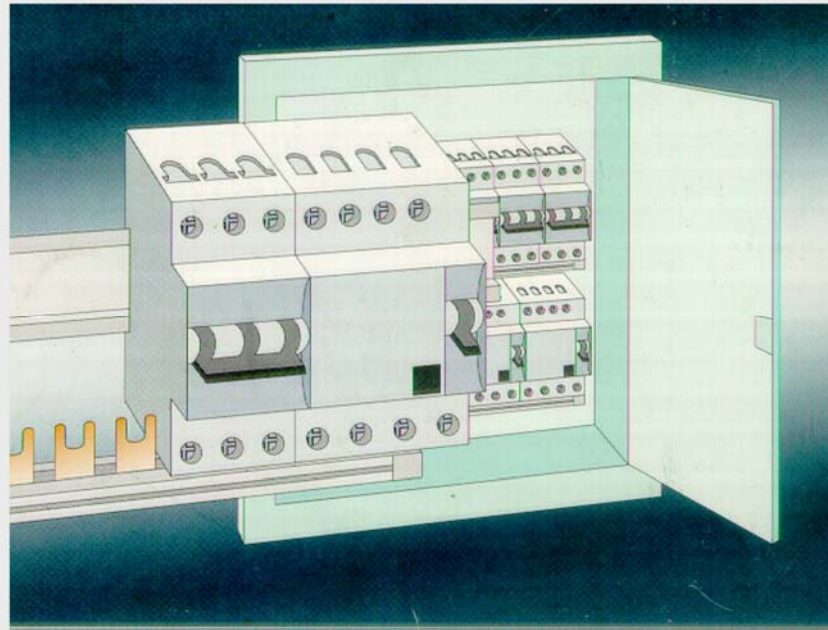


העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים



כתיבה ועריכה
סגל אריאל

אריאל סגל www.arielsegal.co.il

מבטחים והתקנתם



כללי:

לא יתכנן אדם, לא יתקין, לא יבדוק, לא ישנה כוונון ולא יתקן
מבטח אלא אם כן הוא חשמלאי בעל רישיון מתאים לגודל
המבטח.

אריאל סגל www.arielsegal.co.il

העמסה והגנה של מוליכים מבודדים וכבלים

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.
- אין צורך בהגנה מפני זרם העמסת יתר, אם מקור הזינה אינו יכול לגרום לזרם העמסת יתר במוליכים או אם המעגל מזין מיתקני חירום.
- חתך מוליך אפס (N) יהיה כזה שימנע חימום יתר של מוליך זה.

איסור התקנת מבטח



אין להתקין מבטח במקומות המפורטים להלן:

- במוליך PEN
- במוליך האפס (N) אלא אם כן המבטח מפסיק בו-זמנית גם את שאר מוליכי המופעים;
- במוליך הארקה PE.
- במוליך חיבור לפס השוואת פוטנציאלים;
- במעגל משני של משנה זרם;
- במעגל עירור של גנרטור או מנוע לזרם ישר;
- במעגל המזין התקן התרעה חיוני כגון צופר או מעגל פיקוד שהפסקתו כרוכה בסכנה.



מבטחים והתקנתם

מיקום התקנת המבטח וייעודו:

- מבטח להגנה בפני זרם העמסת יתר ומבטח להגנה בפני זרם קצר יותקנו בכל הסתעפות של מעגל שבה חלה הקטנה בכושר ההעמסה של המוליך עקב הקטנת חתכו, שינוי אופן התקנתו או שינוי סוג הבידוד
- קיים במעלה מעגל מבטח בפני זרם קצר, המגן עד לסיום המעגל על המוליכים שבהם חלה הקטנת כושר ההעמסה, אין חובה להתקין הגנה נוספת בפני זרם קצר בלבד.



מבטחים והתקנתם

מיקום התקנת המבטח וייעודו:

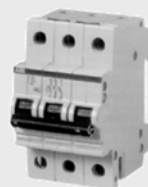
- בהסתעפות שאורכה אינה עולה על 3 מטרים ושופן התקנתה מקטין עד לסבירות מזערית היווצרות קצר, אין חובה להתקין הגנה נוספת.
- בהסתעפות יכול שהמבטח בפני זרם העמסת יתר בלבד ימוקם במקום כלשהו במעגל, בתנאי שאין כל הסתעפות בין נקודת ההקטנה של כושר ההעמסה לבין המבטח.



מבטחים והתקנתם

מבחינים ב-3 סוגי מבטחים:

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



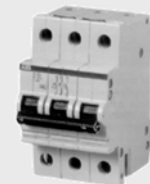
מבטחים והתקנתם

סוגי מבטחים:

מחלקים את המבטחים ל-2 קבוצות עיקריות :

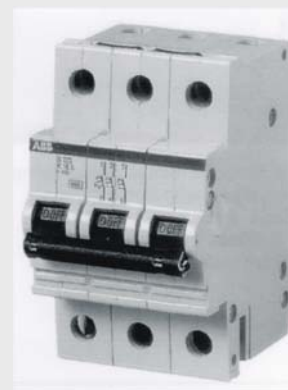
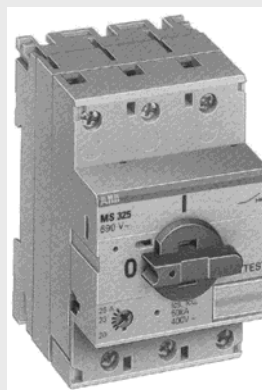
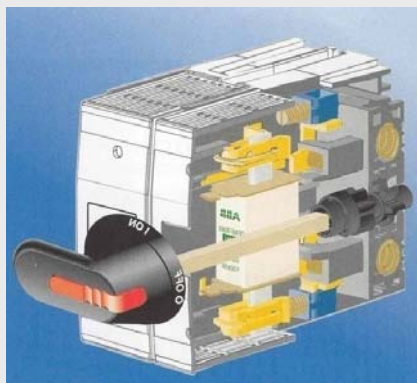
1. נתיכים.
 2. מפסקי זרם אוטומטיים.
- שני הסוגים מיועדים להגן על הציוד החשמלי או המוליכים בפני זרם יתר.
- שניהם בעלי אופיין מסוג Inverse time (זמן הפוך) כלומר, התקצרות זמן הניתוק עם עליית הזרם דרך המבטח.

מבטחים והתקנתם

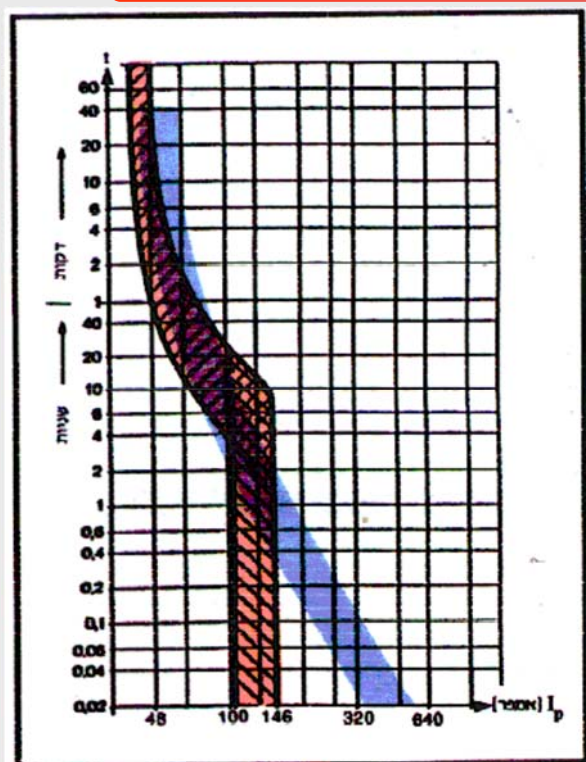


נתיכים

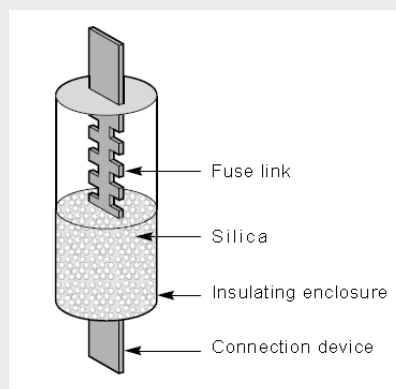
מפסק אוטומטי זעיר ומתנע תרמו-מגנטי



מבטחים והתקנתם



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





מבטחים והתקנתם

בנתיך עקומת הניתוק רציפה לכל אורכה ואילו עקומת הניתוק של מפסק אוטומטי מחולקת ל- 2 חלקים:

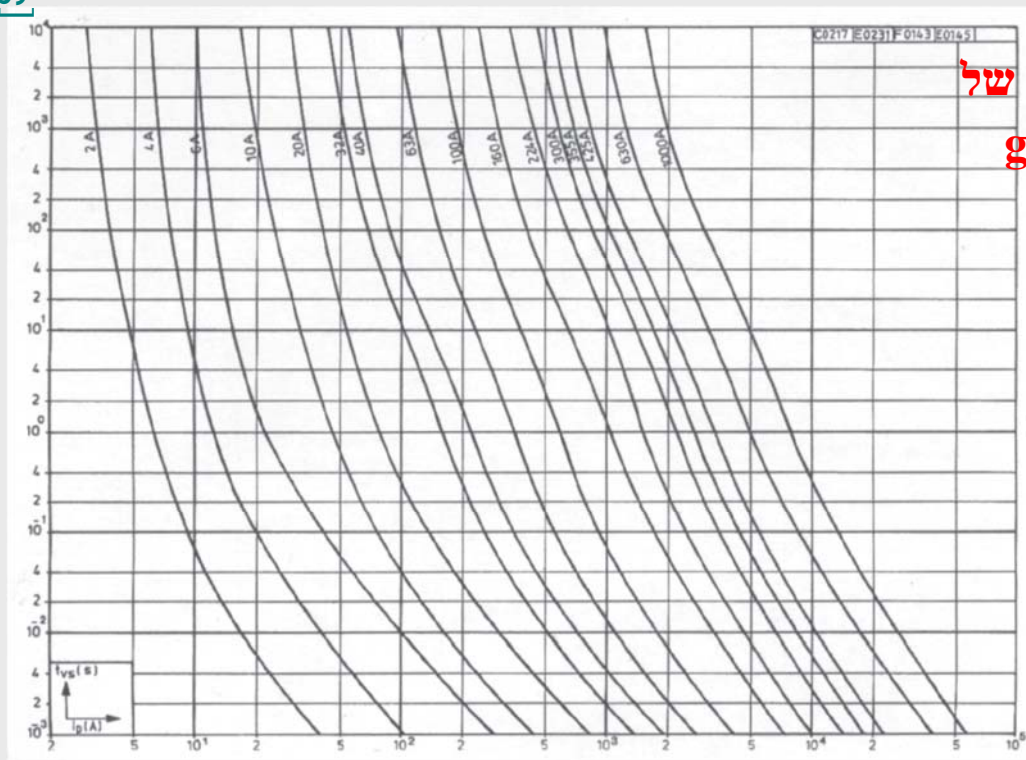
חלק עליון מבטא את פעולת המנגנון התרמי, להגנה בפני עומסי יתר.

