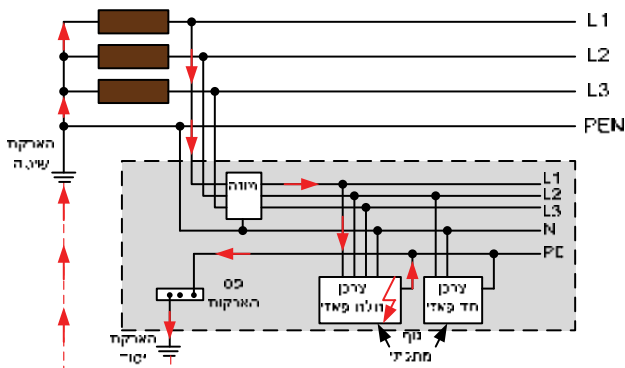


# עכבת לולאת התקלה

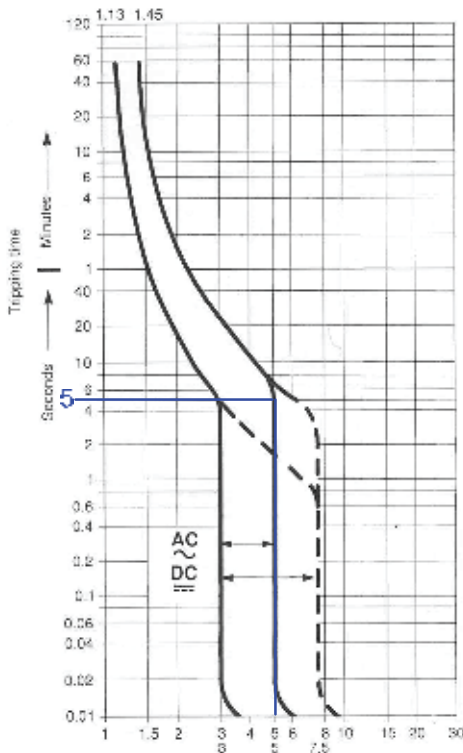
שלמה פרץ ורן ססה



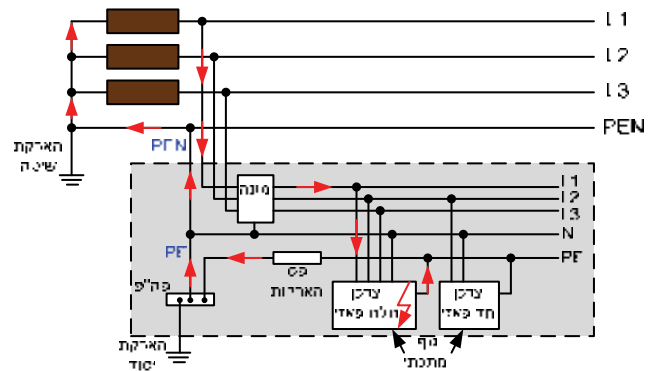
איור מס' 2 – מסלול זרם התקלה בשיטת הגנה מסוג הארקה הגנה TT

עכבת לולאת התקלה הינה אחד מהנושאים החשובים ביותר בבואנו לטפל בהגנה בפני חשמול, נושא זה נדון בחלקו במאמרים קודמים, אנו נתמקד בפתרונות ומתן דוגמאות מעשיות לבעיית ערכי לולאת תקלה גבוהים.

נפתח בציטוט הגדרה מחוק ותקנות בנושא החשמל: "לולאת התקלה" – מסלול זרם התקלה ממקור הזינה, דרך מוליכי הזינה, מוליכי הארקה ומוליכי PEN, אלקטרודת הארקה המסה הכללית של האדמה, הארקה השיטה של מקור הזינה, כולם או מקצתם, מחוברים בטור או במקביל, שדרכו עובר זרם התקלה או זרם הדלף. חשוב להבין כי מסלול זרם התקלה משתנה בהתאם לשיטת ההגנה שבחרנו עבור המתקן, לדוגמה בשיטת הגנה מסוג איפוס TN-C-S (ראה איור מס' 1)



