

## מערכות הספק ומתקני חשמל

### טכנאים – הנדסת חשמל

פתרון שאלון 93624, 97164 – קיץ 2025 – מועד א

#### פתרון שאלה 1

א. ההספק המדומה של המפעל בהנחה שבחירת כבל ההזנה מבוססת על שיקולי העמסת יתר בלבד -

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \frac{135 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 194.85 \text{ A}$$

$$I_n = I'_Z = 200 \text{ A}$$

הטמפרטורה האופפת של הקרקע היא  $50^\circ\text{C}$  ולכן,

$$K_2 = 0.82$$

ההתנגדות התרמית הסגולית של הקרקע היא  $1.5 \text{ Km/W}$ .

$$K_3 = 1.1$$

הזרם המתמיד המרבי של המוליך:

$$\frac{I'_Z}{C} = \frac{200}{0.82 \cdot 1.1} = 221.73 \text{ A}; I_Z \geq 221.73 \text{ A}$$

הזרם המתמיד המרבי מהטבלה לפי שיטת ההתקנה (טבלה 90.6) הוא  $223 \text{ A}$  שטח חתך  $120 \text{ מ"ר}$ .

ב. שיטת ההגנה היא איפוס TN-C-S. קיים חיבור בין מוליך האפס לפס הארקות במתקן.

ג. עכבת לולאת תקלה בלוח הראשי (לוח מסוג 1) במפעל היא  $0.19^{477^\circ} \Omega$ .

$$Z_K = 0.19^{477^\circ} \Omega = 0.0427 + j0.185 \Omega$$

$$I_k = \frac{1.1 \cdot U_L}{\sqrt{3} \cdot Z_k} = \frac{1.1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 0.19 \cdot 10^{-3}} = 1.33 \text{ kA}$$

ערך מקסימלי של זרם הקצר-  
מקדם ההלם יהיה:

$$K = \frac{R}{X} = \frac{0.0427}{0.185} = 0.23 \rightarrow K \approx 1.5$$

ערך הפסגה של זרם הקצר:

$$I_p = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_K = \sqrt{2} \cdot 1.5 \cdot 1.33 = 2.82 \text{ kA}$$

גודל מקסימלי של זרם הקצר יהיה כ-  $2.82 \text{ kA}$ .

ד. ניזון מכשיר חשמלי ממעגלים סופיים אחדים, ירוכזו אמצעי הניתוק למעגלים אלו בלוח משותף; בקרבת

המכשיר ובקרבת אמצעי הניתוק של מעגלי הזינה ייקבעו שלטי אזהרה ברורים; שלטים כאמור אינם

נדרשים כאשר מותקן מפסק משותף לכל המעגלים המנתק אותם בו-זמנית.

ה. הכיוון הנדרש-

$$I_r = \frac{194.85}{250} = 0.78 \rightarrow K_1 = 0.9 \rightarrow I_r = 225 \text{ A}$$

$$I_m = \frac{1.33 \cdot 10^3}{225} = 5.9 \rightarrow K_2 = 5 \rightarrow I_r = 1225 \text{ A}$$

אפשרות 3.

**פתרון לשאלה 2**

א. נציג זרמים בצורה קרטזית:

$$I_{ph} = \frac{U_{ph}}{Z_{ph}}$$

$$\vec{I}_1 = \frac{230^{40^\circ}}{4 + j5} = 35.9^{4-51.34^\circ} A$$

$$\vec{I}_2 = \frac{230^{4-120^\circ}}{6 + j2} = 36.36^{4-138.43^\circ} A$$

$$\vec{I}_3 = \frac{230^{4+120^\circ}}{3 - j4} = 46^{4+173.13^\circ} A$$

$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

הזרם במוליך האפס:

$$\vec{I}_N = 35.9^{4-51.34^\circ} + 36.36^{4-138.43^\circ} + 46^{4+173.13^\circ} = 68.71^{4-137.23^\circ}$$

ב. נחשב את מקדם ההספק:

הספק:

$$\vec{S}_1 = \vec{I}_1^* \cdot \vec{U}_1 = 35.9^{4+51.34^\circ} \cdot 230^{40^\circ} = 8.257^{4+51.34^\circ} kVA$$

$$\vec{S}_2 = \vec{I}_2^* \cdot \vec{U}_2 = 36.36^{4+138.43^\circ} \cdot 230^{4-120^\circ} = 8.362^{4+18.43^\circ} kVA$$

$$\vec{S}_3 = \vec{I}_3^* \cdot \vec{U}_3 = 46^{4-173.13^\circ} \cdot 230^{4+120^\circ} = 10.58^{4-53.13^\circ} kVA$$

הספק כולל:

$$\vec{S}_T = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3 = 19.46^{4+1.88^\circ} kVA$$

מקדם ההספק:

$$\cos(1.88) = 0.99$$

מקדם ההספק של המתקן הוא 0.99.