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:

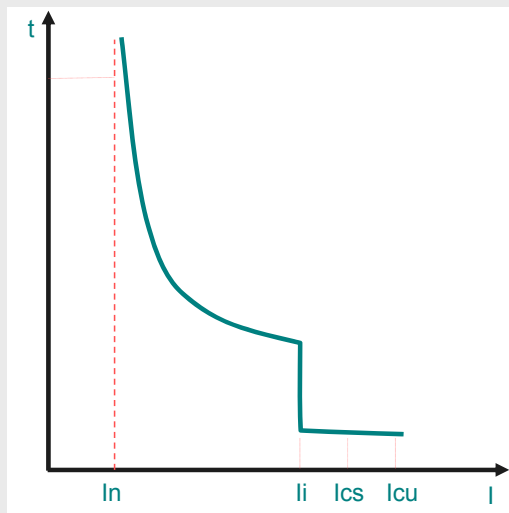
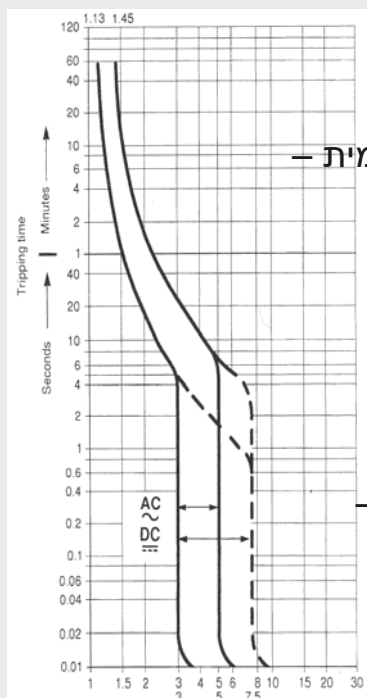
$$I^2 \cdot t$$

זרם [A]



מבטחים והתקנתם

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



כפולה של הזרם הנקוב

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.



מבטחים והתקנתם

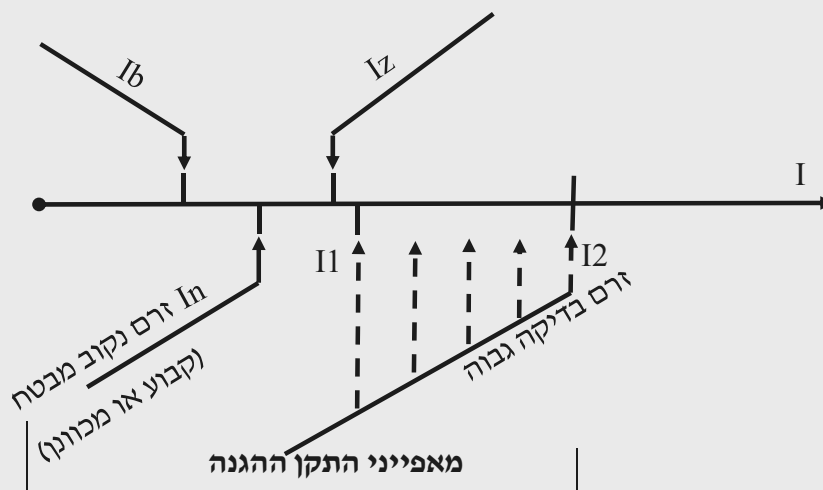
מגדירים ארבעה סוגי זרמים:

- I_b - זרם העבודה הממושך במעגל (זרם הצרכן המרבי בעבודה תקינה).
- I_n - הזרם הנקוב של המבטח או הזרם אליו הוא כוונן.
- I_z - הזרם המתמיד המרבי של המוליך (זרם זה מביא לעליית טמפרטורה במוליך עד לטמפ' המרבית המותרת בתנאי סביבה אחידים).
- I'_z - ערך הזרם של מוליך המחושב כמכפלה של I_z במקדמי התיקון לפי הטבלאות שבתוספת הראשונה;
- I_2 - זרם הבדיקה הגבוה של המבטח (זרם השימוט המובטח ע"פ הזמן 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

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I'_Z$$

2. חוק השימוט (Tripping current rule):

בזרם הגדול ב-45% מעבר לזרם המתמיד המרבי של המוליך חייב המבטח להפסיק בוודאות בתוך זמן המתאים לסוג המבטח.



מבטחים והתקנתם

הטבלה הבאה מתארת את ערכי הזרם I_2 הנדרשים לפי התקן:

I_2 [A]	I_n [A]	סוג המבטח
$1.75I_n$	$10A < I_n \leq 25A$	נתיך
$1.6I_n$	$I_n > 25A$	
$1.45I_n$	כל הערכים	מא"ז B או C
$1.3 I_n$	כל הערכים	מפסק זרם אוטומטי הניתן לכוונון



מבטחים והתקנתם

עבור מא"זים:

מחוק השימוט נדרש:

זרם הבדיקה I_2 של מא"זים מקיים:

מהצבת I_2 באי שוויון העליון נקבל:

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I'_Z$$

$$I_2 = 1.45 \cdot I_n$$

$$I_n \leq 1 \cdot I'_Z$$



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

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

יש לתכנן כבל זינה ללוח משנה תלת מופעי, המותקן במפעל. זרם נקוב של הנתיכים המגנים על המעגל הינו 50 אמפר. תוואי הכבל ללוח ללא מעגלים נוספים. טמפרטורה אופפת 35°C . הכבל XLPE מנחושת ומונח צמוד לקיר.

פתרון: מחוק השימוט ומהטבלה עבור נתיכים בזרם 35A ומעלה נקבל:

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I'_z \quad I_2 = 1.6I_n \Rightarrow I'_z = \frac{1.6}{1.45} I_n = 1.1 \cdot I_n$$

$$I'_z = 1.1 \cdot I_n = 1.1 \cdot 50 = 55\text{A}$$

מטבלה 90.3 – מתקבל שכבל במעגל תלת מופעי שעונה לדרישה הנ"ל הינו בחתך 10 ממ"ר והזרם המתמיד המרבי בו 63A.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

עבור מפסקים הניתנים לכוונון:

מחוק השימוט:

$$I_2 \leq 1.45 \cdot I'_z$$

זרם הבדיקה של המפסקים מקיים:

$$I_2 = 1.3 \cdot I_n$$

מהצבת I_2 באי שוויון העליון נקבל:

$$1.3 \cdot I_n \leq 1.45 \cdot I'_z$$

$$I'_z \geq \frac{1.3}{1.45} \cdot I_n = 0.896 \cdot I_n \approx 0.9 \cdot I_n$$

לא הגיוני



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

הנתונים בטבלאות שבתקנים חושבו על פי הנחות אלו:

- הטמפרטורה המרבית המותרת בזרם I'_z היא 70°C בבידוד PVC
- הטמפרטורה המרבית המותרת בזרם I'_z היא 90°C בבידוד XLPE או סוגים של בידוד נטול הלוגנים המתאימים לטמפ' זו.
- הטמפרטורה האופפת היא 35°C באוויר או 30°C באדמה.
- ההתנגדות התרמית הסגולית של האדמה היא $2.5 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$.
- בתנאים השונים מאלה יחושב הזרם המתמיד המרבי המתקן של המוליך I'_z כמכפלה של מקדמי התיקון כמפורט בתוספת הראשונה.
- כאשר מוליך מותקן בשיטות שונות יש להתחשב בשיטה הנותנת תוצאות גרועות יותר.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

- מתכנן בעל רישיון חשמלאי מהנדס רשאי לסטות מהערכים המתקבלים מהנוסחאות שבתקנה זו, בתנאי שהוא מבסס את חישוביו על תנאי ההתקנה וההעמסה של המעגל או הקו.
- בכל מקרה, מוליך בעל בידוד 70°C בחתך 1.5 מ^2 , יוגן באמצעות מבטח בעל זרם נקוב שאינו עולה על 10 אמפר, ומוליך בעל בידוד 70°C בחתך 2.5 מ^2 , יוגן באמצעות מבטח בעל זרם נקוב שאינו עולה על 16 אמפר.
- מבטח מפני זרם העמסת יתר יכול שיותקן במקום כלשהו במעגל המוגן על ידו, בתנאי שאין לפניו הסתעפות במעלה המעגל או שזרם העבודה הממושך המרבי בהסתעפות נלקח בחשבון בעת בחירת המבטח.
- ליד כל מבטח או עליו, יימצא סימון ברור ובר-קיימא המציין את הזרם הנקוב שלו; לגבי מפסק אוטומטי הניתן לכוונון יסומן כאמור זרם הכונון; לגבי נתיכים יסומן הזרם הנקוב של הנתיכים.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

מתוך התוספת הראשונה טבלה 1: מקדמי תיקון לחישוב I'_z בעבור ערכים שונים של טמפרטורה אופפת של אויר.

טמפרטורה אופפת של האויר [°C]														מקדם	
80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15		10
-	-	-	-	0.53	0.6	0.76	0.84	0.93	1.00	1.06	1.13	1.19	1.24	1.30	בידוד 70°C
0.43	0.52	0.60	0.68	0.74	0.79	0.85	0.91	0.95	1.00	1.04	1.08	1.13	1.17	1.20	בידוד 90°C