איור מס' 3 – אופיין זרם זמן של מא"ז דגם B



איור מס' 1 – מסלול זרם התקלה בשיטת הגנה מסוג איפוס TN-C-S

ניתן לראות כי מסלול זרימת זרם התקלה בשיטת הגנה TN-C-S הינו דרך מקור הזינה אל הצרכן התקול דרך המעטה המתכתי אל מערכת הארקה וממנה אל פס השוואת הפוטנציאלים ודרך מוליך האפס אל מקור הזינה, חלק קטן של זרם התקלה יזרום דרך האדמה, רוב זרם התקלה יעבור דרך מוליך ה-PEN עקב התנגדותו הנמוכה מזו של האדמה.

לעומת זאת בשיטת הגנה מסוג הארקה הגנה TT (ראה איור מס' 2).

ניתן לראות כי מסלול זרימת זרם התקלה בשיטת הגנה TT הינו דרך מקור הזינה אל הצרכן התקול דרך המעטה המתכתי אל מערכת הארקה וממנה אל הארקה היסוד ודרך האדמה חזרה אל מקור הזינה, עקב אכילס בשיטה זו הינה טיב מוליכות האדמה.

עד כה דנו במסלול לולאת התקלה בהתאם לשיטות ההגנה השונות, כידוע לכל מעגל חשמלי סגור קיימת התנגדות, ונשאלת השאלה מה צריכה להיות ההתנגדות של מסלול לולאת התקלה שתאפשר הגנה אמינה בפני חשמול.

## ערכי לולאת התקלה

ערך לולאת התקלה למעשה קיבל התייחסות בתקנה 42 בפרק ("הארקות ואמצעי הגנה בפני חשמול במתח עד 1000 וולט"), כאן למעשה טמון המפתח בקביעת ערך לולאת התקלה. עכבת לולאת התקלה לא תהיה גדולה מזו הנדרשת לפיתוח זרם במקרה של קצר אשר יגרום להפסקת הזינה תוך 5 שניות לכל היותר.

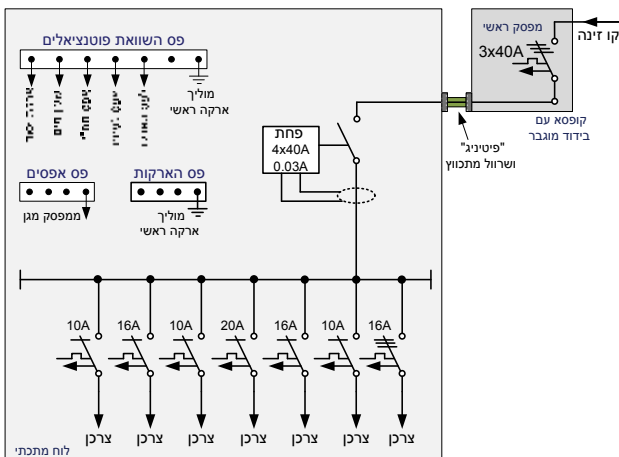


לעומת זאת כאשר לוח החשמל עשוי מחומר עם בידוד כפול לולאת התקלה נקבעת לפי מעגל היציאה הגדול ביותר, במקרה של הדוגמא שלנו  $I_n = 20A$ , וערך לולאת התקלה במקרה זה הינה  $Z = 1.7\Omega$ .

### דרכי התמודדות עם ערכי לולאת תקלה גבוהים

- כאמור ישנן מספר דרכים להתמודד עם ערכי לולאה גבוהים:
1. בניית לוח החשמל מחומר בעל בידוד כפול/מוגבר
  2. הקמת מערך אלקטרודות
  3. חיבור ברזל הזיון של המבנה אל מקור הארקה הראשי
  4. כיוול מגנטי במפסקי זרם מתכווננים
  5. הגנה בלעדית על ידי מפסק מגן

**בניית לוח החשמל מחומר בעל בידוד כפול/מוגבר:** נושא זה תואר בדוגמא שלעיל, נוסף ונאמר שקיימת גם האפשרות הבאה, כאשר לוח החשמל הינו מתכתי ניתן להוציא את המפסק הראשי של הלוח המתכתי ולהתקינו בקופסא מבודדת ואת כבל הזינה ממנו אל הלוח להוביל ע"י "פיטינג" על מנת לוודא שלא ייתכן מצב של פגיעה בבידוד הכבל לבין הלוח המתכתי (בידוד כפול), וע"י כך תקבע לולאת התקלה לפי ערך המפסק הגדול ביציאה (ראה איור מספר 5).



