

**בתכנון מתקן חשמל יש-וצריך "רזרבה" (מקדם KAPP 24%)**  
**בהספק הכללי למתקן היה ואין – מהן ההשלכות של הגדלת ההספק**  
**במתקן.**

**(המשך לתכנון בית מלאכה על פי תקנות חשמל)**

בתכנון מתקני חשמל נהוג לתכנן את קווי ההזנה הראשיים בהנחה שיחול גידול בהעמסתם, כתוצאה מהוספה הדרגתית של מערכות ומכשירים.

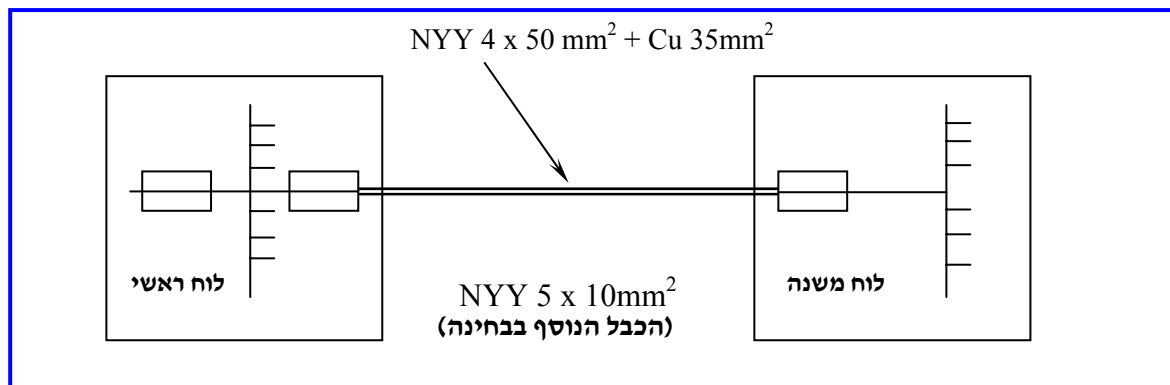
ברור שמגיע שלב, שקווי ההזנה מועמסים באופן מרבי וכל תוספת מכשיר או מערכת, מחייבת תכנון מחדש של רשת ההזנה, על פי 2 שיטות: 1 - שיטה כלכלית 2 - פיזור זרם למעשה התכנון מחדש מורכב ממספר שלבים:

- א. הוספת כבל הזנה במקביל לכבל הקיים.
  - ב. התאמת גודל המבטח המשותף לכבל הישן ולכבל החדש.
  - ג. ביצוע שינויים בלוחות החשמל עקב גידול זרם הקצר הצפוי.
  - ד. הוספת שנאי במקביל לשנאי הקיים, כאשר תוספת העומס מחייבת זאת.
- יש לערוך את השינויים הנדרשים על בסיס שיקולים טכניים וכלכליים וכמובן בהתאם לתקנות החשמל. אין דרך טובה להמחשת הדברים, מאשר דוגמה מעשית אשר מתרחשת לעיתים קרובות במפעלים עתירי מערכות, ובבתי מלאכה ועוד.

**קביעת שטח החתך של הכבל הנוסף.**

ניקח לדוגמא מחלקה בבית מלאכה שבה לוח המשנה המוזן מהלוח הראשי באמצעות כבל בחתך 4x50 ממ"ר מסוג NYY (כבל עם 4 מוליכי נחושת בעלי בידוד PVC, שבו התחממות הבידוד בזמן עבודה תקינה מותרת עד 70 מעלות צלסיוס). במקביל לכבל, מותקן מוליך הארקה בחתך 35 ממ"ר. הכבל מותקן על מגש מחורר. את זרמי ההעמסה המותרים ניתן למצוא בטבלה מס' 70.3 בתקנות החשמל (העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים) במתח עד 1000 וולט. המפעל נדרש לתת פתרון להתקנת מכונה במחלקה הנדונה. התברר לבית מלאכה שבעקבות הפעלת המכונה, הזרם ללוח המשנה צפוי לגדול מ-140 אמפר ל-150 אמפר.

**באור 1** מתוארת רשת ההזנה בבית מלאכה.



הזרם המתמיד המרבי  $I_z$  של הכבל הקיים הוא 140 אמפר, כשהטמפרטורה האופפת של האוויר היא 35 מעלות צלסיוס.