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



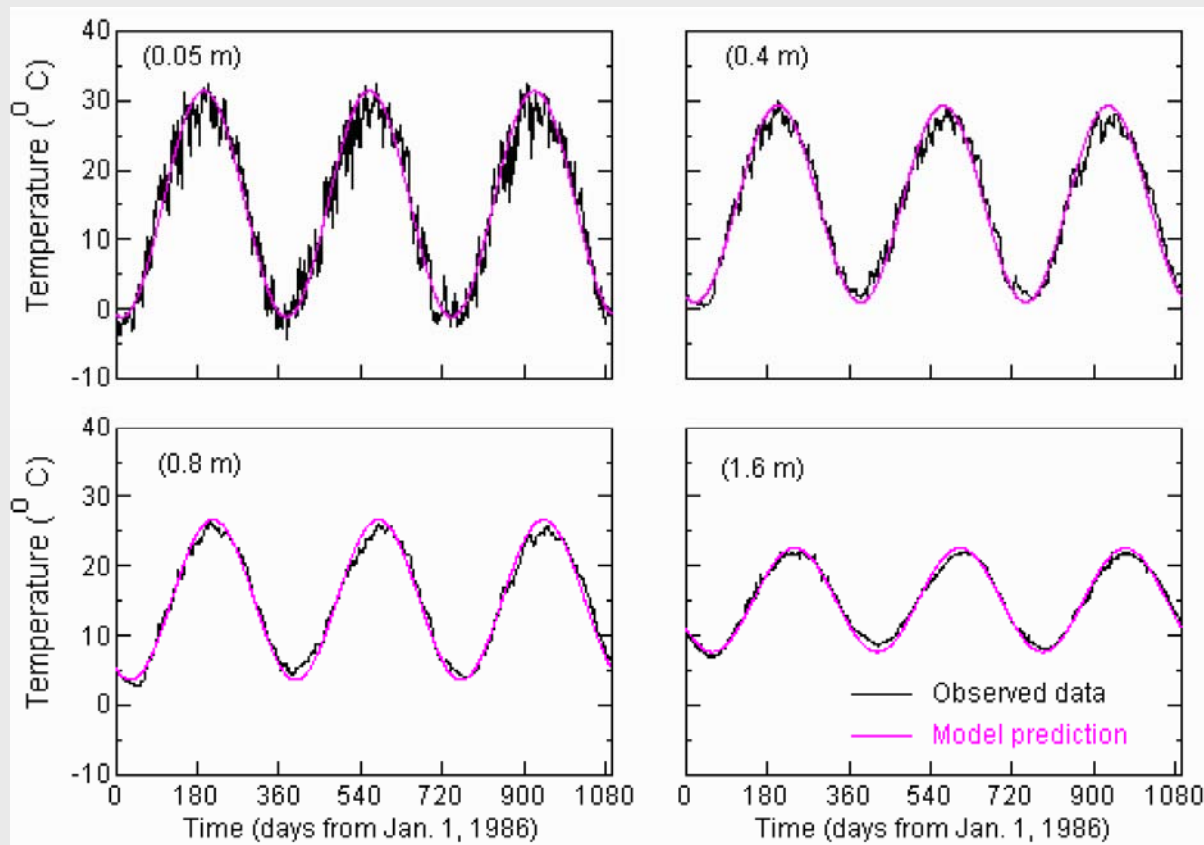
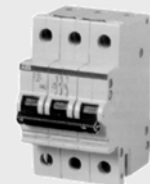
בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

מתוך התוספת הראשונה טבלה 2: מקדמי תיקון לחישוב I'_z בעבור ערכים שונים של טמפרטורה אופפת של הקרקע.

טמפרטורה אופפת של האדמה [°C]														מקדם	
80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15		10
-	-	-	-	0.51	0.62	0.71	0.80	0.87	0.94	1.00	1.07	1.12	1.18	1.24	בידוד 70°C
0.41	0.49	0.57	0.65	0.70	0.76	0.82	0.86	0.91	0.96	1.00	1.03	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

השתנות טמפרטורת הקרקע כתלות בעומק



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן



מתוך התוספת הראשונה טבלה 3: מקדמי תיקון לחישוב I'_2 בעבור ערכים שונים של התנגדות תרמית סגולית של הקרקע.

3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	$\left[\frac{Km}{Watt} \right]$ התנגדות תרמית סגולית
0.96	1.00	1.05	1.10	1.18	

Nature of soil	k3
Very wet soil (saturated)	1.21
Wet soil	1.13
Damp soil	1.05
Dry soil	1.00
Very dry soil (sunbaked)	0.86



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 °Ccm/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.



התנגדות תרמית סגולית של הקרקע

התכונות התרמיות של הקרקע נגזרות מסוג האדמה. הנתון של התנגדות תרמית סגולית משמש בתחומי ההנדסה, קלימטולוגיה וחקלאות. נתון זה קשור להעברת החום בקרקע, על ידי קרינה, הולכה והסעה.

יחידות ההתנגדות התרמית הסגולית בתקנות החשמל עודכנו וכעת מתייחסות התקנות ל: **Km/Watt**. נתון זה מבטא את עלית הטמפרטורה לכל וואט פיזור לאורך 1 מטר.

מרבית קטלוגי יצרני כבלים משתמשים **Km/Watt**.

הערכת ההתנגדות התרמית של האדמה צריכה להיות חלק מהתקנת כבלים בקרקע. מידע יקר ערך זה עוזר לקבוע את שטחי הכבלים המתאימים, היכולת להתקין מערכי כבלים, ולזהות את חומר המילוי המתאים.



התנגדות תרמית סגולית של הקרקע

דגימות קרקע נלקחות למעבדה, המפיקה דו"ח מלא על תכונות הקרקע וחומר המילוי הנדרש.



לוקחים מספר דגימות קרקע מייצגות מהאתר המיועד להתקנה.

טבלה 4 - מקדמי תיקון לחישוב I'z לכבלים המותקנים בקבוצות בלא רווח ביניהן



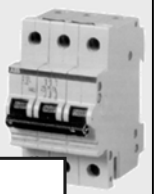
מספר מעגלים או מספר כבלים רב־גידיים												אופן התקנת הכבלים	מס' סידורי
20	16	12	9	8	7	6	5	4	3	2	1		
0.38	0.41	0.45	0.50	0.52	0.54	0.57	0.60	0.65	0.70	0.80	1.00	מקבץ כבלים באוויר, על גבי משטח, בהתקנה סמויה או חשיפה	1
בהתקנות אלה אין להתקין יותר מ-9 מעגלים או כבלים רב־גידיים			0.70	0.71	0.72	0.72	0.73	0.75	0.79	0.85	1.00	כבלים בשכבה אחת על קיר, רצפה או על מגש לא מחורר	2
			0.61	0.62	0.63	0.64	0.66	0.68	0.72	0.81	0.95	כבלים בשכבה אחת מותקנים בצמוד לתקרה	3
			0.72	0.72	0.73	0.73	0.75	0.77	0.82	0.88	1.00	כבלים בשכבה אחת מותקנים על מגש מחורר אופקי או אנכי	4
			0.78	0.78	0.79	0.79	0.80	0.80	0.82	0.87	1.00	כבלים בשכבה אחת מותקנים על סולם או באמצעות חבקים וכיוצא באלה	5

1. מקדמי התיקון מתייחסים לקבוצות כבלים המועמסים באופן דומה.

2. אם המרחק האופקי בין הכבלים הסמוכים עולה על פי שניים מקוטרו החיצוני, אין להתחשב במקדמי התיקון לפי הטבלה.

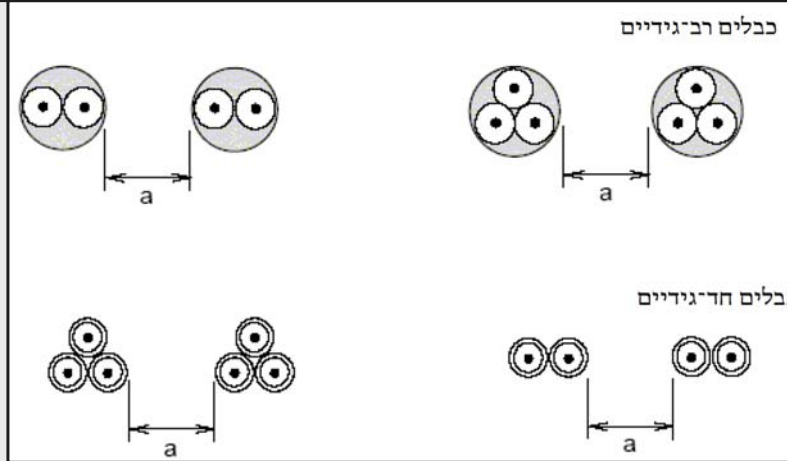
3. מקדמי התיקון מתייחסים לקבוצות של 2 או 3 כבלים חד־גידיים ולקבוצות של כבלים רב־גידיים.

טבלה 5 - מקדמי תיקון לחישוב I'z עבור מעגלים מכבלים חד - גידיים צמודים או מכבלים רב - גידיים המונחים במישרין באדמה כתלות במרחק ביניהם.



מרחק בין המעגלים (a) בסנטימטרים					מספר המעגלים
a=50	a = 25	a =12.5	a = De	a= 0 (צמודים)	
0.90	0.90	0.85	0.80	0.75	2
0.85	0.80	0.75	0.70	0.65	3
0.80	0.75	0.70	0.60	0.60	4
0.80	0.70	0.65	0.55	0.55	5
0.80	0.70	0.60	0.55	0.50	6

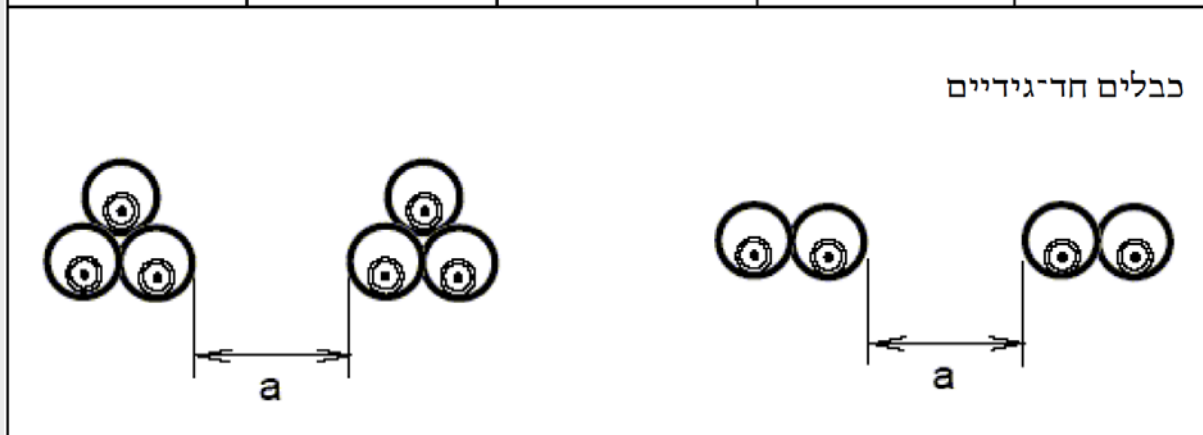
De - קוטר חיצוני של הכבל



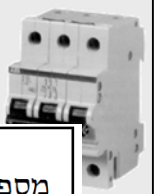
טבלה 6 - מקדמי תיקון לחישוב I'z בעבור קבוצות של כבלים חד-גידיים בתוך צינורות המונחים ישירות באדמה - כל כבל בצינור נפרד.



מרחק בין הקבוצות של הצינורות (a) בסנטימטרים				מספר קבוצות של צינורות
a = 100	a = 50	a = 25	a = 0 (צמודים)	
0.95	0.90	0.90	0.80	2
0.90	0.85	0.80	0.70	3
0.90	0.80	0.75	0.65	4
0.90	0.80	0.70	0.60	5
0.90	0.80	0.70	0.60	6

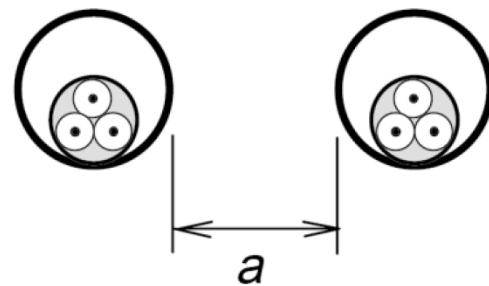


טבלה 7 - מקדמי תיקון לחישוב I'z בעבור קבוצות של כבלים רב-גידיים בתוך צינורות המונחים ישירות באדמה - כל כבל בצינור נפרד.