איור מס' 5 – הוצאת המפסק הראשי והתקנתו בקופסא מבודדת

**"מערך אלקטרודות":** מתקינים שלוש אלקטרודות באדמה בצורת משולש כשהמרחק ביניהן הוא מינימום חמישה מטר (בכדי שלא תהיה השפעה הדדית ביניהן) כשבניהן מוליך חשוף בחתך 35 מ"מ, ומחברים את מערך האלקטרודות ע"י מוליך הארקה בחתך מתאים לפס הארקות ראשי של המתקן.

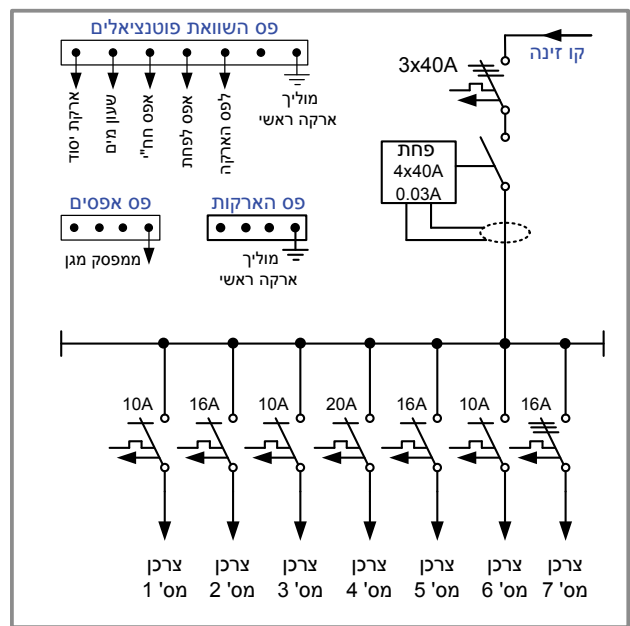
**חיבור ברזל הזיון של המבנה אל מקור הארקה הראשי:** ניתן לנסות ולשפר את ערך לולאת התקלה ע"י חיבור ברזל זיון המבנה הקיים כתוספת למקור הארקה הראשי של המבנה.

**כיוול מגנטי במפסקי זרם מתכווננים:** אופיין של מפסק זרם בנוי משלושה חלקים: תרמי (L), מגנטי מושהה (S) ומגנטי מיידי (I). הגנה תרמית מתייחסת לגודל החיבור של המתקן, הגנה מגנטית מושהית מתייחסת להגנה בפני חשמול עם אפשרות ליישום סלקטיביות, והגנה המגנטית-מיידיית מתייחסת להגנה בפני זרמים תלת פאזיים. בעת

חשוב לציין שהכלל הנ"ל תופס גם אם המבטח הינו מסוג מפסק מתכוונן או מסוג מפסק אוטומטי זעיר שלא ניתן לכוונון. קיימות טבלאות רבות בהן מופיע ערך לולאת התקלה, ערכים אלו נובעים מעקומות היצרן עבור המבטחים השונים, לדוגמא איור 3. באיור מס' 3 מופיע אופיין זרם של מא"ז דגם B, כאמור נעביר קו אופקי בערך זמן של 5 שניות, נקודת המפגש של קו זה עם עקומת היצרן מורידה אותנו בצורה אנכית אל ערך זרם הקצר הנדרש על מנת שהמא"ז ינתק את המעגל תוך 5 שניות, כעת ניתן לחשב את ערך לולאת התקלה במעגל הניזון ממא"ז בעל אופיין B

$$Z \leq \frac{U}{I} = \frac{230}{5 \cdot I_n}$$

נסתכל כעת על האיור הבא:



איור מס' 4 – לוח חשמל אופייני

כאמור אנו נדרשים לוודא את ניתוק הזינה תוך 5 שניות בעת תקלה, עבור ערכי מבטחים שונים נקבל ערכי לולאת תקלה שונים ונשאלת השאלה בלוח חשמל כמתואר באיור מס' 4, מיהו המבטח שלפיו תקבע לולאת התקלה?

