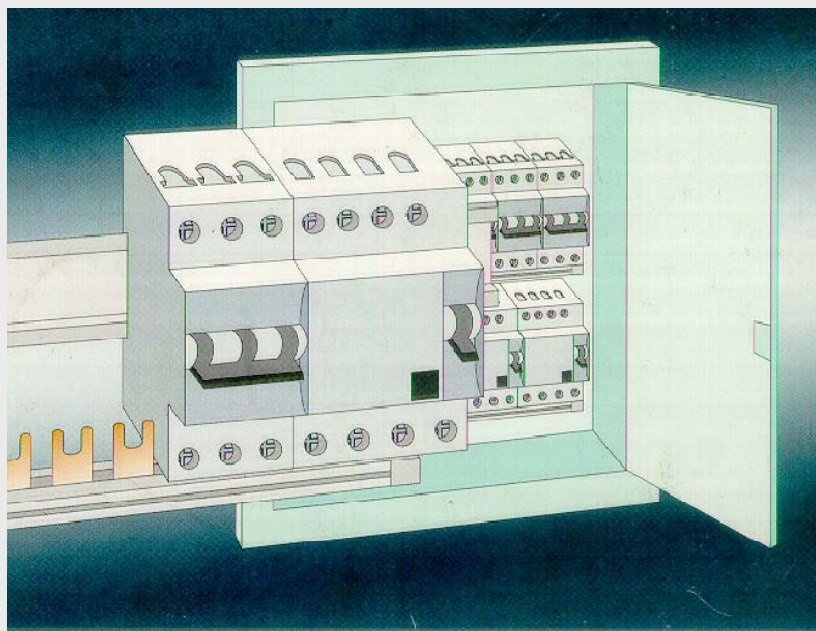
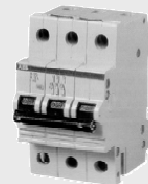


העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים



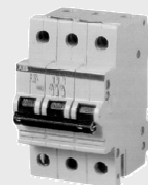
כתיבה ועריכה
סגל אריאל

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

0

מבטחים והתקנתם



חובת ההגנה:

➤ כל מוליך חי, אשר איננו מוליך אפס N, מוליך PEN, או מוליך תווך מוארק, בקו או מעגל סופי חייב להיות מוגן ע"י מבטח המגן בפני זרם קצר והעמסת יתר, או על ידי מבטח נפרד לכל יעוד.

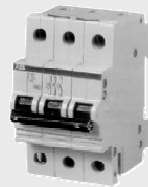
➤ התקנת המבטח, תכנונו, בדיקתו, תיקונו והחלפתו מותרת לחשמלאים בלבד.

➤ בידוד המוליך, סוג הכבל וגודל המבטח חייבים להיות מותאמים לתקן.

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

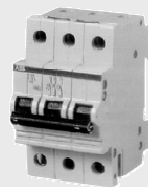
1



איסור התקנת מבטח

אסור להתקין מבטח במקומות המפורטים להלן:

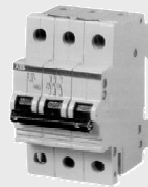
- במוליכי אפס, PEN, הארקה, או השוואת פוטנציאלים.
- במעגל משני של שנאי זרם.
- במעגל עירור מנוע לזרם ישר.
- במעגל המזין התקן התרעה חיוני כגון צופר, או מעגל פיקוד שהפסקתו כרוכה בסכנה.



מבטחים והתקנתם

מיקום התקנת המבטח וייעודו:

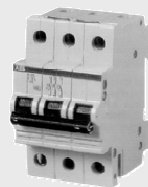
- המבטח חייב להיות מותקן ככל האפשר סמוך למקור הזינה בתנאי שהמקום נוח לגישה ותחזוקה.
- המבטח חייב לנתק את הזרם במוליך אם עוצמת הזרם בו עלולה לגרום לעליית הטמפרטורה המעל המותר.



מבטחים והתקנתם

מבחינים ב-3 סוגי מבטחים:

1. מבטח להגנה בפני עומס יתר בלבד.
2. מבטח להגנה בפני זרם קצר או מפסק זרם אוטומטי מגביל זרם בלבד.
3. מבטח להגנה בפני זרם יתר (מגן בפני עומס יתר וזרם קצר).



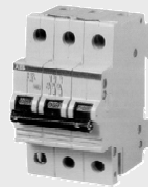
מבטחים והתקנתם

סוגי מבטחים:

מחלקים את המבטחים ל-2 קבוצות עיקריות :

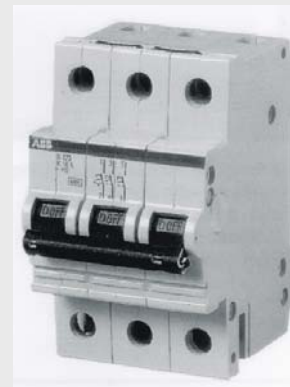
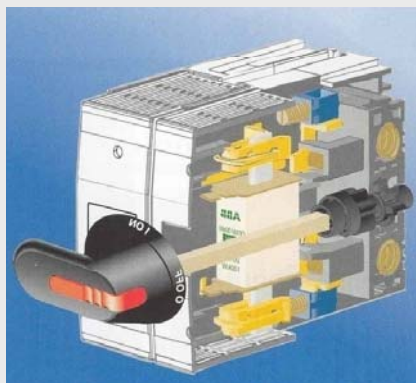
1. נתיכים.
 2. מפסקי זרם אוטומטיים.
- שני הסוגים מיועדים להגן על הציוד החשמלי או המוליכים בפני זרם יתר.
- שניהם בעלי אופיין מסוג Inverse time (זמן הפוך) כלומר, התקצרות זמן הניתוק עם עליית הזרם דרך המבטח.

מבטחים והתקנתם



נתיכים

מפסק אוטומטי זעיר ומתנע תרמו-מגנטי

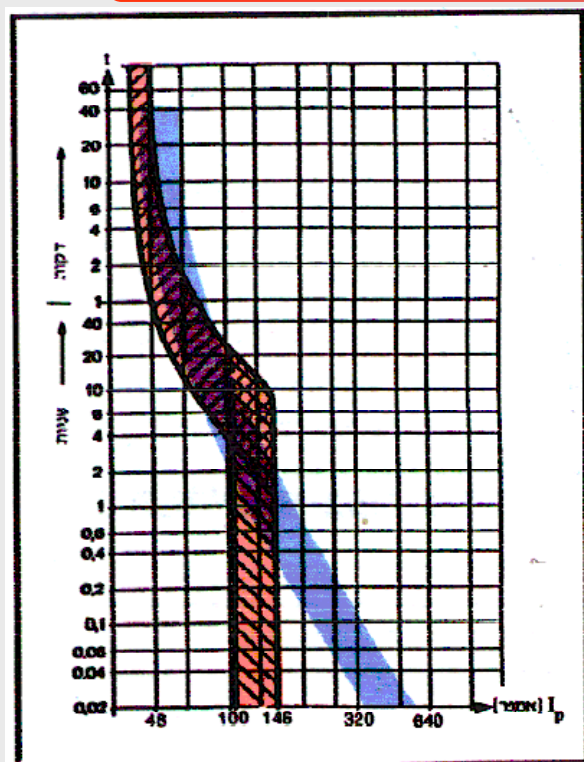
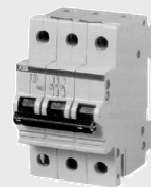


סגל אריאל

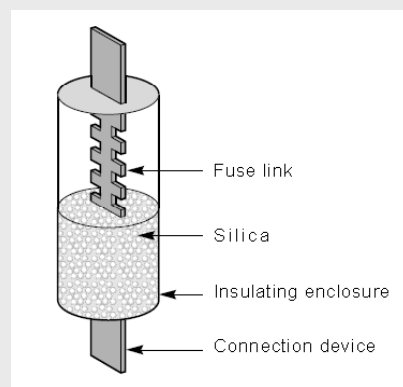
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

6

מבטחים והתקנתם



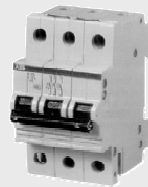
השוואת
ניתוק של
מול מא"ז בעלי
זרם נקוב של
32A



סגל אריאל

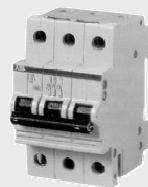
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

7



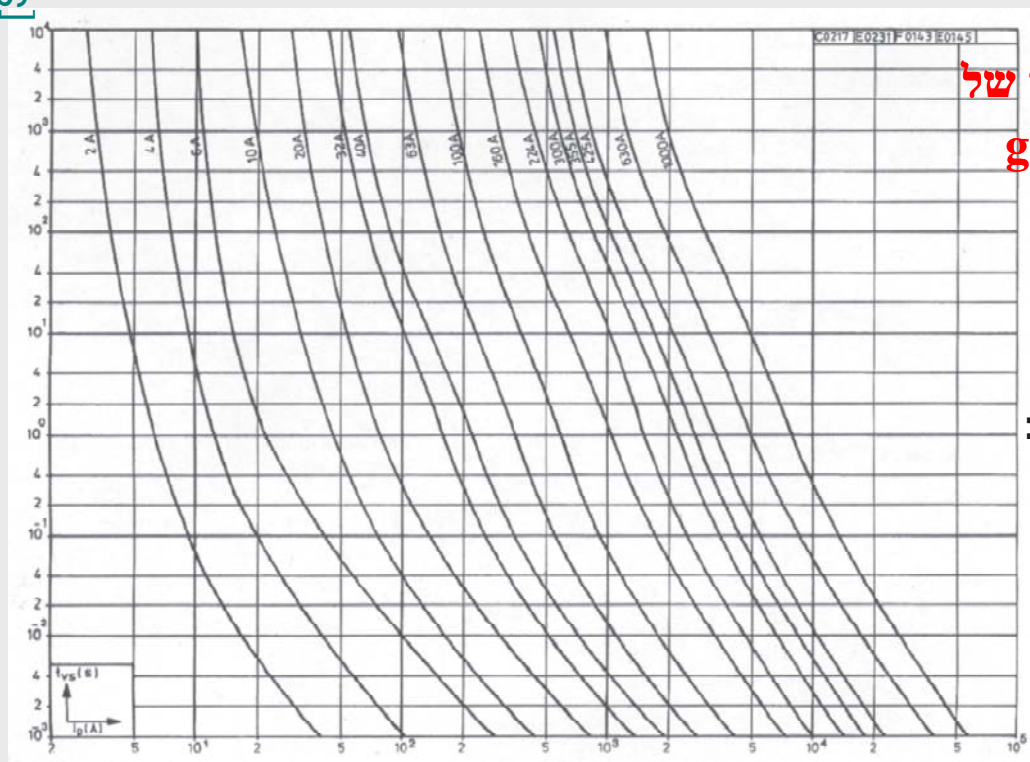
מבטחים והתקנתם

בנתיך עקומת הניתוק רציפה לכל אורכה ואילו עקומת הניתוק של מפסק אוטומטי מחולקת ל- 2 חלקים:
חלק עליון מבטא את פעולת המנגנון התרמי, להגנה בפני עומסי יתר.
חלק תחתון מבטא את פעולת המנגנון האלקטרוני להגנה בפני קצר.



מבטחים והתקנתם

זמן [Sec]

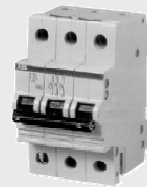


אופייני זרם זמן הפוך של
נתיכים בעלי אופין gL

עקום הניתוק של נתיך.
עקרון פעולה – תרמי.
ניתוק לפי אנרגיית חום:

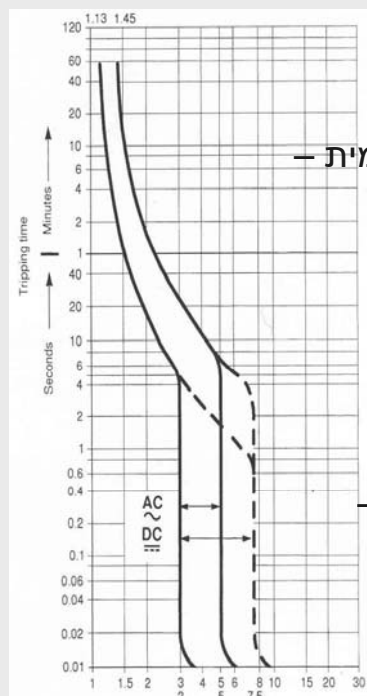
$$I^2 \cdot t$$

זרם [A]



מבטחים והתקנתם

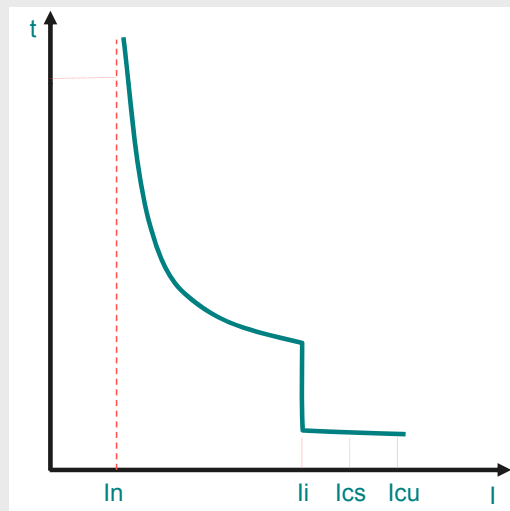
עקומת הניתוק של מא"ז. עקרון פעולה: חלק עליון – תרמי. חלק תחתון – מגנטי



אזור הגנה תרמית –
עומס יתר

אזור הגנה מגנטית –
קצר

כפולה של הזרם הנקוב

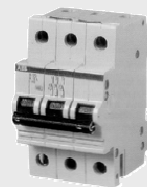


סגד אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

10

מבטחים והתקנתם



המפסקים האוטומטיים מתחלקים ל- 4 קבוצות:

1. מפסקים אוטומטיים שאינם ניתנים לכוונון (מאז"ים).
2. מפסקים אוטומטיים שהמנגנון התרמי שלהם ניתן לכוונון והמנגנון המגנטי לא ניתן לכוונון (PKZM).
3. ממסרים תרמיים (Overloads) המנתקים זרם יתר על פי רוב באמצעות מגענים.
4. מפסקים אוטומטיים המצוידים במנגנונים תרמיים ואלקטרומגנטיים ששניהם ניתנים לכוונון (NZM).