ג. לא יתקין אדם הארקות שיטה כאשר ההגנה בפני חשמול מבוססת על-

זינה צפה, הפרד מגן ומתח נמוך מאד.

ד. שיטת ההגנה בפני חשמול שתיושם במתקן היא TN-C-S. בין שתי אותיות A-C נדרש לבצע חיבור על מנת

ליישם את השיטה. צבעו של המוליך המחבר בין הנקודות יהיה בעל בידוד בצבע כחול עם סימון, באמצעות

שרוויל או כיוצא באלה, בצבע צהוב/ירוק לסירוגין בכל קצה.

ה. המתח עומס Z1 במקרה של נתק בנקודה B-

$$\vec{U}_N = \frac{\vec{I}_N}{\vec{Y}_1 + \vec{Y}_2 + \vec{Y}_3} = \frac{\vec{I}_N}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_1}} = \frac{68.71^{4-137.23^\circ}}{\frac{1}{6.4^{4+51.3^\circ}} + \frac{1}{6.32^{4+18.43^\circ}} + \frac{1}{5^{4-53.13^\circ}}} = 186.71^{4-135.36^\circ} V$$

$$\vec{U}_{Z1} = \vec{U}_{ph} - \vec{U}_N = 230^{40^\circ} - 186.71^{4-135.36^\circ} = 385.19^{4+19.8^\circ} V$$

מתח עומס Z1 יהיה 385.19V.

### פתרון שאלה 3

א. כבל ההזנה לכל כניסה (5 גידים בכבל ההזנה) מותקן בצינור בקרקע. כאשר טמפרטורת האדמה היא  $40^{\circ}\text{C}$  וההתנגדות התרמית הסגולית של הקרקע היא  $2.5 \text{ Km/W}$ . הצינורות צמודים והם בעלי מוליכי אלומיניום ובידוד XLPE.

מקדמי התיקון:

הטמפרטורה האופפת של הקרקע היא  $40^{\circ}\text{C}$  ולכן,

$$K_2 = 0.91$$

הצינורות צמודים ולכן,

$$K_7 = 0.85$$

הזרם המתמיד המרבי של המוליך:

$$\frac{I'_Z}{C} = \frac{63}{0.91 \cdot 0.85} = 81.44 \text{ A}; I_Z \geq 81.44 \text{ A}$$

לפי טבלה 90.6 (שיטת התקנה ל') שטח החתך המסחרי המינימלי יהיה 35 ממ"ר.

ב. לפי חוק החשמל, החתך המזערי של מוליך הארקה, המותקן כולו עם יתר מוליכי המעגל כך שביכולתו לבוא במגע איתם כגון בהתקנה בצינור משותף או בתעלה סגורה, עבור 35 ממ"ר חתך מוליך מופע יהיה 16 ממ"ר.

ג. מדדו את התנגדות מוליך הארקה של מעגל ההזנה לעמדת הטעינה. התנגדות מוליך הארקה שנמדדה היא  $0.34 \Omega$ .

אפשרות א'

$$R_E \leq \frac{U_{safety}}{I_{trip}}$$

$$R_E \leq \frac{50}{10 \cdot 25} = 0.2 \Omega$$

התוצאה שהתקבלה אינה תקינה.

אפשרות ב' (עבור ניתוק של עד 5 שניות)

$$R_E \leq \frac{U_{safety}}{I_{trip}}$$

$$R_E \leq \frac{50}{6.6 \cdot 25} = 0.3 \Omega$$

התוצאה שהתקבלה אינה תקינה.

ד. במיתקן דירתי ימוקם הלוח בתוך הדירה; במיתקן דירתי במבנה צמוד קרקע ניתן להתקין את הלוח בכניסה מקורה או במרפסת חיצונית מקורה, בתנאי שהלוח יוגן בפני חדירת מים; הלוח, לרבות המעטה שלו, יהיה מסוג 2 (בידוד כפול או בידוד מוגבר).

