משרד העבודה
MINISTRY OF LABOR

מה"ט
המכון הממשלתי להכשרה טכנולוגית

נוסחאון

מערכות הספק ומתקני חשמל

שאלון 97164, 97162

הנדסאים וטכנאים

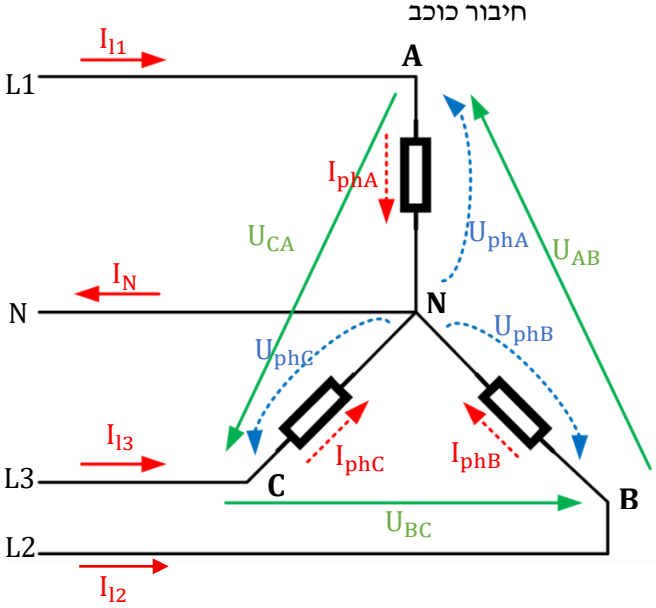
פברואר 2026

תוכן

1. מערכות חשמל תלת מופעיות	3
2. חישובי ותכנון רשתות חלוקה	6
2.1. שיקול מפל מתח מותר	6
2.2. שיקול הפסדי הספק	9
2.3. שיקול מינימום חומר	10
2.4. שיקול צפיפות זרם	10
3. חישוב זרמי קצר	11
4. פסי צבירה	14
5. שיפור מקדם הספק	16
6. תאורה	18
7. שיקול כדאיות כלכלית	20
8. וויסות מתח (בחירת דרגות השנאה)	21
9. קווי תמסורת – משטר נקודת האפס	22
9.1. פרמטרים של קווי הספק	23
פרמטרים של שנאי	24

1. מערכות חשמל תלת מופעיות

תרשים מערכת תלת פאזית
חיבור כוכב



1.1. חיבור כוכב – עם מוליך אפס (מערכת סימטרית ולא סימטרית)

מתחים פאזיים

$$U_{phA}\angle 0°$$

$$U_{phB}\angle -120°$$

$$U_{phC}\angle 120°$$

מתחים שלובים:

$$U_{AB} = U_A - U_B \qquad (\angle 30°)$$

$$U_{BC} = U_B - U_C \qquad (\angle -90°)$$

$$U_{CA} = U_C - U_A \qquad (\angle 150°)$$

(הזוויות זזות ב$30°$)

במערכת סימטרית - $U_{line} = \sqrt{3} \cdot U_{ph}$

זרמים:

$$\overline{I_{l1}} = \overline{I_{phA}} = \frac{U_{phA}\angle 0°}{Z_A\angle \varphi_A°}$$

$$\overline{I_{l2}} = \overline{I_{phB}} = \frac{U_{phB}\angle -120°}{Z_B\angle \varphi_B°}$$

$$\overline{I_{l3}} = \overline{I_{phC}} = \frac{U_{phC}\angle 120°}{Z_C\angle \varphi_C°}$$

$$\overline{I_N} = \overline{I_{phA}} + \overline{I_{phB}} + \overline{I_{phC}}$$

הספקים:

$$\overline{S_\Sigma} = U_{phA}\angle 0° \cdot I^*_{phA}\angle \varphi_A + U_{phB}\angle -120° \cdot I^*_{phB}\angle \varphi_B + U_{phC}\angle 120° \cdot I^*_{phC}\angle \varphi_C$$

* $I^*_{ph}\angle\varphi$ – הצמוד של הזרם.

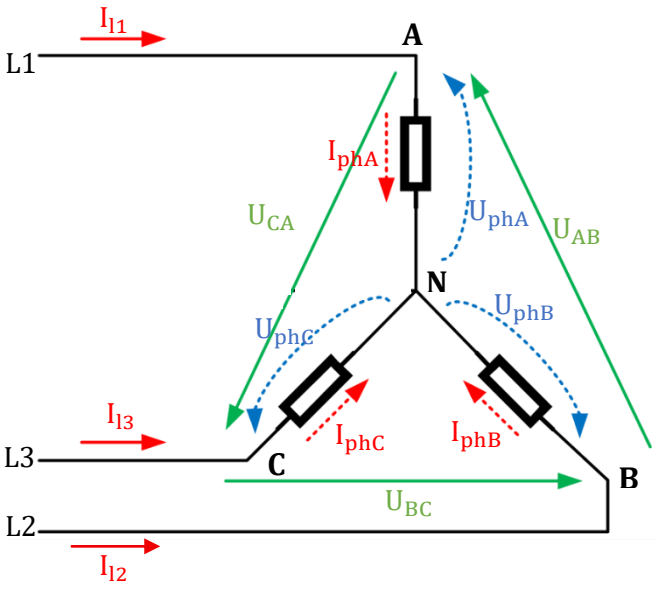
הזרם בפאזה

$$I_{ph} = \frac{P_{ph}}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{S_{ph}}{U_{ph}} = \frac{U_{ph}}{Z_{ph}}$$

1.2. חיבור כוכב – ללא מוליך אפס

(מערכת לא סימטרית)

חיבור כוכב עם מוליך אפס (מערכת לא סימטרית) – ניתוק במוליך האפס.



U_N - מתח בנק' N

$$\overline{U_N} = \frac{\frac{U_{phA}}{Z_A} + \frac{U_{phB}}{Z_B} + \frac{U_{phC}}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}}$$

מציאת הזרמים:

