.

מקדם הספק של צרכנים קרוב ל-1.

מוליכי רשת בעלי חתכים קטנים שהתנגדותם האומית הרבה יותר גדולה מההיגב האשראי שלהם.

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

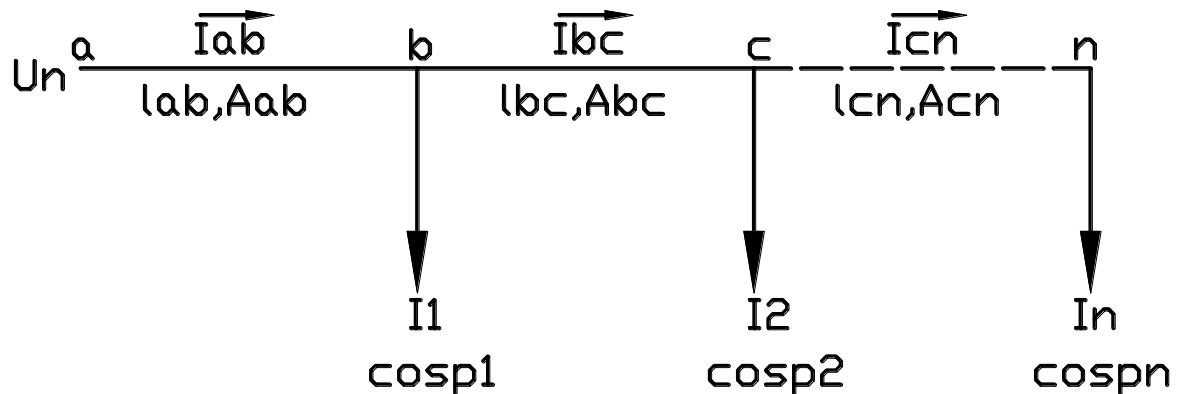
ג. חישוב מפל מתח אקטיבי מותר  $\Delta U_a\%$  לפי הנוסחה:  $\Delta U_a\% = \Delta U\% - \Delta U_r\%$

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

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

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

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



כאשר:

$$\vec{I}_1 = I_{a1} \mp jI_{r1}$$

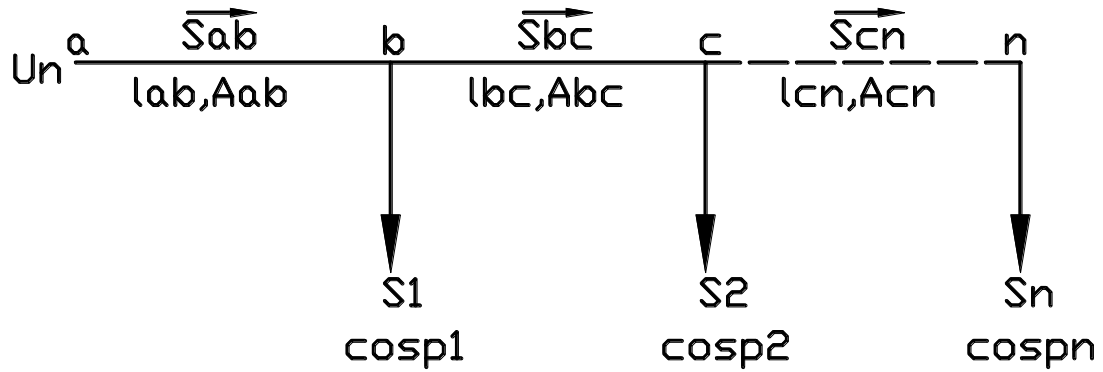
$$\vec{I}_2 = I_{a2} \mp jI_{r2}$$

$$\vec{I}_n = I_{an} \mp jI_{rn}$$

$$\vec{I}_{cn} = \vec{I}_n$$

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

$$\vec{I}_{ab} = \vec{I}_{bc} + \vec{I}_1$$



כאשר:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

את מפל המתח ביחידות וולט ניתן לחשב לפי:

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



מפל המתח המקסימאלי ברשת הוא סכום מפלי המתח בקטעים השונים:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ברשת זרם ישר

תרגיל דוגמא 1

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

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

א. חשב את שטח החתך של המוליך.

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. כיוון  $\cos\phi=1$

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

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

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של  $16mm^2$

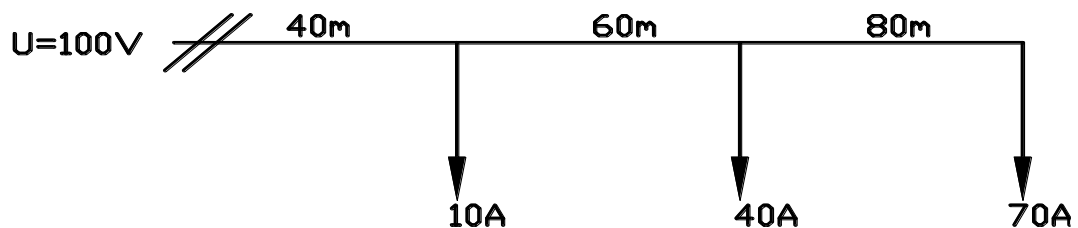
$$\Delta Umax\%' = \frac{200\rho}{A' * Un} * I * l = \frac{200}{16 * 115 * 58} * 30 * 40 = 2.249\%$$

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:

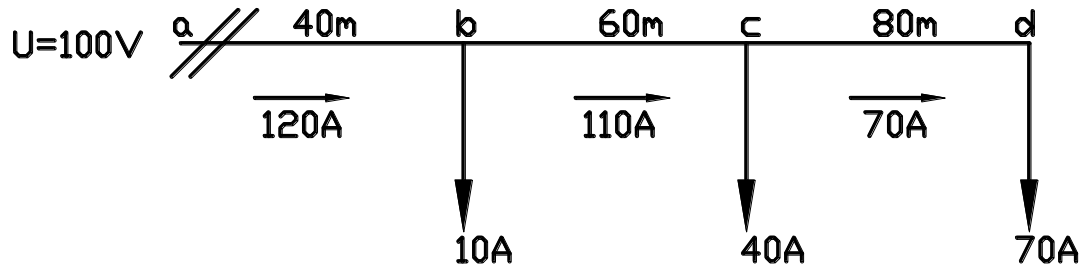


$$\rho = \frac{1}{34} \text{ נתון כי}$$

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

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

ג. חשב את מפל המתח המקסימאלי באחוזים.



א. כיוון  $\cos\phi=1$

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

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

$$A = 250mm^2$$

ב.

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

$$\Delta U_{ac\%} = \frac{200\rho}{A * U_n} * (I_{ab} * l_{ab} + I_{bc} * l_{bc}) = \frac{200}{2 * 150 * 100 * 34} * (120 * 40 + 110 * 60)$$

$$\Delta U_{ac\%} = 2.235\%$$

$$\Delta U_{ac} = \frac{\Delta U_{ac\%}}{100} * U_n = \frac{2.235}{100} * 100 = 2.235V$$

$$U_c = U_a - \Delta U_{ac} = 100 - 2.235 = 97.765V$$

ג.