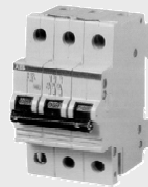
במא"זים האופייניים השכיחים הם B ו- C.

בנתיכים האופייניים השכיחים הם gL ו- gM.

סגד אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

11



מבטחים והתקנתם

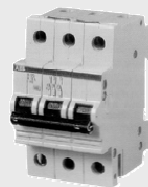
מגדירים ארבעה סוגי זרמים:

I_b - זרם העבודה הממושך במעגל (זרם הצרכן המירבי בעבודה תקינה).

I_n - הזרם הנקוב של המבטח או הזרם אליו הוא כוון.

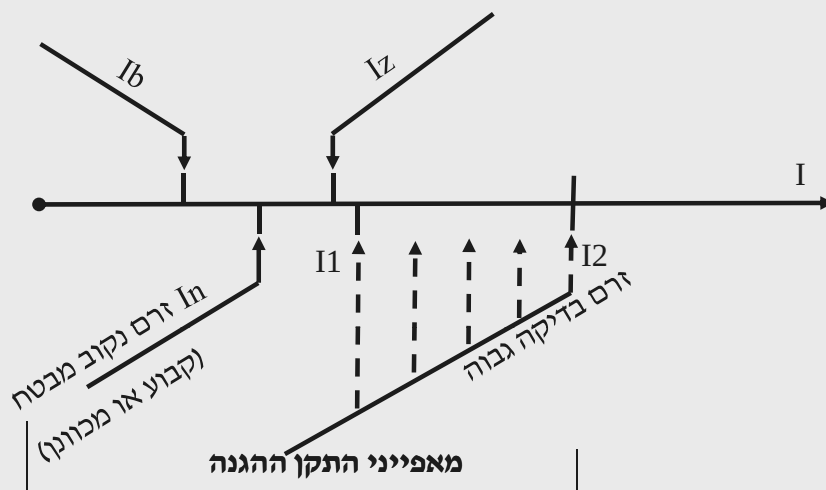
I_z - הזרם המתמיד המירבי של המוליך (זרם זה מביא לעליית טמפרטורה במוליך עד לטמפ' המירבית המותרת).

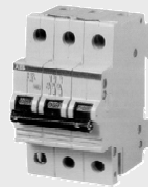
I_2 - זרם הבדיקה הגבוה של המבטח (זרם השימוש המובטח תוך זמן המוגדר בתקן של המבטח).



מבטחים והתקנתם

רמות הזרמים בתרשים:





מבטחים והתקנתם

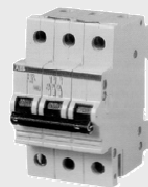
הגנה בפני עומס יתר

המבטח חייב להגן על מוליכי המעגל החשמלי בפני נזק העלול להגרם כתוצאה מעליית טמפרטורה של בידוד המוליכים או מרכיבים אחרים במסלול הזרם (הדקים, נק' חיבור), סביבה אופפת, מוליכים אחרים, מעבר למותר.

דרישת תקנות החשמל: מבטח המגן על מוליך בפני עומס יתר בלבד חייב להתאים לדרישות הבאות:

$$I_b \leq I_n \leq I_Z$$

1. חוק הזרם הנומינלי :



מבטחים והתקנתם

מבטח להגנה בפני עומס יתר בלבד

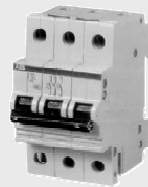
$$I_2 \leq n \cdot I_Z$$

2. חוק השימוש (Tripping current rule):

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_Z$$

2 א': עבור נתיכים או מאזים בעלי אופיין מסוג L :

כלומר ב-45% מעבר לזרם המתמיד המרבי של המוליך חייב המבטח להפסיק בוודאות בפרק זמן שאינו עולה על 1 שעה.



מבטחים והתקנתם

3. במפסקים אוטומטיים זעירים בעלי אופייני B או C חייב להתקיים:

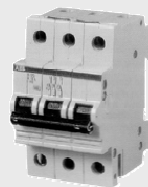
$$I_2 \leq 1.3 I_Z$$

כלומר 30% מעבר לזרם המתמיד המרבי של המוליך חייב המא"ז להפסיק בוודאות בפרק זמן שאינו עולה על 1 שעה.

$$I_2 \leq 1.1 I_Z$$

4. במפסקים אוטומטיים ניתנים לכוונון חייב להתקיים: כלומר 10% מעבר לזרם המתמיד המרבי של המוליך חייב המפסק האוטומטי להפסיק את המעגל בוודאות בפרק זמן שאינו עולה על 1 שעה.

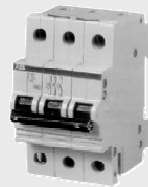
את ערכי I_Z מקבלים מתוך טבלאות על פי אופן ההתקנה



מבטחים והתקנתם

הטבלה הבאה מתארת את ערכי הזרם I_2 הנדרשים לפי התקן:

I_2 [A]	I_n [A]	סוג המבטח
$1.45 I_n$	כל הערכים	מא"ז B או C
19 43.8-35-28 $1.6 I_n$	10 25-20-16 35 ומעלה	מא"ז L או נתיך gL
$1.15 I_n$	כל הערכים	מפסק זרם אוטומטי הניתן לכוונון



מבטחים והתקנתם

עבור מא"זים:

בתנאי 3 בעמוד 15 נדרש:

$$I_2 \leq 1.3 \cdot I_z$$

זרם הבדיקה I_2 של מא"זים מקיים:

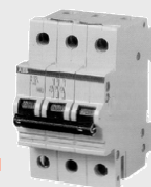
$$I_2 = 1.45 \cdot I_n$$

מהצבת I_2 באי שוויון העליון נקבל:

$$I_n \leq 0.9 \cdot I_z$$

או:

$$1.11 \cdot I_n \leq I_z$$



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמת תכנון מספר 1 – בחירת חתך ו/או זרם נקוב מבטח:

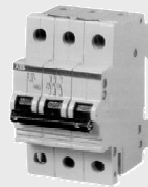
יש לתכנן כבל זינה ללוח משנה המותקן במפעל. זרם העבודה הצפוי מהפעלת הצרכנים הינו 50 אמפר. תוואי הכבל ללוח ללא מעגלים נוספים. טמפרטורה אופפת 35°C . המבטחים המותקנים בלוח ראשי להזנת לוח משנה זה הינם נתיכים (עקב קרבת לוח לשנאי וצורך בניתוק זרם קצר גבוה בעלות נמוכה יחסית). הכבל PVC מנחושת ומונח צמוד לקיר.

פתרון: על פי זרם הצרכן, נבחר נתיך בעל זרם נקוב: $I_b = I_n = 50\text{A}$
מחוק השימוש עבור נתיכים בזרם 35A ומעלה:

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I_z \quad I_2 = 1.6 I_n \Rightarrow I_z = \frac{1.6}{1.45} I_n = 1.1 \cdot I_n$$

$$I_z = 1.1 \cdot I_n = 1.1 \cdot 50 = 55\text{A}$$

מטבלה 70.3 – מתקבל שכבל במעגל תלת מופעי שעונה לדרישה הנ"ל הינו בחתך 16 ממ"ר והזרם המתמיד המרבי בו 70A.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

עבור מפסקים הניתנים לכיול:

$$I_2 \leq 1.1 I_z$$

במפסק הניתן לכיול מתקיים:

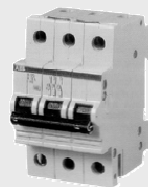
$$I_2 = 1.15 I_n$$

זרם הבדיקה של המפסקים מקיים:

מהצבת I_2 באי שוויון העליון נקבל:

$$I_n \leq 0.956 \cdot I_z$$

$$1.046 \cdot I_n \leq I_z$$



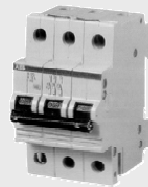
בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

הנתונים בטבלאות שבתקנים חושבו על פי הנחות אלו:

- הטמפרטורה המירבית המותרת בזרם I_z היא 70°C בבידוד PVC ו- 90°C בבידוד פוליאטילן מוצלב.
- הטמפרטורה האופפת היא 35°C באוויר או 30°C באדמה.
- ההתנגדות התרמית הסגולית של האדמה היא $120^\circ\text{C} \cdot \text{Cm/W}$.

➤ כל הנתונים מתייחסים לכבל אחד או למוביל אחד עם מוליכים שאינם מושפעים מהתחממות של כבלים או מוליכים אחרים בקרבתם.

בתנאים שונים מאלו יש להתחשב במקדמי תיקון מתאימים (פרק ד' בתקנות). כאשר מוליך מותקן בשיטות שונות יש להתחשב בשיטה הנותנת תוצאות גרועות יותר.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (15): התקנת מוליכים מבודדים או כבלים

חד גידיים ללא רווח ביניהם

K_{15} – עבור שלושה או יותר מוליכים מבודדים או שלושה כבלים חד גידיים ללא רווח ביניהם בהתקנה חשופה לאויר (כמו על סולמות) אופקית או אנכית בשכבה אחת:

מספר המוליכים	4	6	9	12
המקדם	0.80	0.72	0.66	0.63

בשכבות אחדות או במקובץ:

מספר המוליכים	4	6	8	10	12	16
המקדם	0.80	0.69	0.62	0.59	0.55	0.51

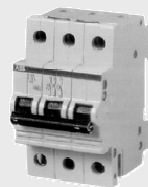
הערה: בהתקנה שכולה אופקית ניתן להגדיל את המקדמים בעוד 0.04

הערה 2: מוליך אפס בו זורם זרם משמעותי (מהרמוניות למשל) יחשב כמוליך מועמס

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

22



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (16): התקנת כבלים רב גידיים ללא

רווח ביניהם

K_{16} – עבור כבלים רב גידיים ללא רווח ביניהם בהתקנה חשופה לאויר (כמו על סולמות) אופקית או אנכית. בשכבה אחת:

מספר הכבלים	2	3	4	6	9
המקדם	0.80	0.73	0.70	0.68	0.66

בשכבות אחדות או במקובץ:

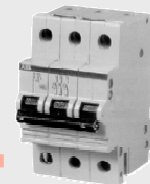
מספר הכבלים	2	3	4	5	6	8	10	12
המקדם	0.80	0.70	0.65	0.60	0.57	0.52	0.48	0.45

הערה: בהתקנה שכולה אופקית ניתן להגדיל את המקדמים בעוד 0.05

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

23



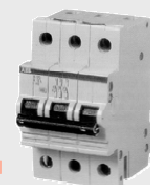
בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (17): השפעת הטמפרטורה העוטפת של האויר

K_{17} – השפעת הטמפרטורה העוטפת של האויר:

טמפרטורה אופפת של האויר [°C]										המקדם
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	
0.66	0.76	0.85	0.91	1.00	1.08	1.15	1.2	1.26	1.31	בידוד 70°C
0.8	0.85	0.9	0.95	1.00	1.04	1.09	1.13	1.17	1.21	בידוד 90°C

טמפ' היחוס של האויר נלקחה כפי שניתן לראות מהטבלה 35°C. בכל טמפ' שונה מזו יש להתחשב במקדם התיקון המתאים



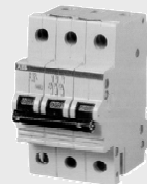
בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (18): השפעת הטמפרטורה העוטפת של האדמה:

K_{18} – השפעת הטמפרטורה של האדמה:

טמפרטורה אופפת של האדמה [°C]										המקדם
55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	
0.61	0.71	0.80	0.87	0.94	1.00	1.07	1.12	1.18	1.22	בידוד 70°C
0.77	0.82	0.87	0.91	0.96	1.00	1.04	1.08	1.12	1.15	בידוד 90°C

טמפ' היחוס של הקרקע נלקחה כפי שניתן לראות מהטבלה 30°C. בכל טמפ' שונה מזו יש להתחשב במקדם התיקון המתאים

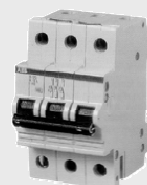


בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (19): התקנת כבלים אחדים באדמה:

K_{19} – התקנת כבלים אחדים באדמה (כבלים חד גידיים המשמשים שני מעגלים תלת פאזיים או יותר):

מספר המעגלים			אופן התקנת המעגלים
4	3	2	
0.59	0.66	0.78	מעגלים צמודים
0.67	0.72	0.83	מעגלים שמרחק בין מעטיהם 7 ס"מ לפחות

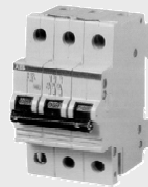


בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פרק ד': מקדמי תיקון תקנה (20): מקדם ההתנגדות התרמית הסגולית של האדמה

K_{20} – מקדם ההתנגדות התרמית הסגולית של האדמה.

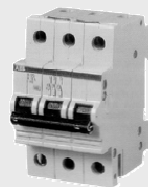
600	500	400	300	250	200	150	120	100	70	התנגדות תרמית סגולית $[^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{watt}]$
0.53	0.58	0.64	0.67	0.74	0.81	0.91	1.00	1.07	1.19	המקדם



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמאות להתנגדויות תרמיות סגוליות של קרקעות שונות שנמדדו בישראל בעומק 80-100 ס"מ בטמפרטורת קרקע של 25°C-35°C.

התנגדות תרמית סגולית °C*cm/Watt	סוג הקרקע
70-100	חול ים עדין
100-150	אדמה חומה
70-100	אדמת גיר או סלע גיר
400-500	אדמת מילוי עם אבנים גדולות (קוטר מעל 10 ס"מ)
150-200	אדמת מילוי עם אבנים קטנות (קוטר עד 5 ס"מ)
120-200	אדמה חומה עם סלע
120-200	אדמה חוורית אפורה יבשה (עמק הירדן)
80-120	אדמה שחורה
100-120	אדמת לס
120-250	אדמת מילוי לס ואבנים.