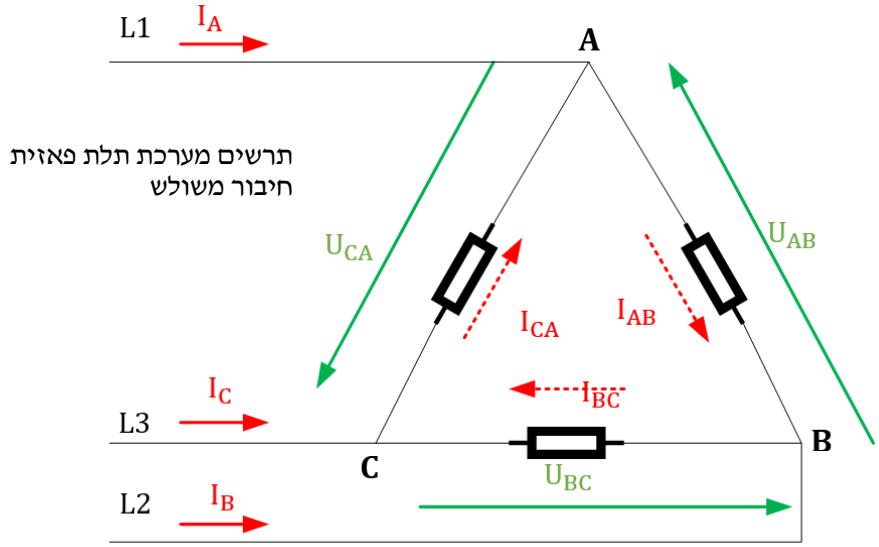
$$I_{l1} = I_{phA} = \frac{\overline{U_{phA}} - \overline{U_N}}{Z_A}$$

$$I_{l2} = I_{phB} = \frac{\overline{U_{phB}} - \overline{U_N}}{Z_B}$$

$$I_{l3} = I_{phC} = \frac{\overline{U_{phC}} - \overline{U_N}}{Z_C}$$

$$S = U_{phA} \cdot I^*_{phA} + U_{phB} \cdot I^*_{phB} + U_{phC} \cdot I^*_{phC}$$

1.3.חיבור משולש



מתחים:

$$U_{AB}\angle 30°$$
$$U_{BC}\angle -90°$$
$$U_{CA}\angle 150°$$

זרמים:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}\angle 30°}{Z_{AB}\angle \varphi_{AB}°}$$
$$I_{BC} = \frac{U_{BC}\angle -90°}{Z_{BC}\angle \varphi_{BC}°}$$
$$I_{CA} = \frac{U_{CA}\angle 150°}{Z_{CA}\angle \varphi_{CA}°}$$

$$I_A = I_{AB}\angle\varphi_{AB} - I_{CA}\angle\varphi_{CA}$$
$$I_B = I_{BC}\angle\varphi_{BC} - I_{AB}\angle\varphi_{AB}$$
$$I_C = I_{CA}\angle\varphi_{CA} - I_{BC}\angle\varphi_{BC}$$

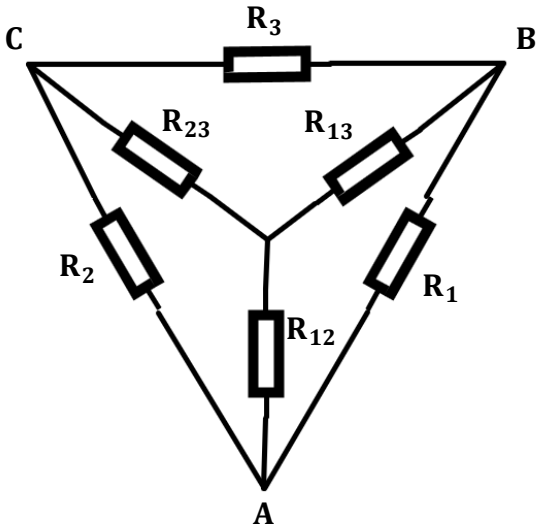
הספקים:

$$S_\Sigma = U_{AB}\angle 30° \cdot I_{AB}^* + U_{BC}\angle -90° \cdot I_{BC}^* + U_{CA}\angle 150° \cdot I_{CA}^*$$

הזרם בפאזה

$$I_{ph} = \frac{P_{ph}}{U \cdot \cos\varphi} = \frac{S_{ph}}{U_{ph}} = \frac{U_{ph}}{Z_{ph}}$$

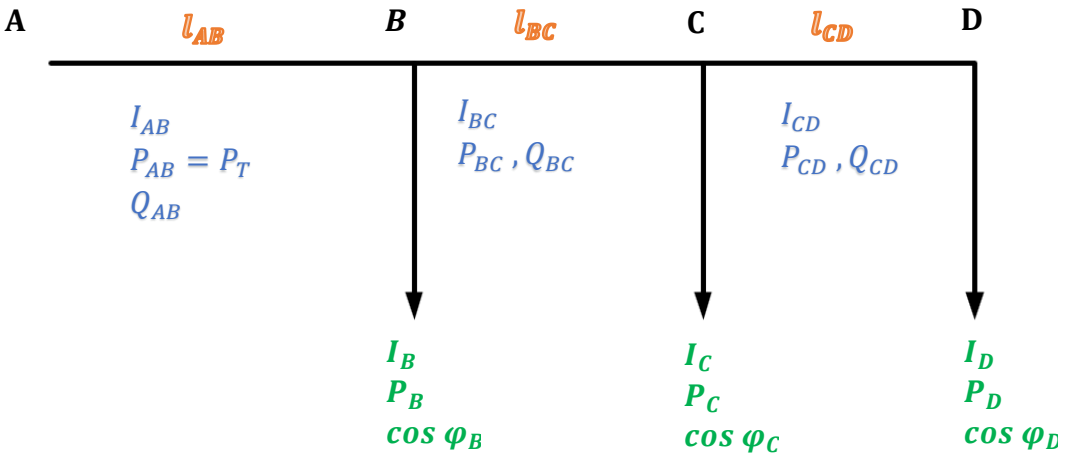
המרת משולש לכוכב:



$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$
$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$
$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

2. חישוב ותכנון רשתות חלוקה

מבנה אופייני של רשת:



נוסחאות כלליות:

זרמים

$$\bar{I} = I\angle \pm \varphi° = I_a \pm jI_r$$

חלק אקטיבי של הזרם:

$$I_a = I \cdot cos\varphi°$$

חלק ראקטיבי של הזרם

$$I_r = I \cdot sin\varphi°$$

הספקים

$$S = \frac{P}{\cos\varphi}\angle\varphi° = \frac{Q}{\sin\varphi}\angle\varphi°$$

$$S = U \cdot I^*$$

$$\boldsymbol{\rho_{AL} = 34^{-1}\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}}\quad \boldsymbol{\rho_{cu} = 57^{-1}\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}}$$

2.1 חישוב שטח חתך לפי מפל מתח מותר

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100$$

נוסחאת קנאפ עבור רשת השראית:

רשת חד מופעית

$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot (R_L \cdot cos\varphi + X_L \cdot sin\varphi)$$

רשת תלת מופעית

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R_L \cdot cos\varphi + X_L \cdot sin\varphi)$$

מפל מתח אקטיבי

$$\Delta U_{a\%} = \Delta U_{\%} - \Delta U_{r\%}$$

יחידות

$\boldsymbol{I_{ai}}\ [A]$ – החלק האקטיבי של הזרם בקטע i

$\boldsymbol{I_{ri}}\ [A]$ – החלק הראקטיבי של הזרם בקטע i

$\boldsymbol{x_0}\ \left[\frac{\Omega}{km}\right]$ – היגב ליח' אורך.

$\boldsymbol{r_0}\ \left[\frac{\Omega}{km}\right]$ – התנגדות ליח' אורך.