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

$$\Delta U_{max\%} = 3.333\%$$

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

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

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

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

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

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

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

$$S = U * I$$

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

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

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

כאשר:

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

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

$P$  - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן - [W]

$Q$  - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן - [Var]

$S$  - ההספק המדומה המתפתח בצרכן - [VA]

### תרגיל דוגמא 1

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

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

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

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

### פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של  $70mm^2$ .

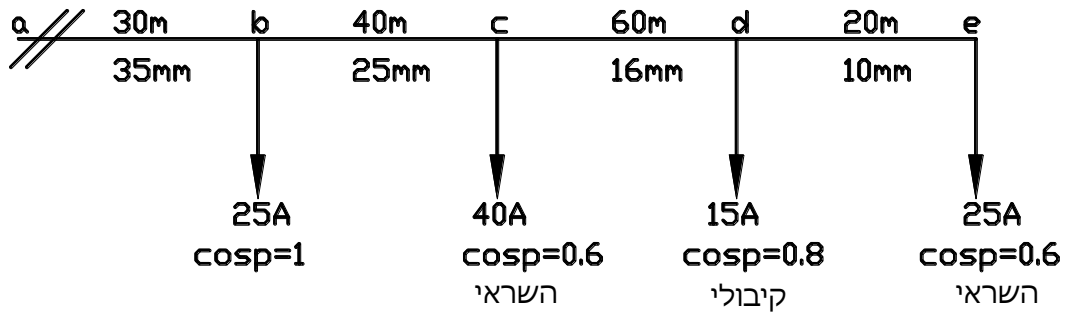
$$\begin{aligned}\Delta U_{max}\% &= \frac{200\rho}{A * U_n} * I_a * l + \frac{X_o}{10 * U_n} * I_r * l = \\ \Delta U_{max}\% &= \frac{200}{70 * 200 * 57} * 80 * 100 + \frac{0.1}{10 * 200} * 60 * 100 = 2.3\% \\ \Delta U_{max} &= \frac{\Delta U_{max}\%}{100} * U_n = \frac{2.3}{100} * 200 = 4.6V \\ U(\text{צרכן}) &= U(\text{מקור}) - \Delta U_{max} = 200 - 4.6 = 195.4V\end{aligned}$$

### 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  $0.04\Omega$ . ואילו ההיגב ההשראתי של הרשת עד לצרכן הוא  $0.15\Omega$ . חשב את מתח המקור.

### פתרון לתרגיל דוגמא 2

$$\begin{aligned}I_{La} &= \frac{PL}{UL} = \frac{15 * 10^3}{220} = 68.182A \\ I_{Lr} &= \frac{QL}{UL} = \frac{P * \tan \varphi}{UL} = \frac{15 * 10^3 * \tan(\cos^{-1} 0.8)}{220} = 51.136A \\ \Delta U_{max} &= \Delta U_a + \Delta U_r = I_{La} * R + I_{Lr} * X \\ \Delta U_{max} &= 68.182 * 0.04 + 51.136 * 0.15 = 10.4V \\ U(\text{מקור}) &= U(\text{צרכן}) + \Delta U_{max} = 220 + 10.4 = 230.4V\end{aligned}$$



נתון כי:

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

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

$$U_n = 200V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 3

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

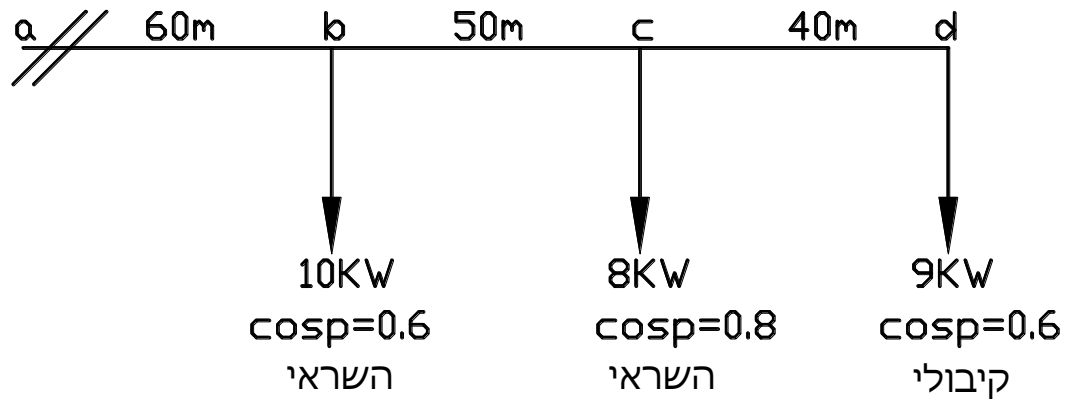
ב.

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

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

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

נתונה הרשת הבאה:



נתון כי:

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

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

$$U_n = 240V$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

ב.נבחר שטח חתך מסחרי של  $35mm^2$ .

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

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

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

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

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

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

תזכורת:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

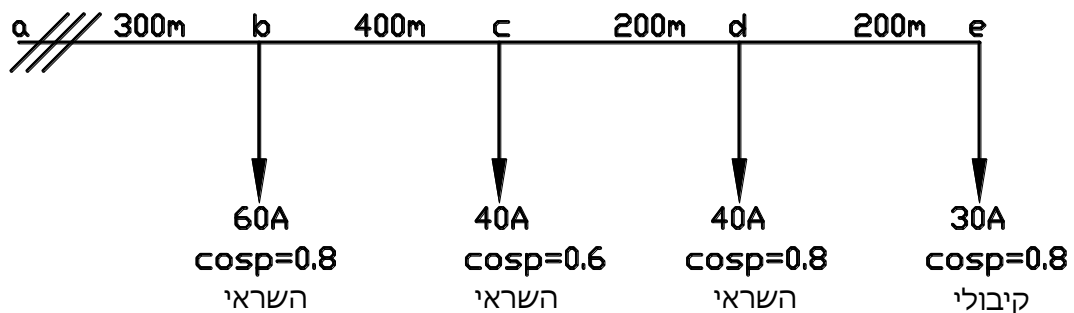
$I_r$  - זרם דרך המרכיב ההיגבי של המוליך- [A]

$P$  - ההספק האקטיבי המתפתח בצרכן- [W]

$Q$  - ההספק הראקטיבי המתפתח בצרכן- [Var]

$S$  - ההספק המדומה המתפתח בצרכן- [VA]

תרגיל דוגמא 1



נתון כי:

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

$$Un = 400V$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

בהזנחה של  $X_0$  (כיוון שלא נתון).

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

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

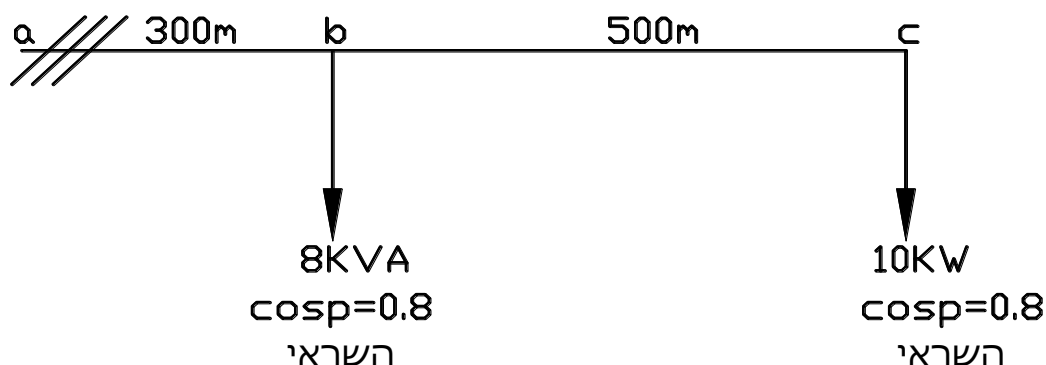
$$A = \frac{\sqrt{3} * 100 * 0.0175}{5 * 400} * (128 * 300 + 80 * 400 + 56 * 200 + 24 * 200) = 130.943 mm^2$$

ב. נבחר שטח חתך מסחרי של  $150 mm^2$ .

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

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

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



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

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 2

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

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

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

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

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

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

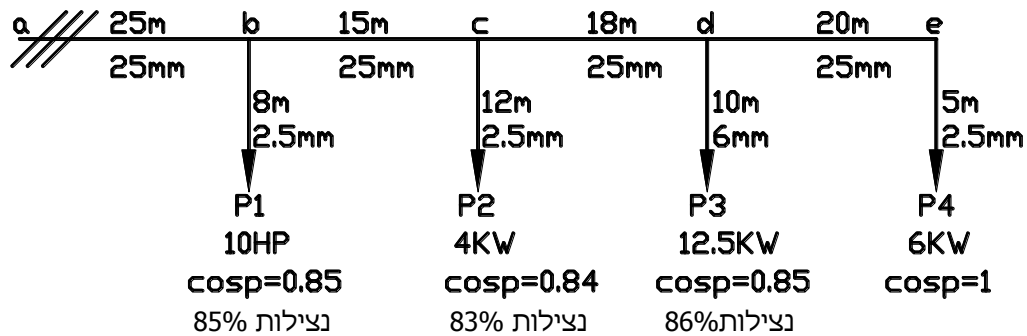
$$\Delta U_a \% = \Delta U_{max} \% - \Delta U_r \% = 3 - 1.628 = 1.372\%$$

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

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

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

נבחר בשטח חתך מסחרי של  $95 mm^2$ .