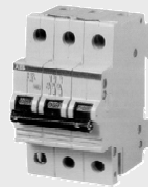
בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

שלבי קביעת חתך המוליכים והמבטחים כאשר ידוע הזרם I_b

א- חישוב מקדם התיקון הכללי K_t . $K_t = K_{15} * K_{16} * K_{17} * K_{18} * K_{19} * K_{20}$

ב- בחירת מפסק זרם מתאים (סוג וערך) $I_n \geq I_b$

ג- הכפלת ערך הזרם הנקוב של המפסק במקדם המתאים כדי לקבל את ערכו של הזרם I_z . מקדם זה שווה ל- 1.11 עבור מא"ז מסוג B או C ושווה ל- 1.046 במפסק זרם אוטומטי הניתן לכיול. הערך המחושב יהיה גודל הזרם המתמיד המרבי שהמוליך יעביר בתנאי התקנה של הטבלאות.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

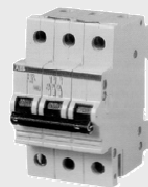
$$I'_z = I_z / K_t$$

-ד קביעת גודל הזרם I'_z :

-ה קביעת חתך המוליך מהטבלה המתאימה לסוג המוליך ושיטת התקנתו. בוחרים את הערך של I_z הקרוב ביותר ל- I'_z והגדול ממנו.

-ו במידה וההתקנה דורשת שימוש במספר כבלים במקביל יש לחזור על החישוב ולהתחשב בהשפעת הכבלים הצמודים.

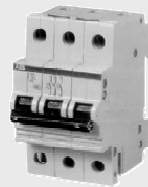
שים לב!!! תכנון זה אינו מביא בחשבון את מפל המתח. על פי חוק החשמל נדרש כי מפל המתח בין לוח החשמל לצרכן לא יעלה על 3%. בסוף מצגת זו מוצגת שיטת חישוב מפלי המתח.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמה 2 – בחירת חתך כבל ומבטח בתנאים חריגים

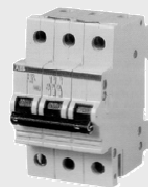
יש לתכנן מעגל זינה ללוח משנה המותקן במפעל. זרם העבודה הצפוי מהפעלת הצרכנים הינו 50 אמפר. כבל ההזנה מנחושת עם בידוד PVC מונח על סולם כבלים בנוסף לחמישה כבלים קיימים המונחים בשכבה אחת. טמפרטורה אופפת 40 מעלות צלסיוס.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

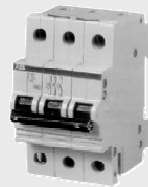
פתרון דוגמה 2 :

מקדם תיקון: 6 כבלים בשכבה אחת: $K_{16}=0.68$
 מקדם תיקון טמפרטורה 40°C : $K_{17}=0.91$
 מקדם תיקון כולל: $K_t = K_{16} \cdot K_{17} = 0.68 \cdot 0.91 = 0.62$
 להגנת הצרכן נבחר מא"ז בעל ערך נקוב של 50A
 $I_z \geq 1.11 \cdot I_n = 1.11 \cdot 50 = 55.5\text{A}$
 חישוב זרם מרבי מותר למוליך בשל התנאים החריגים:
 $I'z = I_z / K_t = 55.5 / 0.62 = 89.5\text{A}$
 לפי שיטת התקנה י"א – טבלה 70.3 – יש לבחור כבל בחתך 25mm^2 המתאים לזרם מרבי טבלאי של 94 אמפר.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 3: צרכן תלת מופעי צורך זרם של 70 אמפר דרך כבל תלת מופעי מנחושת בעל בידוד PVC. הכבל מונח על סולמות בשכבה אחת יחד עם 5 כבלים אחרים. טמפרטורת סביבה (אופפת) 40 מעלות צלסיוס. יש לקבוע את חתך הכבל הנדרש וזרמו הנומינלי של מא"ז סטנדרטי המגן על מעגל זה.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון 3: בהנחת הגנה באמצעות מא"ז

נתון: $I_b = 70A$, שיטת ההתקנה: י"ב

שלב א' מקדם תיקון ל- 6 כבלים בשכבה:

$$K_{16} = 0.68$$

$$K_{17} = 0.91$$

מקדם תיקון טמפ' אופפת שונה מ- $35^{\circ}C$:

$$K_t = K_{16} * K_{17} = 0.68 * 0.91 = 0.62$$

מקדם תיקון כולל:

$$I_n = 80 A \geq I_b = 70 A$$

שלב ב' בחירת מפסק זרם (מא"ז):

$$I_z \geq 1.11 * I_n = 88.8 A$$

שלב ג' זרם מרבי מותר צריך לקיים:

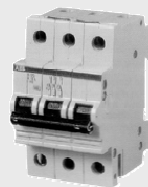
$$I'_z = I_z / K_t = 88.8 / 0.62 = 143.2 A$$

שלב ד' זרם מרבי מתוקן

שלב ה' בחירת שטח חתך הכבל על פי הזרם המתמיד המירבי בטבלה - הערך

הקרוב בטבלה - 70.3 הינו 178A, המתאים לשטח חתך של 70 ממ"ר.

אפשר בדוחק להסתפק בשטח חתך של 50 ממ"ר שמסוגל להוליך זרם מתמיד מרבי של 140 A.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון 3: בהנחת מפסק זרם מתכוון

נתון: $I_b = 70A$, שיטת ההתקנה: י"ב

שלב א' מקדם תיקון ל- 6 כבלים בשכבה:

$$K_{16} = 0.68$$

$$K_{17} = 0.91$$

מקדם תיקון טמפ' אופפת שונה מ- $35^{\circ}C$:

$$K_t = K_{16} * K_{17} = 0.68 * 0.91 = 0.62$$

מקדם תיקון כולל:

$$I_n = 70 A ; I_b = 70 A$$

שלב ב' בחירת מפסק זרם (מא"ז):

$$I_z \geq 1.046 * I_n = 73.22 A$$

שלב ג' זרם מרבי מותר צריך לקיים:

$$I'_z = I_z / K_t = 73.22 / 0.62 = 118 A$$

שלב ד' זרם מרבי מתוקן

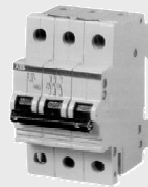
שלב ה' בחירת שטח חתך הכבל על פי הזרם המתמיד המירבי בטבלה - הערך הקרוב

בטבלה - 70.3 הינו 116A המתאים לשטח חתך של 35 ממ"ר או 50 ממ"ר

שמתאים לזרם של 140 A.

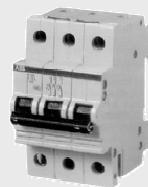
ומכאן: $S = 35mm^2$, $I_n = 70A$.

הערה: בחירת חתך קטן יותר של מוליכי המעגלים נבעה משינוי שיטת ההגנה.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 4: צרכן תלת מופעי צורך זרם של 155 אמפר באמצעות כבלים חד גידיים מאלומיניום עם בידוד XLPE. הכבלים מותקנים במשולש לפי שיטת התקנה י"ד יחד עם עוד 3 כבלים חד גידיים. המעגלים צמודים. קבע את חתך הכבל הנדרש וזרמו הנומינלי של הנתיך המגן על קו זה. טמפ' אדמה אופפת – 35 מעלות צלסיוס.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון 4:

נתון – $I_b = 155 \text{ A}$, שיטת ההתקנה : י"ד

מקדם תיקון ל- טמפ' אדמה: $K_{18} = 0.96$

מקדם תיקון לכבלים חד גידיים במעגל תלת מופעי, צמודים: $K_{19} = 0.78$

מקדם תיקון כולל: $K_t = K_{18} * K_{19} = 0.96 * 0.78 = 0.75$

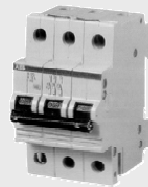
בחירת ההגנה: $I_b = 155 \text{ A}$ המפסק הסטנדרטי הקרוב יהיה $I_n = 160 \text{ A}$, נכיל אותו לזרם הנקוב של הצרכן.

זרם מרבי מותר צריך לקיים: $I_z \geq 1.046 * I_n = 1.046 * 155 = 162.1 \text{ A}$

זרם מרבי מתוקן: $I'_z = I_z / K_t = 162.1 / 0.75 = 216.2 \text{ A}$

הערך הקרוב בטבלה 90.6: כבל חד גידי במעגל תלת מופעי במשולש שהזרם המתמיד המרבי בו הוא 218 אמפר. ערך זה מתאים לכבל ששטח חתך מוליכיו 95 mm^2

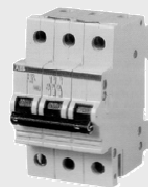
ומכאן: $I_n = 155 \text{ A}$, $S = 95 \text{ mm}^2$



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 5: לוח חשמל מוזן באמצעות כבל תלת מופעי רב גידי מאלומיניום, בידוד פוליאטילן מוצלב הכבל מונח יחד עם שלושה כבלים רב גידיים אחרים בתוך תעלה רחבה סגורה. טמפרטורת סביבה בתעלה – 35 מעלות צלסיוס. הספק הצרכן : 65 קווא"ט, מקדם הספק – 0.85, מתח נקוב 400 וולט.

א. מצא את חתך הכבל המתאים להזנת הלוח הנתון ואת הזרם הנקוב של המפסק האוטומטי הניתן לכוונון להגנה בפני עומס יתר בלבד.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 5 , פתרון

מקדם התיקון עבור כבל רב גידי תלת מופעי מאלומיניום בתעלה רחבה המותקן בשיטת התקנה ד' 4 כבלים בתעלה ללא רווח ביניהם $K_{16} = 0.70$.

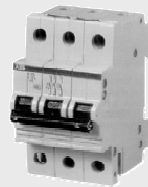
$$I_b \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = \frac{65,000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.85} = 110.5A: \text{זרם עבודה ממושך של הצרכן}$$

במפסק הניתן לכיול מהסוג המופיע בדרישות התרגיל פיתחנו:

$$I_n \leq 0.956 \cdot I_z \Rightarrow I_z \geq \frac{I_n}{0.956} = 1.046 I_n$$

בחירת ההגנה: אם זרם המפסק יכוייל לערך זרם הצרכן אזי הערך המזערי של הזרם המתמיד המירבי שהכבל חייב לעמוד בו:

$$I_z \geq \frac{I_n}{0.956} = 1.046 \cdot 110.5 = 115.6A$$



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

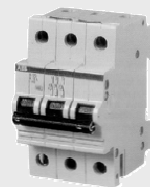
דוגמא 5, המשך פתרון

חישוב הזרם תוך התחשבות במקדמי תיקון: $I'_z \geq \frac{I_z}{K_t} = \frac{115.6A}{0.7} = 165.1A$

מטבלה 90.2 לאור תנאי ההתקנה נבחר כבל בשטח חתך 95mm^2 שמסוגל להעביר זרם מתמיד מירבי בשיעור של $187A$.
שים לב!!! אם יבחר מא"ז של $125A$ במקום מפסק הניתן לכיול, המוליך הנבחר אינו מובטח מפני העמסת יתר.

$$I_z \geq 1.11 \cdot I_n = 1.11 \cdot 125 = 138.7A$$

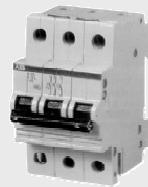
$$I'_z \geq \frac{I_z}{K_t} = \frac{138.7A}{0.7} = 198.2A$$



מבטחים והתקנתם

דוגמא 6

נתון שנאי בהספק של 630kVA . השנאי מזין לוח ראשי באמצעות כבלים המונחים צמודים זה לזה על תעלת רשת. יש לקבוע את מספר הכבלים ואת שטח החתך שלהם עבור מוליכים מנחושת בעלי בידוד XLPE. טמפ' הסביבה 45°C .



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 - פתרון

$$I_b = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0.4} = 910A$$

זרם השנאי:

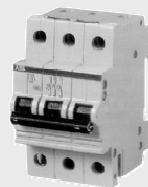
הכבלים בעלי שטח חתך מרבי במעגל תלת מופעי בטבלה 90.3 א' הם בשטח חתך $120mm^2$. כבלים אלה יכולים להוליך זרם מתמיד מרבי של 313A. לכן, יש צורך בלפחות 4 כבלים במקביל בכל מופע ו-4 כבלים במקביל עבור מוליך האפס. סה"כ 16 כבלים המונחים במקובץ.

מקדם התיקון עבור 16 כבלים מבודדים או יותר, ללא רווח ביניהם בהתקנה חשופה לאויר (כמו על סולמות) אופקית או אנכית המונחים במקובץ יהיה:

$$K_{15} = 0.51$$

$$K_{17} = 0.9$$

מקדם התיקון בגין הטמפרטורה:



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

$$K_T = K_{15} \cdot K_{17} = 0.51 \cdot 0.9 = 0.46$$

מקדם התיקון הכללי:

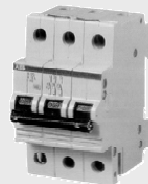
$$I_z = \frac{I_b}{K_T} = \frac{910}{0.46} = 1978A$$

קטע המעגל אינו מכיל נתיכים או מפסקים לפיכך אין צורך לשלב מקדם תיקון בין I_n ל- I_z והזרם המתמיד המרבי המתוקן:

$$n = \frac{I_z}{I_{z_1}} = \frac{1978}{313} = 6.3$$

מספר הכבלים במקביל הנדרש להולכת זרם זה:

ההתקנה תכלול 7 כבלים במקביל בכל מופע. מקדם התיקון אינו משתנה מאחר ונדרשים יותר מ-16 כבלים.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

בחירת כבל מתאים מקטלוג יצרן תאפשר שימוש בכבל בעל שטח חתך גדול יותר והקטנת מספר המוליכים במקביל.

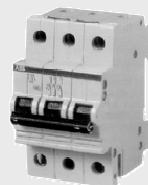
נתבונן בקטלוג כבלים של חברת סינרג'י ונבחר כבלים מנחושת חד גידיים. שים לב!!! הזרם הנתון בטבלאות מתייחס לטמפ' אופפת של 30°C ולא 35°C כבתקנות החשמל.



סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

44



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

Catalog Number	No. and Nominal cross sectional area of conductors	Nominal insulation thickness	Nominal sheath thickness	Approximate outer diameter	Approximate cable weight	Minimum bending radius	Max. conductor resistance at 20 °C	Short circuit rating (1 sec) (1)	Current rating (2)		Voltage Drop (5)	
									In Air (3)	Buried (4)	Single Phase AC	Three Phase AC
	No. x mm ²	mm	mm	mm	kg/km	mm	Ω/km	kA	A	A	mV/A/m	mV/A/m
181001	1 x 10	0.7	1.8	9	180	135	1.83	1.4	77	90	4.7	4.0
1810027	1 x 16	0.7	1.8	10	210	150	1.15	2.3	102	115	2.9	2.5
1810037	1 x 25	0.9	1.8	13	310	195	0.727	3.6	139	149	1.85	1.60
1810047	1 x 35	0.9	1.8	14	410	210	0.524	5.0	170	178	1.35	1.15
1810057	1 x 50	1.0	1.8	15	530	225	0.387	7.2	208	211	1.00	0.87
1810067	1 x 70	1.1	1.8	18	750	270	0.268	10.0	265	259	0.71	0.61
1810087	1 x 95	1.1	1.8	19	970	285	0.193	13.6	326	310	0.52	0.45
181009	1 x 120	1.2	1.8	22	1270	330	0.153	17.2	381	352	0.43	0.37
181010	1 x 150	1.4	1.8	24	1550	360	0.124	21.5	438	396	0.36	0.31
1810111	1 x 185	1.6	1.8	27	1950	405	0.0991	26.5	507	449	0.30	0.26
1810121N	1 x 240	1.7	1.8	30	2560	450	0.0754	34.3	606	521	0.25	0.22
181014	1 x 300	1.8	1.8	32	3050	480	0.0601	42.9	697	587	0.22	0.195
1810151	1 x 400	2.0	2.0	33.5	3950	503	0.0470	57.2	816	669	0.20	0.175

(1) Short circuit rating is based on an initial conductor temperature of 90 °C and a final temperature of 250 °C.

(2) Current rating based upon operation at 90 °C conductor, three-phase a.c. load. According to VDE 0298.

(3) Cable laid in trefoil touching in freely circulating air at 30 °C, protected against direct thermal radiation due to sun, etc.

(4) Cable directly buried in trefoil touching at 0.7 m deep in soil at 20 °C, with 1 K . m/W thermal resistivity. Load factor 0.7.

(5) Voltage drop according to BS 7671:1992.3 assuming that the conductor temperature is 90 °C, the load is balanced and the phase angle of the cable equals that of the load. Single-phase (two cables) touching or three-phase in trefoil touching.

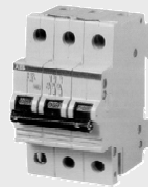
TEMPERATURE RATING FACTORS (Protection against short-circuit only). According to BS 7671:1992.3

Ambient Temperature °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Correction factor air	1.08	1.04	1.00	0.96	0.91	0.87	0.82	0.76	0.71	0.65
Correction factor ground	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.80	0.76	-	-	-

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

45



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

מקדם התיקון הכללי בהנחה של 12 כבלים בשכבה אחת:

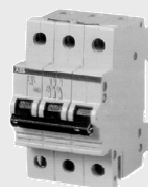
$$K_T = K_{15} \cdot K_{17} = 0.63 \cdot 0.91 = 0.573$$

קטע המעגל אינו מכיל נתיכים או מפסקים לפיכך אין צורך לשלב מקדם תיקון בין I_n ל- I_z והזרם המתמיד המרבי המתוקן:

$$I_z = \frac{I_b}{K_T} = \frac{910}{0.573} = 1587 A$$

מספר הכבלים במקביל הנדרש להולכת זרם זה:

ההתקנה תכלול 3 כבלים במקביל בכל מופע ו-3 כבלים עבור אפס (זה אכן מה שמבוצע בפועל בדר"כ).



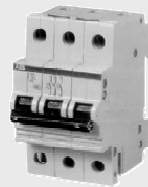
מבטחים והתקנות

דרישת התקנות בנוגע להתקנת המבטחים:

תקנה 5 (ג): - במפסק זרם אוטומטי הניתן לכוונון, הכיוונון יהיה ניתן לשינוי באמצעות כלים בלבד.
- על המפסק או בצמוד אליו ימצא שלט או סימון ברור ובר קיימא, שבו יצוין זרם חל המותר למעגל המוגן.

תקנה 5 (ד): כאשר משתמשים במבטח משותף להגנת מספר מוליכים במקביל בפני העמסת יתר, יקוימו במוליכים כל התנאים הבאים:

- א-** הם יהיו מאותו חומר
- ב-** הם יהיו בעלי חתך שווה
- ג-** הם יהיו בעלי אורך שווה
- ד-** אבזרי החיבור שלהם ואופן התקנתם יהיו זהים
- ה-** טמפרטורת העבודה של בידודם תהיה זהה



מבטחים והתקנתם

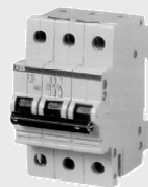
בעת התכנון יש לוודא בדיקת עמידת המבטחים והמוליכים בזרמי קצר.

הגנת המתקן בפני זרם קצר קשורה בהיבטים הבאים:

א- כושר הניתוק של המבטחים.

ב- הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר.

ג- עמידה בהלם חום בזרם קצר.



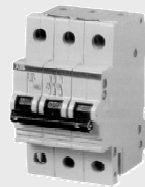
מבטחים והתקנתם

א. כושר ניתוק:

מוגדר כזרם קצר (או הספק קצר) מרבי אותו יכול המבטח להפסיק ללא נזק לו ולסביבתו (כגון: התפרקותו/התפוצצותו).

- נדרש לבדוק שהמבטחים מסוגלים להפסיק את זרם הקצר המרבי העלול להתרחש במקום התקנתם.
- נתיכים מצטיינים על פי רוב בכושר ניתוק גבוה מ- 80kA ועד 120kA.
- במפסקי זרם מצוין כושר הניתוק של זרם קצר ע"י I_{CU} . נתון זה מופיע על שלט מפסק הזרם ומציין את עוצמת זרם הקצר שמפסק הזרם מסוגל להפסיק פעמיים.
- כושר הניתוק של מא"זים הינו בדרך כלל 6kA עד 10kA.
- קיימים מא"זים בעלי כושר ניתוק של 20kA ויותר. במתקני חשמל ביתיים משתמשים בדרך כלל במא"זים בעלי כושר ניתוק של 6kA. מאחר ואין על פי רוב חשש שזרם הקצר יעלה על ערך זה. במתקנים תעשייתיים ובצרכנים גדולים יש חשש שהמא"ז לא יעמוד בזרם הקצר המירבי ויש לחשב את ערכו.

כושר ניתוק



6kA



סגל אריאל

Tmax T2L 160	Iu=160A Ue=690V Ui=800V Uimp=8kV IEC 60947-2							
Ue (V)	230	400/415	440	500	690	250	500	Made in Italy by ABB SACE
Icu (kA)	150	85	75	50	10	85	85	
Ics (% Icu)	75	75	75	75	75	75	75	
Cat A	~ 50-60Hz					2 P == 3 P in series		CE

120kA



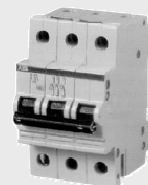
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

85kA



50

מבטחים והתקנות

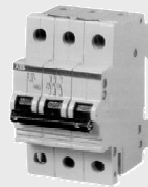


ב. הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר.

המבטח חייב לענות על 2 תכונות חשובות:

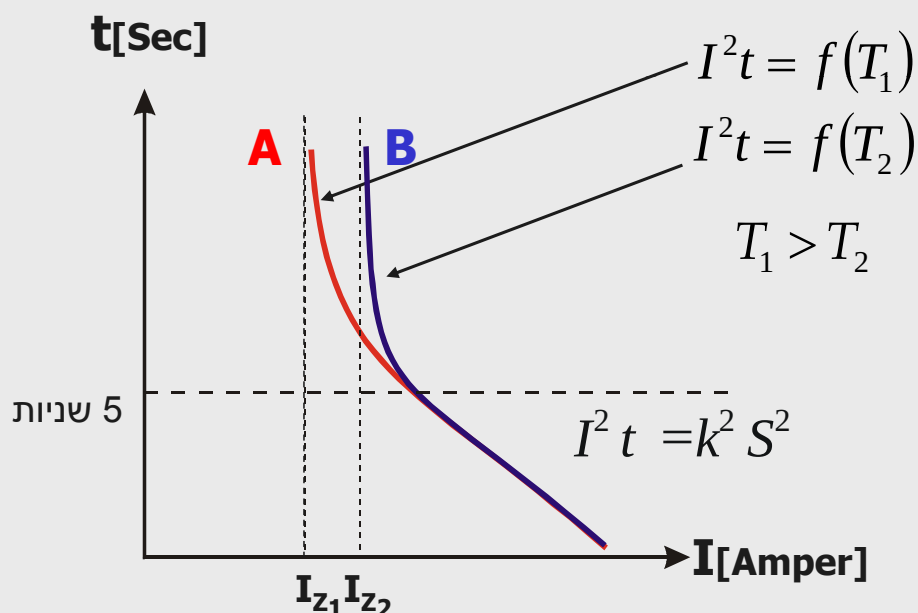
1. הפסקת המעגל במצבי קצר בזמן קצר מהזמן המרבי המותר t שבו בזרם נתון נשמרת עדיין שלמות הבידוד. אך לא יותר מ- 5 שניות.
 הקשר המתמטי נתון ע"י: $I^2 t = K^2 S^2$

2. לאפשר פעולה לזמן בלתי מוגבל של זרם I_b – הזרם הנקוב של המעגל.



מבטחים והתקנתם

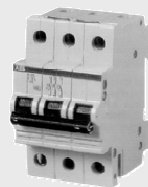
אופיין I^2t של מוליך מבודד, ב-2 ערכים שונים
של טמפ' אופפת:



סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

52



מבטחים והתקנתם

הגרף מתאר אופיין I^2t של מוליך מבודד. ערך זה מבטא למעשה, את כמות החום הנפלטת מהמוליך בעת מעבר זרם I דרכו לכל אוהם של התנגדות המוליך עד הפסקת הזרם באמצעות המבטח. החלק העליון של האופיין מתייחס למעבר זרם דרך המוליך במשך זמן העולה 5 שניות. קטע זה של האופיין תלוי במידה רבה בטמפרטורת הסביבה.

אופין A בטמפ' סביבה T_1 .

אופין B בטמפ' סביבה T_2 .

טמפרטורת הסביבה T_1 גדולה מהטמפ' T_2 . לכן, הזרם המרבי שניתן להזרים במוליך קטן יותר.

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

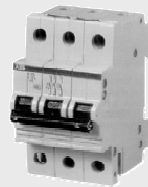
53



מבטחים והתקנות

החלק התחתון באופין מתייחס לפרק זמן קטן מ-5 שניות. מתוך הנחה שבמהלך 5 השניות אין חילופי חום עם הסביבה (התחממות אדיאבטית) האופין בתחום זמנים זה הוא בקירוב קו ישר. $I^2 t = K^2 S^2$. מחילוץ t יתקבל פרק הזמן שבו מוליך בעל שטח חתך S יגיע לטמפרטורה של 160°C עבור בידוד P.V.C ו- 250°C עבור בידוד XLPE (בהתאם למקדם K).

$$t = \frac{K^2 S^2}{I^2} = \left[\frac{KS}{I_{K \min}} \right]^2$$

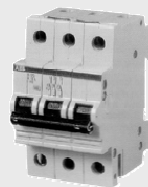


מבטחים והתקנתם

חתך מוליכי המעגל והמבטח חייבים להתאים כך שזרם קצר יופסק ע"י המבטח תוך מספר שניות אך לא יותר מאשר 5 שניות.

$$t_{TH} = \frac{k^2 s^2}{I_{kmin}^2} = \left[\frac{ks}{i_{kmin}} \right]^2 \geq t_{br} \leq 5Sec$$

t_{TH} משך קיום הקצר בשניות שבו מגיעה טמפרטורת המוליך לערך:
 $160^\circ C$ לבידוד $70^\circ C$ (PVC) כשהטמפרטורה ההתחלתית היא $70^\circ C$
 $250^\circ C$ לבידוד $90^\circ C$ (XLPE) כשהטמפרטורה ההתחלתית היא $90^\circ C$
 התכנון חייב להבטיח שפרק זמן זה ארוך מזמן תגובת המבטח t_{br}
 S – שטח חתך המוליך בממ"ר.
 I_{kmin} – זרם קצר חד פאזי הצפוי בנקודה המרוחקת ביותר של המעגל.
 k – מקדם התלוי בסוג המוליך ובידודו וניתן בטבלה:



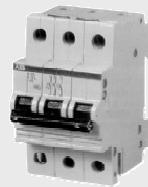
מבטחים והתקנתם

ערך המקדם k

k	טמפ' מירבית		סוג המוליך	
	בקצר	מתמדת	חומר	בידוד
115	160	70	נחושת	P.V.C
74	160	70	אלומיניום	
140	250	90	נחושת	X.L.P.E
90	250	90	אלומיניום	

K^2

Insulation	Conductor copper (Cu)	Conductor aluminium (Al)
PVC	13,225	5,776
XLPE	20,449	8,836



מבטחים והתקנתם

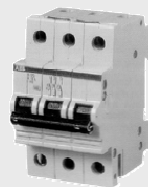
לאחר קביעת ההגנה בפני **העמסת יתר**, יש לבדוק אם המבטח יכול להפסיק את המעגל תוך **5 שניות** לכל היותר גם בזרם קצר מזערי. על פי תקן IEC-364-5 ניתן לחשב את זרם הקצר החד פאזי המזערי לאדמה בנקודה המרוחקת ביותר ובירידת מתח הרשת ל- $0.8U_L$. למתקן המוגן **בשיטת האיפוס** ע"י:

$$I_{K \min} = \frac{0.8 \cdot U_L}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot (R_{ph} + R_N)}$$

כאשר:

- U_L – מתח שלוב ברשת.
- 0.8** – מקדם ירידת המתח בתנאי קצר במערכת.
- 1.5** – מקדם הגדלת התנגדות המוליכים בגלל התחממותם בתנאי קצר.
- R_{ph} – התנגדות מוליך הפאזה.
- R_N – התנגדות מוליך האפס.