$\boldsymbol{l_i}\ [m]$ – אורך הקטע i

$\rho\ \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}\right]$ – התנגדות סגולית של הקו

$P_i\ [W]$ – הספק אקטיבי בקטע i

$Q_i\ [VAr]$ – הספק ראקטיבי בקטע i

חישוב שטח חתך אחיד

עבור מתח DC ועבור מתח AC חד מופעי

$$A=\frac{200\cdot\rho}{\Delta U_{a\%}\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i \quad , \qquad A=\frac{200\cdot\rho}{\Delta U_{a\%}\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$$

עבור רשת תלת מופעית:

$$A=\frac{\sqrt{3}\cdot 100\cdot\rho}{\Delta U_{a\%}\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i \quad , \qquad A=\frac{100\cdot\rho}{\Delta U_{a\%}\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$$

מפל מתח בוולטים:

$$\Delta U=\Delta U_a+\Delta U_r$$

סוג רשת	שיטת פתרון	מפל מתח אקטיבי ΔU_a	מפל מתח ראקטיבי ΔU_r
חד פאזית	זרמי קטעים	$\frac{2\cdot\rho}{A}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i$	$\frac{2\cdot X_0}{1000}\cdot\sum_1^n I_{ri}\cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{2\cdot\rho}{A\cdot U_n}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$	$\frac{2\cdot X_0}{1000\cdot U_n}\cdot\sum_1^n Q_i\cdot l_i$
תלת פאזית	זרמי קטעים	$\frac{\sqrt{3}\cdot\rho}{A}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i$	$\frac{\sqrt{3}\cdot X_0}{1000}\cdot\sum_1^n I_{ri}\cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{\rho}{A\cdot U_n}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$	$\frac{X_0}{1000\cdot U_n}\cdot\sum_1^n Q_i\cdot l_i$

מפל המתח באחוזים:

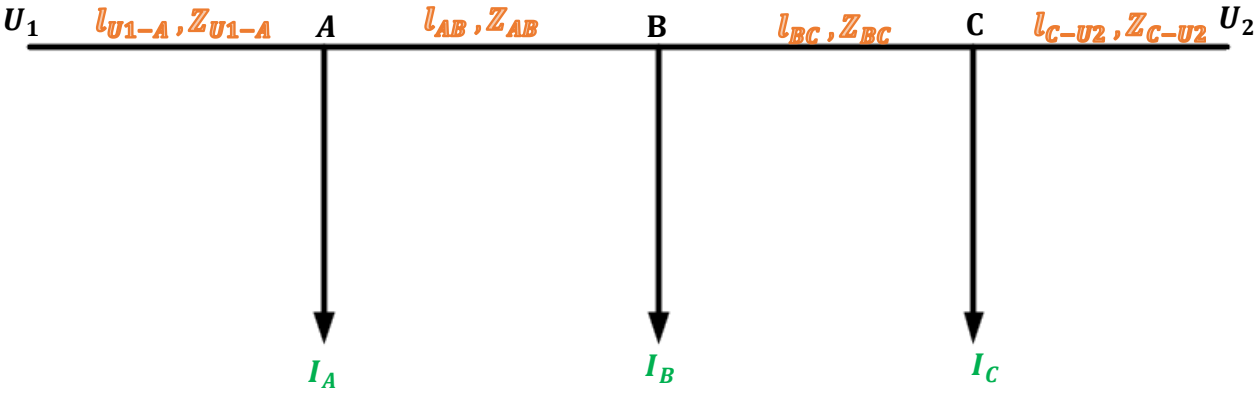
$$\Delta U_{\%}=\Delta U_{a\%}+\Delta U_{r\%}$$

סוג רשת	שיטת פתרון	מפל מתח אקטיבי $\Delta U_{a\%}$	מפל מתח ראקטיבי $\Delta U_{r\%}$
חד פאזית	זרמי קטעים	$\frac{200\cdot\rho}{A\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i$	$\frac{2\cdot X_0}{10\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ri}\cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{200\cdot\rho}{A\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$	$\frac{2\cdot X_0}{10\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n Q_i\cdot l_i$
תלת פאזית	זרמי קטעים	$\frac{\sqrt{3}\cdot 100\cdot\rho}{A\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ai}\cdot l_i$	$\frac{\sqrt{3}\cdot X_0}{10\cdot U_n}\cdot\sum_1^n I_{ri}\cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{100\cdot\rho}{A\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n P_i\cdot l_i$	$\frac{X_0}{10\cdot U_n^2}\cdot\sum_1^n Q_i\cdot l_i$

במפל מתח ראקטיבי, את הזרם I_r יש להכפיל ב(-1)

רשת עם 2 מקורות מתח – עבור שטח חתך אחיד.

עבור אורכים, זרמים והספקים



$$\overline{I_{U1}} = \frac{\overline{I_A} \cdot (Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CU2}) + \overline{I_B} \cdot (Z_{BC} + Z_{CU2}) + \overline{I_C} \cdot (Z_{CU2})}{Z_{U1A} + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CU2}} \pm I_0$$

כאשר מוליכי הרשת עשויים מאותו החומר, ושטחי החתך אחידים:

$$\overline{I_{U1}} = \frac{\overline{I_A} \cdot (l_{AB} + l_{BC} + l_{CU2}) + \overline{I_B} \cdot (l_{BC} + l_{CU2}) + \overline{I_C} \cdot (l_{CU2})}{l_{U1A} + l_{AB} + l_{BC} + l_{CU2}} \pm I_0$$

I_0 [A] – זרם משלים

עבור רשת חד פאזית:

$$I_0 = \frac{U_{high} - U_{low}}{2 \cdot (Z_{U1A} + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CU2})} = \frac{U_{high} - U_{low}}{2 \cdot Z_\Sigma}$$

עבור רשת תלת פאזית:

$$I_0 = \frac{U_{high} - U_{low}}{\sqrt{3} \cdot (Z_{U1A} + Z_{AB} + Z_{BC} + Z_{CU2})} = \frac{U_{high} - U_{low}}{\sqrt{3} \cdot Z_\Sigma}$$

$$R_\Sigma = \frac{\rho}{A} \cdot \sum l_i$$
$$X_\Sigma = X_0 \cdot \sum l_i$$
$$Z_\Sigma = R_\Sigma + jX_\Sigma$$

זרמים ברשת

$$I_{U1} + I_{U2} = I_A + I_B + I_C$$

כאשר $U_1 = U_2$

$$I_0 = 0A$$

2.2. שיקול הפסדי הספק

ברשת חד מופעית:

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

ברשת תלת מופעית:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R = 3 \cdot I^2 \cdot \frac{\rho \cdot l}{A}$$

$$\Delta P_{\%} = \frac{\Delta P}{P_{\Sigma}} \cdot 100$$

$P_{\Sigma} = P_{l1} = U \cdot I_{a1}$ – הספק כללי ברשת חד פאזית

$P_{\Sigma} = P_{l1} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{a1}$ – הספק כללי ברשת תלת פאזית

שטח חתך אחיד:

DC ו-AC חד מופעי

$$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta P_{\%} \cdot P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$$

$$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta P_{\%} \cdot P_{\Sigma} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$$

AC תלת מופעי

$$A = \frac{300 \cdot \rho}{\Delta P_{\%} \cdot P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$$

$$A = \frac{100 \cdot \rho}{\Delta P_{\%} \cdot P_{\Sigma} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$$

הפסדי הספק של קו

סוג רשת	נתונים	$\Delta P\ [W]$	$\Delta P_{\%}$
חד פאזית	זרמי קטעים	$\frac{2 \cdot \rho}{A} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$	$\frac{200 \cdot \rho}{A \cdot P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{2 \cdot \rho}{A \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$	$\frac{200 \cdot \rho}{A \cdot P_{\Sigma} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$
תלת פאזית	זרמי קטעים	$\frac{3 \cdot \rho}{A} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$	$\frac{300 \cdot \rho}{A \cdot P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} I_i^2 \cdot l_i$
	הספקי קטעים	$\frac{\rho}{A \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$	$\frac{100 \cdot \rho}{A \cdot P_{\Sigma} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} S_i^2 \cdot l_i$

עבור שטחי חתך לא אחידים

עבור רשת חד מופעית וזרם ישר

$$\Delta P_{\%} = \frac{200 \cdot \rho}{P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} \frac{I_i^2 \cdot l_i}{A_i} \quad , \qquad \Delta P = 2 \cdot \rho \cdot \sum_{1}^{n} \frac{I_i^2 \cdot l_i}{A_i}$$

עבור רשת תלת מופעית

$$\Delta P_{\%} = \frac{300 \cdot \rho}{P_{\Sigma}} \cdot \sum_{1}^{n} \frac{I_i^2 \cdot l_i}{A_i} \quad , \qquad \Delta P = 3 \cdot \rho \cdot \sum_{1}^{n} \frac{I_i^2 \cdot l_i}{A_i}$$

2.3 שיקול מינימום חומר

סוג רשת	שיטת פתרון	מקדם רשת	שטח חתך של כל קטע
חד פאזית	זרמי קטעים	$K_I = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n} \cdot \sum_{1}^{n} \sqrt{I_{ai}} \cdot l_i$	$A_i = K_I \cdot \sqrt{I_{ai}}$
	הספקי קטעים	$K_P = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} \sqrt{P_i} \cdot l_i$	$A_i = K_P \cdot \sqrt{P_i}$
תלת פאזית	זרמי קטעים	$K_I = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n} \cdot \sum_{1}^{n} \sqrt{I_{ai}} \cdot l_i$	$A_i = K_I \cdot \sqrt{I_{ai}}$
	הספקי קטעים	$K_P = \frac{100 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n^2} \cdot \sum_{1}^{n} \sqrt{P_i} \cdot l_i$	$A_i = K_P \cdot \sqrt{P_i}$

2.4 שיקול צפיפות זרם

שטח חתך לפי צפיפות זרם אחידה

רשת חד מופעית:

$$j = \frac{\Delta U_{a\%} \cdot U_n}{200 \cdot \rho \cdot \sum(l_i \cdot \cos\varphi_i)}$$

רשת תלת מופעית:

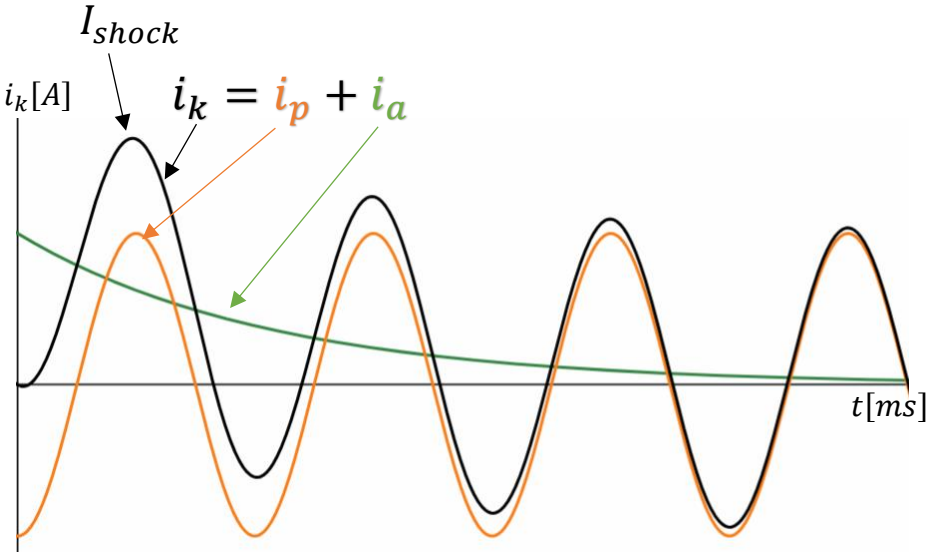
$$j = \frac{\Delta U_{a\%} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot \rho \cdot \sum(l_i \cdot \cos\varphi_i)}$$

שטח החתך של כל קטע:

$$A_i = \frac{I_i}{j}$$

$l\ [m]$ - אורך הקטע במטרים!
$I_i[A]$ – גודל הזרם בלי זווית.

3. חישוב זרמי קצר



זרם הקצר (I_{SC}):

1. רכיב זרם קצר מחזורי (סינוסידאלי) (i_p)
2. רכיב זרם ישר זמני של זרם הקצר (i_a)

נוסחאות

זרם קצר רגעי:

$$\boldsymbol{i_k = i_p + i_a} = I_K \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t \cdot \frac{360}{2\pi} + \alpha - \varphi_K\right) - \sqrt{2} \cdot I_K \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

רכיב זרם קצר מחזורי (סינוסידאלי)

$$i_p = I_K \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t \cdot \frac{360}{2\pi} + \alpha - \varphi_K\right)$$

רכיב זרם ישר זמני

$$i_a = -\sqrt{2} \cdot I_K \cdot \sin(\alpha - \varphi_K) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

I_K - זרם קצר תמידי (תלוי בסוג הקצר)

α או φ_U – זוית המתח ברגע הופעת הקצר

φ_K - הפרש מופע בין המתח לזרם הקצר

$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X_K}{\omega R_K}$ – קבוע הזמן של רכיב המעבר של זרם הקצר

זרם קצר תמידי

קצר תלת מופעי - $I_{K3ph} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_K}$

זרם קצר מקסימלי - $I_{kmax} = \frac{1.1 \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k}$

קצר דו מופעי - $I_{K2ph} = \frac{U_n}{2 \cdot Z_K}$

קצר חד מופעי - $I_{K1ph(L-N)} = \frac{U_{ph}}{Z_L + Z_N}$

זרם קצר מינימלי - $I_{kmin} = \frac{0.9 \cdot U_{ph}}{Z_L + Z_N}$

קצר חד מופעי לאדמה - $I_{K1ph(L-GND)} = \frac{U_{ph}}{Z_L + Z_E}$

U_n [V] – המתח בנקי הקצר

Z_E [Ω] – עכבת האדמה

Z_L [Ω] – עכבת מוליכי הפאזה והשנאים (כמו Z_k)

Z_N [Ω] – עכבת מוליך האפס

Z_k [Ω] – עכבת מסלול הקצר

עכבת קצר של רכיבי המעגל השונים:

הזנה

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

$U_n\ [V]$ – מתח בצד המשני של השנאי.