הקו התלת מופעי המתואר בתרשים מזין שלושה מנועים ותנור תלת מופעי

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

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

פתרון תרגיל דוגמא 3

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

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

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

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

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

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

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

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

נתון כי ניתן להזניח את ההשראות בקו, המשמעות היא:

$$\Delta U = \Delta U_a$$

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

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

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

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

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

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

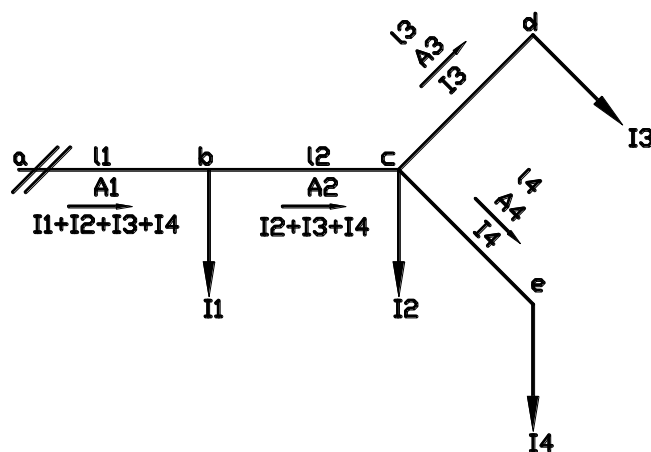
$$\Delta U(a-3) = \frac{1}{400 * 34} * \left( \frac{34116.1 * 25}{25} + \frac{25354.2 * 15}{25} + \frac{20534.9 * 18}{25} + \frac{14534.9 * 10}{6} \right) = 6.49V$$

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

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

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

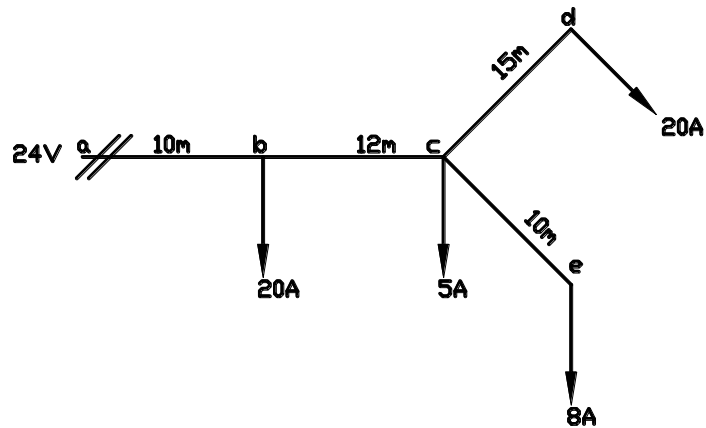
#### רשת מתפצלות



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

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

קובעים את שטח החתך האחיד בהתאם מפל המתח הקטן מבניהם.



נתון

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

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

פתרון לתרגיל דוגמא

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

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

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

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

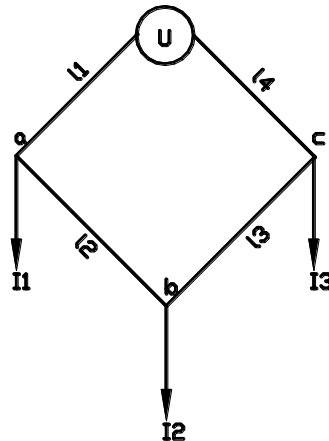
$$A = \frac{200\rho}{\Delta U_{\text{max}\%} * U_n} * \sum I * l$$

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

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

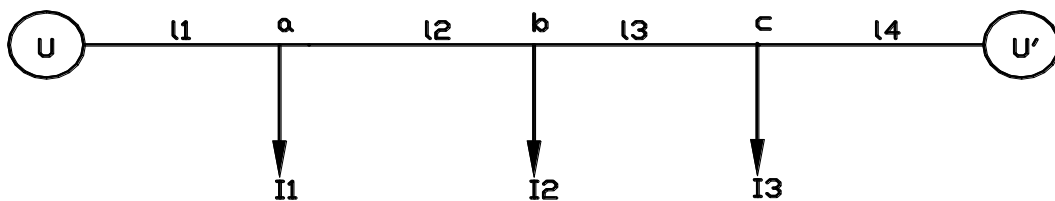
על פי החישוב ניתן לראות כי שטח הגדול האחיד של קטע רשת  $ad$  הוא גדול יותר ולפיכך יקבע שטח החתך האחיד של הרשת. נבחר שטח חתך מסחרי של  $70 \text{mm}^2$ .

רשת טבעתית או רשת עם 2 מקורות שווים



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

סימון כיווני הזרמים-הקטעים הקיצוניים מסמנים את כיוון הזרם לתוך הרשת, כיוון יתר הזרמים יתבררו במהלך החישובים בהתאם לערך הוקטורי שלהם.



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

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

או

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

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

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

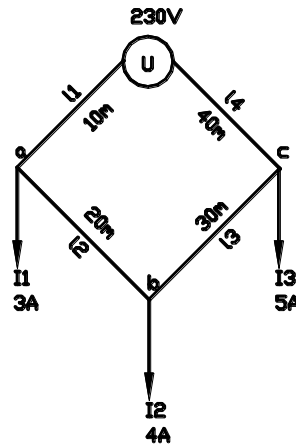
$$I_{bc} = I_{ab} - I2$$



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

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

#### תרגיל דוגמא 1



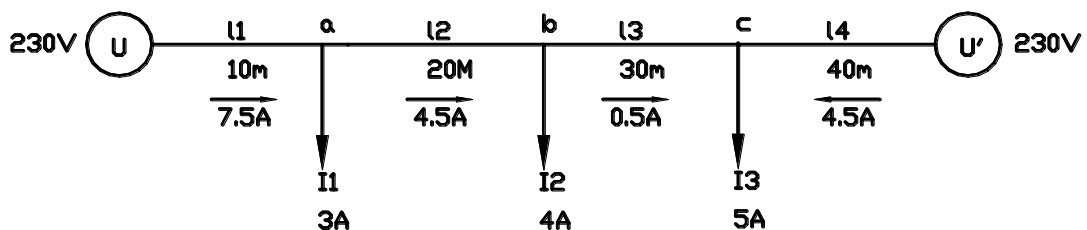
נתון כי:

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

$$A = 4 mm^2$$

חשב ומצא את הנקודה ברשת שבה המתח הוא מינימאלי.

#### פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

או

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

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

ולכן

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

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

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

הסימן השלילי מעיד כי בקטע זה כיוון הזרם הפוך.

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

$$\Delta U_{u'c} = \frac{2\rho}{A} * I_{u'} * l_4 =$$
$$\Delta U_{u'c} = \frac{2}{4 * 58} * 4.5 * 40 = 1.552V$$

אפשרות 2-

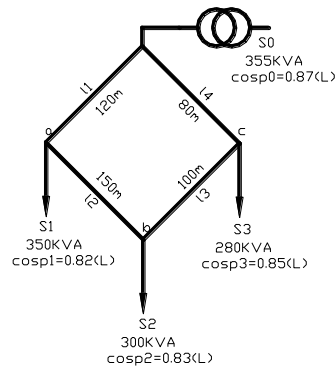
$$\Delta U_{uc} = \frac{2\rho}{A} * I_u * l_1 + I_{ab} * l_2 + I_{bc} * l_3 =$$
$$\Delta U_{uc} = \frac{2}{4 * 58} * 7.5 * 10 + 4.5 * 20 + 0.5 * 30 = 1.552V$$

המתח בנקודה השפך-

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

## תרגיל דוגמא 2

באיור הבא מתוארת מערכת הספקת חשמל תלת מופעית במתח נמוך-



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

מתח הרשת 400V.