תשובה לשאלה זו ניתנה בתקנה 8 בפרק ("התקנת לוחות במתח עד במתח עד 1000 וולט"), כאשר הלוח הוא מסוג 1 (מיועד לזינה במתח נמוך, שחלקיו מבודדים בבידוד בסיסי בלבד) תיקבע לולאת התקלה המרבית המותרת בהתאם למבטח, בקו הזינה של הלוח.

כאשר הלוח הוא מסוג 2 (מיועד לזינה במתח נמוך, שחלקיו מבודדים בבידוד כפול או בידוד מוגבר) תיקבע לולאת התקלה המרבית המותרת בהתאם למבטח הגדול ביותר בלוח, המגן על יציאה מהלוח.

במילים אחרות כאשר לוח החשמל עשוי מחומר מתכתי או חומר שאינו בידוד כפול/מוגבר לולאת התקלה נקבעת ע"י המבטח בקו הזינה שהוא למעשה המבטח הראשי המזין את לוח המתואר באיור מס' 3 וערכו הנקוב הינו  $I_n = 63A$ , ולפי האופיין של מבטח מסוג C נדרשת לולאת תקלה של  $Z = 0.55\Omega$ .

כיול המנגנון המגנטי מתבצע ע"י הזאת מפסקים זעירים בערך הנדרש במקרה שלנו 2.5, לפיכך נזיז את המפסקים הזעירים הבאים: 2 ונקבל:

$$I_3 = 400 \cdot (2) = 800A$$

אנו רואים שמתקיים התנאי שזרם הקצר הצפוי גדול מערך הזרם שקיבלנו בעקבות הכיול המגנטי ולכן ההגנה המגנטית של המפסק תנתק את המתקן בעת הצורך.



**דוגמא מס' 2:** לאתר קידוח של מקורות הזמינו חיבור של  $3 \cdot 910A$  לצרכי עבודות הקמה של האתר. הלוח הראשי הוא מסוג מתכתי והמפסק הראשי  $1000A \cdot 3$ . שיטת ההגנה הקיימת במתקן היא TT, טבעת המגושרת בין הכלונסאות של האתר ומחוברת לפס הארקות ראשי. לפי תקנות החשמל חל איסור לבצע איפוס באתרים מסוג זה משום שלא ניתן לבצע השוואת פוטנציאלים.

עכבת לולאת התקלה שנמדדה באתר היא:  $1.5\Omega$ . במתקנים בגודל חיבור כזה הסיכוי שהכיול המגנטי יתאים לערכי לולאת התקלה שתימדד במתקן הם קלושים לכן הפתרון במקרה זה הוא התקנה של מפסק ראשי משולב עם פחת אינטגרלי.

**נתמקד בכיול של הפחת האינטגרלי:**  
 זרם דלף:  $I_{\Delta n} : 0.03A - 30A$   
 זמן תגובה:  $\Delta t : 0 - 5 \text{ sec}$

כיול הפחת: מכיוון שבמתקן זה שיטת ההגנה תהיה פחת כהגנה בלעדית נדרוש שעכבת לולאת התקלה במתקן תהיה מספיק נמוכה כדי שבזמן קצר של מופע כלפי האדמה יתפתח זרם קצר פי עשר לפחות מזרם ההפעלה הנומינלי של מפסק המגן במקרה שלנו:

$$I_{\Delta n} = \frac{U}{Z \cdot 10} = \frac{230}{1.5 \cdot 10} = 15.3A$$

על מנת למנוע זרימת זרם בערך הנ"ל כלפי האדמה נכיל ל-  $I_{\Delta n} = 10A$ . לבדיקה נחשב את ערך העכבה בזרם של  $10A$  ונקבל  $Z = 2.3\Omega$ , ערך גבוה מערך עכבת המתקן ולפיכך המתקן מוגן.