$S_k\ [kVA]$ – הספק קצר של מערכת ההזנה.

$$S_K = \sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K$$

כאשר לא נתון הספק הקצר – ניתן להניח ש $X_s = 0$

גנרטור:

$$X_G = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

שנאי:

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

$$\mathrm{R_{TR}} = \frac{\Delta \mathrm{P_{cu}} \cdot U_n^2}{S_n^2}$$

$$R_{TR} = \frac{U_{a\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$X_{TR} = \frac{U_{r\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

$$Z_{TR} = \frac{U_{k\%} \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n}$$

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

U_n – המתח בצד המשני של השנאי.

$U_{a\%}$ – מתח קצר אקטיבי באחוזים

$U_{r\%}$ – מתח קצר ראקטיבי באחוזים

$U_{k\%}$ – מתח קצר כולל באחוזים

$\Delta \mathrm{P_{cu}} = P_k$ – הפסדי נחושת של השנאי

כאשר לא נתונים נתוני החלק האקטיבי של השנאי - $\mathrm{Z_{TR}} = j\mathrm{X_{TR}}$

קו הולכה:

$$Z_l = R_l + jX_l$$

$$R_l = r_0 \cdot l$$

$$X_l = x_0 \cdot l$$

$l[km]$ – אורך הקו

$r_0 \left[\frac{\Omega}{km}\right]$ – התנגדות ליחידת אורך

$x_0 \left[\frac{\Omega}{km}\right]$ – היגב ליחידת אורך

שיקוף עכבות:

$$Z'_k = Z_k \cdot \left(\frac{U_k}{U'}\right)^2$$

Z'_k – עכבה משוקפת.

U_k – מתח בנק' הקצר.

U' – מתח הרשת בהדקי הרכיב.

זרם הלם (I_{shok})

$$I_{shok} = \sqrt{2} \cdot I_{K\Sigma} \cdot K_{shok}$$

מקדם הלם K_{sh}:

$a = 0$, $\varphi_k = 90°$:

$$K_{shok} = \left[\sin\left(0.01\omega \cdot \frac{360}{2\pi} - \varphi_K\right) + \sin(\varphi_K) \cdot e^{-\frac{0.01}{\tau}}\right]$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{X_L}{\omega \cdot R}$$



טבלת ערכים של מקדם הלם

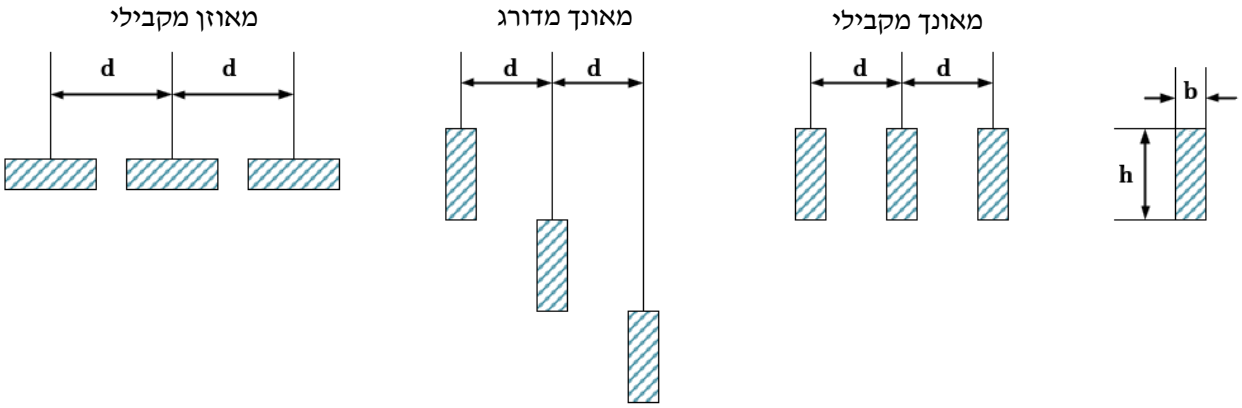
$\frac{R_k}{X_k}$	1.2	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	015.	0.1
K_{sh}	1.04	1.06	1.08	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2

כאשר הקצר בהדקי המנוע יש להוסיף את זרם ההתנעה לזרם ההלם:

$$I_{k\Sigma} = I_k + I_{st}$$

4. פסי צבירה

שיטות התקנה של פסי צבירה:



עמידות בהלם טרמי

$$A = \sqrt{\frac{I_K^2 \cdot t}{k^2}}$$

$$F_{3ph} = \frac{1.76 \cdot I_{sh}^2 \cdot l}{d \cdot 100}$$

$$\sigma = \frac{F \cdot l}{12 \cdot W}$$

$$l_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_{max} \cdot 12 \cdot W \cdot d \cdot 100}{1.76 \cdot I_{sh}^2}}$$

$A\ [mm^2]$ - שטח חתך

$I_K\ [A]$ - זרם קצר תלת מופעי צפוי על הפס צבירה

$t\ [s]$ - זמן ניתוק הקצר ע"י מפסק

$k\ \left[\frac{A \cdot s^{-\frac{1}{2}}}{mm^2}\right]$ - מקדם נתון בטבלאות עזר

$F\ [kgf]$ – כח המופעל על פס הצבירה בקטע בין 2 מבדדים

$I_{sh}\ [kA]$ - זרם הלם צפוי על הפס צבירה.

$d\ [cm]$ – מרחק בין מרכזי הפסים.

$l\ [cm]$ – מרחק בין מבדדים

$\sigma\ \left[\frac{kg}{cm^2}\right]$ – מאמץ כפיפה

$W\ [cm^3]$ – מומנט התנגדות של הפס

$W = \frac{b^2 \cdot h}{6}\ [cm^3]$ - כאשר הפסים מותקנים במצב מאונך

$W = \frac{h^2 \cdot b}{6}\ [cm^3]$ - כאשר הפסים מותקנים במצב מאוזן

בדיקת תהודה

יש לוודא שתדר התהודה של הפסים לא נמצא בטווחים

$$100Hz \pm 10\%$$
$$50Hz \pm 10\%$$

ואם כן, להקטין את l

$$f_0 = \frac{112}{l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}}$$

f_0 $[Hz]$ – תדר עצמי

l $[cm]$ –מרחק בין מבדדים

E $[\frac{kg}{cm^2}]$ – מקדם אלסטיות (גמישות) של הפס ($E_{cu} = 1.1 \cdot 10^6$).