הזרם הלא מסופק הוא 10 אמפר ותאורטית ניתן היה להסתפק בהנחת כבל  $5 \times 1.5$  ממ"ר במקביל לכבל הקיים. למעשה, התקנת כבל נוסף במקביל, מקטינה את כושר העברת הזרם של הכבל הקיים. את הזרם המתמיד המרבי, בהתאם לתנאי ההתקנה החדשים, ניתן לחשב לפי הנוסחה הבאה:

$$\Gamma_z = I_z \cdot K_1 \cdot K_2$$

כאשר:

$\Gamma_z$  – הזרם המתמיד בכבל המקורי לפי תנאי ההתקנה החדשים.

$K_1$  – מקדם תיקון של מספר הכבלים המותקנים במקביל.

$K_2$  – מקדם תיקון של הטמפרטורה האופפת.

**בדוגמה לפנינו:**

$K = 0.8$  – מקדם תיקון לשני כבלים במקביל בשכבה אחת.

$K_2 = 1.0$  – מקדם תיקון לטמפרטורה אופפת של 35 מעלות צלסיוס.

**מהצבת הערכים נקבל:**

$$\Gamma_z = 140 \cdot 0.8 \cdot 1 = 112A$$

מכאן שהזרם שנותר לספק לאחר השינוי הוא:

$$150A - 112 = 38A$$

הזרם המתמיד המרבי של הכבל הנוסף צריך להיות שווה או גדול מהערך הבא:

$$38A : 0.8 = 47.5A$$

לפי טבלה 70.3 בתקנות, הכבל המתאים לתנאי הנ"ל הוא כבל  $5 \times 10$  NYY.

הגיד החמישי הוא מוליך הארקה. הזרם המתמיד המרבי  $I_z$  שווה ל-53A. בדיקת ההעמסה של הכבל החדש בתנאי ההתקנה החדשים מראה:

$$\Gamma_z = 53A \cdot 0.8 = 42.4A > 38A$$

נראה ממבט ראשון שזו הבחירה הנכונה, אבל יש לבדוק את חלוקת הזרמים בין שני מוליכים במקביל. כידוע חלוקה זו הנה ביחס הפוך לעכבות המוליכים.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

כאשר:

$I$  – הזרם הכולל

$I_1, I_2$  – הזרמים בכבלים.

$Z_1, Z_2$  – עכבות הכבלים (היות שאורך הכבלים שווה, ניתן לצורך החישוב להתייחס לערכים הסגוליים).

את מרכיבי העכבה עבור שני הכבלים ניתן לראות באיור מס' 2.

NYN 4x 50mm<sup>2</sup>

$$R_1 = 0.463 \, \Omega/\text{km}$$

$$X_1 = 0.083 \, \Omega/\text{km}$$

NYN 5 x 10mm<sup>2</sup>

$$R_2 = 2.16 \, \Omega/\text{km}$$

$$X_2 = 0.094 \, \Omega/\text{km}$$

$$Z_1 = \sqrt{0.463^2 + 0.083^2} = 0.47 \, \Omega$$

$$Z_2 = \sqrt{2.16^2 + 0.094^2} = 2.162 \, \Omega$$

חלוקת הזרמים נתונה ע"י הנוסחה:

חלוקת הזרמים נתונה ע"י הנוסחה:

$$I_1 = I \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{150 \text{ A} \cdot 2.162}{0.47 + 2.162} = 123 \text{ A}$$

$$I_2 = I \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{150 \text{ A} \cdot 0.47}{0.47 + 2.162} = 26.79 \text{ A}$$

איור 2 – מרכיבי העכבה עבור שני הכבלים

מהחישוב ניתן לראות שהזרם שיזרום בכבל המקורי יהיה בפועל גדול יותר מהמותר:

$$112 \text{ A} < 123 \text{ A}$$

בנתיך המשותף לשני הכבלים לא יורגש זרם יתר בגלל שזרם העבודה הכולל או עולה על הזרם הנומינלי של המבטח. מצב זה מהווה מקור לתקלה עתידית. מצב זה לא נעלם מעיני המחוקק אשר קבע שבמקרה של הוספת כבל למעגל המוגן על-ידי נתיך משותף, הכבל הנוסף צריך להיות בשטח חתך ובאורך זהה לכבל הקיים, וגם עשוי באותו חומר ולהעביר זרם באותם תנאים סביבתיים כפי שמפורט בתקנה 5(ד).