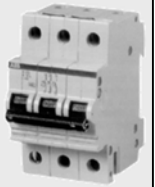


מרחק בין הקבוצות של הצינורות (a) בסנטימטרים				מספר קבוצות של צינורות
a = 100	a = 50	a = 25	a = 0 (צמודים)	
0.95	0.95	0.90	0.85	2
0.95	0.90	0.85	0.75	3
0.90	0.85	0.80	0.70	4
0.90	0.85	0.80	0.65	5
0.90	0.80	0.80	0.60	6

כבלים רב-גידיים



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן



שלבי קביעת חתך המוליכים והמבטחים כאשר ידוע הזרם I_b

א- חישוב מקדם התיקון הכללי K_t. $K_t = K_1 * K_2 * K_3 * K_4 * K_5 * K_6 * K_7$

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. ערך זה יהיה גודל הזרם המתמיד המרבי שהמוליך יעביר בתנאי ההתקנה המפורטים בטבלאות.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

$$I'_Z = I_Z \cdot K_T \quad I_Z = I'_Z / K_T \quad \text{-ד קביעת גודל הזרם } I_Z$$

-ה קביעת חתך המוליך מהטבלה המתאימה לסוג המוליך ושיטת התקנתו. בוחרים את הערך של I_Z הקרוב ביותר לערך המחושב והגדול ממנו.

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

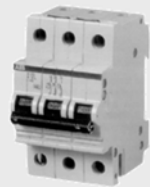
שים לב!!! תכנון זה אינו מביא בחשבון את מפל המתח. על פי חוק החשמל נדרש כי מפל המתח בין לוח החשמל לצרכן לא יעלה על 3%. בסוף מצגת זו מוצגת שיטת חישוב מפלי המתח.



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 מגש רשת בנוסף לחמישה כבלים קיימים המונחים בשכבה אחת. טמפרטורה אופפת 40 מעלות צלסיוס.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון דוגמה 2 :

מקדם תיקון טמפרטורה 40°C : $K_1 = 0.91$

מקדם תיקון: 6 כבלים בשכבה אחת: $K_4 = 0.73$

מקדם תיקון כולל: $K_t = K_1 \cdot K_4 = 0.91 \cdot 0.73 = 0.6667$

להגנת הצרכן נבחר מא"ז בעל ערך נקוב של 50A

$$I'_z \geq 1 \cdot I_n = 1 \cdot 50 = 50\text{A}$$

חישוב זרם מרבי מותר למוליך בשל התנאים החריגים:

$$I_z = \frac{I'_z}{K_t} = 50 / 0.6667 = 75\text{A}$$

לפי שיטת ההתקנה ט"ו יש להשתמש בטבלה 70.7 – יש לבחור כבל בחתך 16mm^2 המתאים לזרם מרבי של 75A.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 3: צרכן תלת מופעי צורך זרם של 70 אמפר דרך כבל תלת מופעי אלומיניום בעל בידוד XLPE. הכבל מונח על מגש רשת 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 טמפ' אופפת שונה מ- $35^{\circ}C$: $K_1 = 0.95$

מקדם תיקון ל- 6 כבלים בשכבה: $K_4 = 0.73$

מקדם תיקון כולל: $K_T = K_1 \cdot K_4 = 0.95 \cdot 0.73 = 0.6935$

שלב ב' בחירת מפסק זרם סטנדרטי (מא"ז): $I_n = I_z = 80A > I_b$

שלב ד' זרם מרבי מתוקן $I_z = \frac{I'_z}{K_T} = \frac{80}{0.6935} = 115.4A$

שלב ה' בחירת שטח חתך הכבל על פי הזרם המתמיד המרבי בטבלה - הערך הקרוב בטבלה - 90.7 הינו $115A$, המתאים לשטח חתך של 35 ממ"ר.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון 3: בהנחת מפסק זרם מתכוון:

נתון: $I_b = 70A$, שיטת ההתקנה: י"ב

שלב א' מקדם תיקון טמפ' אופפת שונה מ- $35^{\circ}C$: $K_1 = 0.95$

מקדם תיקון ל- 6 כבלים בשכבה: $K_4 = 0.73$

מקדם תיקון כולל: $K_T = K_1 \cdot K_4 = 0.95 \cdot 0.73 = 0.6935$

שלב ב' נכוון את המפסק לזרם הצרכן: $I_n = 70A = I_b$

שלב ג' $I'_z = 0.9 \cdot I_n = 0.9 \cdot 70 = 63A$

שלב ד' זרם מרבי מתוקן $I_z = \frac{I'_z}{K_T} = \frac{63}{0.6935} = 90.84A$

שלב ה' בחירת שטח חתך הכבל על פי הזרם המתמיד המרבי בטבלה - הערך הקרוב בטבלה - 90.7 הינו $93A$, המתאים לשטח חתך של 25 ממ"ר. בזכות השימוש במפסק אוטומטי הופחת שטח חתך הכבל!



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 4: צרן תלת מופעי צורך זרם של 155 אמפר באמצעות כבלים חד גידיים מאלומיניום עם בידוד XLPE. הכבלים מותקנים במישרין באדמה במשולש לפי שיטת התקנה יחד עם עוד 3 כבלים חד גידיים. המעגלים צמודים. טמפ' אדמה אופפת – 35 מעלות צלסיוס.

1. בחר מפסק אוטומטי מתאים.
2. קבע את חתך הכבל הנדרש כשהמפסק מכוון לערך הזרם המרבי.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

פתרון 4:

נתון: $I_b = 155A$, שיטת ההתקנה: י"ב

שלב א' מקדם תיקון טמפ' אדמה שווה ל- $35^{\circ}C$:

$$K_2 = 0.96$$

$$K_5 = 0.75$$

$$K_T = K_2 \cdot K_5 = 0.96 \cdot 0.75 = 0.7125$$

מקדם תיקון ל- 6 כבלים בשכבה:

מקדם תיקון כולל:

$$I_n = 160A > I_b$$

שלב ב' נבחר מפסק לזרם נקוב של 160A

$$I'_z = 0.9 \cdot I_n = 0.9 \cdot 160 = 144A$$

שלב ג'

$$I_z = \frac{I'_z}{K_T} = \frac{144}{0.7125} = 202.1A$$

שלב ד' זרם מרבי מתוקן

שלב ה' בחירת שטח חתך הכבל על פי הזרם המתמיד המרבי בטבלה 90.6 הערך הקרוב הינו 205A, המתאים לשטח חתך של 120 ממ"ר.



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 5: לוח חשמל מוזן באמצעות כבל תלת מופעי רב גידי מנחושת, 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 מנחושת בתעלה רחבה המותקן בשיטת התקנה ל' כבלים מונחים על הריצפה ללא רווח ביניהם: $K_4=0.75$

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

במפסק הניתן לכוונון מהסוג המופיע בדרישות התרגיל פיתחנו:

$$I'_z = I_n \cdot 0.9 = 110.5 \cdot 0.9 = 99.45A$$

$$K_2 = 0.96$$

$$K_4 = 0.75$$

$$K_T = K_2 \cdot K_4 = 0.96 \cdot 0.75 = 0.72$$



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 5, המשך פתרון

חישוב הזרם תוך התחשבות במקדמי תיקון:

$$I_z \geq \frac{I'_z}{K_t} = \frac{99.45}{0.72} = 138.1A$$

מטבלה 90.6 לאור תנאי ההתקנה נבחר כבל בשטח חתך 70mm^2 שמסוגל להעביר זרם מתמיד מרבי בשיעור של 166A.



מבטחים והתקנתם

דוגמא 6

נתון שנאי בהספק של 630kVA. השנאי מזין לוח ראשי באמצעות כבלים חד גידיים מנחושת בעלי בידוד XLPE המונחים צמודים זה לזה על סולם כבלים. יש לקבוע את מספר הכבלים ואת שטח החתך שלהם. 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:

כבלים חד גידיים במעגל תלת מופעי מופיעים בטבלה 90.8. נבחר כבלים בשטח חתך 240mm^2 . כבלים אלה יכולים להוליך זרם מתמיד מרבי של $652A$. לכן, יש צורך בלפחות 2 כבלים במקביל בכל מופע ו-2 כבלים במקביל עבור מוליך האפס. סה"כ 8 כבלים המונחים בשכבה אחת.

מקדם התיקון עבור 8 כבלים מבודדים או יותר, ללא רווח ביניהם המונחים בשכבה אחת על מגש מחורר:

$$K_4 = 0.72$$

$$K_1 = 0.91$$

מקדם התיקון בגין הטמפרטורה:



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

$$K_T = K_4 \cdot K_1 = 0.72 \cdot 0.91 = 0.6552$$

מקדם התיקון הכללי:

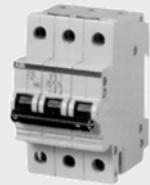
$$I_z = \frac{I_b}{K_T} = \frac{910}{0.6552} = 1388A$$

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

$$n = \frac{I_z}{I_{z1}} = \frac{1388}{652} = 2.13$$

מספר הכבלים במקביל הנדרש להולכת זרם זה מעט גדול מ-2.

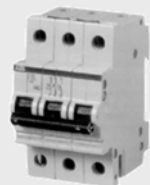
במקרה זה ניתן לבחור 3 כבלים בשטח חתך קטן יותר, או 2 כבלים בשטח חתך 300mm^2 .



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

נשווה את בחירת שטח חתך הכבל לבחירה מתוך קטלוג יצרן. 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.



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	-	-	-



בחירת שטח חתך מוליכי המתקן

דוגמא 6 – המשך פתרון

מקדם התיקון הכללי בהנחה של 8 כבלים $K_T = K_{temp} \cdot K_4 = 0.87 \cdot 0.72 = 0.6264$ בשכבה אחת:

$$I_Z = \frac{I_b}{K_T} = \frac{910}{0.6264} = 1452A$$

קטע המעגל אינו מכיל נתיכים או מפסקים לכן אין צורך לשלב מקדם תיקון בין I_n ל- I_Z הזרם המתמיד המרבי המתוקן:

$$n = \frac{I_Z}{I_{Z_1}} = \frac{1452}{606} = 2.397$$

מספר הכבלים במקביל הנדרש במקרה זה: רצוי לבחור 3 כבלים בשטח חתך 185 ממ"ר במקביל בכל מופע ו-3 כבלים עבור אפס (זה אכן מה שמבוצע בפועל בדר"כ).



מבטחים והתקנתם

כמשתמשים במבטח משותף להגנת כמה מוליכים המחוברים במקביל בפני זרם העמסת יתר, יתקיימו במוליכים כל התנאים שלהלן:

1. הם יהיו מאותו חומר;
2. הם יהיו בחתך שווה;
3. הם יהיו בעלי אורך שווה;
4. אבזרי החיבור שלהם ואופן התקנתם יהיו זהים;
5. זרם ההעמסה יתאים לסוג הבידוד העומד בטמפרטורה הנמוכה ביותר.