במאמר זה הצגנו מהם ערכי לולאת התקלה וכיצד הם נקבעים, פתרונות להתמודדות עם ערכי לולאת תקלה גבוהים, יש לציין שכל פתרון הוא נכון עוד הוא עונה על תקנות החשמל ושומר על בטיחות המשתמשים במתקן.



איור מס' 6 - מפסק ראשי משולב עם פחת אינטגרלי

**שלמה פרוץ** - מהנדס חשמל M.S.C, מדריך ומנהל קורסים ביה"ס לייצור והולכה חברת חשמל  
**רון טסה** - מהנדס חשמל M.S.C, בודק מתקנים מחוז דן, חברת חשמל

קבלת ערך לולאת תקלה גבוה מהנדרש ניתן לכייל את התחום המגנטי בצורה שתבטיח את פעולתו של המפסק (ראה דוגמא מס' 1).

**הגנה בלעדית על ידי מפסק מגן:** מותר להשתמש במפסק מגן כהגנה בלעדית בפני חשמול במקרים מסוימים כמפורט בתקנה 68 בפרק ("הארקות ואמצעי הגנה בפני חשמול במתח עד 1000 וולט"), אך כאן ערך עכבת לולאת התקלה תהיה נמוכה דיה כך שבעת תקלה בין המופע לאדמה יתפתח זרם קצר פי עשר לפחות מזרם ההפעלה הנומינלי של מפסק מגן, כלומר:

$$Z = \frac{U}{10 \cdot I_{\Delta n}} = \frac{230}{10 \cdot 0.03} = 766.6\Omega$$

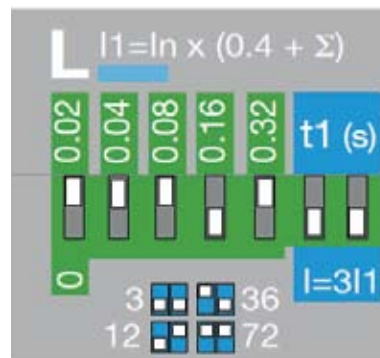
**דוגמאות לדרכי התמודדות עם ערכי לולאת תקלה גבוהים**

**דוגמא מס' 1:** בית ספר שגודל החיבור הקיים במתקן הוא  $160A \cdot 3$  ודרוש לבצע הגדלה לגודל חיבור של  $315A \cdot 3$ . הלוח הראשי שבו מותקן המפסק הראשי הוא מתכתי. שיטת ההגנה הקיימת במתקן היא TT (צנרת מים), ערך לולאת התקלה הדרושה לחיבור  $315A \cdot 3$  היא  $0.1\Omega$  בקירוב. אם מסיבה כלשהיא לא ניתן להשתמש בשיטת האיפוס אז ננסה להשתמש במפסק עם כיול מגנטי מתאים.

ערך לולאת התקלה שקיבלנו במתקן מצנרת המים הוא  $0.27\Omega$  והמפסק שמוותקן בלוח הראשי הוא בגודל של  $400A \cdot 3$  עם כיול תרמי של  $1 \cdot In - 0.4$  וכיול מגנטי  $10 \cdot In - 1.0$ .

**פתרון:** שלב ראשון נכיל את המנגנון התרמי -

$$setting - L = \frac{I_b}{I_n} = \frac{315}{400} = 0.78$$



כיול המנגנון התרמי מתבצע ע"י הזאת מפסקים זעירים בערך הנדרש במקרה שלנו 0.78, לפיכך נזיז את המפסקים הזעירים הבאים: 0.04, 0.02 + ערך קבוע של 0.4 ונקבל:

$$I_1 = 400 \cdot (0.4 + 0.32 + 0.04 + 0.02) = 312A$$

שלב שני נכיל את המנגנון המגנטי -

נחשב מהו זרם הקצר החד פאזי הצפוי במתקן

$$I_{k-min} = \frac{U}{R_{lt}} = \frac{230}{0.27} = 851A$$

לכיול המפסק:

$$setting - I = \frac{I_{K-min}}{I_n} = \frac{851}{400} = 2.12$$