$G = g_0 \cdot h \cdot b$ $[\frac{kg}{cm}]$ – משקל הפס לס״מ אורך.

$g_{0cu} = 8.9 \cdot 10^{-3}$ $\left[\frac{kg}{cm^3}\right]$ – משקל סגולי של נחושת

J $[cm^4]$ – מומנט אינרציה (התמדה) של הפס:

$J = \frac{b^3 \cdot h}{12}$ $[cm^4]$ - כאשר הפסים מותקנים במצב מאונך

$J = \frac{b \cdot h^3}{12}$ $[cm^4]$ - כאשר הפסים מותקנים במצב מאוזן

5. שיפור מקדם הספק

הספק הקבל

$$Q_C = P \cdot (tan\varphi_{\text{קיים}} - tan\varphi_{\text{רצוי}})$$

חיבור קבל למתח השונה מהמתח הנקוב:

$$Q'_C = Q_C \cdot \left(\frac{U'}{U_n}\right)^2$$

$U_n[V]$ – מתח נומינלי של הקבל

$U'[V]$ – מתח הרשת

הספק וקיבול של סוללות הקבלים:

$$Q_C = 3 \cdot U_{ph}^2 \cdot \omega \cdot C$$

$$C = \frac{Q_C}{3 \cdot 2\pi \cdot f \cdot U_{ph}^2}$$

בחיבור כוכב $U_{ph} = 230V$
בחיבור משולש $U_{ph} = 400V$

זרם בקבל:

$$I_C = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U}$$

נגדי פריקה

$$R = -\frac{t}{C \cdot \ln\left(\frac{U_C}{U_0}\right)}$$

$t\ [s]$ – זמן הפריקה

$C[F]$ – קיבול סוללות הקבלים

$U_0 = \sqrt{2} \cdot U_{ph}[V]$ – המתח המרבי על הקבל בתחילת הפריקה

$U_C[V]$ – המתח על הקבל בסיום הפריקה

$R[\Omega]$ – התנגדות נגד הפריקה.

חישוב זמן החזרת ההשקעה להתקנת סוללות קבלים

חסכון אנרגיה שנתי:

$$\Delta W = (\Delta P_1 - \Delta P_2) \cdot t$$

החסכון הכספי שנתי:

$$C_W = \Delta W \cdot M$$

החסכון הכספי לאחר n שנים:

$$C_{Wn} = \Delta W \cdot M \cdot n$$

עלות השקעה

$$B = b \cdot Q_C$$

מחיר ההשקעה לאחר n שנים תהיה

$$C_{Qn} = b \cdot Q_C \cdot \left(1 + \frac{K\%}{100} \cdot n\right)$$

הזמן הנדרש להחזר ההשקעה:

$$C_{Wn} = C_{Qn}$$

$Q_C[kVAr]$ – הספק סוללות הקבלים

$b[NIS]$ – מחיר של $kVAr$ אחד.

$M\left[\frac{NIS}{kWh}\right]$ – תעריף החשמל

$K\%$ – ריבית ופחת שנתיים

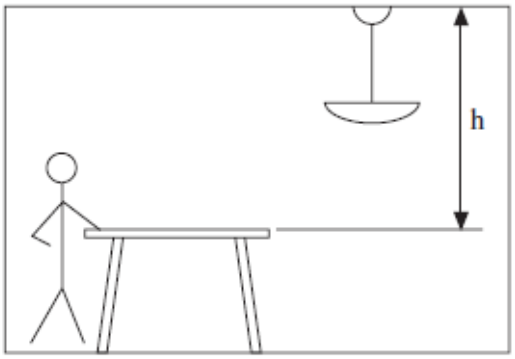
$\Delta P_1[kW]$ – הפסדי הספק בקו לפני התקנת הקבלים (kW)

$\Delta P_2[kW]$ – הפסדי הספק בקו אחרי התקנת הקבלים (kW)

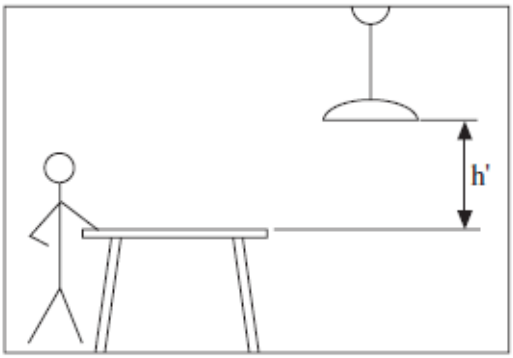
$t[h]$ – זמן שימוש שנתי בעומס

6. תאורה

תאורה בלתי ישירה



תאורה ישירה



$$R_K = \frac{2a+b}{4h}$$

$$R_K = \frac{2a+b}{6h'}$$

R_K	–	מקדם האולם	
a	–	רוחב האולם	[m]
b	–	אורך האולם	[m]
h	–	המרחק האנכי בין התקרה ומשטח העבודה	[m]
h'	–	המרחק האנכי של גוף התאורה ממשטח העבודה	[m]
ϕ	–	שטף האור הנדרש	[lm]
E	–	עוצמת המאור הנדרשת	[lx]
A	–	שטח האולם	[m^2]
k	–	מקדם ההפחתה	
η	–	נצילות התאורה	[%]

$$\phi = \frac{E \cdot A \cdot 100}{k \cdot \eta}$$

תאורת פנים:

$$\phi_T = \frac{E \cdot a \cdot b \cdot 100}{k \cdot \eta_{\%}}$$

$$E = \frac{k \cdot \eta_{\%} \cdot \phi_T}{100 \cdot a \cdot b}$$

$$\phi_T = n \cdot \phi_0$$

$$n = \frac{E \cdot a \cdot b \cdot 100}{k \cdot \eta_{\%} \cdot \phi_0}$$

n – מס' גופי התאורה.
a – רוחב האולם (m)
b – אורך האולם (m)
h – המרחק בין גוף התאורה למשטח המואר (m)
ϕ_0 – שטף אור של גוף תאורה אחד (lm)
ϕ_T – שטף אור של כל גופי התאורה (lm)
k – מקדם הפחתה
$\eta_{\%}$ – מקדם נצילות תאורה $(CU_{\%})$

שטף אור – נצילות אורית - הספק

$$I_{\alpha o} = \frac{\phi}{\omega}$$

$I_{\alpha o}\ [cd]$ – עוצמת האור

$\omega\ [steradian]$ – זווית מרחבית (עבור עיגול שלם $\omega = 4\pi$)

שטף אור – נצילות אורית - הספק

$$\eta_E = \frac{\phi}{P}$$

η_E – נצילות אורית של נורה ($\frac{lum}{W}$)

P – הספק חשמלי של נורה (W)

