משה שפיגל <<<

עכבת לולאת תקלה מירבית מותרת, בהתאמה לאופייני מא"זים

עכבת לולאת התקלה הינה מדד חשוב המצביע על איכות ההגנה בפני חישמול. בחירת המבטח המתאים להגנה בפני חישמול, במיתקנים המוגנים בשיטת הארקת הגנה (TT) ובמיתקנים המוגנים בשיטת האיפוס (TN-C-S), מבוססת על הערך הנמדד של עכבת לולאת התקלה במיתקן החשמל. מאמר זה מציג את ערכי העכבה המירבית המותרת של לולאת התקלה, כתלות באופייניים השונים של המא"זים

עכבת לולאת התקלה

בתקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה מפני חישמול במתח עד 1,000 וולט) מוגדרת לולאת התקלה כדלהלן:

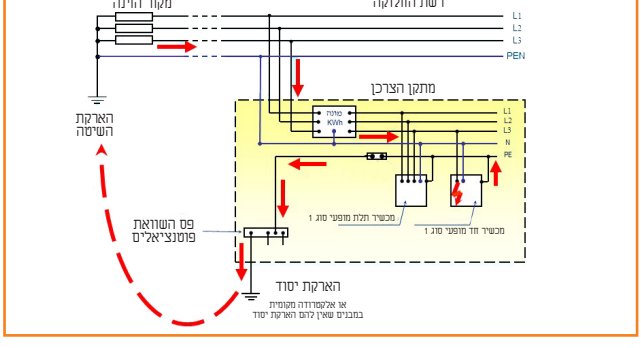
"לולאת התקלה" – מסלול זרם התקלה ממקור הזינה, דרך מוליכי הזינה, מוליכי הארקה ומוליכי PEN, אלקטרודת הארקת המסה הכללית של האדמה, הארקת שיטה של מקור הזינה, כולם או מקצתם, מחוברים בטור או במקביל, שדרכו עובר זרם התקלה או זרם הדלף;

העכבה המירבית המותרת של לולאת התקלה במיתקן המוגן בשיטת הארקת הגנה או בשיטת האיפוס, חייבת להיות כזו שבעת קצר בין מופע להארקה, יזרום במעגל זרם קצר בעוצמה שתגרום לניתוק המבטח תוך 5 שניות לכל היותר.

באיור 1 מתואר מסלול זרימת זרם התקלה, במיתקן המוגן בפני חישמול בשיטת הארקת הגנה (TT): החל ממקור הזינה (שנאי), דרך המעגל ודרך המכשיר הפגום – וחזרה למקור הזינה. חלק מלולאת התקלה כולל את המסה הכללית של האדמה בין אלקטרודת ההארקה של המתקן לבין הארקת השיטה של מקור הזינה. חלק זה הינו בעל עכבה גבוהה.

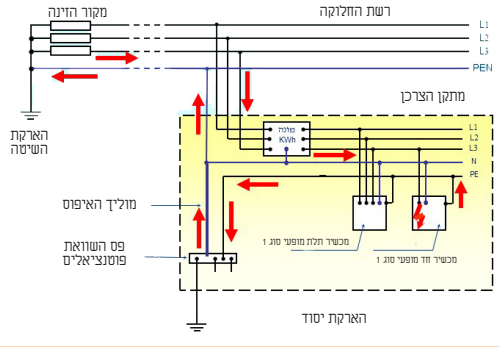
באיורים 2 ו-3 מתואר מסלול זרימת זרם התקלה במיתקן, המוגן בפני חישמול באמצעות איפוס (TN-C-S ו- TN-S בהתאמה): רוב זרם התקלה זורם במסלול מתכתי – החל ממקור הזינה,