כשמוסיפים מוליך במיתקן במקביל למוליך קיים, לא יחולו הוראות תקנה זו, אם יובטח שזרם העבודה בכל מוליך לא יעלה על זרם ז' שלו.



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 המרבי ויש לחשב את ערכו.



כושר ניתוק



6kA

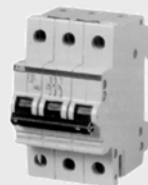
Tmax T2L 160	Iu=160A Ue=690V Ui=800V Uimp=8kV							IEC 60947-2
Ue (V)	230	400/415	440	500	690	250	500	Made in Italy by ABB SACE
Icu (kA)	150	85	75	50	10	85	85	
Ics (% Icu)	75	75	75	75	75	75	75	
Cat A	~ 50-60Hz					2 P == 3 P in series		CE



120kA



85kA



כושר ניתוק

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



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



הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר



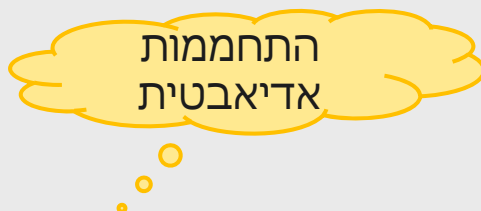
ב. הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר.

המבטח חייב לענות על 2 תכונות חשובות:

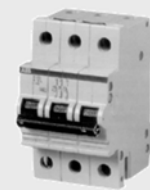
1. הפסקת המעגל במצבי קצר בזמן קצר מהזמן המרבי המותר t שבו בזרם נתון נשמרת עדיין שלמות הבידוד. אך לא יותר מ- 5 שניות. הקשר המתמטי נתון ע"י:

$$I^2 t \leq K^2 S^2$$

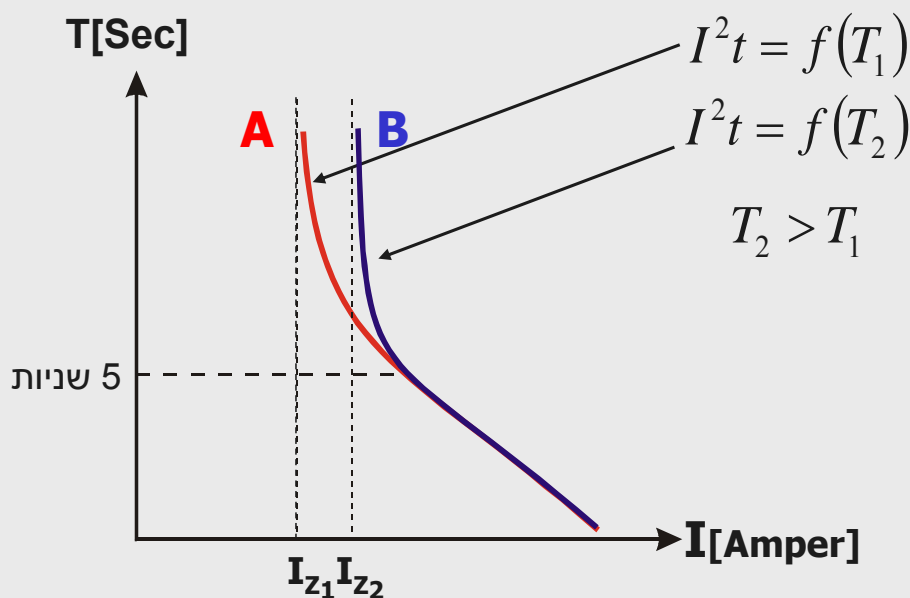
2. לאפשר פעולה לזמן בלתי מוגבל של זרם I_b – הזרם הנקוב של המעגל.



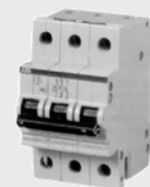
הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר



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



הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר



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.



הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר

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).

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

הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר



חתך מוליכי המעגל והמבטח חייבים להתאים כך שזרם קצר יפסק 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 (PVC) $70^{\circ}C$ כשהטמפרטורה ההתחלתית היא $70^{\circ}C$
 $250^{\circ}C$ לבידוד (XLPE) $90^{\circ}C$ 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:

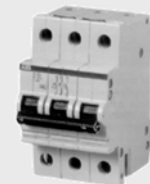
הגנה בפני התחממות יתרה של המוליך בזרם קצר



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	

שטח חתך מוליך הארקת שנאים



Transformer rating in kVA (230/400 V output)	Conductor material	Bare conductors			PVC-insulated conductors			XLPE-insulated conductors					
		Copper t(s)			0.2	0.5	-	0.2	0.5	-	0.2	0.5	-
		Aluminium t(s)			-	0.2	0.5	-	0.2	0.5	-	0.2	0.5
≤ 100	c.s.a. of PE conductors SPE (mm ²)	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
160		25	25	35	25	25	50	25	25	35	25	25	35
200		25	35	50	25	35	50	25	25	50	25	25	50
250		25	35	70	35	50	70	25	35	50	25	35	50
315		35	50	70	35	50	95	35	50	70	35	50	70
400		50	70	95	50	70	95	35	50	95	35	50	95
500		50	70	120	70	95	120	50	70	120	50	70	120
630		70	95	150	70	95	150	70	95	150	70	95	120
800		70	120	150	95	120	185	70	95	150	70	95	150
1,000		95	120	185	95	120	185	70	120	185	70	120	150
1,250		95	150	185	120	150	240	95	120	185	95	120	185

Fig. G61: Recommended c.s.a. of PE conductor between the MV/LV transformer and the MGDB, as a function of transformer ratings and fault-clearance times.

שטח חתך מוליך הארקת שנאים



- The table indicates the c.s.a. of the conductors in mm² according to:
 - The nominal rating of the MV/LV transformer(s) in kVA
 - The fault-current clearance time by the MV protective devices, in seconds
 - The kinds of insulation and conductor materials
 - If the MV protection is by fuses, then use the 0.2 seconds columns.
- In IT schemes, if an overvoltage protection device is installed (between the transformer neutral point and earth) the conductors for connection of the device should also be dimensioned in the same way as that described above for PE conductors.



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- $0.8U$. 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 דוגמה:

א. חשב את זרם הקצר בקצה מעגל ששטח חתך המוליכים 16 ממ"ר מאלומיניום, המבטח המגן על המעגל 63A. אורך המעגל 80 מטר.
 ב. בהנחה שהמתקן מאופס וכבל הזינה מכיל מוליך הארקה שווה בשיטחו לשטח מוליך האפס. האם המעגל מוגן כנדרש בתקנות במקרה של קצר פאזה הארקה?

פתרון:

$$R_{ph} = R_N = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0.028 \cdot 80}{16} = 0.14 \Omega$$

א.

$$I_{K \min} = \frac{0.8 \cdot U_L}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot (R_{ph} + R_N)} = \frac{0.8 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 1.5 \cdot (0.14 + 0.14)} = 440 A$$

$$I_{5Sec} = 6.6 \cdot I_n = 415.8 A$$

ב. המעגל מוגן בצורה גבולית.



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

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

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

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



מבטחים והתקנתם

המשך פתרון תרגיל דוגמא:

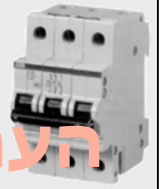
בהזנחת ההיגב ההשראי של הכבל (בשל שטח החתך הקטן):

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

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

$10^{-6} \cdot K^2 S^2$ 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 Im 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 של המעגל

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



מבטחים והתקנתם

כאשר משך קיום הקצר עולה על 5 שניות, יש להתקין להגנה בפני זרם קצר לאדמה, נוסף על המבטח, גם מפסק מגן; מפסק המגן שיותקן כאמור יהיה כזה שלולאת התקלה תאפשר פיתוח זרם תקלה שהוא פי 10 לפחות מזרם ההפעלה של מפסק המגן; מפסק מגן כאמור יהיה בעל כושר הפסקה מזערי של זרם הקצר לאדמה הצפוי בתחילת המעגל; זרם העמידה של מפסק המגן יאפשר להעביר, בלא נזק לעצמו או לסביבתו, את זרם הקצר הצפוי עד להפסקתו על ידי המבטח שבמעלה המעגל.



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.

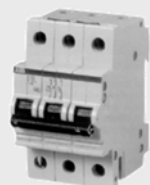
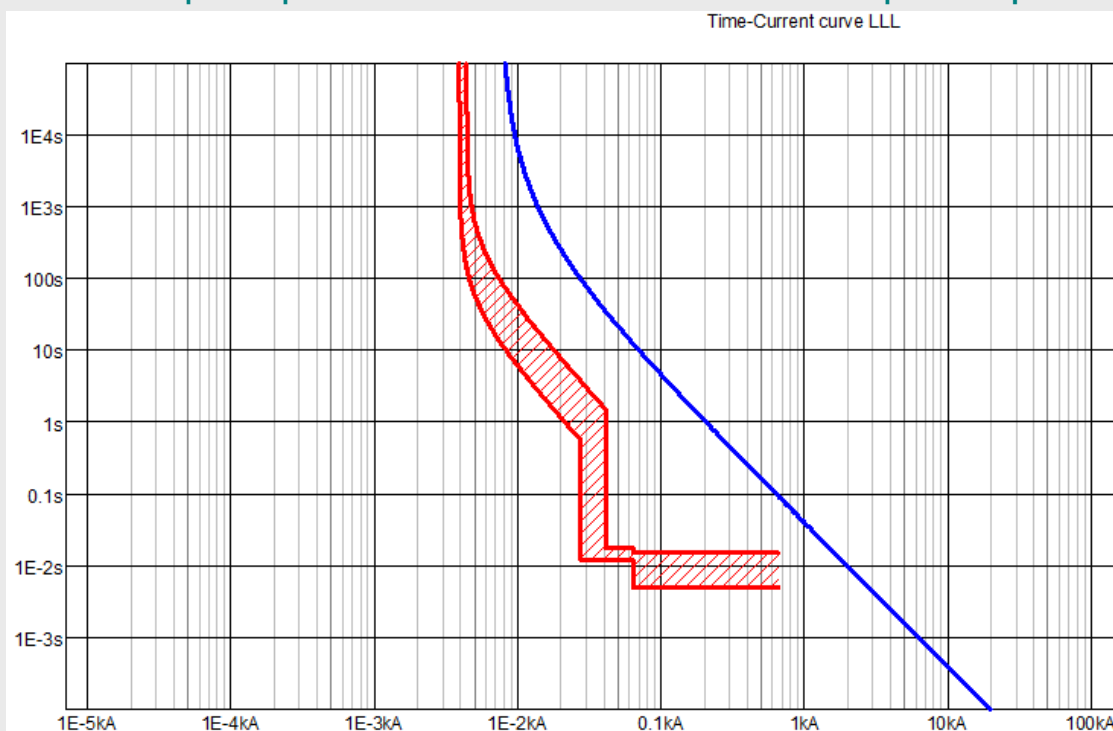
$$\int I^2 dt < k^2 s^2$$