### בדיקת זרם הקצר הצפוי לאחר הוספת כבל במקביל

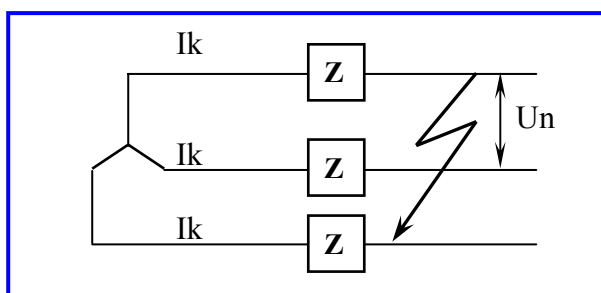
כאשר מחליפים או מוסיפים כבל, לא מתחשבים תמיד בשינויים הנלווים. אחד השינויים החשובים הוא בגודל זרם הקצר הצפוי ברשת עקב שינוי שטח החתך של כבל ההזנה. את זרם הקצר המקסימלי, שהוא תלת-מופעי, מחשבים לפי הנוסחה הבאה ( הפרמטרים השונים מתוארים באיור 3):

$$I_k = \frac{1.1 U_n}{\sqrt{3 \cdot Z}}$$

–  $U_n$  מתח נומינלי שלוב של רשת ההזנה.

–  $I_k$  זרם קצר תלת מופעי.

–  $Z$  העכבה של הכבל.



העכבה של כבל ההזנה לפני הוספת הכבל היא :

$$Z = 0.47 \Omega/\text{km} : 1000 \cdot 50 = 0.0235 \Omega \quad (0.47:20=0.0235\Omega)$$

אם נזניח את העכבה של הרשת ונתחשב רק בהתנגדות של כבל ההזנה, זרם הקצר התלת מופעי לפני הוספת הכבל יהיה שווה ל :

$$I_k = \frac{1.1 \cdot 400V}{1.732 \cdot 0.0235\Omega} = 10,810A$$

בהתקנת שני כבלים במקביל העכבה  $Z'$  תקטן פי 2 ובמקרה זה תהיה שווה ל :

$$Z' = \frac{0.0235\Omega}{2} = 0,01175\Omega$$

הזרם הקצר  $I'k$  לאחר הוספת הכבל יהיה שווה ל :

$$I'k = \frac{(1.1 \cdot 400V)}{(1.732 \cdot 0.01175\Omega)} = 21,620A$$

החישוב מראה שיש להתאים את מפסק הזרם האוטומטי הראשי וכך גם יתר הצידוד הרלוונטי לזרם הקצר החדש. זרם הקצר שבו נדרש הצידוד לעמוד הוא כעת 25kA. בכך עדיין לא הסתיימה "חקירת" המקרה. שינוי זרם הקצר משפיע גם על עמידות פסי הצבירה בלוח החשמל בזרם קצר, כפי שנראה בהמשך.

### עמידות פסי צבירה בפני זרם קצר

שטח החתך של הפסים עצמם, המרווחים בין המופעים, המרווחים בין החיזוקים (מבודדים) נקבעים על ידי היצרן לפי זרם הקצר המקסימלי שיכול להתפתח בלוח החשמל. שינוי זרם הקצר מחייב לבדוק את עמידות פסי הצבירה בהלם תרמי ובכוחות אלקטרו-דינמיים שמתפתחים בתנאים החדשים.

בלוח המשנה בדוגמה, שטח החתך של פס הצבירה מתאים במקור לזרם נומינלי של 180A וגם לזרם הנומינלי לאחר השינויים מידות הפס הן 20 x 2 מ"מ ושטח החתך של הפס הוא 40 ממ"ר. יש לערוך מספר בדיקות של התאמת פסי הצבירה בלוח למצב החדש.

#### **א. עמידות הפס בהלם תרמי:**

חתך הפס המינימלי שיעמוד בהלם תרמי נתון על ידי הנוסחה הבאה :

$$S = \sqrt{(I_k : k)^2 \cdot t}$$

**כאשר :**

- S שטח חתך מינימלי של פס הצבירה.
- $I_k$  זרם הקצר הצפוי.
- t משך קיום הקצר בשניות (הזמן המרבי הוא 5 שניות).
- k מקדם המאפיין את צפיפות הזרם בשנייה (בפס נחושת גלוי).