הערה: עדיף להתחשב בנתון עכבת לולאת התקלה במקום סכום ההתנגדויות



מבטחים והתקנתם

תרגיל דוגמא:

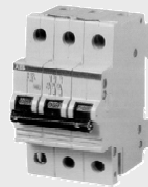
יש לחשב את האורך המרבי ועמידותו התרמית בקצר של מעגל חשמלי העשוי מכבל בעל בידוד XLPE ומוליכי נחושת בשטח חתך 10 ממ"ר, המעגל מוגן על ידי מא"ז בעל ערך נקוב של 63A. מתח הרשת השלוב 400V, עכבת לולאת התקלה שנמדדה בלוח החשמל ממנו מוזן הכבל היתה 0.3Ω

פתרון

$$I_{K \min} = 6.6 I_n = 6.6 \cdot 63 = 415.8A$$

$$Z_{Loop} \leq \frac{U_{ph}}{I_{K \min}} = \frac{230}{415.8} = 0.553\Omega$$

$$Z_{cable_{max}} = Z_{Loop} - Z_{board} = 0.553 - 0.3 = 0.253\Omega$$



מבטחים והתקנתם

המשך פתרון תרגיל דוגמא:

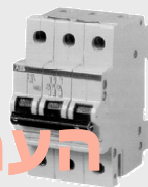
בהזנחת ההיגב ההשראי של הכבל (בשל שטח החתך הקטן):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \Rightarrow l = \frac{R \cdot A}{\rho} = \frac{0.253 \cdot 10}{0.018} \cong 140m$$

האורך המרבי של הכבל יהיה 70 מטר. בפועל על אורך זה להיות קטן יותר בשל עלית התנגדות המוליכים בעת התחממותם, וכן בשל המתח הירוד בעת קצר.

$$t_{TH} = \left[\frac{K \cdot S}{I_{K_{min}}} \right]^2 = \left[\frac{140 \cdot 10}{415.8} \right]^2 = 11.3Sec$$

זמן התחממות המוליך לטמפרטורה של $250^{\circ}C$ עדין גדול משמעותית ממשך זמן פעולת המא"ז. שימוש בכבל ארוך יותר תסכן את המתקן.



הערך המרבי של אנרגיית המעבר במוליכים

$K^2 S^2 \cdot 10^{-6}$ של מוליכים שונים

S (mm ²)	PVC		XLPE	
	Copper	Aluminium	Copper	Aluminium
1.5	0.0297	0.0130	0.0460	0.0199
2.5	0.0826	0.0361	0.1278	0.0552
4	0.2116	0.0924	0.3272	0.1414
6	0.4761	0.2079	0.7362	0.3181
10	1.3225	0.5776	2.0450	0.8836
16	3.3856	1.4786	5.2350	2.2620
25	8.2656	3.6100	12.7806	5.5225
35	16.2006	7.0756	25.0500	10.8241
50	29.839	13.032	46.133	19.936

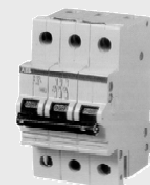
Operating current level I_m of the instantaneous magnetic tripping element (in A)	c.s.a. (nominal cross-sectional-area) of conductors (in mm^2)															
	1.5	2.5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	
50	100	167	267	400												
63	79	133	212	317												
80	63	104	167	250	417											
100	50	83	133	200	333											
125	40	67	107	160	267	427										
160	31	52	83	125	208	333										
200	25	42	67	100	167	267	417									
250	20	33	53	80	133	213	333	467								
320	16	26	42	63	104	167	260	365	495							
400	13	21	33	50	83	133	208	292	396							
500	10	17	27	40	67	107	167	233	317							
560	9	15	24	36	60	95	149	208	283	417						
630	8	13	21	32	63	85	132	185	251	370						
700	7	12	19	29	48	76	119	167	226	333	452					
800	6	10	17	25	42	67	104	146	198	292	396					
875	6	10	15	23	38	61	95	133	181	267	362	457				
1000	5	8	13	20	33	53	83	117	158	233	317	400	435			
1120	4	7	12	18	30	48	74	104	141	208	283	357	388	459		
1250	4	7	11	16	27	43	67	93	127	187	253	320	348	411		
1600		5	8	13	21	33	52	73	99	146	198	250	272	321	400	
2000		4	7	10	17	27	42	58	79	117	158	200	217	257	320	
2500			5	8	13	21	33	47	63	93	127	160	174	206	256	
3200			4	6	10	17	26	36	49	73	99	125	136	161	200	
4000				5	8	13	21	29	40	58	79	100	109	128	160	
5000				4	7	11	17	23	32	47	63	80	87	103	128	
6300					5	8	13	19	25	37	50	63	69	82	102	
8000					4	7	10	15	20	29	40	50	54	64	80	
10000						5	8	12	16	23	32	40	43	51	64	
12500						4	7	9	13	19	25	32	35	41	51	

אורך מרבי במטרים עבור מוליכי נחושת (עבור אלומיניום יש לכפול ב- 0.62)

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

61



אורך מרבי של המעגל

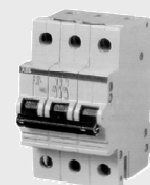
אורך מרבי במטרים עבור מוליכי נחושת (עבור אלומיניום יש לכפול ב- 0.62)

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

61

מבטחים והתקנתם



ג. עמידה בהלם חום בזרם קצר.

כאשר t קטן מ- 0.1 שנייה או כאשר המבטח מגביל את זרם הקצר, יבחר המבטח אשר בו הלם החום של זרם הקצר (האנרגיה שהמפסק מסוגל לפזר) קטנים ממכפלת k בריבוע ו- S בריבוע.

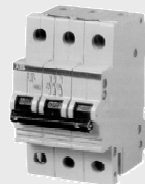
$$\int I^2 dt < k^2 s^2$$

את הלם החום מקבלים מתוך קטלוגי היצרן ואותם משווים למכפלה: $k^2 S^2$ הלם החום נקרא בספרות גם אנרגיית מעבר - Let through energy מושג זה מיטיב לתאר את תופעת קליטת האנרגיה מהמעגל ע"י המפסק עד לרגע ההפסקה. הלם החום מופיע תחת הסימול: אינטגרל ג'אול ונמדד ביחידות של $A^2 sec$

סגל אריאל

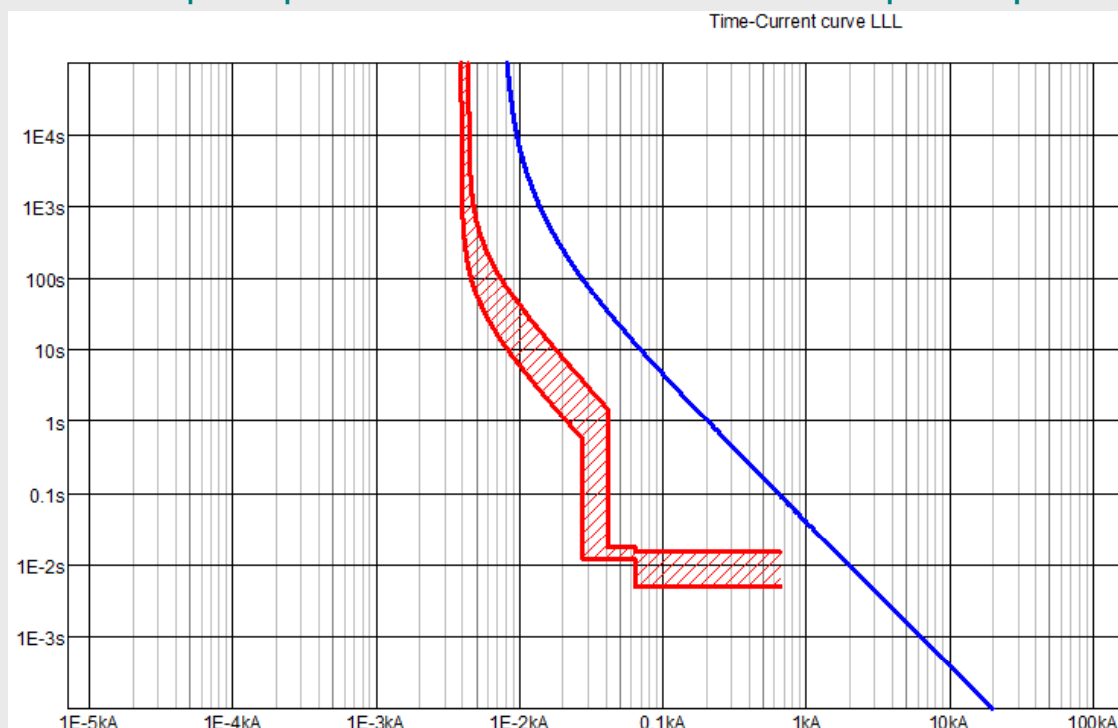
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

62



מבטחים והתקנתם

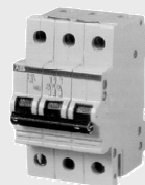
אופן המפסק לעומת יכולת הספיגה של המוליכים בקצר 3p סימטרי



סגל אריאל

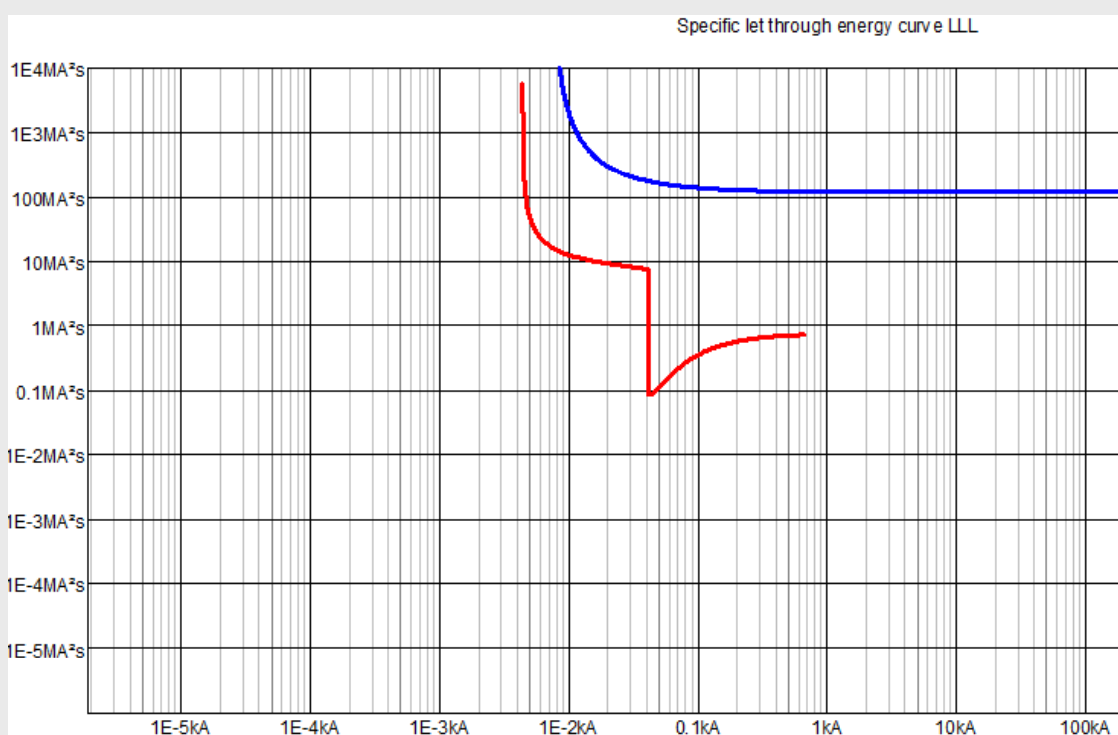
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

63



מבטחים והתקנתם

אנרגיית המעבר של המפסק לעומת יכולת הספיגה של המוליכים

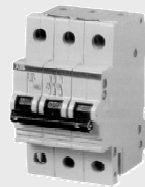


סגל אריאל

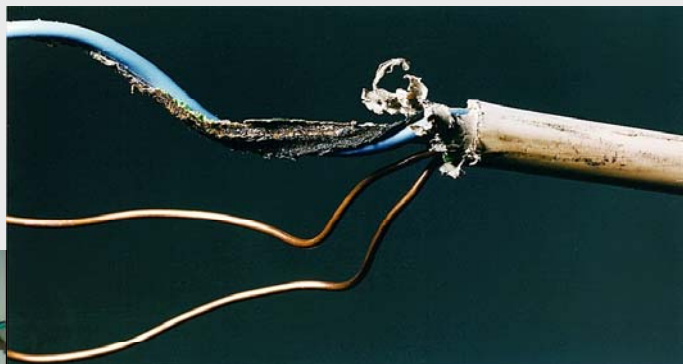
העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

64

מזה נרצה להמנע



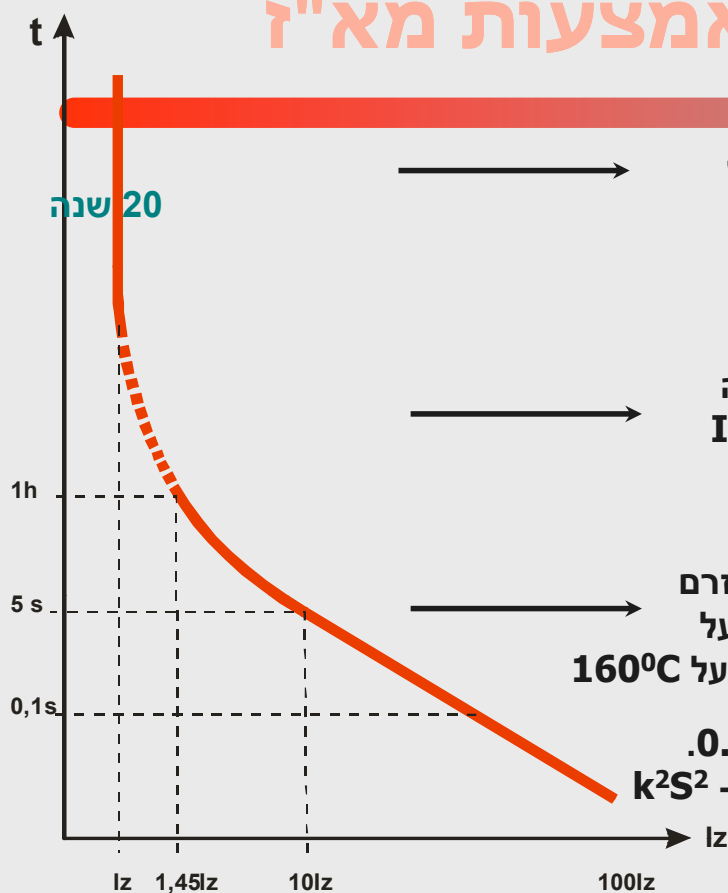
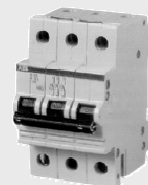
סגל אריאל



העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

65

הגנה באמצעות מא"ז



אזור פעולה בלתי מוגבלת בטמפ' עבודה עד 70°C

אזור מסירת חום מוגבלת לסביבה
תוך עומס יתר של $I_n \leq 1.3 * I_z$

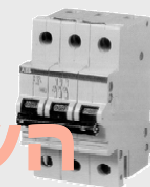
אזור ללא מסירת חום לסביבה. בזרם תקלה שמשכו המירבי אינו עולה על 5 שניות, טמפ' הבידוד לא תעלה על 160°C

אזור בו זמן ההפסקה קצר מ- 0.1s .
 I^2t של המא"ז חייב להיות קטן מ- k^2S^2 של המוליך המוגן.