איור 1: לולאת התקלה במיתקן המוגן בפני חישמול בשיטת הארקת הגנה

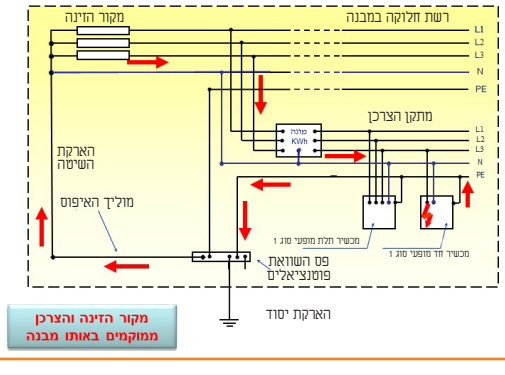


דרך המכשיר הפגום, פס ההארקה, פס השוואת הפוטנציאלים, מוליך האיפוס וחזרה למקור הזינה. חלק קטן מאוד מזרם התקלה זורם דרך הארקת היסוד, האדמה והארקת השיטה של מקור הזינה, כיוון שההתנגדות החשמלית של מסלול זה גבוהה בהרבה מהתנגדות המסלול המכיל את מוליך האיפוס. כך, עכבת לולאת התקלה של מתקן המוגן באמצעות איפוס, נמוכה מזו של מתקן המוגן באמצעות הארקת הגנה. ככל שעכבת לולאת התקלה נמוכה יותר, כך זרם התקלה יהיה גבוה יותר והמבטח יפסיק את זרם התקלה מהר יותר.

איור 2: לולאת התקלה במיתקן המוגן בפני חישמול בשיטת האיפוס (TN-C-S)



איור 3: לולאת התקלה במיתקן המוגן בפני חישמול בשיטת האיפוס (TN-S)



תקנה 42 בתקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה בפני חישמול) דנה בעכבת לולאת תקלה המבטיחה – במקרה של קצר – ניתוק הזינה תוך פחות מחמש שניות, כאשר משתמשים במא"זים בעלי אופיין L וכן בנתיכים בעלי אופיין GI. ואולם, הטבלה המוצגת בתקנה זו פחות מתאימה כיום מאחר שמא"זים בעלי אופיין L כבר לא נפוצים וכמעט יצאו משימוש. בהמשך המאמר נציג את הקשר בין אופיין המא"ז וערכי העכבה המירבית המותרת של לולאת התקלה.

מבנה ואופן הפעולה של מא"ז

מא"ז (מפסק אוטומטי זעיר – MCB - Miniature Circuit Breaker) הוא מבטח בעל התקן הגנה שאיננו ניתן לכיוונון, המשלב התקן הגנה אלקטרו-מכני להגנה בפני קצר והתקן הגנה תרמי להגנה בפני עומס יתר.

באיור 4 מתואר מבנה עקרוני של מא"ז.

ההגנה בפני קצר מתבצעת באמצעות אלקטרומגנט. זהו ניתוק מיידי (instantaneous tripping). אלקטרומגנט מורכב מליבת ברזל

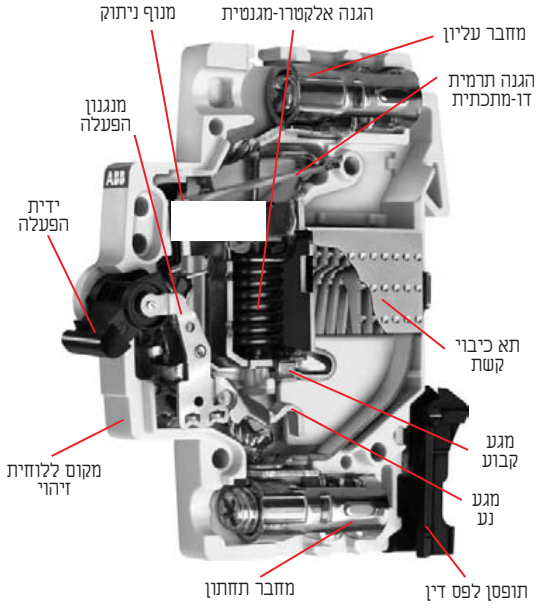
משה שפיגל– מהנדס חשמל, המחלקה לייעול הצריכה, אגף שירות לקוחות, חברת החשמל

כל הזכויות שמורות לחברת החשמל - אוקטובר 2018

שסביבה מלופף המוליך נושא הזרם. כאשר הזרם עובר גבול מסוים, המגע מתנתק ומפסיק את הזרם במעגל שעליו הוא מגן (שימוט ידית המפסק).

ההגנה בפני עומס יתר מתבצעת באמצעות רכיב דו-מתכתי. זהו ניתוק מושהה (delayed tripping). הזרם מחמם מתכת אחת יותר מהשנייה, ונוצר כיפוף עד אשר בטמפרטורה מסוימת המגע מתנתק ומפסיק את הזרם במעגל שעליו הוא מגן (שימוט ידית המפסק).