רמת הארה - בשטח מסויים

$$E_A = \frac{\phi}{A}$$

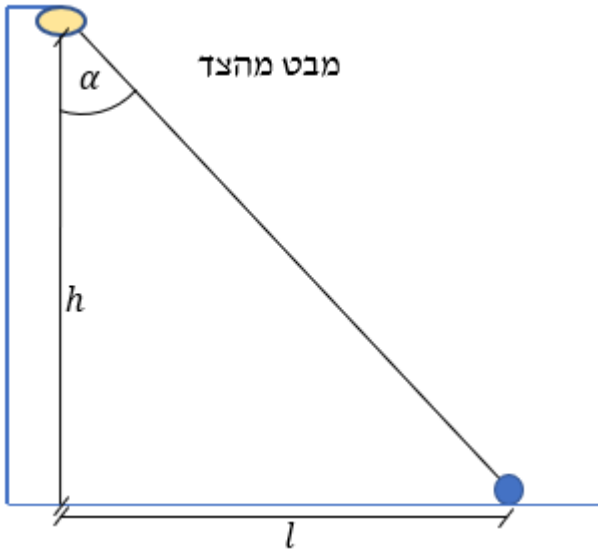
E_A – רמת הארה בשטח מסויים (lux)

A – השטח המואר (m^2)

תאורת חוץ:

רמת הארה - בנקודה מסויימת

$$E_P = \frac{I_\alpha \cdot (\cos\alpha)^3}{h^2}$$



$E_P\ [lux]$ – רמת הארה בנק' P

$I_\alpha\ [cd]$ – עוצמת האור בזווית α

$\alpha\ [°]$ – זווית קרן האור

$l\ [m]$ – המרחק בין גוף התאורה לנק' המוארת במישור האופקי

$h\ [m]$ – גובה גוף התאורה מהמשטח המואר

7. שיקול כדאיות כלכלית (חוק קלווין) – עבור רשתות תלת מופעיות

עלות שנתית של הפסדי אנרגיה

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

$$T_{max} = \frac{\sum I_i^2 \cdot t_i}{I_{max}^2} = \frac{\sum S_i^2 \cdot t_i}{S_{max}^2}$$

עבור עומסים בעלי מקדם הספק אחיד

$$T_{max} = \frac{\sum P_i^2 \cdot t_i}{P_{max}^2}$$

$$\Delta W = 3 \cdot I_{max}^2 \cdot \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot T_{max}$$

$$C_w = \Delta W \cdot M$$

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

שטח חתך לפי חוק קלווין:

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

צפיפות זרם כלכלית:

$$j_{ec} = \frac{I_{max}}{A}$$

C_w [NIS] - עלות שנתית של הפסדי אנרגיה

M $\left[\frac{NIS}{kwh}\right]$ -תעריף אנרגיה חשמלית.

$l[km]$- אורך הקו.

T_{max} – זמן הפסדים מקסימלי.

I_{max}- זרם בעומס מרבי.

ΔW $[kWh]$ – הפסדי אנרגיה שנתיים

x $\left[\frac{NIS}{mm^2 \cdot km}\right]$ - מחיר **סגולי** של מוליך רשת.

$K\%$ - החזר שנתי של הוצאות ריבית ופחת

אנרגיה, ערכים ממוצעים וגידול שנתי:

$$W_{ya} = \sum P_i \cdot t_i$$

$$W_{yr} = \sum Q_i \cdot t_i$$

זמן ניצול עומס מקסימלי ברשת

$$T_V = \frac{W_{ya}}{P_{max}}$$

הספק ממוצע:

$$P_{AV} = \frac{W_{ya}}{t}$$

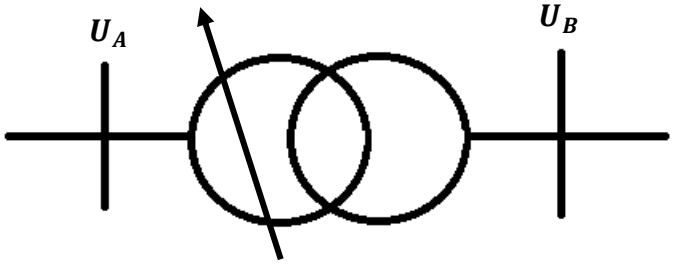
מקדם הספק ממוצע:

$$\tan\varphi_{AV} = \frac{W_{yr}}{W_{ya}}$$

W_{ya} $[kWh]$– אנרגיה **אקטיבית** שנתית

W_{yr} $[kVArh]$– אנרגיה **ראקטיבית** שנתית

8. וויסות מתח (בחירת דרגות השנאה)



$$\Delta U_{TR} = \frac{P \cdot R_{TR} + Q \cdot X_{TR}}{U_B} = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R_{TR} \cdot \cos(\varphi) + X_{TR} \cdot \sin(\varphi))$$

יחס השנאה דרגה 0

$$K = \frac{U_1}{U_2}$$

יחס השנאה משתנה:

$$K_x = \frac{U_1 \cdot \left(1 \pm \frac{n \cdot a\%}{100}\right)}{U_2} = \frac{U_A}{U_B + \Delta U_{TR}}$$

$\cos(\varphi)$ – מקדם הספק של העומס
$I[A]$ – זרם העמסה על השנאי
$U_1[V]$ – מתח נקוב בצד ראשוני של שנאי
$U_2[V]$ – מתח נקוב בצד משני של השנאי
$U_A[V]$ – מתח בפועל בצד ראשוני של שנאי
$U_B[V]$ – מתח בפועל בצד משני של השנאי

$\Delta U_{TR\%}$ – מפל מתח בשנאי באחוזים
$\Delta U_{TR}[V]$ – מפל מתח בשנאי בוולטים
$a\%$ – גודל כל דרגה באחוזים
K_x – יחס השנאה משתנה של השנאי
n – מספר דרגות השנאה

שנאים במקביל:

מקדם העמסה לנצילות מקסימלית מבחינת הפסדי הספק של שנאי אחד:

$$\beta_{\eta max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}}$$

מקדם העמסה לנצילות מקסימלית מבחינת הפסדי אנרגיה של שנאי אחד:

$$\beta_{\eta max} = \sqrt{\frac{\Delta P_{fe} \cdot t}{\Delta P_{cun} \cdot T_{max}}}$$