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

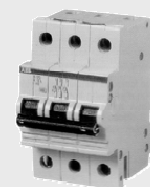
66



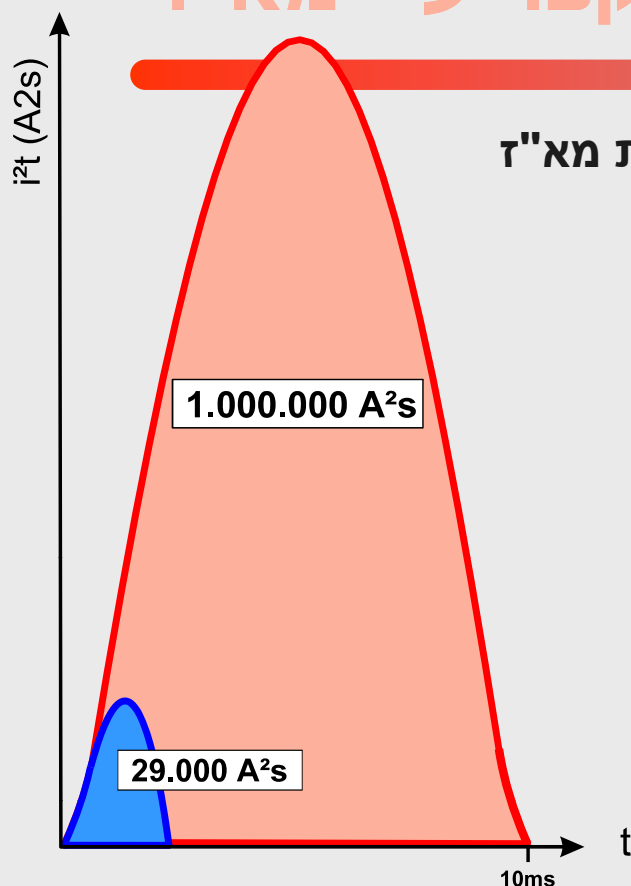
השפעת הטמפרטורה על מוליכי PVC

משך חיים בשל השפעת החימום על מוליך יחיד בעל בידוד PVC

שנות חיים	טמפרטורה מתמידה של המוליך
20,0 years	70°C
2,5 years	90°C
1,0 years	100°C



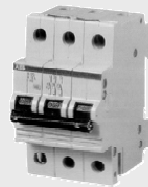
הגבלת אנרגיית הקצר ע"י מא"ז



הגבלת האנרגיה וזרם הקצר באמצעות מא"ז
עבור זרם קצר צפוי של 10kA.

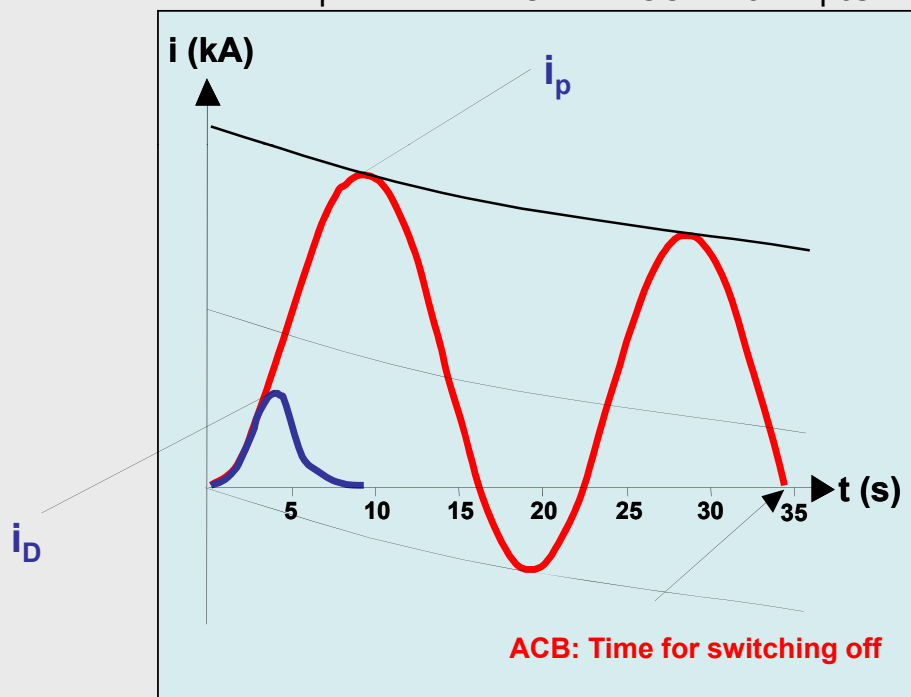
באדום האנרגיה ללא הגבלת זרם

בכחול האנרגיה בשל הגבלת זרם
ע"י מבטח מסוג S280



הגבלת אנרגיית הקצר ע"י מא"ז

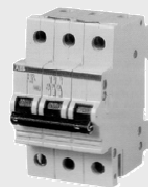
- מפסק אויר או מפסק שאינו מגביל זרם קצר
- מפסקים מסוג MCB או MCCB מגבילי זרם קצר



סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

69



מבטחים והתקנתם

סדרת S260

ג. עמידה בהלם חום בזרם קצר - דוגמא.

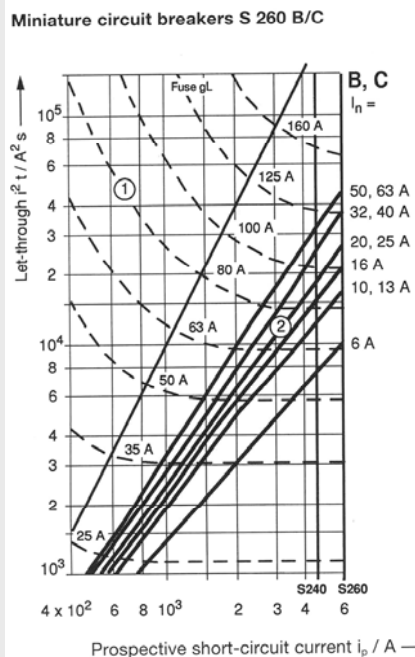
נתון מוליך אלומיניום בשטח חתך 25 ממ"ר בעל בידוד PVC המוגן ע"י מא"ז של 63A מתוך הטבלה: $k=74$

$$k^2 s^2 = 74^2 * 25^2 = 3,422,500$$

מא"ז של 63A בעל אופין C מסדרה S-260 מתוצרת ABB בזרם קצר של 6kA מאפשר העברת אנרגיה של כ- $4.5 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \text{Sec}$ (מתוך הגרף משמאל)

$$\int I^2 dt = 45,000 < k^2 s^2 = 3,422,500$$

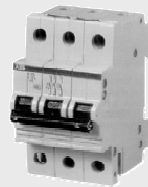
ניתן לראות בבירור כי הדרישה מתקיימת.



סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

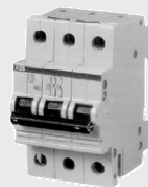
70



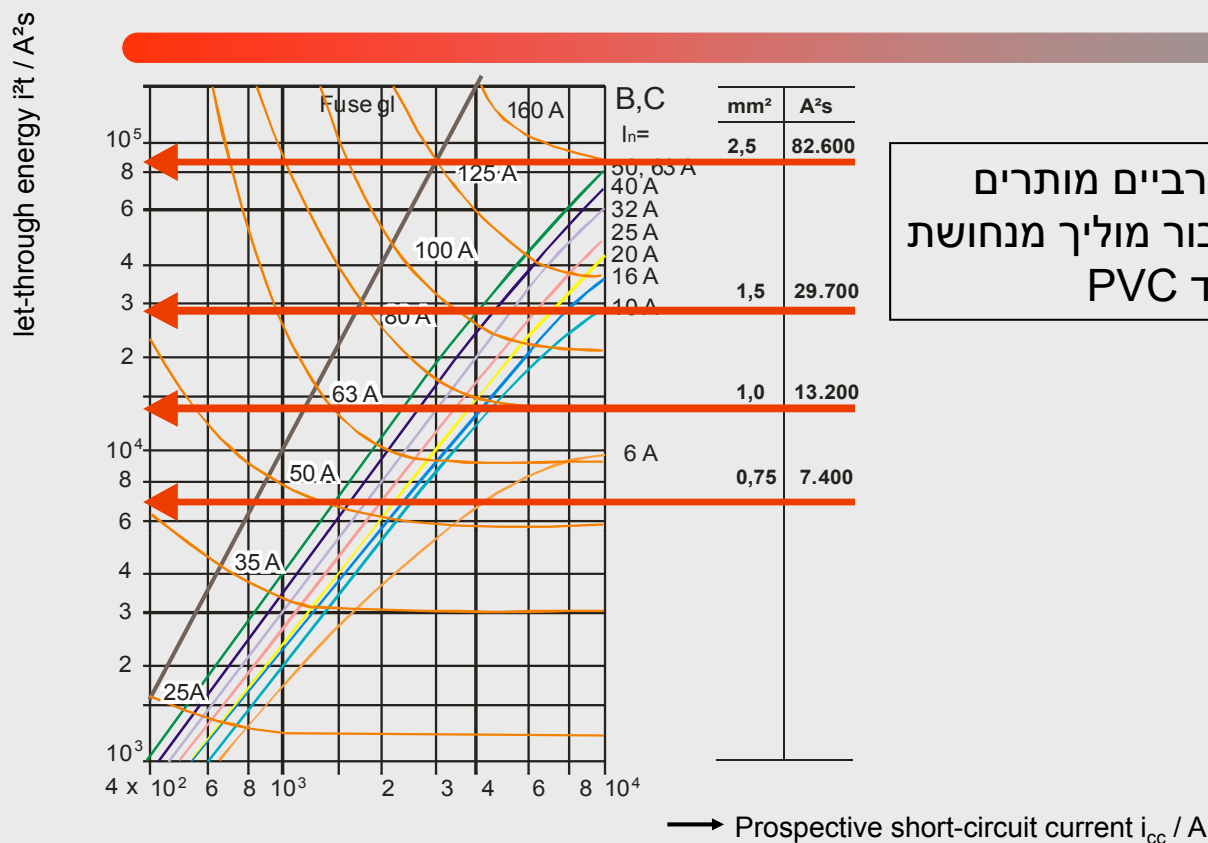
ערכים מרביים של I^2t

מוליכים מנחשת בעל בידוד PVC

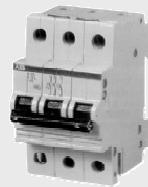
שטח חתך בממ"ר		I^2t
2,50 mm ²	○	82.600 A ² s
1,50 mm ²	○	29.700 A ² s
1,00 mm ²	○	13.200 A ² s
0,75 mm ²	○	7.400 A ² s
0,14 mm ²	○	260 A ² s



אופייני I^2t



ערכים מרביים מותרים
של I^2t עבור מוליך מנחשת
בעל בידוד PVC



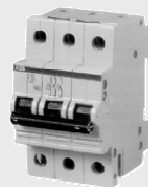
מבטחים והתקנות

עמידת מבטח בזרם התנעה:

לאחר שנקבעו המא"זים, המפסקים או הנתיכים לפי הטבלאות והחשובים הקודמים, יש לבדוק את עמידתם ללא ניתוק הזרם, בזרם התנעה של מנועי השראה רוטור כלוב. זרם זה נמשך על פי רוב עד מספר שניות. לכן מומלץ לבדוק את קיום התנאי:

$$I_{5sec} \geq 1.3 I_{st}$$

במידה ותנאי זה אינו מתקיים יש לקבוע מבטח גדול יותר ולהגדיל את חתך המוליכים בהתאמה למבטח.
אין להשתמש במא"ז מסוג (L) B עבור מנועים.



מבטחים והתקנות

הגנת מוליכים באמצעות מפסקי זרם אוטומטיים מתכווננים:

מפסקים אלה מתאפיינים על פי רוב בנתונים הבאים:

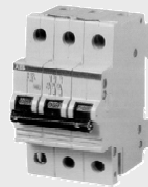
I_n - הזרם הנקוב של המפסק

I_{th} - זרם הכוונון של הממסר התרמי. זרם זה נע בדרך כלל מ- $0.6 I_n$ עד ל- I_n .

I_m - זרם הכוונון של המנגנון המידי נע בדרך כלל מ- $(2-6) I_n$ עד ל- $12 I_n$.