איור 4: מבנה אופייני של מא"ז



מקור: ABB

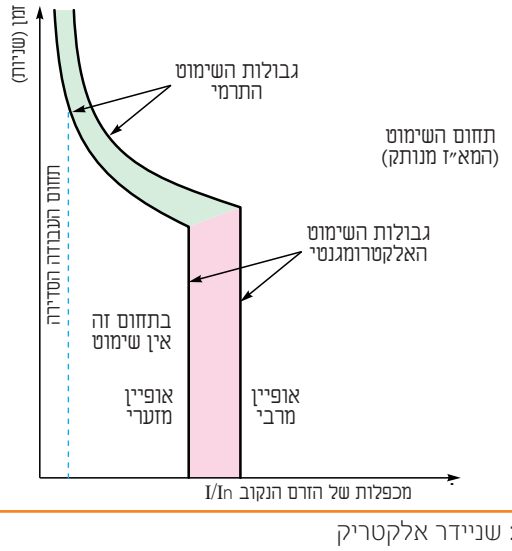
ההגנה על כבל או על מכשיר בפני עומס (חימום) יתר, תלויה בעוצמת זרם היתר ובמשך זרימתו (משך ההשהיה עד לניתוק).

הצירוף של שני סוגי ההגנות מתבטא באופיין זרם/זמן המתאים לכל סוג של מא"ז (ראה איור 5).

כמתואר באיור 5, הציר האנכי הינו ציר הזמן (בשניות), והציר האופקי הינו כפולות של הזרם הנקוב (יחס הזרם לזרם הנקוב - I/In (ללא יחידות).

שני הצירים של האופיין הם לוגריתמיים, וזאת כדי לאפשר הצגת

איור 5: אופיין זרם-זמן ניתוק אופייני של מא"ז



מקור: שניידר אלקטריק

תחום רחב יותר של זמנים וזרמים. לכל סוג של אופיין (B, C, D, K או Z, כפי שיוסבר בהמשך המאמר) ישנן שתי עקומות שהתחום ביניהן צבוע. כאשר הזרם הזורם במא"ז יהיה גדול מהזרם הנקוב של המא"ז, יתבצע שימוט (TRIP) בתוך פרק זמן כלשהו.

האזור מימין לתחום אופיין מסוג מסוים הוא אזור הניתוק הבטוח של המא"ז, ואילו האזור משמאל לתחום אופיין מסוג מסוים הוא אזור בו המא"ז לא יינתק (לא "יקפוץ"). התחום הצבוע הוא תחום אי הוודאות, הנגזר מהגבולות שנקבעו בתקן.

אופיין המא"ז מורכב משני חלקים:

- הגנה בפני עומס יתר (הגנה תרמית) מתייחסת לחלק העליון של האופיין ומתאפיינת בזמני תגובה איטיים. ככל שהזרם גבוה יותר, משך הזמן עד לשימוט מתקצר (יחס הפוך - Inverse Time). המא"זים מותאמים לעבודה בתחום טמפרטורות סביבה מסוימות. כאשר המא"ז קר (טרם הספיק להתחמם), זמני התגובה בו איטיים יותר מאשר במא"ז חם. במא"זים מסוגים שונים התחום התרמי דומה למדי, והשינוי הוא בתחום המגנטי.
- הגנה בפני זרם קצר (הגנה אלקטרומגנטית) - מתייחסת לחלק התחתון של האופיין - ומתאפיינת בזמני תגובה מהירים. כשהזרם עובר סף מסוים המתאים לסוג המא"ז, השימוט יהיה מהיר מאוד.

הקשר בין אופיין המא"ז לעכבת לולאת התקלה

כאמור, העכבה המירבית המותרת של לולאת התקלה - במיתקן המוגן בשיטת הארקת הגנה או בשיטת האיפוס - חייבת להיות כזו, שבזמן קצר בין מופע להארקה, יזרום במעגל זרם קצר בעוצמה שתגרום לניתוק המבטח תוך 5 שניות לכל היותר.

לפיכך, עלינו להביט באופייני המא"זים השונים ולבחון מהו הזרם (ככפולה של הזרם הנומינאלי של המא"ז) שבו מובטח ניתוק תוך פרק זמן שלא יעלה על 5 שניות.

מא"זים משמשים כיום להגנה עד לזרם של 125 אמפר ומחולקים על פי האופיינים: K, D, B,C ו-Z.

על מא"זים בעלי אופיינים B, C ו-D למתקנים ביתיים ולמתקנים דומים, חל התקן הישראלי ת"י 60898-1 "אבזרים חשמליים - מפסקים להגנה מפני זרם-יתר למתקנים ביתיים ולמתקנים דומים: מפסקים אוטומטיים זעירים לפעולה בזרם חילופים".