את הלם החום מקבלים מתוך קטלוגי היצרן ואותם משווים למכפלה: $k^2 S^2$ הלם החום נקרא בספרות גם אנרגית 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 $A^2 \text{sec}$



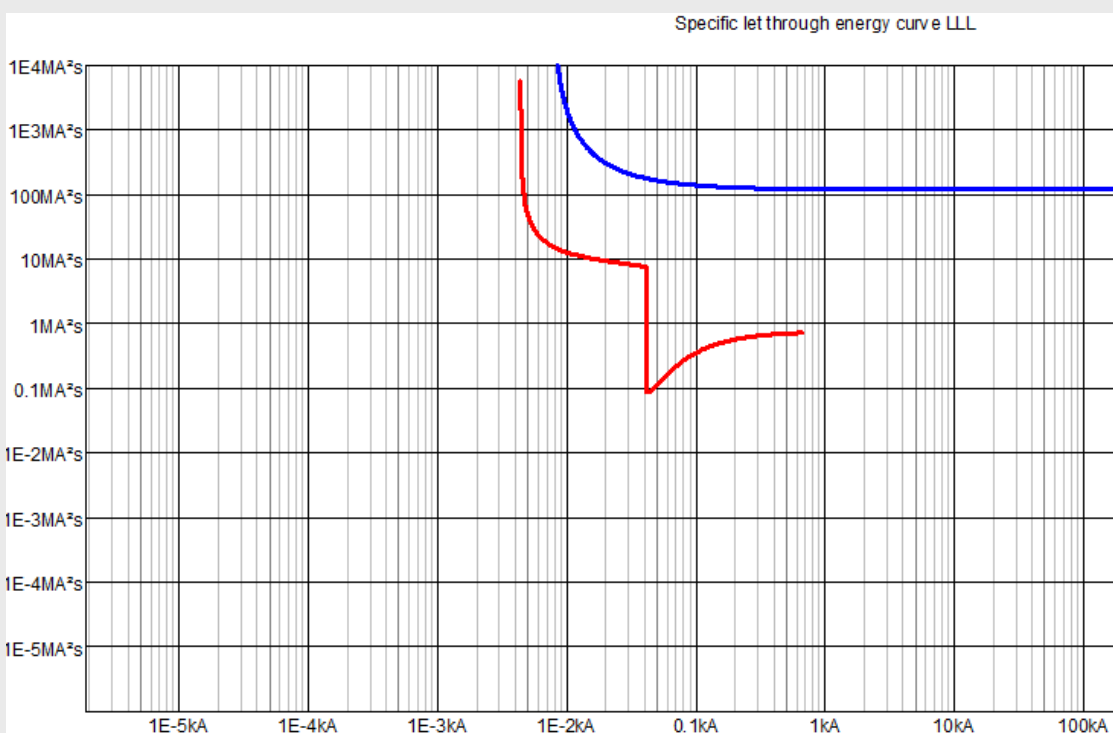
מבטחים והתקנתם

אופן המפסק לעומת יכולת הספיגה של המוליכים בקצר 3פס סימטרי

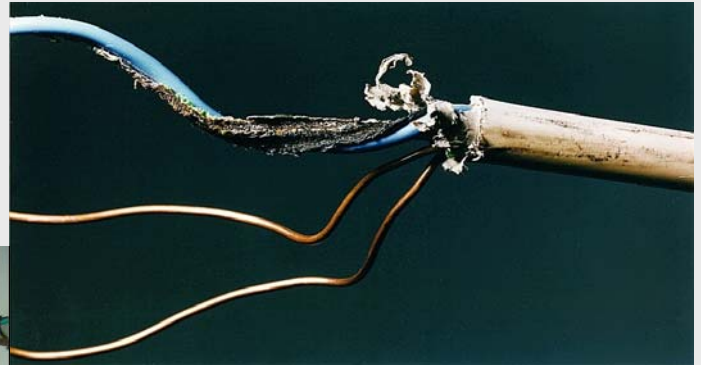


מבטחים והתקנתם

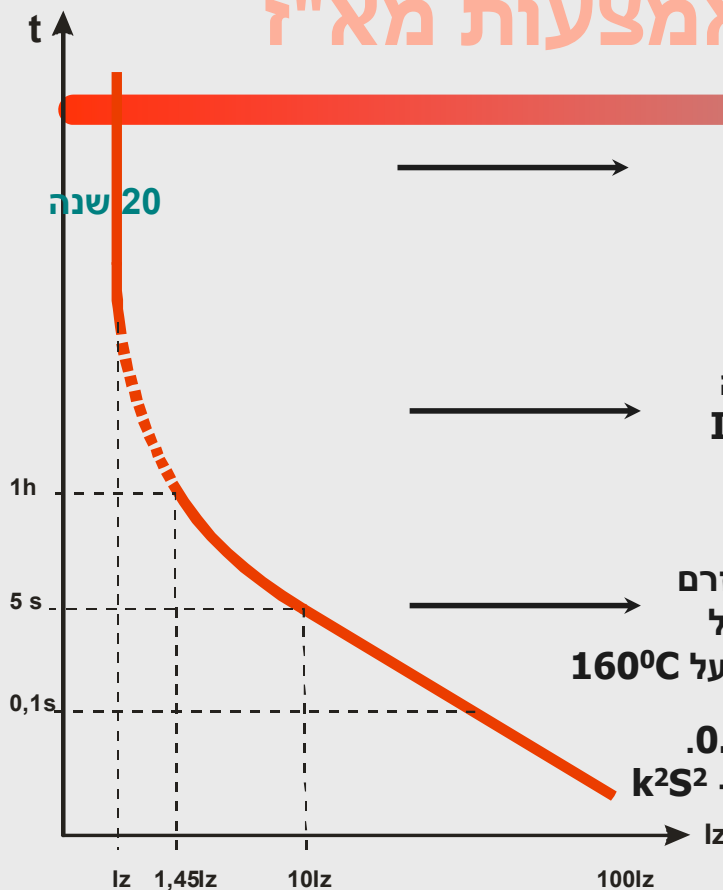
אנרגיית המעבר של המפסק לעומת יכולת הספיגה של המוליכים



מזה נרצה להמנע



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 המרבי 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.



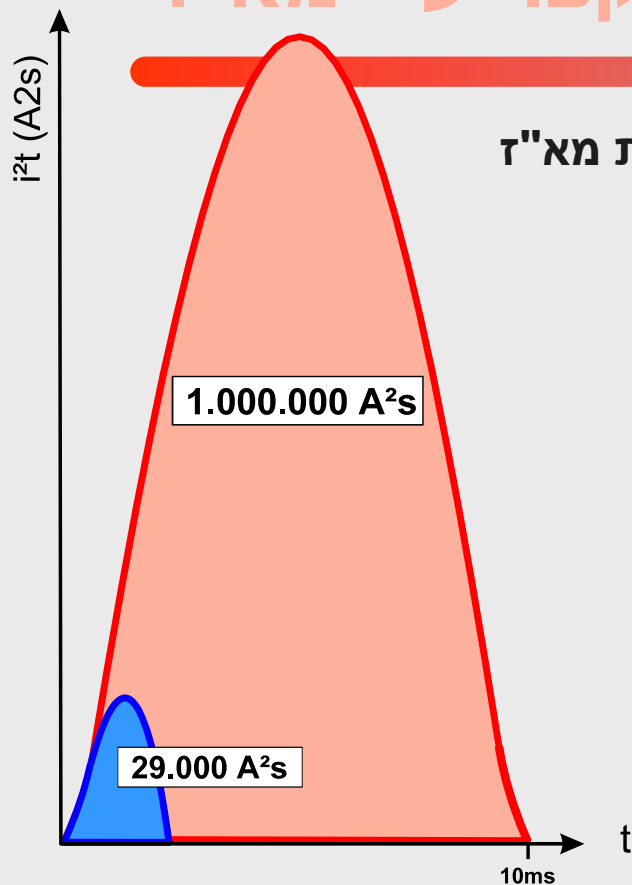
השפעת הטמפרטורה על מוליכי PVC

משך חיים בשל השפעת החימום על מוליך יחיד בעל בידוד PVC

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



הגבלת אנרגיית הקצר ע"י מא"ז



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

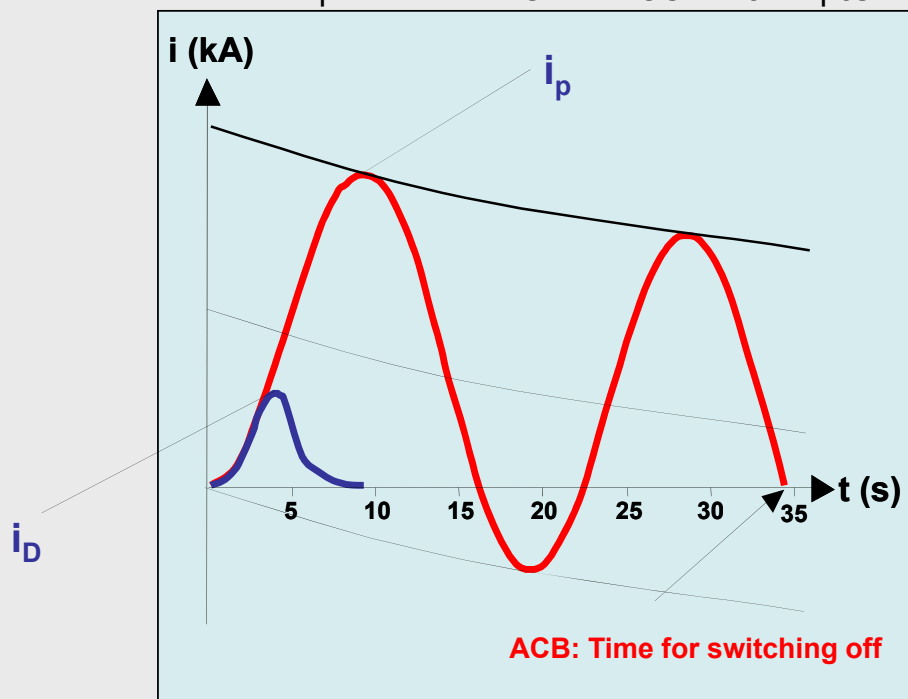
באדום האנרגיה ללא הגבלת זרם

בכחול האנרגיה בשל הגבלת זרם
ע"י מבטח מסוג S280



הגבלת אנרגיית הקצר ע"י מא"ז

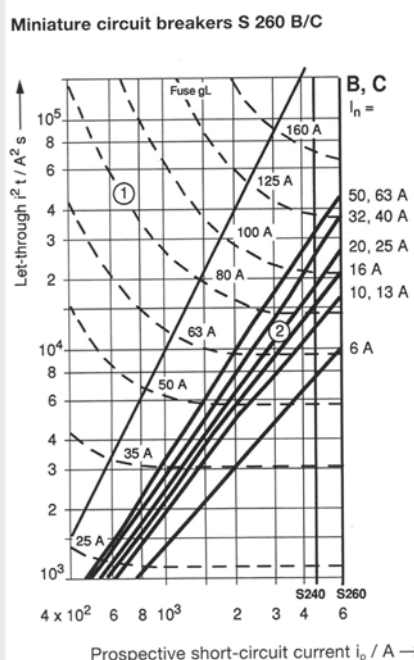
- מפסק אויר או מפסק שאינו מגביל זרם קצר
- מפסקים מסוג MCB או MCCB מגבילי זרם קצר



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- $4.5 * 10^4 A^2 Sec$ (מתוך הגרף משמאל)

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

ניתן לראות בבירור כי הדרישה מתקיימת.