ה. פילר בעל מעטפת מתכתית נדרש בחיבור הארקה, הפילר מרוחק מהמבנה כך שאינו בתחום ההשפעה של המבנה, כך שבעת ניתוק מוליך ה-PEN יתפתח מתח בין מבנה הפילר לארקה. לכן, יש להתקין פילר בעל מעטפת מבודדת.

**פתרון לשאלה 4**

א. חישוב בנקודה A

$$S_A = 161.6^{430.45^\circ} \text{ kVA}$$

$$I_A = \frac{161.6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 233.25 \text{ A}$$

מפל מתח מחושב:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot \Sigma I_a = \sqrt{3} \cdot \frac{1 \cdot 55}{58 \cdot 120} \cdot 233.25 \cdot \cos(30.45^\circ) = 2.75 \text{ V}$$

מתח בנקודה A (ביחס למופע אחר) יהיה-

$$U_A = 400 - 2.75 = 397.25 \text{ V}$$

ב. הפסדי ההספק של הרשת:

חישוב בנקודה B

$$S_B = 120^{419.95^\circ} \text{ kVA}$$

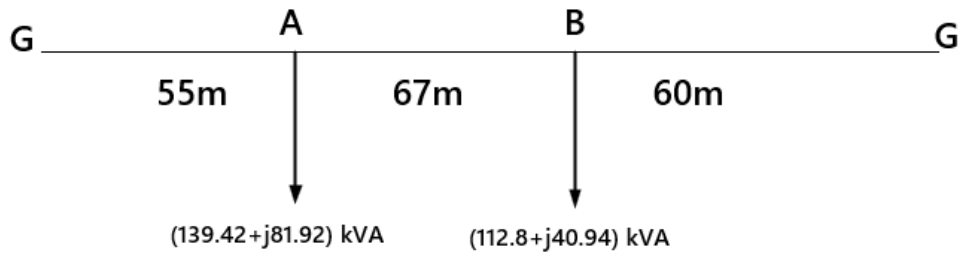
$$I_B = \frac{120 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 173.2 \text{ A}$$

הפסדי הרשת יהיו-

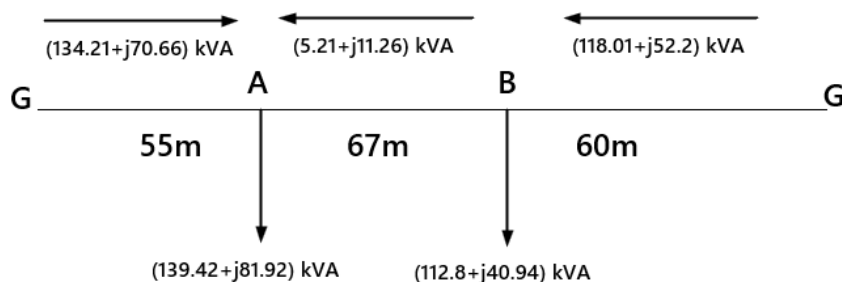
$$\Delta P = \frac{3 \cdot \rho}{A} \cdot (I_A^2 \cdot l_A + I_B^2 \cdot l_B) = \frac{3 \cdot 1}{58 \cdot 120} \cdot (233.25^2 \cdot 55 + 173.2^2 \cdot 60) = 2.06 \text{ kW}$$

הפסדי הרשת הם 2.06kW.

ג. לאחר חיבור של מפסק SW3, המתח בנקודה A יהיה-



$$S_{G \rightarrow B} = \frac{127 \cdot (139.42 + j81.92) + 60 \cdot (112 + j40.94)}{182} = (134.21 + j70.66) \text{ kVA}$$



מפל מתח מחושב:

$$\Delta U_B = \sqrt{3} \cdot \frac{\rho \cdot l}{A} \cdot \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_L} = \sqrt{3} \cdot \frac{1 \cdot 55}{58 \cdot 120} \cdot \frac{134.21 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 2.65 V$$

מתח בנקודה A (ביחס למופע אחר) יהיה-

$$U_A = 400 - 2.65 = 397.35 V$$

ד. הפסדים עבור מפסק SW3 מופסק

$$\Delta P = \frac{3 \cdot \rho}{A} \cdot (I_A^2 \cdot l_A + I_B^2 \cdot l_B) = \frac{3 \cdot 1}{58 \cdot 120} \cdot (233.25^2 \cdot 55 + 173.2^2 \cdot 60) = 2.06 \text{ kW}$$

הפסדים עבור מפסק SW3 מחובר

$$\Delta P = \frac{3 \cdot \rho}{A} \cdot (I_A^2 \cdot l_A + I_{AB}^2 \cdot l_{AB} + I_B^2 \cdot l_B) = \frac{3 \cdot 1}{58 \cdot 120} \cdot (218.65^2 \cdot 55 + 17.9^2 \cdot 67 + 129^2 \cdot 60) = 1.57 \text{ kW}$$

הפסדי ההספק יהיו קטנים יותר כשמפסק SW3 מחובר.