על מפסקי מעגל בעלי אופיינים B, C ו-D וגם Z, K שנועדו לשימושים תעשייתיים, חל התקן הישראלי ת"י 60947-2 "ציוד מיתוג ובקרה למתח נמוך: מפסקי מעגל". תקן זה משמש לאפיון מא"זים, מפסקי זרם באוויר ומפסקי זרם יצוקים.

אופיינים B, C ו-D משמשים כבסיס להגנת כבלים.

אופיין K משמש כבסיס להגנת שנאים ומנועים בעלי זרם התנעה גבוה, והכבלים המזינים אותם.

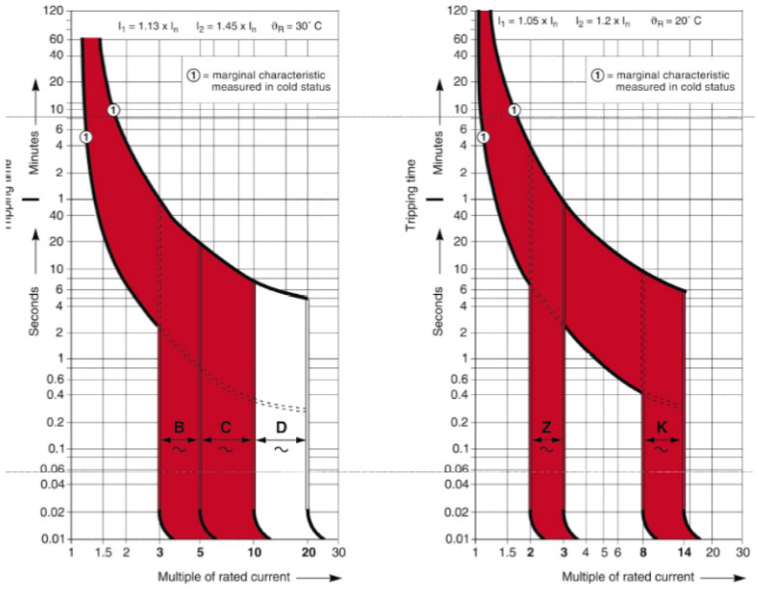
אופיין Z משמש כבסיס להגנת מעגלים בעלי אימפדנסים גבוהים, ממירים ומוליכים למחצה.

מא"זים בעל אופיין Z קיימים כבר בערך נקוב המתחיל ב-0.5 אמפר ומעלה. מא"זים בעל אופיין B קיימים רק בערך נקוב המתחיל ב-6 אמפר ומעלה.

במתקנים בהם מתרחשים לעיתים קרובות נחשולי זרם (current peaks), (הנובעים מזרמי התנעה (inrush currents) של מנועים, שנאים, רתכות, מטענים וכו'), שימוש במא"ז בעל אופיין K או בעל אופיין D משפר את האמינות התפעולית (לדוגמא, ביחס למא"ז בעל אופיין C, כך שהם מונעים ניתוק של המעגל בעקבות זרמי התנעה גבוהים (כמובן שיש לבחור באופיין המתאים בהתאם לגודל זרמי ההתנעה הידועים).

באיור 6 מוצגים האופיינים של המאז"ים, תוך הצגת הסימונים הבאים:

איור 6: אופייני זרם-זמן ניתוק של מא"ז B, C, D, K ו-Z



מקור: ABB

I_n – הזרם הנקוב של המא"ז

I_1 – זרם הבדיקה הנמוך. ערכי זרם הקטנים מזרם זה יבטיחו עבודה של המא"ז ללא ניתוקו.

I_2 – זרם הבדיקה הגבוה, זרם השימוט המובטח לאחר שעה.

בתקנה 6א' בתקנות החשמל "העמסה והגנה על מוליכים מבודדים וכבלים במתח נמוך" נקבע, שזרם I_2 עבור מא"זים יהיה שווה ל-$1.45I_n$.

כמתואר באיור 6 המבוסס על דרישות התקנים, עבור אופיינים B, C ו-D, זרם השימוט המובטח תוך שעה בתחום התרמי הוא $I_2 = 1.45I_n$, וזרם הבדיקה הנמוך הוא $I_1 = 1.13I_n$ כך שלאחר שעת עבודה בתחום זרם הגדול ב-45% מהזרם הנקוב, המא"ז יפסיק את המעגל. כאשר יזרום זרם יתר שאינו גדול ב-13% מהזרם הנקוב, המא"ז לא יפסיק את המעגל; ואילו עבור אופיינים Z ו-K, זרם השימוט המובטח תוך שעה בתחום התרמי הוא $I_2 = 1.2I_n$, וזרם הבדיקה הנמוך הוא $I_1 = 1.05I_n$.