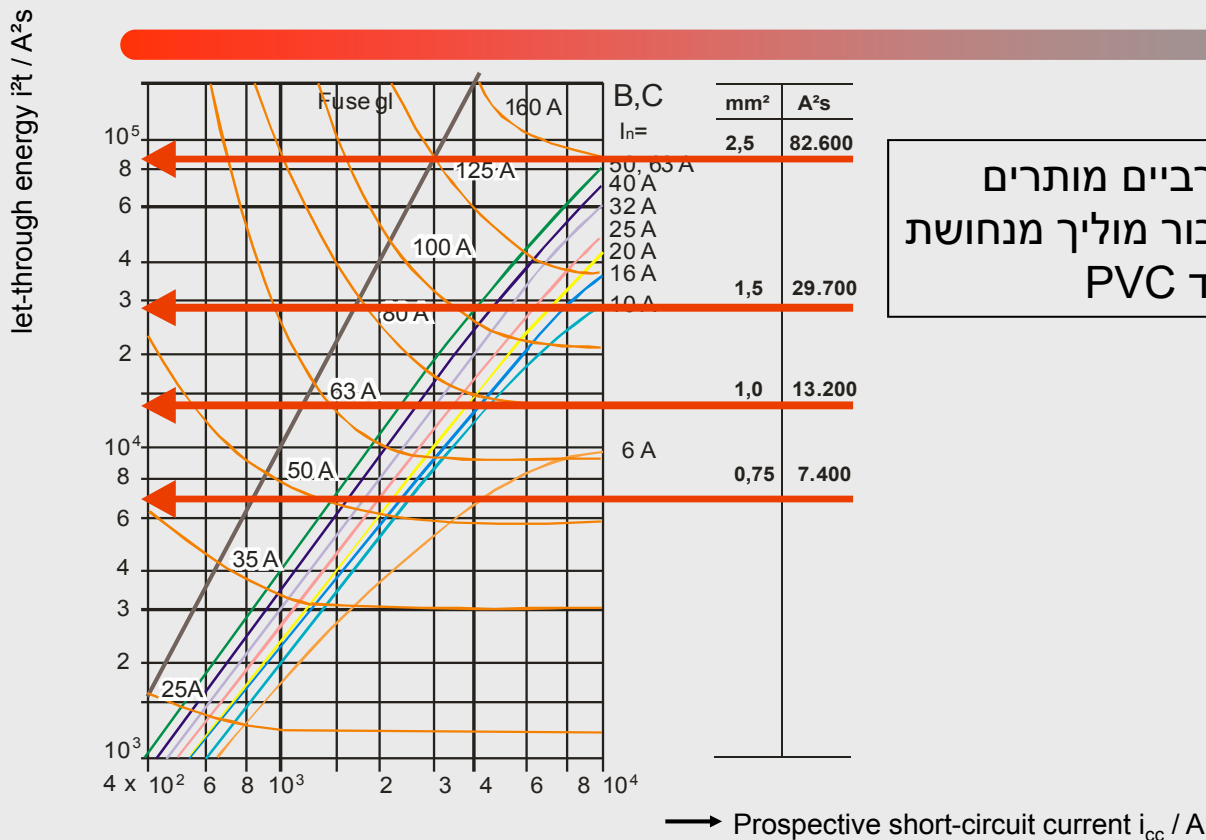
ערכים מרביים של I^2t

מוליכים מנחושת 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 מנחושת בעל בידוד PVC



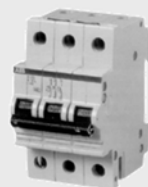
מבטחים והתקנתם

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:

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

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 והתקנתם

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- $0.6I_n$ עד ל- I_n .

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

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 והתקנתם

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 יצויין הזרם I_n המותר במעגל.



מבטחים והתקנתם

דרישות ממבטח להגנה בפני זרם קצר בלבד:

- א-** צריך להפסיק את זרם הקצר .
- ב-** כושר הניתוק שלו חייב להיות גדול מזרם הקצר המרבי 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 השראי מקורו בעובדה שמוליך שזורם בו זרם יוצר סביבו שדה מגנטי. כאשר שדה זה קבוע (כתוצאה מזרם ישר), לא נוצר כ"מ נגדי במוליך. אולם כאשר השדה משנה את עוצמתו כתלות בזמן (בשל השתנות עוצמת הזרם), נוצר במוליך כ"מ מושרה נגדי ששואף להזרים זרם בכוון הפוך. כ"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.

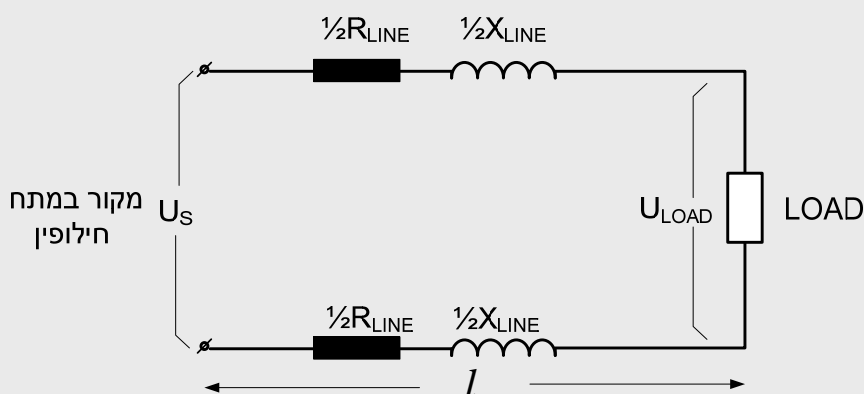


מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

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

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



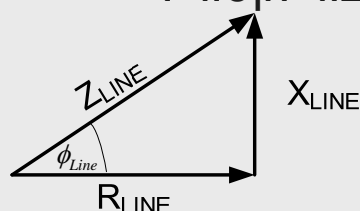
מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

- 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.



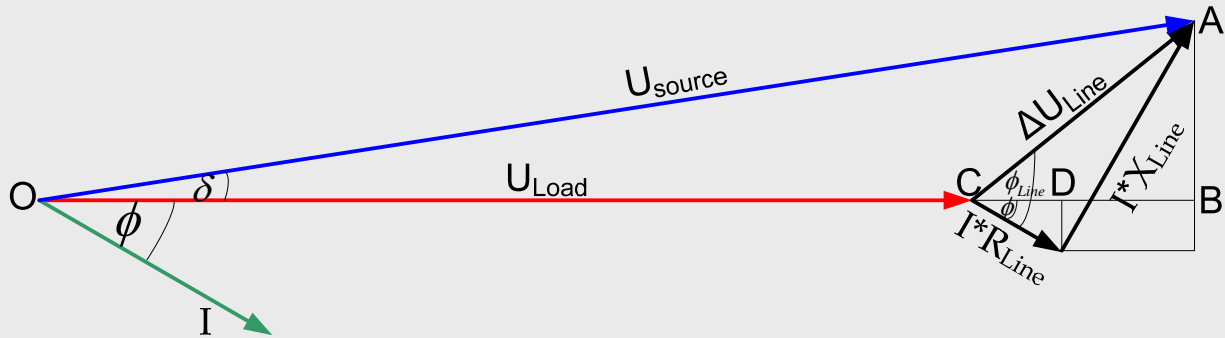
- במתקן בו הזרם מפגר אחר המתח ניתן לתאר את מחוגי המתח והזרם באופן הבא:



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין



תרשים מחוגי של המתחים במעגל



כללית 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.

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

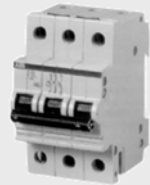
$$\overline{OC} = U_{Load}$$

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

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

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

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



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

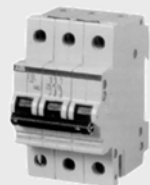
$$\Delta U_{Line} = I \cdot R_{Line} \cdot \cos\phi_{Load} + I \cdot X_{Line} \cdot \sin\phi_{Load}$$

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.



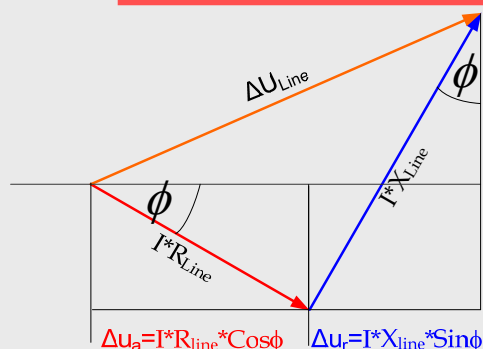
מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

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

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 כוללת של 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)

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

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

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





מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

המשך פתרון תרגיל דוגמא מספר 1 (בדרך מדויקת יותר)

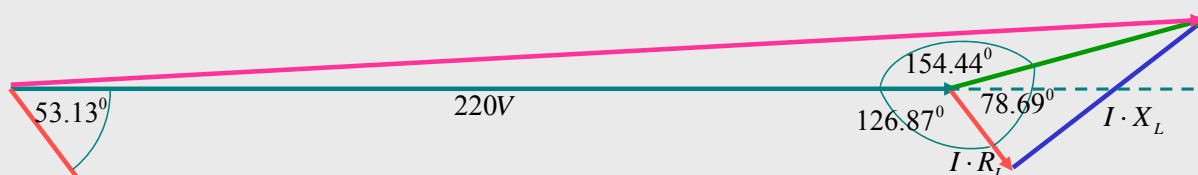
$$180^\circ - 154.44^\circ = 25.56^\circ$$

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

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

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

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



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 0.15Ω/km. חשב את שטח החתך המזערי המותר בהתחשב שמפל המתח אסור שיעלה על 3%. בחר שטח חתך תקני מתאים.