שטח החתך המינימלי של פס הצבירה לפני הוספת הכבל בדוגמה – בהנחה סבירה שזמן הניתוק במקרה של קצר שווה ל- 0.35sec - הוא :

$$S = \sqrt{\left(\frac{10,810}{155}\right)^2 \cdot 0.35} = 41.26 \text{mm}^2$$

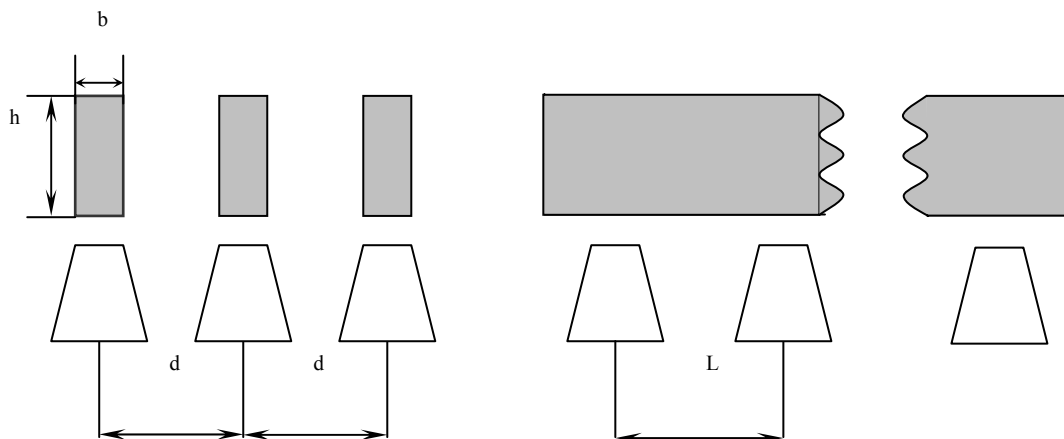
ולאחר הוספת הכבל, שטח החתך המינימלי של פס הצבירה צריך להיות :

$$S = \sqrt{\left(\frac{21,620}{155}\right)^2 \cdot 0.35} = 78.9 \text{mm}^2$$

הכפלת זרם הקצר מחייב הגדלת חתך פסי בצבירה כדי לעמוד בהלם התרמי. אפשר לבחור לצורך העניין בפס נחושת במידות 5x25 מ"מ.

### ב. עמידה בפני כוחות אלקטרו-דינמיים:

זרימת זרם דרך פסי הצבירה המייצרת כוחות אלקטרו-דינמיים של משיכה ודחייה בין הפסים המותקנים אחד מול השני. במקרים קיצוניים עלול הדבר ליצור נקודות המועדות לקצרים נוספים. להמחשת ההסברים בהמשך, מובא באיור 4 פרופיל וצורת ההתקנה של פסי הצבירה.



### כאשר:

L - מרווח בין המבודדים (חיזוקים) לאורך הפס של אותו מופע.

d - מרווח בין פסים של מופעים שונים.

b - עובי הפס.

h - גובה הפס.

תנאי לעמידת פסי הצבירה בפני הכוחות האלקטרו-דינמיים הוא שמאמץ כפיפה לנחושת

–  $\sigma$  יעמוד בתנאי :

$$\sigma \leq 2500 \text{ kg/cm}^2$$

מאמץ הכפיפה שפועל על פס הצבירה נתון על-ידי הנוסחה הבאה :

$$\sigma = \frac{P \cdot L}{12W}$$

כאשר :

$$P = \frac{1.76 \cdot Ik^2 \cdot L}{d \cdot 100}$$

– ו

$$W = 0.17 \cdot b^2 \cdot h$$

כאשר :

$P$ [kgf] - הכוח שפועל על פס הצבירה בקטע שבין שני מבודדים.

$W$ [cm<sup>3</sup>] - מומנט ההתנגדות.

$d$ [cm] - מרווח בין פסים של מופעים שונים.

$L$ [cm] - מרווח בין מבודדים (חיזוקים) לאורך הפס של אותה מופעה.

$\sigma$  [kg/cm<sup>2</sup>] - מאמץ כפיפה שפועל על הפס עקב כוחות דינמיים.

$Ik$ [KA] - זרם קצר.

המרווח בין המבודדים צריך לעמוד בתנאי :

$$L \leq \sqrt{\frac{\sigma \cdot 12W \cdot d \cdot 100}{1.76 \cdot Ik^2}}$$

לאחר הצבת הנתונים לנוסחה, המרווח בין מבודדים  $L$  לפני הוספת הכבל צריך להיות :

$$L \leq 24.4 \text{ cm}$$

לאחר הוספת הכבל ושינוי שטח החתך של פס הצבירה המרווח המבודדים  $L$  צריך להיות :

$$L' \leq 34 \text{ cm}$$

לכאורה המרווח בין המבודדים כפי שהוא בלוח המקורי מספק גם את התנאי לאחר השינוי, אך את החלטה לגבי המרווחים בין המבודדים ניתן יהיה לקבל רק לאחר בדיקת תאימות התדר האופייני של מערכת פסי הצבירה לתדר הרשת כדי למנוע אפשרות כניסה לתהודה של המערכת.