בתחום המגנטי אופייני המא"זים הם כדלקמן:

האופיין המגנטי של מא"ז מסוג B, נמצא בתחום בין $3I_n$ ל-$5I_n$.

האופיין המגנטי של מא"ז מסוג C, נמצא בתחום בין $5I_n$ ל-$10I_n$.

האופיין המגנטי של מא"ז מסוג D, נמצא בתחום בין $10I_n$ ל-$20I_n$.

האופיין המגנטי של מא"ז מסוג K, נמצא בתחום בין $10I_n$ ל-$14\ I_n$.

האופיין המגנטי של מא"ז מסוג Z, נמצא בתחום בין $2I_n$ ל-$3I_n$.

כמתואר באיור 6, באופיין של מא"ז מסוג B ניתוק תוך 5 שניות נמצא בתחום המגנטי בזרם העולה על פי 5 מהזרם הנומינאלי של המבטח (שכן התחום המגנטי שלו הוא בין פי 3 לפי 5 מהזרם הנומינאלי). לפיכך, עכבת לולאת התקלה המירבית המותרת תהיה:

$$Z_B \le \frac{230}{5 \cdot In}$$

כמתואר באיור 6 , באופיין של מא"ז מסוג C ניתוק תוך 5 שניות יתבצע בזרם העולה על פי 10 מהזרם הנומינאלי של המא"ז. ניתן למצוא בשוק מא"זים שבהם הניתוק תוך 5 שניות מתרחש בתחום שבין פי 5 – 10 מהזרם הנומינלי (כגון פי 6.6 במא"זים של יצרנים מסוימים).

לפיכך, עכבת לולאת התקלה המירבית המותרת תהיה:

$$Z_C \le \frac{230}{10 \cdot In}$$

כמובן שעל-פי האופיינים של היצרנים השונים ניתן לחשב את עכבת לולאת התקלה בהתאם. לדוגמא, עבור מא"ז בזרם נומינלי של 20 אמפר, עכבת לולאת התקלה המירבית המותרת תהיה 1.15 אוהם כאשר הניתוק תוך 5 שניות מתרחש בזרם של פי 10 מהזרם הנומינאלי; ואילו עבור מא"ז בעל אופיין שבו הניתוק תוך 5 שניות יתקבל בזרם של פי 6.6 מהזרם הנומינלי, עכבת לולאת התקלה המירבית המותרת תהיה 1.74 אוהם.

בטבלה 1 ריכזנו את ערכי לולאת התקלה המירבית המותרת עבור מא"זים מסוג B ו-C ובהתאמה לזרם הנומינלי שלהם.

טבלה 1: ערכי עכבת לולאת תקלה מירבית

I_n (אמפר)	אופיין B		אופיין C	
	I_{kB} (אמפר)	Z_B (אוהם)	I_{kC} (אמפר)	Z_C (אוהם)
6	30	7.67	60	3.83
10	50	4.60	100	2.3
16	80	2.88	160	1.43
20	100	2.30	200	1.15
25	125	1.84	250	0.92
32	160	1.44	320	0.71
35	175	1.31	350	0.65
40	200	1.15	400	0.57
50	250	0.92	500	0.46
63	315	0.73	630	0.36
80	400	0.58	800	0.28
100	500	0.46	1000	0.23
125	625	0.37	1250	0.18

סיכום:

קיימת חשיבות רבה להתאמת הערך המירבי המותר של עכבת לולאת התקלה במיתקן המוגן באמצעות שיטת הארקת הגנה או איפוס, אל האופיין של המבטח.

חשוב להבחין בין האופיינים השונים של המבטחים, ולא להסתמך על הערכים המופיעים בטבלה הישנה שבתקנה 42 מתוך תקנות החשמל (הארקות ואמצעי הגנה בפני חשמול), שפחות מתאימה כיום מאחר שמא"זים בעלי אופיין L כבר לא נפוצים וכמעט יצאו משימוש.

כאשר מדובר במבטחים בעלי אופיינים אחרים (כגון מפסקים אוטומטיים יצוקים, מפסקי אוויר, נתיכים וכדומה), יש צורך לבחון על-פי האופיינים שלהם מהו הזרם המינימאלי שבו מובטח ניתוק תוך 5 שניות, ועל-פיו לחשב מהי עכבת לולאת התקלה המירבית המותרת.

כל הזכויות שמורות לחברת החשמל - אוקטובר 2018