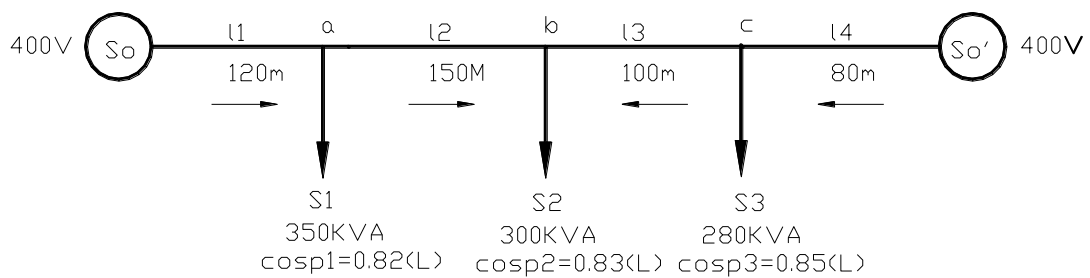
ההיגב האשראי של המוליכים זניח.

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

ב. חשב את המתח בנקודת השפך.

## פתרון לתרגיל דוגמא 2

א.



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

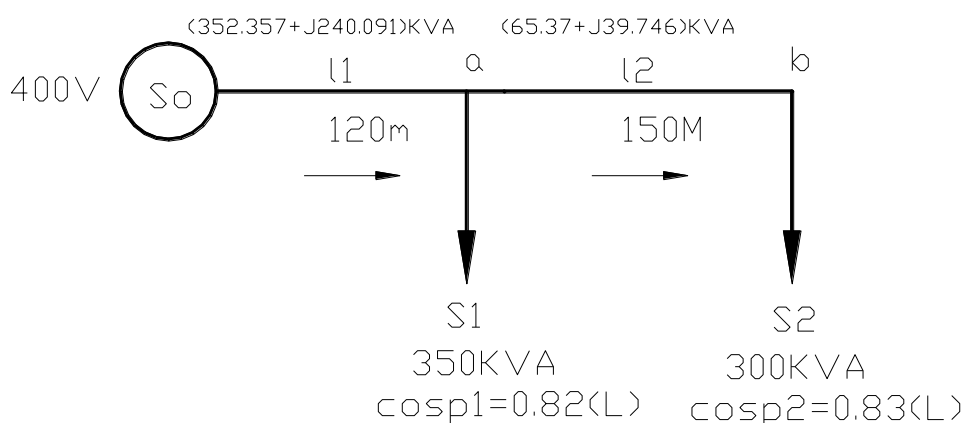
$$S_{bc} = S_{ab} - S_2 = (76.505 \angle 31.30^\circ - 300 \angle 33.90^\circ) * 10^3 = 223.601 \angle -145.63^\circ KVA$$

סימן שלילי בזווית או זווית הגדולה מ-  $90^\circ \pm$  מעידה על שינוי כיוון הזרם (נקודת השפך). ועל מנת לקבל את הערך הנכון של הזרם (או ההספק בדוגמא זו) יש לשנות את הסימנים לפני הערכים:

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

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

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



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

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

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

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

נבחר שטח חתך מסחרי של  $240 mm^2$ .

ב.

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

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

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

**חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול הפסדי הספק**

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

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

ניתן לראות מהביטוי כי שעור איבודי ההספק תלוי בשטח החתך של המוליכים ביחס הפוך.

לפי שיקול של הפסדי הספק ניתן לבחור בשטח חתך אחיד של מוליכי הרשת, בתנאי שהפסדי ההספק לא יעלו מעל אחוז מסוים מהספק הכללי של הרשת.

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

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

שלב החישוב:

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

נוסחאות:

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

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

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

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

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

$\rho$  - התנגדות סגולית של חומר המוליך:

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

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

l- המרחק מהמקור ועד לצרכן (m).

A- שטח החתך של המוליך ( $mm^2$ ).

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

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

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

ואם שטח החתך אינו אחיד:

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

אם סוג המוליכים ושטח החתך אינם אחידים:

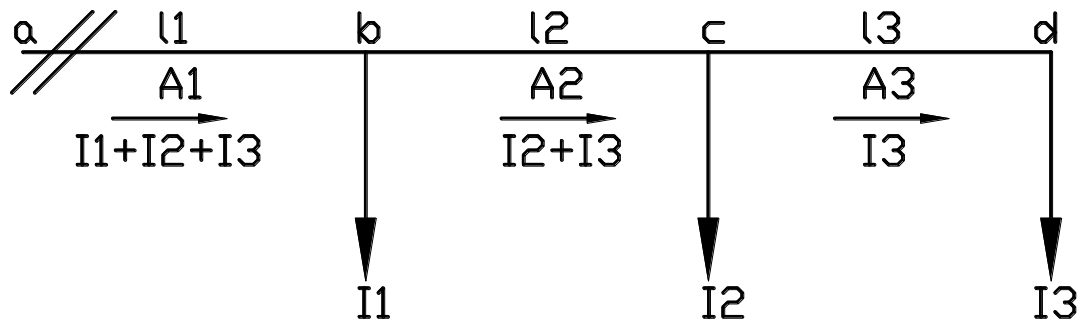
$$\Delta P\% = \frac{200}{P_{l1}} \sum_{i=1}^n \frac{\rho_{li}}{A_{li}} * I_{li}^2 * l$$

את הפסדי ההספק בוואטים ניתן לחשב לפי:

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

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

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



$$I_{cd} = I_3$$

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

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

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

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

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

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

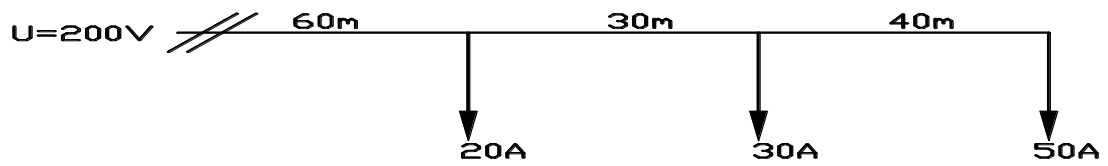
$$\Delta P\% = \frac{200\rho}{A * P_n} \sum I^2 * l$$

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

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

תרגיל דוגמא 1

נתונה רשת חשמל במתח ישר המתוארת באיור הבא:



נתון:

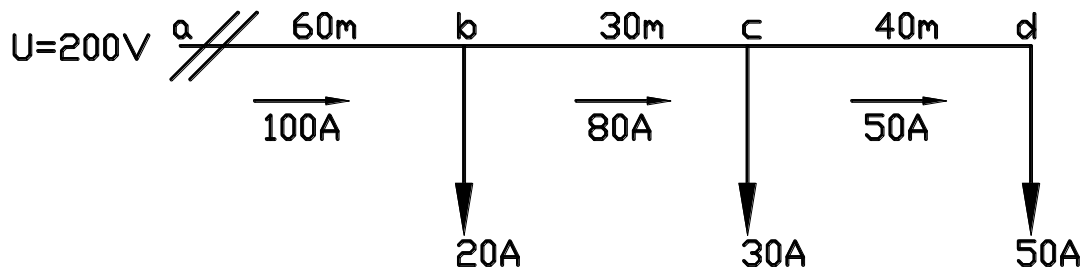
$$\rho = \frac{1}{57} \left[ \frac{\Omega * mm^2}{m} \right]$$

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

מה איבוד ההספק המקסימאלי ברשת ?

האם הרשת כלכלית אם לא הצע פתרון לשיפור ?