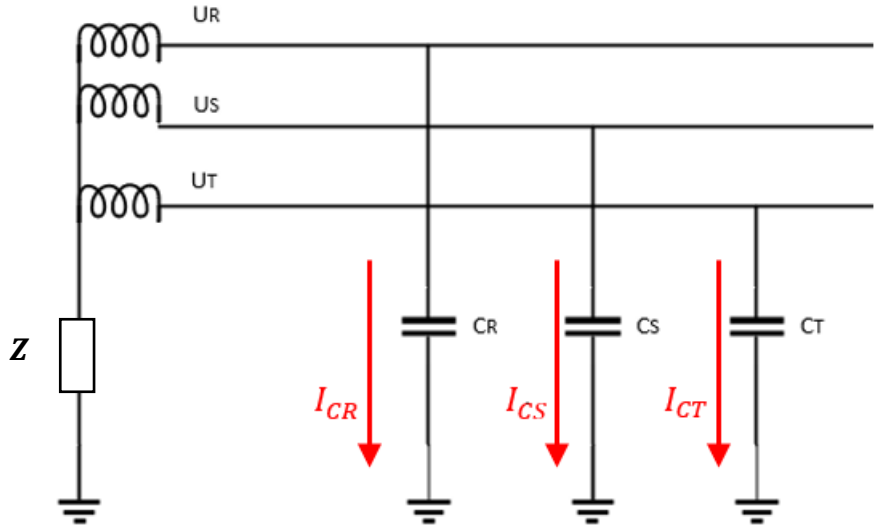
מקדם העמסה אופטימלי לחיבור שנאי נוסף ל-N שנאים קיימים:

$$\beta = \sqrt{\frac{N \cdot (N+1) \cdot \Delta P_{fe}}{\Delta P_{cun}}}$$

חלוקת עומסים בין 2 שנאים במקביל בעלי מתחי קצר שונים:

$$S_1 = \frac{S_T}{\frac{S_{1n}}{U_{K1\%}} + \frac{S_{2n}}{U_{K2\%}}} \cdot \frac{S_{1n}}{U_{K1\%}}$$

9. מערכות הספק – משטר נקודת האפס



$Z = 0$ – הארקה ישירה

$Z = R$ – הארקה דרך נגד

$Z = X_L$ – הארקה דרך סליל כיבוי (פיטרסון)

הארקה דרך נגד

חישוב נגד עבור $Z = R$:

$$R = \sqrt{\left(\frac{U_{ph}}{I_k}\right)^2 - X^2}$$

הארקה דרך סליל כיבוי

זרם קיבולי במצב תקין:

$$I_C = \frac{U_{ph}}{X_C}$$

$$I_{CR} + I_{CS} + I_{CT} = 0A$$

מניחות הקו

$$B = \frac{1}{X_C} = \omega \cdot C_0 \cdot l$$

הזרם בפאזות התקינות במצב תקלה: $I_{Ck,\text{תקינות}} = \sqrt{3} \cdot I_C$

הזרם בפאזה המקוצרת: $I_{CK} = 3 \cdot I_C$

לקיזוז מלא

$$I_L = I_{CK}$$

סליל כיבוי (פטרסון)

$$X_L = \frac{U_{ph}}{I_L} = \omega \cdot L_P = 2\pi \cdot f \cdot L_P$$

$$L_P = \frac{U_{ph}}{2\pi \cdot f \cdot I_L}$$

$$L_P = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0 \cdot l}$$

$I_C\ [A]$	- זרם קיבולי
$I_k\ [A]$	- זרם קצר לאדמה
$X\ [\Omega]$	- היגב השראי של מעגל הקצר
$X_C\ [\Omega]$	- היגב קיבולי של הרשת
$X_L\ [\Omega]$	- היגב השראי של סליל פטרסון
$C_0\ \left[\frac{F}{km}\right]$	- קיבול לק"מ
$L_P\ [H]$	- השראות סליל כיבוי
$l\ [km]$	- אורך הקו

9.1. קווי תמסורת וחלוקה

פרמטרים של קווי הספק:

סמל	יחידה	שם
X_0	Ω / km	**היגב** הקו ליחידת אורך
C_0	$\mu F / km$	קיבול הקו ליחידת אורך
R_0	Ω / km	התנגדות הקו ליחדת אורך
L	km	אורך **הקו**
D_m	cm	מרחק ממוצע בין מוליכים בקו עילי
r	cm	רדיוס המוליך
ΔP_L	W	הפסד הספק פעיל
ΔQ_L	VAr	הפסד הספק השראתי
ΔQ_C	VAr	הפסדי הספק קיבולי
I_C	A	זרם זליגה של הקו
U	V	מתח שלוב של הרשת

$$x_0 = 0.144 \times \log\frac{D_m}{r} + 0.016$$

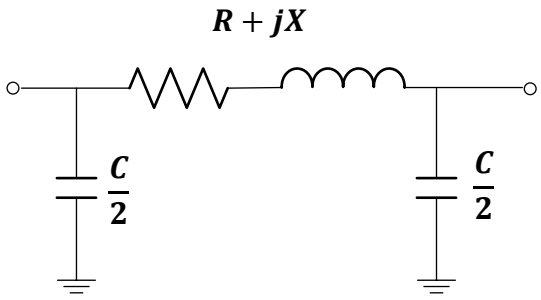
$$C_0 = \frac{0.0242}{\log\frac{D_m}{r}}$$

$$I_c = \frac{U}{\sqrt{3}} \times C_0 \times \omega \times 10^{-6} \times L$$

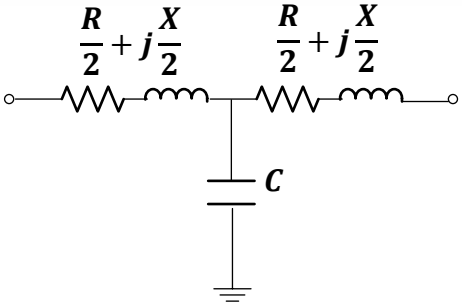
$$\Delta P_L = 3 \times I^2 \times R_0 \times L$$

$$\Delta Q_L = 3 \times I^2 \times x_0 \times L$$

$$\Delta Q_C = \sqrt{3} \times I_c \times U$$



מעגל תמורה π



מעגל תמורה T

במעגל תמורה מוליכות הקו זניחה ($G_L = 0$)

פרמטרים של שנאי

סמל	יחידה	שם
R_T	Ω	התנגדות השנאי
ΔP_{cu}	W	הפסדי הספק בקצר
U_n	V	מתח נקוב של השנאי
S_n	VA	הספק נקוב של השנאי
$\Delta U_{a\%}$	%	רכיב ממשי של מתח קצר
$\Delta U_{r\%}$	%	רכיב ההיגבי של מתח קצר
$\Delta u_{k\%}$	%	מתח קצר
X_T	Ω	הגב השנאי
Z_T	Ω	עכבת השנאי
G_T	S	מוליכות ליבת ברזל של השנאי
Y_T	S	מתירות ליבת ברזל של השנאי
B_T	S	מניחות השנאי
ΔP_{Fe}	W	הפסדי ריקם בשנאי
i_0	%	זרם ריקם של השנאי

$$R_T = \Delta P_{cu}\frac{U_n^2}{S_n^2} = \frac{U_{a\%}\times U_n^2}{100\times S_n}$$

$$X_T = \frac{U_{r\%}\times U_n^2}{100\times S_n}$$

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{U^2}$$

$$Y_T = \frac{I_0}{U_{ph}} = \frac{i_{0\%}\times S_n}{100\times U_n^2}$$

$$B_T = \sqrt{Y_T^2 - G_T^2}$$

$$\Delta P_T = \Delta P_{fe} + \beta^2 \Delta P_{CU}$$

מעגל תמורה Γ

$$Z = R_T + jX_T$$