### בדיקת עמידת המערכת בפני תהודה:

כדי למנוע תופעת תהודה (רזוננס) במערכת פסי הצבירה, לבדוק מהו התדר האופייני  $f_0$  של פסי הצבירה ולהשוותו לתדר רשת החשמל. התדר האופייני נתון על פי הנוסחה:

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

כאשר:

- $f_0$ [Hz] תדר אופייני של פס צבירה
- $L$ [cm] מרחק בין מבודדים
- $E$ [kg/cm] מודול אלסטיות –  $(1.1 \times 10^6)$  לנחושת.
- $J$ [cm<sup>4</sup>] מומנט אינרציה סביב הציר שעובר דרך מרכז הפס והוא נתון על ידי הנוסחה:

$$J = \frac{b^3 \cdot h}{12}$$

כאשר:

- $G$ [kg/cm] משקל של 1cm פס צבירה.

החישוב נעשה רק לפי התנאים החדשים, לאחר שינוי שטח חתך הפס ל-125 ממ"ר כפי שהתחייב מהבדיקה התרמית.

עבור פס נחושת המידות 25x5 מ"מ  $G$  שווה ל: 0.0111 kg/cm

ו- $J$  שווה ל: 0.026cm<sup>4</sup>

המרווח המינימלי צריך להיות פחות מ-34cm לפי תנאי בדיקת העמידה בכוחות אלקטרו-דינמיים.

נבדוק אם ניתן להשאיר מרווח של 24.4cm בין המבודדים כפי שהיה קיים בלוח במקור.

לאחר הצבת הערכים וחישוב  $f_0$  מקבלים: התדר האופייני של פס הצבירה שחושב הוא

$$f_0 = \frac{112}{24.4^2} \cdot \sqrt{\frac{1.1 \cdot 10^6 \cdot 0.026}{0.0111}} = 302 \text{ Hz}$$

כפולה של תדר הרשת, 50 הרץ, והדבר מצביע על אי התאמה וחשש לכניסה לתהודה.

המסקנה היא שהמרווח בין המבודדים הקיים – 24.4 ס"מ – איננו מתאים על אף שהוא עונה לתנאי שעליו להיות קטן מ-34 ס"מ. אם נבחר מרווח של 32cm בין המבודדים, נמצא שהתדר האופייני של פסי הצבירה שווה:

$$f_0 = 175.5 \text{ Hz}$$

תדר זה איננו כפולה של תדר הרשת – 50Hz, ולכן מרווח בין מבודדים של 32cm, מתאים.

מהבדיקות השונות שתוארו לעיל מקבלים שיש לבחור הפס - 5 x 25 מ"מ.

מרווח בין הפסים של המופעים השונים – 30 מ"מ והמרווח בין המבודדים – 32 ס"מ.

## סיכום

הדוגמה שתוארה לעיל נועדה להמחיש את השפעת השינויים, לכאורה קלים, על מערכות שונות במתקן חשמל קיים. מתקן החשמל מתוכנן ובנוי על בסיס הנחות סבירות של גידול ופיתוח שאינם מחייבים שינויים משמעותיים בתשתיות המתקן. אך קיים תמיד מצב שבו לא ניתן יותר "למתוח" את המערכות הקיימות ויש צורך בשינויים יסודיים כדי לענות לדרישות הפיתוח של המשתמש. שיטת פיזור הזרם-מתאימה בכל זמן ולכל תוכנית לתכנון תקין ועם מקדמים נכונים. במיוחד למפעלים – ובתי מלאכה, אשר ההתפתחות טכנולוגית היא חלק חשוב בקדמה של אותו ענף, במיוחד שלוקחים בחשבון לתכנון מתקן, שלושה אפיונים חשובים.

א. ארקת ייסוד – הארקות ואמצעי הגנה בפני חישמול לרבות – פס השוואת הפוטנציאלים.

ב. תכנון מתקן – עם כל הפרמטרים – האפיונים הכוללים אינטגרציה, השילובים בפזור הספקים בסימטריה על פי קרדינאלים ללא פשרות.

ג. הזמנת חיבור שנאי למתקן תלת-מופעי (תלת-פאזי) עם אופציה למערכת של UPS + גנרטור לשעת חירום, כולל לוח ראשי עם כל האופציות ברמה גבוהה לרבות אפיונים של זרם קצר-זרם יתר-כושר ניתוק.