פתרון לתרגיל דוגמא 1



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

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

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

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

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

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



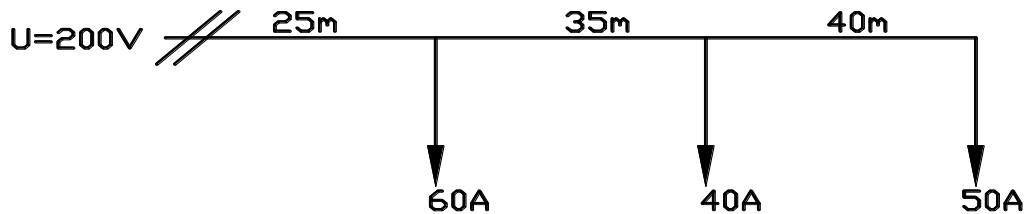
$$P_n = U_n * I_n = 200 * 100 = 20KW$$

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

רשת כלכלית מוגדרת כרשת שאיבודי ההספק המקסימאליים בה לא עולה מעל 10%.  
רשת זו אינה רשת כלכלית ועל מנת לפתור בעיה זו אחת הדרכים להגדיל את שטח החתך של המוליכים.

## תרגיל דוגמא 2

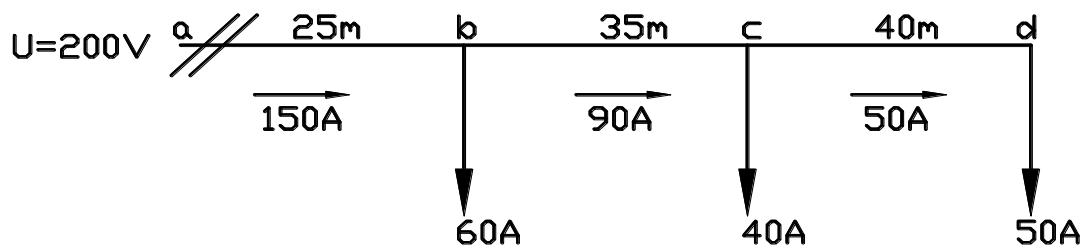
נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

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



א.

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

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

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

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

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

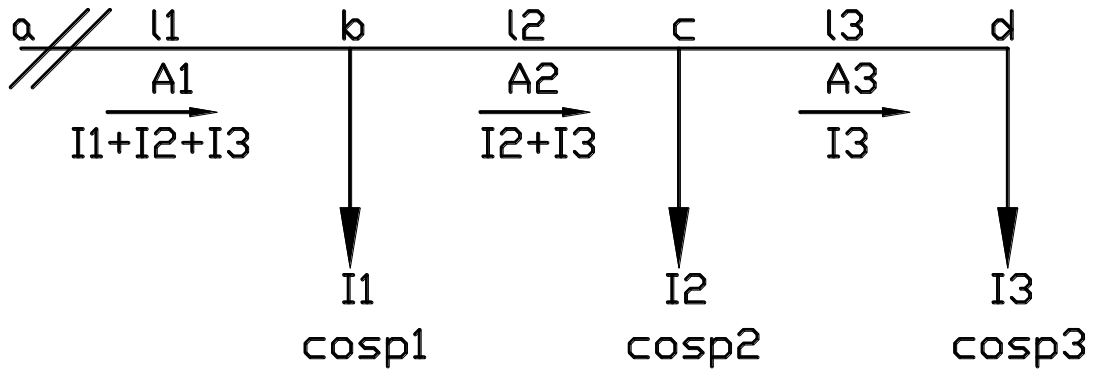
$$A = \frac{200}{6 * 30 * 10^3 * 34} * (150^2 * 25 + 90^2 * 35 + 50^2 * 40) = 30.92mm^2$$

ב.

נבחר שטח חתך מסחרי של  $35mm^2$

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

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



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

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

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

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

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

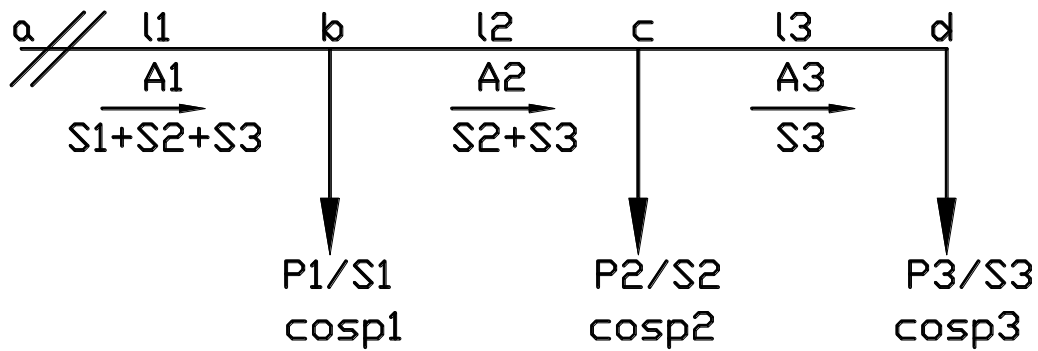
$$\Delta P_{ab} = \frac{2 * \rho_1}{A_1} * I_{ab}^2 * l_1$$

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

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

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



$$S = U * I$$

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

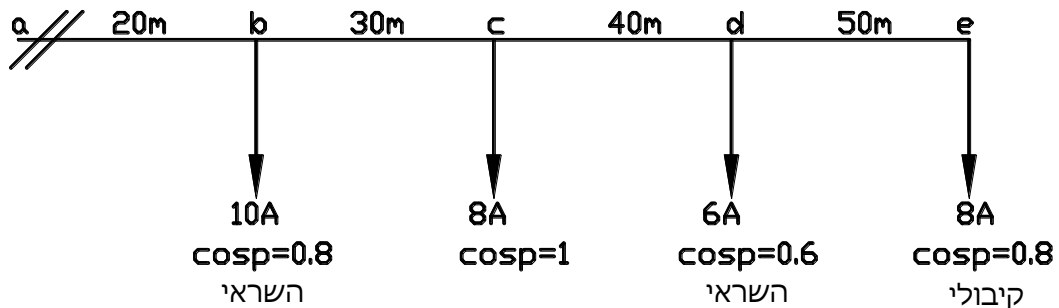
$$Q = U * I * \sin \rho$$

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

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

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

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



נתון:

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

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

$$U = 250V$$

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

#### פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג. נבחר שטח חתך מסחרי של  $25mm^2$ .

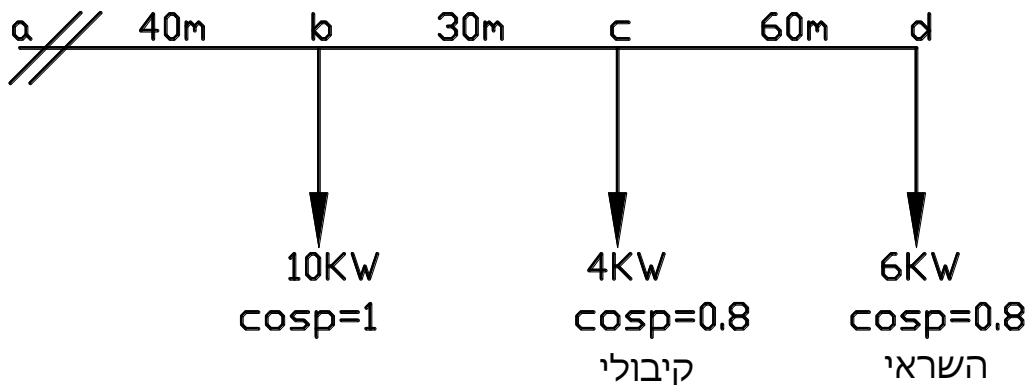
$$\Delta P_{bc} = \frac{2\rho}{A} * I_{bc}^2 * l_{bc} = \frac{2}{25 * 34} * 18^2 * 30 = 22.78W$$

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

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

$$U = 250V$$

א. חשב את שטח האחיד והמסחרי של הרשת

ב. חשב את הפסדי ההספק ברשת באחוזים.