I_{Kn} - כושר הניתוק הנע בדרך כלל מ- $10kA$ ועד $100-150 kA$.

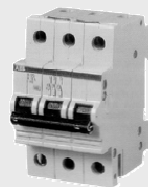
$\int I^2 dt$ - הלם החום של זרם הקצר. ערכו ביחידות A^2S שונה מיצרן ליצרן.



מבטחים והתקנות

במפסקים אוטומטיים חייבות להתקיים גם הדרישות הבאות:

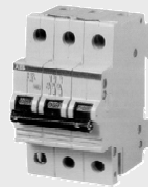
- א** שינוי כוונון יהיה רק בעזרת כלים.
- ב** עליו או בצמוד אליו חייב להימצא שלט או סימון ברור שבו יצוין הזרם I_n המותר במעגל.



מבטחים והתקנות

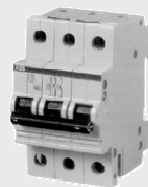
דרישות ממבטח להגנה בפני זרם קצר בלבד:

- א** צריך להפסיק את זרם הקצר .
- ב** כושר הניתוק שלו חייב להיות גדול מזרם הקצר המירבי הצפוי לעבור דרכו.
כאשר במעלה המעגל מותקן מבטח אחר בעל כושר ניתוק כנדרש שיפעל לפני מבטח שכושרו קטן והמבטח שכושרו קטן, מסוגל להעביר את זרם הקצר הצפוי, עד להפסקתו ע"י המבטח שבמעלה המעגל, ללא נזק לו ולסביבתו, ניתן לוותר על דרישה זו.



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

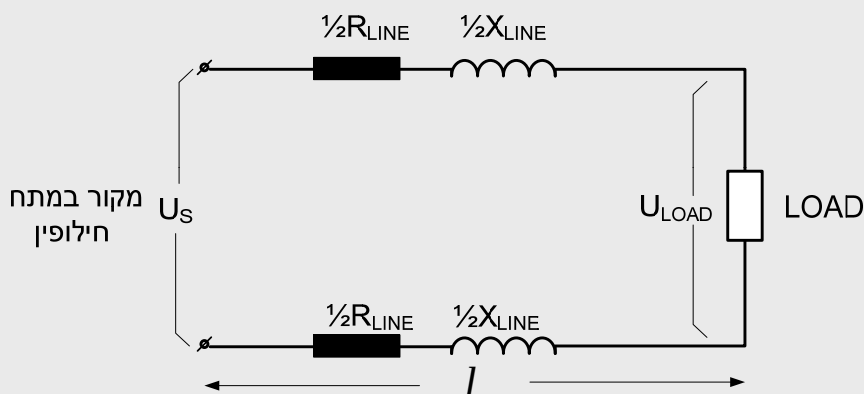
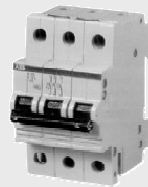
- מוליכי אספקה שמשמשים לאנרגיה בזרם ישר הם בעלי התנגדות פעילה בלבד. בזרם חילופין קיימת גם כן התנגדות זו אך אליה מתווסף היגב השראי.
- ההיגב ההשראי מקורו בעובדה שמוליך שזורם בו זרם יוצר סביבו שדה מגנטי. כאשר שדה זה קבוע (כתוצאה מזרם ישר), לא נוצר כא"מ נגדי במוליך. אולם כאשר השדה משנה את עוצמתו כתלות בזמן (בשל השתנות עוצמת הזרם), נוצר במוליך כא"מ מושרה נגדי ששואף להזרים זרם בכוון הפוך. כא"מ זה הוא תגובה לזרם החשמלי במוליך וגורם להפחתת הזרם במוליך בדומה להתנגדות. מתארים את ההפחתה הזו כהיגב השראי כלומר תגובת המוליך לזרם החשמלי דרכו. תגובה זו אינה גורמת לאובדן הספק פעיל אלא למפל מתח המוזז ב-90 מעלות ביחס לזרם במוליך.



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

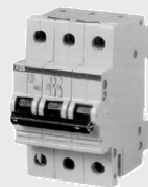
- מידת ההיגב ההשראי תלויה ביחס ישר בעוצמת השדה המגנטי סביב למוליך כלומר בזרם. במערכת מוליכים (מופע ואפס או מערכת תלת מופעית) יהיה ההיגב ההשראי תלוי בשדה המגנטי השקול של המערכת. לפיכך כאשר המוליכים קרובים זה לזה (באותו כבל, או צמודים במבנה תילתן), יהיה ההיגב ההשראי של המוליכים קטן יחסית, אולם כשהמוליכים מרוחקים זה מזה כפי שקיים בקוי הולכת חשמל עיליים יהיה ההיגב ההשראי גדול בהרבה מהתנגדותם הפעילה.

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



סכימת תמורה של מעגל בזרם חילופין חד מופעי.

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

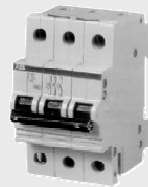


- לקו חד מופעי (בעל שני מוליכים) תהיה עכבה כוללת השווה לסכום ההתנגדויות וסכום ההיגבים ההשראיים של המוליכים.
- החלק בעל ההתנגדות הפעילה של הקו יהיה:

$$R_{Line} = \frac{\rho \cdot 2 \cdot l}{A}$$

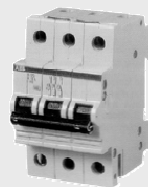
- החלק בעל ההיגב ההשראי של הקו יהיה:

$$X_{Line} = 2 \cdot \omega \cdot L_{Line}$$



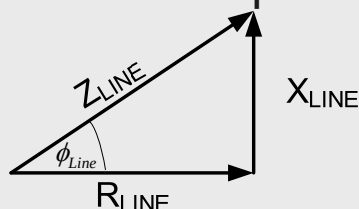
מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

- R_{Line} - התנגדות מוליכי הקו ב- Ω .
- ϕ - התנגדות סגולית של חומר המוליכים ב- $\Omega mm^2/m$.
- l - אורך המוליכים ב- m.
- A - שטח חתך המוליכים ב- mm^2 .
- L_{Line} - השראות מוליכי הקו ב- Henry.
- $\omega = 2\pi f$ - תדירות זוויתית של מתח המקור ב- Rad/Sec.
- X_{Line} - היגב השראי של מוליכי כל הקו ב- Ω .



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

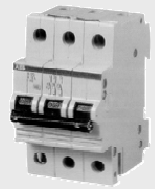
- עכבת הקו הינה הערך השקול של התנגדות הקו והיגבו ההשראי. ערך זה מייצג את סך ההתנגדויות של הקו: ההתנגדות הפעילה וההיגב ההשראי בחיבור וקטורי.



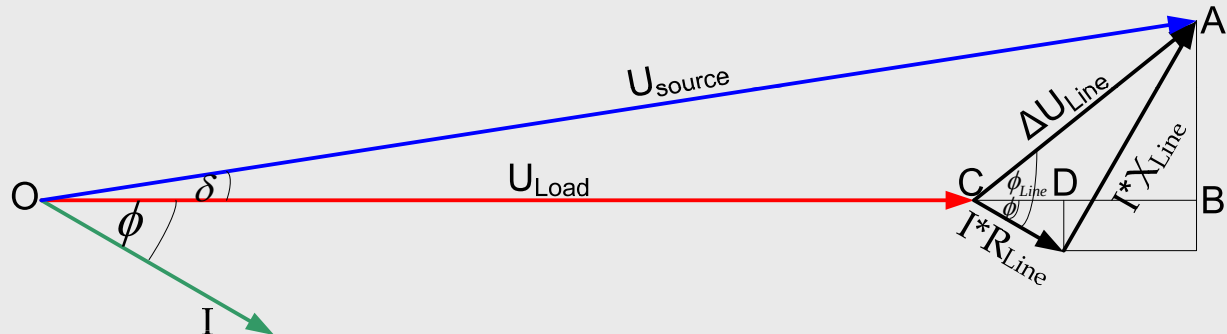
- במתקן בו הזרם מפגר אחר המתח ניתן לתאר את מחוגי המתח והזרם באופן הבא:



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



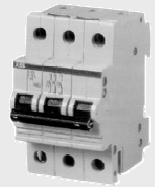
תרשים מחוגי של המתחים במעגל



כלית נוכל לרשום כי הסכום המחוגי של מתח הצרכן ומפל המתח שווים למתח המקור.

$$\vec{U}_{Source} = \vec{U}_{Load} + \Delta \vec{U}_{Line}$$

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



כאשר מפלי המתח קטנים ביחס למתח המקור (אחוזים בודדים) ניתן לומר כי אורך הקטע OA שווה בקירוב לאורך הקטע OB. הקטע OB מורכב מ-3 תת קטעים: מתח הצרכן (OC), הקטע CD והקטע DB.

$$\overline{OB} = \overline{OC} + \overline{CD} + \overline{DB}$$

$$\overline{OC} = U_{Load}$$

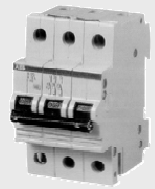
$$\overline{CD} = I \cdot R_{Line} \cdot \cos \phi$$

$$\overline{DB} = I \cdot X_{Line} \cdot \sin \phi$$

$$\overline{OB} \cong U_{Source}$$

$$U_{Source} \cong U_{Load} + \underbrace{I \cdot R_{Line} \cdot \cos \phi + I \cdot X_{Line} \cdot \sin \phi}_{\Delta U_{Line}}$$

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



$$\Delta U_{Line} = I \cdot R_{Line} \cdot \cos\phi_{Load} + I \cdot X_{Line} \cdot \sin\phi_{Load}$$

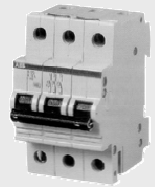
כאשר ההיגב ההשראי (X_{Line}) של הקו זניח (במעגלים בעלי שטח חתך קטן) או כאשר מקדם ההספק של הצרכנים קרוב ל-1 מתנוונת הנוסחה להיות:

$$\Delta U_{Line} = I \cdot R_{Line} \cdot \cos\phi_{Load}$$

הזווית ϕ_{Load} היא זווית המופע של זרם העומס ולא של עכבת הקו.

מחלקים את מפל המתח בקו ל-2 חלקים: מפל מתח האקטיבי שמסומן ב- ΔU_a ומפל מתח ריאקטיבי שמסומן ב- ΔU_r . מפל המתח האקטיבי מתאר את מפל המתח על ההתנגדות הפעילה של הקו, מפל המתח הריאקטיבי מציין את מפל המתח על ההיגב ההשראי של הקו.

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

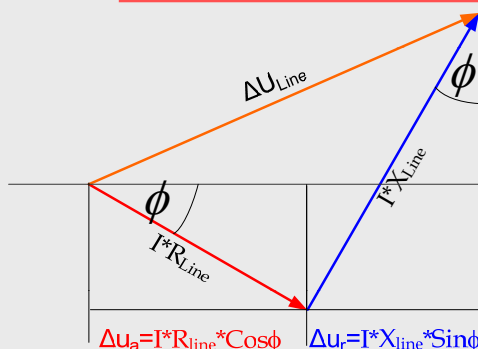


$$\Delta U_{Line} = \Delta U_a + \Delta U_r = \underbrace{I \cdot R_{Line} \cdot \cos\phi_{Load}}_{\Delta U_a} + \underbrace{I \cdot X_{Line} \cdot \sin\phi_{Load}}_{\Delta U_r}$$

צורת רישום אחרת של הנוסחה האחרונה היא:

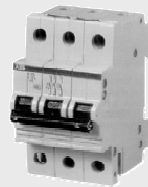
$$\Delta U_{Line} = I \cdot (R_{Line} \cdot \cos\phi_{Load} \pm X_{Line} \cdot \sin\phi_{Load})$$

$$\Delta U_{Line} = I_a \cdot R_{Line} \pm I_r \cdot X_{Line}$$



נוסחה זו ידועה בספרות בשם נוסחת קנפ.

הסיבה ל- $\pm$ נובעת מסוגי עומסים שונים. בעומס השראי (זרם מפגר אחר המתח) יהיה הסימן חיובי (+) ובעומס קיבולי (זרם מקדים את המתח) יהיה סימן שלילי (-).



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

■ מפל המתח במעגל חד מופעי מחושב על ידי הקשר:

$$\Delta U = 2 \cdot (R_L \cdot I_a \pm X_L \cdot I_r)$$

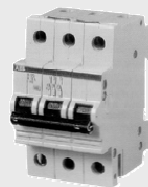
■ מפל המתח במעגל תלת מופעי מחושב על ידי הקשר:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot (R_L \cdot I_a \pm X_L \cdot I_r)$$

■ מפל המתח ב-% יחושב על ידי:

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

■ מפל המתח המרבי המותר בין הדקי המונה להדקי הצרכן אסור שיעלה על 3%.

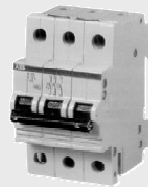


מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

תרגיל דוגמא מספר 1

צרכן חד פאזי צורך הספק של 16kW במקדם הספק של 0.6. המתח הנמדד על הדקי הצרכן 220V. התנגדות מוליכי הזינה 0.04Ω והיגבם ההשראי 0.2Ω . יש לחשב את מתח המקור.