ה. נניח שמפסקים SW1 ו-SW3 מחוברים ומפסק SW2 מופסק-

חישוב בנקודה A

$$S_A = 161.6^{430.45^\circ} + 120^{419.95^\circ} = 280.5^{425.98^\circ} \text{ kVA}$$

$$I_A = \frac{280.5 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 404.86 \text{ A}$$

$$J_A = \frac{I}{S} = \frac{404.86}{120} = 3.37 \text{ A/mm}^2$$

בהתאם לצפיפות זרם בנחושת של  $2.2 \text{ A/mm}^2$  המצב שתואר לא אפשרי מהיבט העמסת יתר

פתרון לשאלה 5

א. לפי אמות המידה של רשות החשמל, הספק המנוע הנדרש בהתקן התנעה יהיה  $2.5\text{kW}$  למנוע חד מופעי ו- $3.7\text{kW}$  למנוע תלת מופעי. מטרת התקן ההתנעה להקטין את זרם ההתנעה ולמנוע שקיעת מתח בקו ההזנה עבור התנעת המנוע וצרכנים נוספים המחוברים לקו ההזנה. שיטות מוכרות להתנעה הן כוכב-משולש, שנאי עצמי, התנעה רכה וווסת מהירות.

ב. זרם הקצר התלת-מופעי המרבי בנקודה A-

ערכי של עכבת הקצר:

רשת החשמל-

$$X_k = \frac{U_L^2}{S_n} = \frac{400^2}{500 \cdot 10^6} = 0.32 \text{ m}\Omega$$

עכבת השנאי

$$X_{tr} = \frac{u_{k,r}(\%)}{100} \cdot \frac{U_L^2}{S_n} = \frac{7}{100} \cdot \frac{400^2}{1600 \cdot 10^3} = 7 \text{ m}\Omega$$

עכבת כבל המתח הנמוך 1

$$R_1 = \frac{\rho \cdot L_{LV}}{S} = \frac{0.018 \cdot 50}{7 \cdot 300} = 0.43 \text{ m}\Omega$$

$$X_1 = L_{LV} \cdot x_0 = \frac{50}{7} \cdot 0.08 \cdot 10^{-3} = 0.57 \text{ m}\Omega$$

עכבת כבל המתח הנמוך 2

$$R_2 = \frac{\rho \cdot L_{LV}}{S} = \frac{0.018 \cdot 40}{150} = 4.8 \text{ m}\Omega$$

$$X_2 = L_{LV} \cdot x_0 = 40 \cdot 0.08 \cdot 10^{-3} = 3.2 \text{ m}\Omega$$

עכבת הקצר:

$$Z_{eq} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_k + X_{tr} + X_1 + X_2)^2}$$

$$Z_{eq} = \sqrt{(0.43 + 4.8)^2 + (0.32 + 7 + 0.57 + 3.2)^2}$$

$$Z_k = 12.26 \text{ m}\Omega$$

זרם הקצר התלת פאזי התמידי המרבי מהזנת הרשת בנקודה A:

$$I_k = \frac{1.1 \cdot U_L}{\sqrt{3} \cdot Z_{eq}} = \frac{1.1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 12.26 \cdot 10^{-3}} = 20.72 \text{ kA}$$

ג. ערך הפסגה של זרם הקצר-

מקדם ההלם יהיה:

$$K = \frac{R}{X} = \frac{0.43 + 4.8}{0.32 + 7 + 0.57 + 3.2} = 0.47 \rightarrow K \approx 1.25$$

ערך הפסגה של זרם הקצר:

$$I_p = \sqrt{2} \cdot K \cdot I_k = \sqrt{2} \cdot 1.25 \cdot 20.72 = 36.63 \text{ kA}$$