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

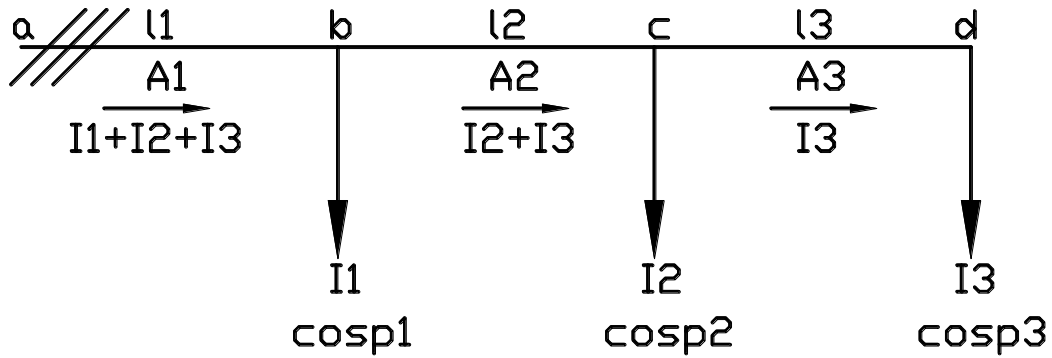
נבחר שטח חתך מסחרי של  $16mm^2$ .

ב.

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

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

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



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

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

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

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

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

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

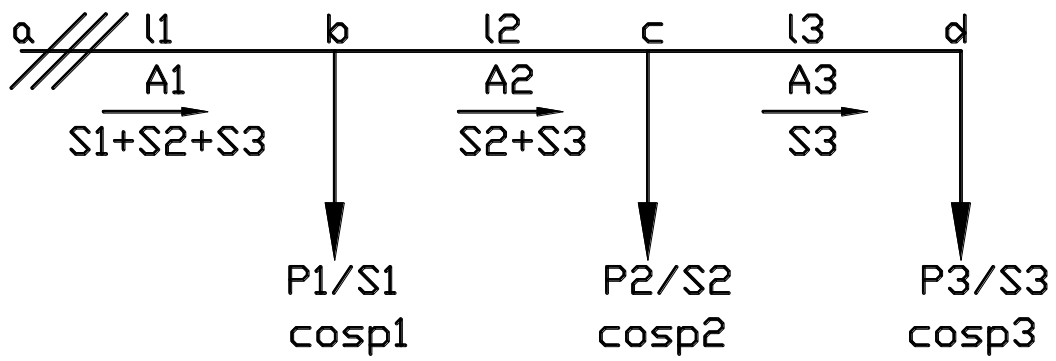
$$\Delta P_{max} = \Delta P_{ab} + \Delta P_{bc} + \Delta P_{cd}$$

כאשר סוג החומר ושטח החתך אחידים:

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

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





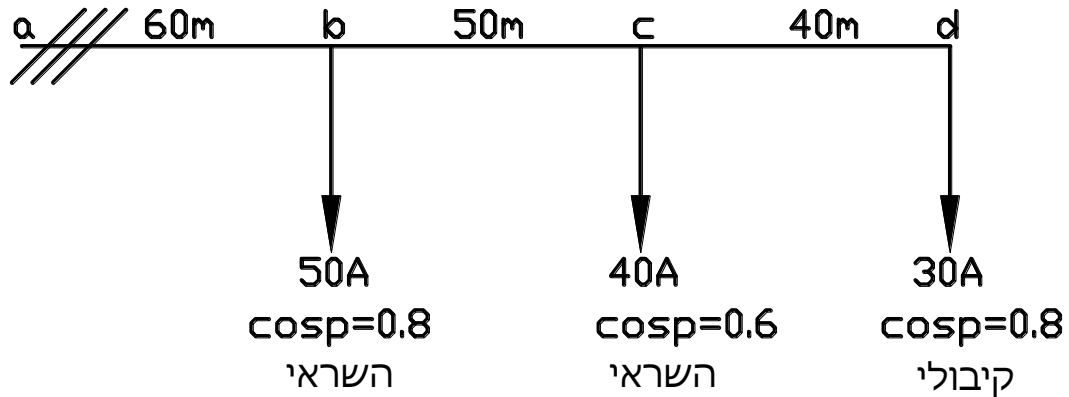
$$S = \sqrt{3} * U * I$$

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

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

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

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



נתון:

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

$$UL = 400V$$

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

פתרון לתרגיל דוגמא 1

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג.

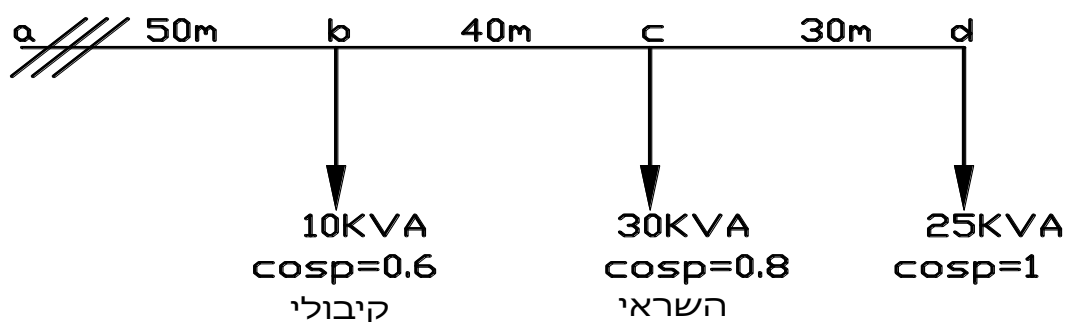
נבחר שטח חתך מסחרי  $25mm^2$ .

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

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

תרגיל דוגמא 2

נתונה הרשת הבאה:



נתון:

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

$$UL = 400V$$

א. חשב את ההספק המדומה בכל קטע.

ב. חשב את שטח החתך האחיד בדרוש עבור איבוד הספק מרבי של 1.5%.

ג. בחר שטח חתך מסחרי וחשב את איבודי ההספק בקטע bc.

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

ב.

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

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

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

ג.

נבחר שטח חתך מסחרי  $50mm^2$ .

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

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

### חישוב שטח חתך המוליכים לפי שיקול העמסה מותרת

בתקנות החשמל (העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים במתח עד 1000 וולט), בתוספת הראשונה מובאים ערכי זרם מתמיד מרבי  $I_z$  של מוליכים בהתאם לשיטת התקנתם. יש לבחור את שטח חתך המוליכים לפי התנאי:  $I_b \leq I_n \leq I_z$  כאשר  $I_b$  - זרם עבודה ממושך (זרם נתון או מחושב),  $I_n$  - זרם הנומינאלי של המאבטח להגנה בפני זרמי יתר וזרמי קצר.

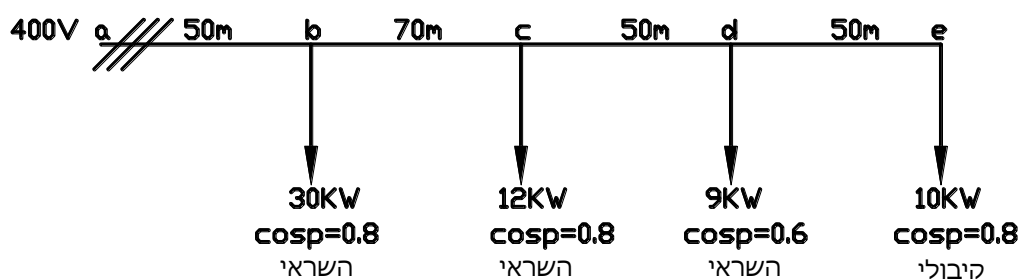
יש לציין כי לא ניתן לבחור חתך מוליך ללא בחירת גודל וסוג המאבטח המגן עליו. נרחיב בנושא זה בפרק הדן בהגנות בפני זרמי יתר וזרמי קצר.

כאשר מותקנים כבלים ללא רווח בניהם או כאשר הטמפרטורה האופפת במקום ההתקנה שונה מהטמפרטורה התקנית ( $35^\circ\text{C}$  באוויר ו- $30^\circ\text{C}$  באדמה), יש להכפיל את הערך  $I_z$  במקדם תיקון  $k$ .  $I_z' = k * I_z$ . ובמקרים אלו יש לבחור את שטח החתך לפי התנאי:

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

#### תרגיל דוגמא 1

נתונה הרשת התלת פאזית הבאה:



נתון: כבל ההזנה בקטעים  $a-e$  מונחים בתעלה פתוחה מאווררת יחד עם עוד 2 כבלים.