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

פתרון תרגיל דוגמא מספר 2

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

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

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

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

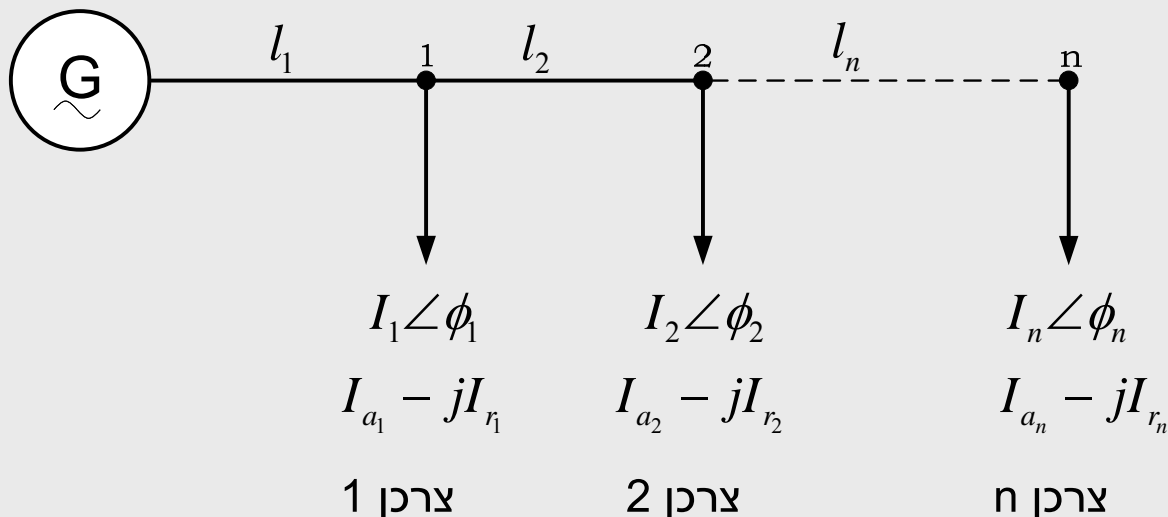
$$S = \frac{\rho \cdot l}{R} = \frac{0.0175 \cdot 175}{0.104} = 29.44mm^2$$

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]
הד 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

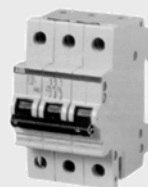
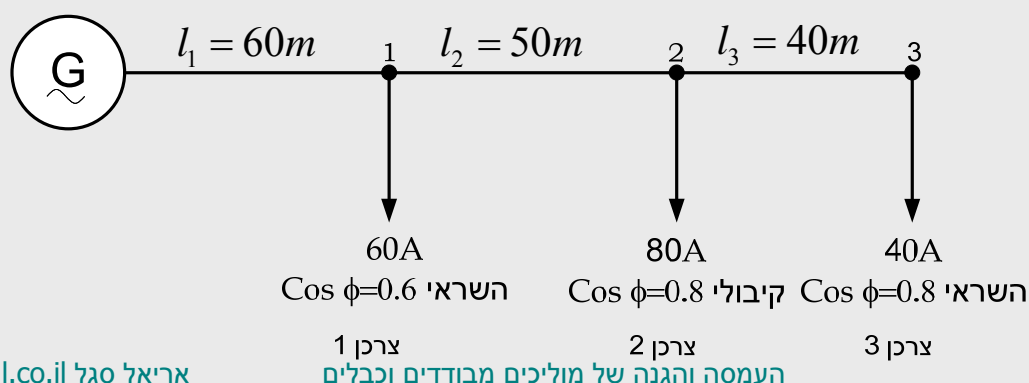
מפל המתח על הרכיב <u>ההגבי</u> של הקו [V].	$\Delta U_{r\%}$
מפל המתח על הרכיב <u>הפעיל</u> של הקו [V].	$\Delta U_{a\%}$
ההיגב <u>ההשראי</u> של מוליכי הקו [Ω/km].	X_0
מתח <u>נקוב</u> של הרשת [V].	U_n
זרם <u>ריאקטיבי</u> בקטע קו i [A].	$I_{r_{li}}$
זרם <u>פעיל</u> בקטע קו i [A].	$I_{a_{li}}$
אורך קטע הקו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



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

תרגיל דוגמא מספר 3

נתונה רשת עלית חד מופעית במתח 230V מוליכים מנחושת והיגב השראי של $0.4\Omega/km$. נתוני הצרכנים מתוארים באיור. בחר שטח חתך אחד תקני אם ידוע שמפל המתח המרבי המותר הוא 3%.



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

פתרון תרגיל דוגמא מספר 3

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

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

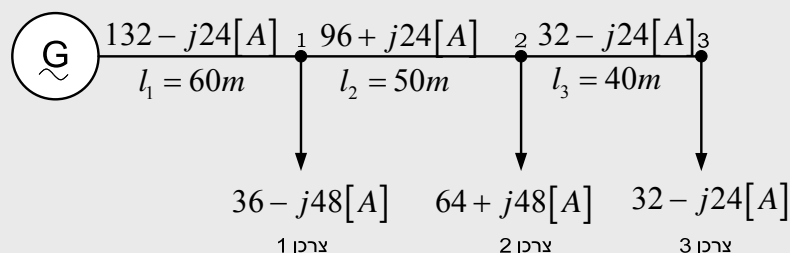
$$I_2 = I_2 \cdot \cos\phi_2 + jI_2 \cdot \sin\phi_2 = 80 \cdot 0.8 + j80 \cdot 0.6 = 64 + j48 [A]$$

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

$$I_{l_3} = 32 - j24A : l_3 \text{ הזרם בקטע}$$

$$I_{l_2} = 96 + j24A : l_2 \text{ הזרם בקטע}$$

$$I_{l_1} = 132 - j24A : l_1 \text{ הזרם בקטע}$$





מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

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

המשך פתרון תרגיל דוגמא מספר 3

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

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

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

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

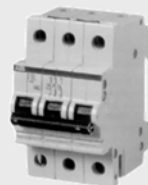
שטח חתך תקני המבטיח מפל מתח קטן מהנדרש הינו: 95 ממ"ר.

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

הזרם בכניסה שווה ל:

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

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



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

תרגיל מפל מתח במעגל בעל שטח חתך לא אחיד.

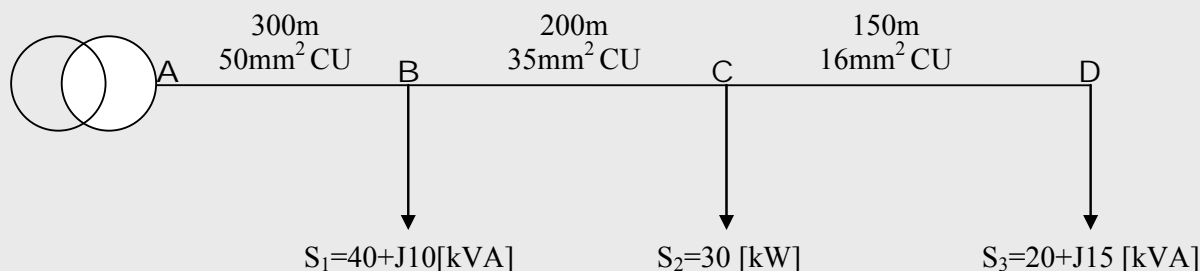
מעגל רדיאלי תלת מופעי ביציאת שנאי, מזין צרכנים כמתואר בתרשים. המתח הנקוב של השנאי, 400V. המוליכים עשויים מנחושת והיגבם ההשראי 0.1Ω/km.

א. חשב את מפל המתח המרבי ברשת.

ב. נדרש שהמתח בהדקי המונה של הצרכנים לא ירד מתחת ל- 7% מהמתח הנקוב.

מה עליך לעשות כדי לקיים את הדרישה? (הערה: נדרשת תוצאה חישובית)

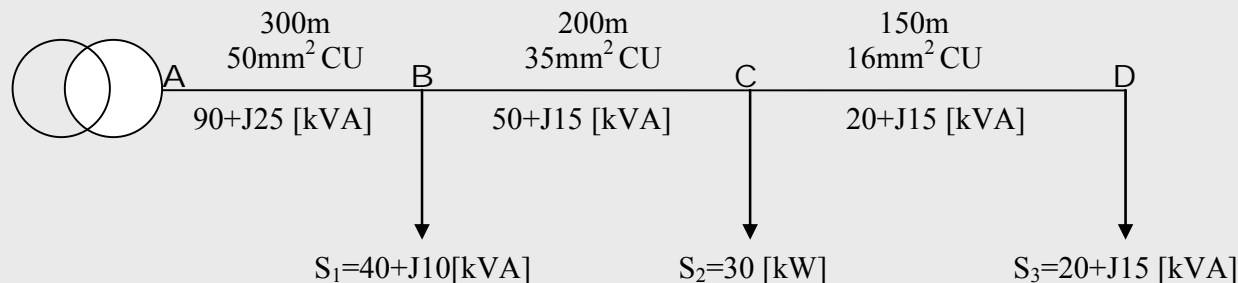
ג. ציין פתרונות אפשריים נוספים להקטנת מפל המתח בקו.





מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

חישוב הספקי הקטעים:

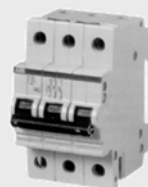


א. חישוב מפל המתח הראקטיבי והאקטיבי בצרכן האחרון:

$$\Delta U_{r\%} = \frac{X_0}{10 \cdot U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} Q_{li} \cdot l_i = \frac{0.1}{10 \cdot 400^2} \cdot [(25 \cdot 300) + (15 \cdot 200) + (15 \cdot 150)] \cdot 1000 = 0.77\%$$

$$\Delta U_{a\%} = \frac{100 \cdot \rho}{U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{li} \cdot l_i}{A_{li}} = \frac{100 \cdot 0.018}{400^2} \cdot \left[\left(\frac{90 \cdot 300}{50} \right) + \left(\frac{50 \cdot 200}{35} \right) + \left(\frac{20 \cdot 150}{16} \right) \right] \cdot 1000 = 11.4\%$$

$$\Delta U = \Delta U_{r\%} + \Delta U_{a\%} = 0.77 + 11.4 = 12.7\% > 7\%$$



מפלי מתח ברשתות זרם חילופין

כדי להפחית את מפל המתח לפחות מ-7% נדרש להפחית את מפל המתח האקטיבי לפחות מ-6.3%. לכן: הביטוי בסוגריים המרובעים [X] שווה ל:

$$X = 1013.2$$

$$\Delta U_{a\%} = \frac{100 \cdot \rho}{U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{li} \cdot l_i}{A_{li}} = \frac{100 \cdot 0.018}{400^2} \cdot [X] \cdot 1000 = 6.3\%$$

$$X' = 560$$

נדרש שערכו של הביטוי בסוגריים יהיה:

נדרש איפה להקטין את הביטוי בסוגריים ל-55% מערכו.

הדבר ניתן לביצוע על ידי הכפלת שטחי החתך של כל אחד מחלקי המעגל.

$$\Delta U_{a\%} = \frac{100 \cdot \rho}{U_n^2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{P_{li} \cdot l_i}{A_{li}} = \frac{100 \cdot 0.018}{400^2} \cdot \left[\left(\frac{90 \cdot 300}{95} \right) + \left(\frac{50 \cdot 200}{70} \right) + \left(\frac{20 \cdot 150}{35} \right) \right] \cdot 1000 = 4.8\%$$

$$\Delta U = \Delta U_{r\%} + \Delta U_{a\%} = 0.77 + 4.8 = 5.57\% < 7\%$$

עקרונית ניתן להסתפק בענף האחרון בשטח חתך מוליכים של 25 מ"ר.

ג. ניתן לשפר את מקדם ההספק ולהפחית את מפל המתח הריאקטיבי.