ד. כושר ניתוק- הזרם המרבי אשר מבטח מסוגל לנתק מבלי שתיגרם סכנה לאנשים או לסביבה ומבלי שהמבטח עצמו יינזק; בהתאם לסעיפים הקודמים כושר הניתוק הנדרש הוא לפחות

20.27kA

ה. נבדוק את התקנת פס צבירה BB2 בהתאם לטבלה המצורפת מהיבט של כוחות אלקטרו-דינאמיים ותדירות טבעית. התדירות הטבעית של הפס עבור התקנה במאונך-מומנט האינרציה

$$J = \frac{b^3 \cdot h}{12} = \frac{0.5^3 \cdot 4}{12} = 0.0416 \text{ cm}^4$$

$$f_0 = \frac{112}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{G}} = \frac{112}{33^2} \cdot \sqrt{\frac{1.1 \cdot 10^6 \cdot 0.0416}{8.9 \cdot 10^{-3} \cdot 0.5 \cdot 4}} = 164.9 \text{ Hz}$$

מומנט ההתנגדות במצב מאונך :

$$W = \frac{b^2 \cdot h}{6} = \frac{0.5^2 \cdot 4}{6} = 0.16 \text{ cm}^3$$

מאמץ הכפיפה-

$$\sigma = \frac{1.76 \cdot I_{shok}^2 \cdot L^2}{12 \cdot W \cdot d \cdot 100} = \frac{1.76 \cdot 36.63^2 \cdot 33^2}{12 \cdot 0.16 \cdot 5 \cdot 100} = 2678 \frac{Kg}{cm^2}$$

מאמץ הכפיפה גדול מהערך המותר, ההתקנה אינה תקינה.

**פתרון שאלה 6**

א. שיטות ההגנה המתאפשרת בעמודי תאורה יהיו TN-S, TNC-S, TT, זינה צפה, הפרד מגן, מפסק מגן כהגנה בלעדית בפני זרם דלף, בידוד מגן ומתח נמוך מאוד.

ב. נחשב את רמת ההארה בנקודה A שטף האור לנורה

$$\varphi = P \cdot \eta_E = 200 \cdot 150 = 30000 \text{ Lm}$$

$$I_\alpha = \frac{\varphi}{2 \cdot \pi} = \frac{30000}{2 \cdot \pi} = 4774.65 \text{ Cd}$$

עמודים 2,3

$$\tan \alpha = \frac{7.5}{8} = 0.9375 \rightarrow \alpha = 43.15^\circ$$

$$E_2 = \frac{4 \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{4 \cdot 4774.65 \cdot \cos^3 43.15}{8^2} = 115.88 \text{ lux}$$

עמוד 1

$$\tan \alpha = \frac{22.5}{8} = 2.81 \rightarrow \alpha = 70.4^\circ$$

$$E_1 = \frac{4 \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{4 \cdot 4774.65 \cdot \cos^3 70.4}{8^2} = 11.265 \text{ lux}$$

רמת הארה בנקודה A תהיה-

$$E_A = 2 \cdot E_2 + E_1 = 2 \cdot 115.88 + 11.265 = 243 \text{ lux}$$

ג. רמת הארקה בנקודה B-

עמוד 1

$$\tan \alpha = \frac{15}{8} = 1.875 \rightarrow \alpha = 61.9^\circ$$

$$E_1 = \frac{4 \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{4 \cdot 4774.65 \cdot \cos^3 61.9}{8^2} = 31.1 \text{ lux}$$

עמוד 2

$$\tan \alpha = \frac{21.21}{8} = 2.65 \rightarrow \alpha = 69.33^\circ$$

$$E_2 = \frac{4 \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{4 \cdot 4774.65 \cdot \cos^3 69.33}{8^2} = 13.11 \text{ lux}$$

עמוד 3

$$\tan \alpha = \frac{33.54}{8} = 4.19 \rightarrow \alpha = 76.58^\circ$$

$$E_3 = \frac{4 \cdot I_\alpha \cdot \cos^3 \alpha}{h^2} = \frac{4 \cdot 4774.65 \cdot \cos^3 76.58}{8^2} = 3.725 \text{ lux}$$

רמת הארה בנקודה B תהיה-

$$E_A = E_1 + E_2 + E_3 = 31.1 + 13.11 + 3.725 = 47.9 \text{ lux}$$

ד. נדרש מפסק דו-קוטבי.

ה. סרטוט סכמה חשמלית של מעגל תאורה הפועל בהתבסס על התקן פוטו-צל (Photo cell)-