הכבלים עשויים מנחושת בעלי בידוד של  $90^\circ\text{C}$  בעלי התנגדות סגולית של-

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

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

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

א.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

נציג את זרמי הקטעים בצורה קרטזית:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

מצב זה עומד בדרישות התרגיל.

## תרגיל דוגמא 2

מפעל צורך הספק של 150KW במתח של 400V, במקדם הספק של 0.85 השראי.

המפעל מוזן משנאי חלוקה קרוב באמצעות כבל A רב גידי תלת פאזי העשוי נחושת.

הכבל טמון במישרין בקרקע עם כיסוי מגן מלוחות ביטון. נתוני הכבל: אורך 120m

בחתך  $150\text{mm}^2$  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  $25\text{mm}^2$  הגיבו האשראי  $X_o = 0.06 \frac{\Omega}{\text{km}}$  התנגדותו הסגולית

ושיטת ההתקנה זהה ל-כבל 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:

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

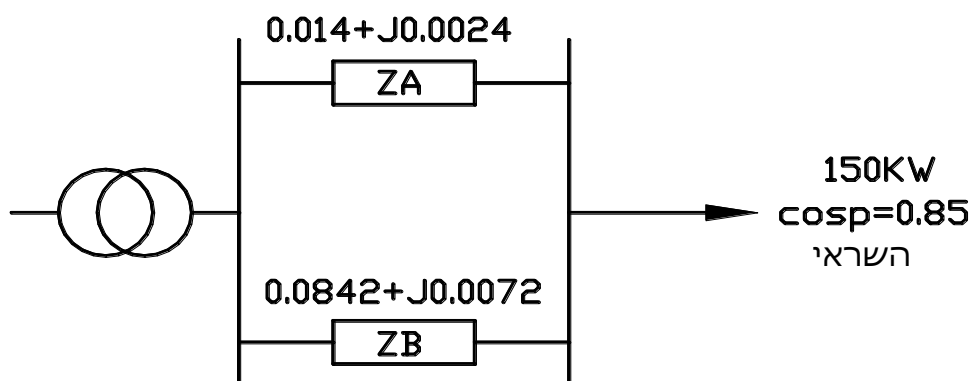
$$X_A = \frac{X_{oA}}{1000} * l_A = \frac{0.02}{1000} * 120 = 0.0024\Omega$$

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

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

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

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





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.

### פרק 3-זרמי קצר

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

במערכת תלת מופעית מבחינים ב-4 סוגים של קצר:

- קצר תלת מופעי- מגע בין מוליכי שלשת המופעים.
- קצר דו מופעי לאדמה- מגע בין מוליכי 2 מופעים לאדמה.
- קצר דו מופעי- מגע בין מוליכי 2 מופעים.
- קצר חד מופעי – מגע בין מוליך מופע אחד לאדמה.

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

מטרת חישוב זרם הקצר:

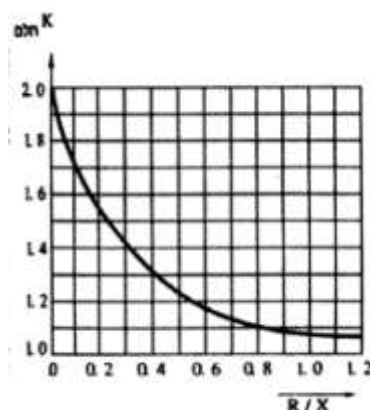
- זרם קצר תלת מופעי- משמש לקביעת כושר הניתוק של המאבטח המגן על מוליכי המעגל.
- זרם הלם- משמש לקביעת עמידות דינמית של הציוד החשמלית.
- זרם קצר חד מופעי- משמש לקביעת זמן הניתוק של מאבטח המגן על מוליכי המעגל מבחינת עמידותם התרמית בעת קצר.

#### חישובי זרם קצר תלת מופעי וזרם הלם:

ערכי מקדמי ההלם מובאים בטבלה:

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

ניתן לראות את מקדם ההלם גם בגרף הבא:



את זרם ההלם מחשבים לפי:

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

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

### חישוב זרם קצר תלת מופעי

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

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

כאמור זרם קצר תלת מופעי מחשבים לפי:

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

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

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

### חישוב עכבת הקצר $Z_k$

עכבת הקצר הנה עכבת המסלול הקצר ממקור המתח (שנאי, גנרטור) ועד למקום הקצר. לקביעת כושר הניתוק של המאבטח מחשבים את זרם הקצר בלוח החשמל בו הוא מותקן. כל מרכיב הרשת מוצג על ידי רכיבים טוריים של מעגל תמורה, כאשר עכבת הקצר הנה חיבור טורי של עכבות הרכיבים-  $Z_k = \sum Z$

א. שנאי מוצג על ידי העכבה-

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

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

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

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

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

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

כאשר:

$\Delta P_{cu}$  - הפסדי נחושת נקובים (W).

$S_n$  - הספק נקוב של השנאי (VA).

$U_k\%$  - מתח הקצר (%).

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

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

$Un$  - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

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

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

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

כאשר:

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

$l$  - אורך הקו (m).

$A$  - שטח החתך של מוליכי הקו ( $mm^2$ ).

$$R_L = r_0 * l$$

$$X_L = x_0 * l$$

וכאשר:

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

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

$l$  - אורך הקו (km).

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

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

כאשר:

$Un$  - המתח הנקוב של הקו (V).

$Un'$  - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

$Z_k$  - עכבת הקו ( $\Omega$ ).

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

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

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

כאשר:

$S_k$  - הספק הקצר של המערכת (VA).

$Un$  - המתח הנקוב בנקודת הקצר (V).

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

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

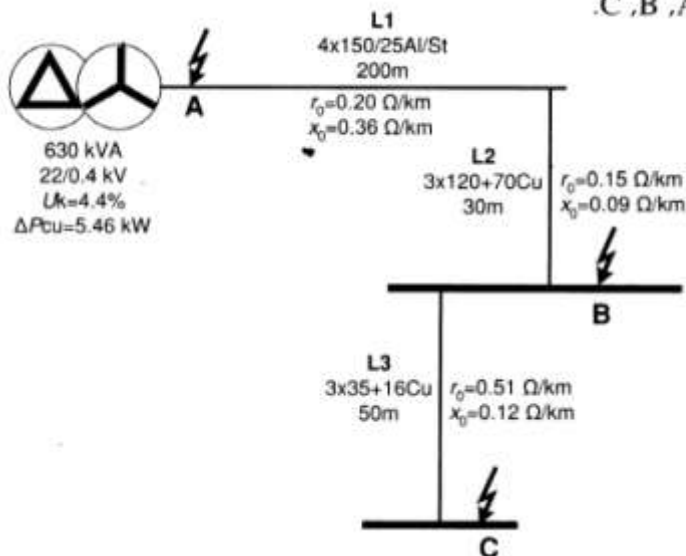
שלבי חישוב של זרם תלת מופעי:

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

### תרגיל דוגמא 1

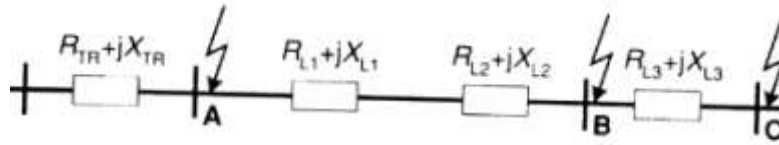
נתון תרשים של מתקן חשמלי במתח נמוך  
הלוח הראשי של המתקן מוזן מרשת עלית L1 של חב' חשמל על ידי כבל L2. לוח משנה  
"א" מוזן מהלוח הראשי על ידי כבל L3.

חשב את זרמי הקצר בנקודות A, B, C.