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



פתרון תרגיל דוגמא מספר 1

$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \phi} = \frac{16,000}{220 \cdot 0.6} = 121.2A$$

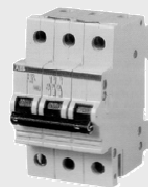
$$\Delta U = \Delta U_a + \Delta U_r = I \cdot R_L \cdot \cos \phi + I \cdot X_L \cdot \sin \phi$$

$$\Delta U = 121.2 \cdot 0.04 \cdot 0.6 + 121.2 \cdot 0.2 \cdot 0.8$$

$$\Delta U = 2.91 + 19.39 = 22.3V$$

$$U_s = 220 + 22.3 = 242.3V$$

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



פתרון תרגיל דוגמא מספר 1 (בדרך מדויקת יותר)

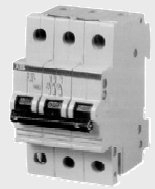
$$I = \frac{P}{U \cdot \cos \phi} = \frac{16,000}{220 \cdot 0.6} = 121.2A$$

$$\left. \begin{aligned} I \cdot R_L &= 121.2 \cdot 0.04 = 4.848V \\ I \cdot X_L &= 121.2 \cdot 0.2 = 24.24V \end{aligned} \right\} I \cdot Z = \sqrt{(I \cdot R_L)^2 + (I \cdot X_L)^2} = 24.68V$$

$$\tan \alpha = \frac{24.24}{4.84} = 5 \Rightarrow \alpha = 78.69^\circ$$



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



המשך פתרון תרגיל דוגמא מספר 1 (בדרך מדויקת יותר)

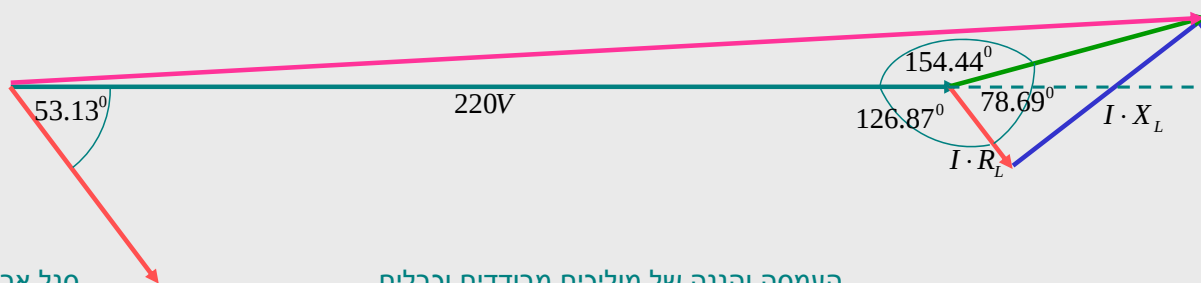
$$180^\circ - 154.44^\circ = 25.56^\circ$$

$$24.68 \cdot \cos 25.56^\circ = 22.264V$$

$$24.68 \cdot \sin 25.56^\circ = 10.648V$$

$$U_s = \sqrt{(220 + 22.264)^2 + 10.64^2} = 242.498V$$

כפי שניתן לראות הפרש המתחים בין שתי הדרכים קטן מ- 0.2V.

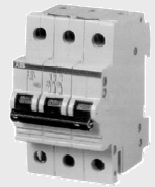


סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

91

מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



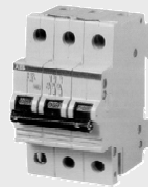
תרגיל דוגמא מספר 2

צרכן תלת פאזי בעל מקדם הספק 0.8 צורך זרם של 70A, מרשת בעלת מתח שלוב של 400V. מרחק מקור הזינה מהצרכן 175 מטר. הצרכן מוזן באמצעות כבל מנחושת בעל בידוד PVC, המונח ישירות באדמה עם כיסוי מגן על ידי לוחות בטון. ההיגב ההשראי של מוליכי הכבל $0.15\Omega/\text{km}$. חשב את שטח החתך המזערי המותר בהתחשב שמפל המתח אסור שיעלה על 3%. בחר שטח חתך תקני מתאים.

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

92



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

פתרון תרגיל דוגמא מספר 2

$$\Delta U = 0.03 \cdot 400 = 12V$$

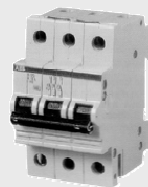
$$\Delta U_r = \sqrt{3} \cdot I \cdot X \cdot \sin\phi = \sqrt{3} \cdot 70 \cdot \frac{0.15}{1000} \cdot 175 \cdot 0.6 = 1.91V$$

$$\Delta U_a = \Delta U - \Delta U_r = 12 - 1.91 = 10.09V$$

$$\Delta U_a = \sqrt{3} \cdot I \cdot R \cdot \cos\phi \Rightarrow R = \frac{\Delta U_a}{\sqrt{3} \cdot I \cdot \cos\phi} = \frac{10.09}{\sqrt{3} \cdot 70 \cdot 0.8} = 0.104\Omega$$

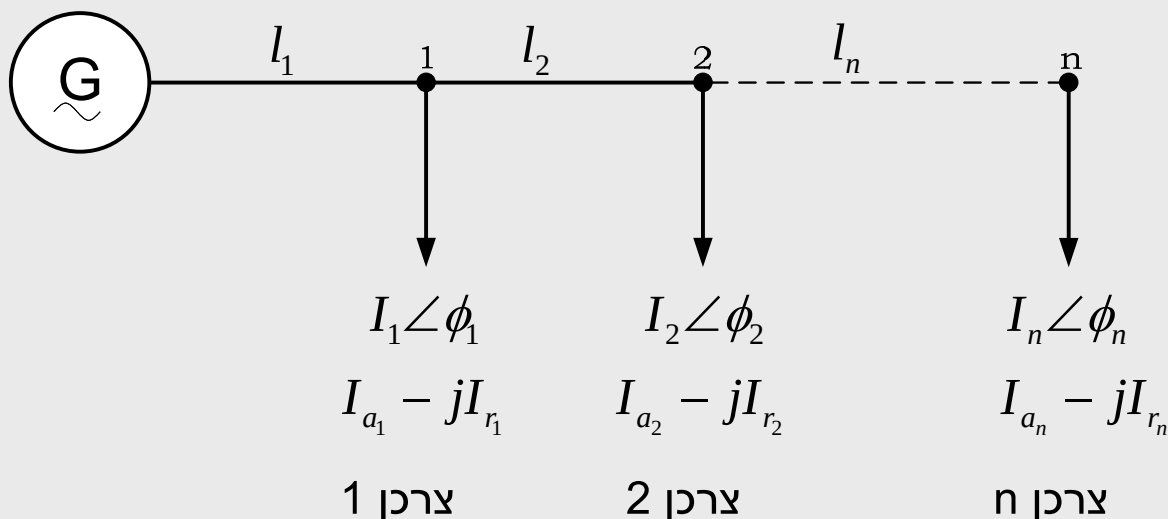
$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0.0175 \cdot 175}{0.104} = 29.44mm^2$$

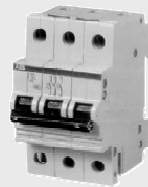
שטח חתך תקני מתאים הוא 35 ממ"ר שטח חתך זה אכן מתאים להולכת זרם כנ"ל (מאפשר זרם מתמיד מרבי של עד 121A) גם בהתחשב במקדמים המתאימים בין הזרם המתמיד המרבי וגודל המבטח.



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

חישוב מפל המתח עבור קו המזין צרכנים רבים בעל שטח חתך אחיד

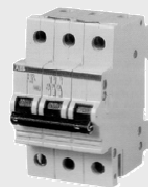




מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

חישוב מפל המתח עבור קו חד ותלת מופעי המזין צרכנים רבים

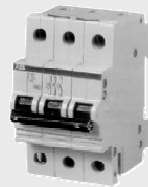
סוג רשת	נתונים	מפל מתח הגבי ב %	ערך שטח חתך אחיד ברשת [mm ²]
חד מופעית	זרמי הקטעים	$\Delta U_{r\%} = \frac{X_0}{10 \cdot U_n} \sum_{i=1}^n I_{r_{li}} \cdot l_i$	$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n} \sum_{i=1}^n I_{a_{li}} \cdot l_i$
	הספקי הקטעים	$\Delta U_{r\%} = \frac{X_0}{10 \cdot U_n^2} \sum_{i=1}^n Q_{li} \cdot l_i$	$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n^2} \sum_{i=1}^n P_{li} \cdot l_i$
תלת מופעית	זרמי הקטעים	$\Delta U_{r\%} = \frac{\sqrt{3} \cdot X_0}{10 \cdot U_n} \sum_{i=1}^n I_{r_{li}} \cdot l_i$	$A = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n} \sum_{i=1}^n I_{a_{li}} \cdot l_i$
	הספקי הקטעים	$\Delta U_{r\%} = \frac{X_0}{10 \cdot U_n^2} \sum_{i=1}^n Q_{li} \cdot l_i$	$A = \frac{100 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n^2} \sum_{i=1}^n P_{li} \cdot l_i$



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

חישוב מפל המתח עבור קו חד ותלת מופעי המזין צרכנים רבים

מפל המתח על הרכיב <u>ההגבי</u> של הקו [V]	$\Delta U_{r\%}$
מפל המתח על הרכיב <u>הפעיל</u> של הקו [V]	$\Delta U_{a\%}$
ההיגב ההשראי של מוליכי הקו [Ω/km]	X_0
מתח נקוב של הרשת [V]	U_n
זרם <u>ריאקטיבי</u> בקטע קו i [A]	$I_{r_{li}}$
זרם פעיל בקטע קו i [A]	$I_{a_{li}}$
אורך קטע הקו i [m]	l_i
הספק <u>עוור</u> בקטע קו i [VAR]	Q_{li}
הספק פעיל בקטע קו i [Watt]	P_{li}
שטח חתך מוליכי הרשת [mm ²]	A
התנגדות סגולית של מוליכי הקו [Ω×mm ² /m]	ρ



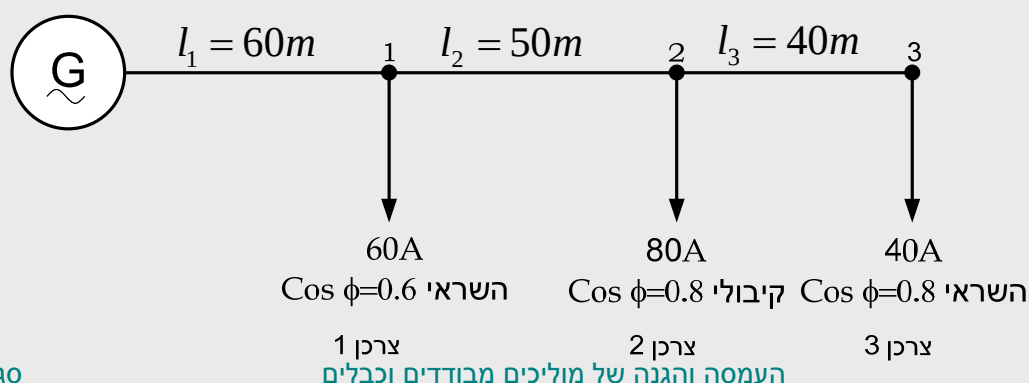
מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

תרגיל דוגמא מספר 3

נתונה רשת עלית חד מופעית במתח 230V מוליכים מנחושת והיגב השראי של $0.4\Omega/\text{km}$.

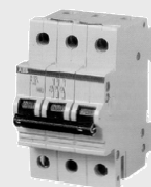
נתוני הצרכנים מתוארים באיור.

בחר שטח חתך אחיד תקני אם ידוע שמפל המתח המרבי המותר הוא 3%.



97

סגל אריאל



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

פתרון תרגיל דוגמא מספר 3

שלב הראשון הצגת הזרמים בצורה קרטזית על מנת לחשב את הזרמים בקטעי הרשת:

$$I_1 = I_1 \cdot \cos\phi_1 - jI_1 \cdot \sin\phi_1 = 60 \cdot 0.6 - j60 \cdot 0.8 = 36 - j48 [A]$$

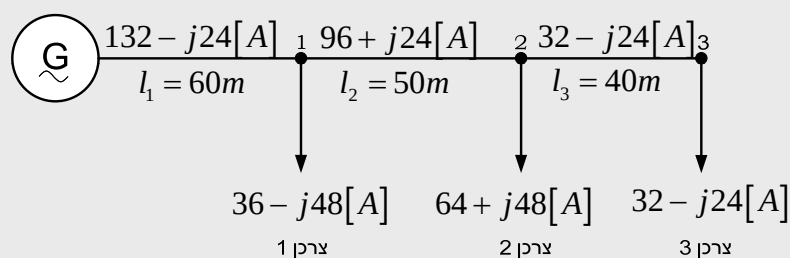
$$I_2 = I_2 \cdot \cos\phi_2 + jI_2 \cdot \sin\phi_2 = 80 \cdot 0.8 + j80 \cdot 0.6 = 64 + j48 [A]$$

$$I_3 = I_3 \cdot \cos\phi_3 - jI_3 \cdot \sin\phi_3 = 40 \cdot 0.8 - j40 \cdot 0.6 = 32 - j24 [A]$$

$$I_{l_3} = 32 - j24 A : l_3 \text{ הזרם בקטע}$$

$$I_{l_2} = 96 + j24 A : l_2 \text{ הזרם בקטע}$$

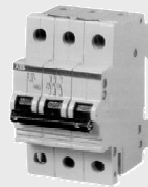
$$I_{l_1} = 132 - j24 A : l_1 \text{ הזרם בקטע}$$



98

סגל אריאל

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

המשך פתרון תרגיל דוגמא מספר 3

$$\Delta U_{r\%} = \frac{X_0}{10 \cdot U_n} \sum_{i=1}^n I_{r_{li}} \cdot l_i =$$

$$\Delta U_{r\%} = \frac{0.4}{10 \cdot 230} \cdot [24 \cdot 60 - 24 \cdot 50 + 24 \cdot 40] = 0.209\%$$

הספק השראי מגדיל את מפל המתח
הספק קיבולי מקטין את מפל המתח

$$\Delta U_{a\%} = \Delta U_{\%} - \Delta U_{r\%} = 3 - 0.209 = 2.791\%$$

$$A = \frac{200 \cdot \rho}{\Delta U_{a\%} \cdot U_n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{a_{li}} \cdot l_i = \frac{200 \cdot 0.018}{2.791 \cdot 230} \cdot [132 \cdot 60 + 96 \cdot 50 + 32 \cdot 40] = 78.5 \text{ mm}^2$$

שטח חתך תקני המבטיח מפל מתח קטן מהנדרש הינו: 95 ממ"ר.

$$I = \sqrt{132^2 + 24^2} = 134 \text{ A}$$

הזרם בכניסה שווה ל:

כבל בשטח חתך זה יכול להוליך 200A ויותר (תלוי בשיטת ההתקנה).

בדוק תמיד האם שטח החתך מספק מבחינת הולכת הזרם!!!