פתרון לתרגיל דוגמא 1

א. נציג את הרשת על ידי מעגל תמורה:



ב. נחשב את עכבות רכיבי הרשת:

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

1. חישוב עכבת השנאי  $-Z_{TR}$

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

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

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

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

2. חישוב עכבת הקו  $-Z_{L1}$

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

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

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

3. חישוב עכבת הקו  $-Z_{L2}$

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

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

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

4. חישוב עכבת הקו  $-Z_{L3}$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

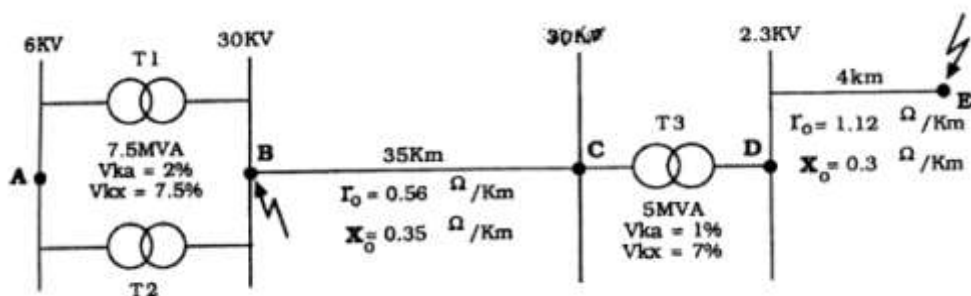
$$Z_{kC} = Z_A + Z_{L1} + Z_{L2} + Z_{L3} = 2.2 + j11.17 + 40 + j72 + 4.5 + j2.7 + 25.5 + j6 =$$

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

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

## תרגיל דוגמא 2

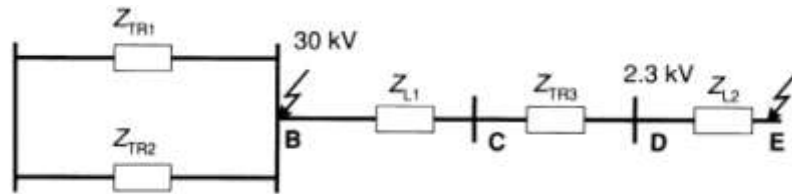
נתונה מערכת של רשת תלת פאזית, השנאים T1 ו-T2 מקבילים זה לזה וזהים כמתואר באיור הבא:



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

פתרון לתרגיל דוגמא 2

נציג את מעגל התמורה של הרשת:



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

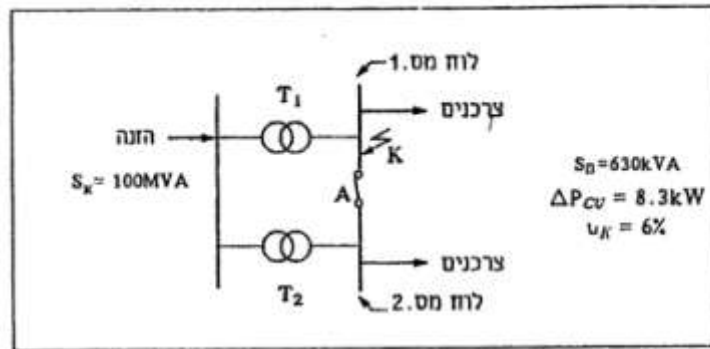
$$Z_{kE} = 0.122 + j0.098 + 0.0106 + j0.0741 + 4.48 + j1.2 = 4.613 + j1.372 = 4.813 \Omega$$

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



### תרגיל דוגמא 3

המתח בלוחות הראשיים הוא 400V וזנים באמצעות 2 שנאים זהים בתאם למתואר באיור הבא:



טבלה מס. 1

| 0 | 0.1  | 0.16 | 0.3 | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8 | 0.9  | 1    | 1.2  | R/X               |
|---|------|------|-----|------|------|------|------|-----|------|------|------|-------------------|
| 2 | 1.75 | 1.6  | 1.4 | 1.32 | 1.24 | 1.18 | 1.14 | 1.1 | 1.08 | 1.06 | 1.04 | K <sub>בחוק</sub> |

המנתק A המקשר בין 2 הלוחות הראשיים הוא במצב "סגור".

מתרחש קצר תלת מופעי בלוח מס' 1 (בנקודה K).

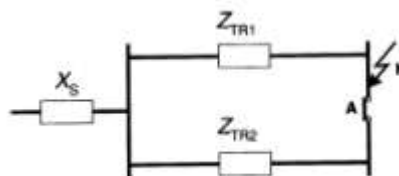
א. חשב את זרם הקצר (ערך אפקטיבי). בנקודת התקלה.

ב. חשב את זרם ההלם המתקיים במנתק מגשר A בעת התקלה.

בטבלה מס' 1 ערכים של מקדם ההלם כתלות בפרמטרים של הרשת.

### פתרון לתרגיל דוגמא 3

א. נציג את מעגל התמורה של הרשת-



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

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

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

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

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

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

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

ב. זרם הקצר שחושב בסעיף א שווה למחצית הזרם הקצר שיעבור דרך המנתק A כיוון שהמנתק מותקן בין 2 עכבות שוות ביחס לנקודת הקצר ולכן:

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

לפי טבלת מקדם ההלם המצורפת נמצא-

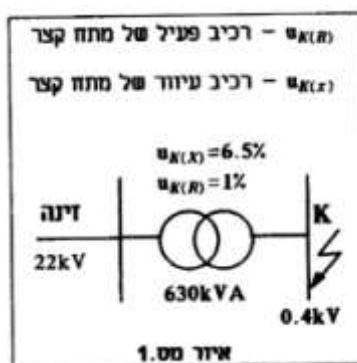
$$k_{shok} \approx 1.5$$

ולכן:

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

#### תרגיל דוגמא 4

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



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

חשב את הערך האפקטיבי של זרם הקצר התמידי.

#### פתרון לתרגיל דוגמא 4

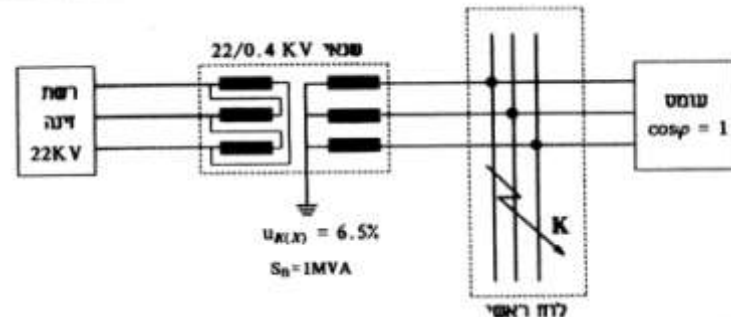
$$\frac{R_k}{X_k} = \frac{U_{r\%}}{U_{x\%}} = \frac{1}{6.5} = 0.154$$

$$k_{shok} \approx 1.6$$

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

### תרגיל דוגמא 5

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



- חשב את הערכים האפקטיביים של זרמי הקצר התמידי בנקודת הקצר ובמופעי קו הזינה 22kV.
- חשב את הספק הקצר המועבר דרך השנאי. הערות:
  - מזניחים את ההתנגדות האומית של השנאי.
  - עכבת רשת הזינה זניחה יחסית לעכבת השנאי.
  - סדר הופעת המופעים היא -  $R \Rightarrow S \Rightarrow T$ .

### פתרון לתרגיל דוגמא 5

א. חישוב זרם הקצר המתמיד בנקודת הקצר-

$$U_k\% = U_x\% = 6.5\%$$

$$Z_{TR} = \frac{U_k\% * Un^2}{100S_n} = \frac{6.5 * 400^2}{100 * 1 * 10^6} = 10.4m\Omega$$

$$I_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 400}{\sqrt{3} * 10.4 * 10^{-3}} = 24.426kA$$

חישוב זרם הקצר המתמיד במופעי קו הזינה 22kV-

$$Z'_{22kV} = Z_{400V} * \left(\frac{U'_n}{Un}\right)^2 = 10.4 * 10^{-3} * \left(\frac{22 * 10^3}{400}\right)^2 = 31.46\Omega$$

$$I'_k = \frac{1.1 * Un}{\sqrt{3} * Z_k} = \frac{1.1 * 22 * 10^3}{\sqrt{3} * 31.46} = 444.116A$$

ב. חישוב הספק בקצר המועבר דרך השנאי-

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