



כבלי מתח גבוה ומתח עליון

כתיבה ועריכה:

• סגל אריאל



בידוד כבלים למתח גבוה ומתח עליון

בידוד הכבל:

בידוד הכבל הוא החלק החשוב ביותר של הכבל. הבידוד צריך להיעשות מחומר באיכות גבוהה. ללא אלמנטים זרים שיכולים להשפיע על צורת השדה החשמלי בכבל. נדרשת עמידות הבידוד מ-2 סיבות:

- א.** חשמלית - עמידה במתח פריצה ומתח יתר.
- ב.** מכנית - הגנה טובה. פיזור חום מתאים ועמידה בטמפרטורות.

סוגי בידוד:

- נייר רווי שמן
- חומרים פלסטיים ופולימרים.
- שמן
- גז.

בידוד כבלים למתח גבוה ומתח עליון

בידוד נייר רווי שמן

בידוד זה שימושי בתעשיית הכבלים מזה עשרות שנים, בהצלחה גדולה. הנייר עשוי מחומר הומוגני בצורת פס ברוחב 15 - 10 מ"מ. הניר עצמו עובר בדיקות קפדניות לעמידות במתח פריצה ומתח יתר ובדיקות מכניות לקריעה והומוגניות החומר.

תפקיד הטבילה בשמן לשפר את בידוד הנייר ולאטום את הכבל מפני חדירת רטיבות. בעת ליפוף הנייר על הכבל יש לדאוג למניעת היווצרות בועות אויר בין שכבות הנייר אחרת עשוי הכבל להיפרץ במהירות. קיימים גם סוגי שמן בלתי נזיל שניתז להתקינו גם במקומות עם הפרשי גובה גדולים ללא סכנה שהקצה העלי של הכבל יתייבש וינזק.

בידוד כבלים למתח גבוה ומתח עליון

בידוד בעזרת חומרים פלסטיים

הסוגים המקובלים בסוג בידוד זה הם פולימרים טרמופלסטיים

א. פוליויניל כלוריד P.V.C.

ב. פוליאטילן P.E.

ג. פוליאטילן מוצלב X.L.P.E.

ד. גומי E.P.R. (אטילן פרופילן רבר)

פוליויניל כלוריד P.V. C

P.V.C הוא החומר הראשון שנכנס לשימוש כבידוד פלסטי לכבלים.

חומר זה גמיש מאוד ובעל כושר הדבקה טוב. אין לו נתונים טרמיים טובים ומסיבה זו מוסיפים לו מילוי של חומרים כגון גיר או קאולין. בכל מקרה מוגבל בידוד זה לטמפרטורה של 70°C . בטמפרטורה גבוהה הופך הבידוד לנוזלי. יש לציין כי הכלור פולט בעת בעירה גזים רעילים. ל-P.V.C הפסדים דיאלקטריים גדולים שמגבילים אותו לשימוש למתח עד 10kV .

בידוד כבלים למתח גבוה ומתח עליון

פוליאתילן P.E.

P.E. הינו חומר דומה מאוד ל- P.V.C. אך בשימוש כבידוד לכבלים הוא ניחן ביתרונות הבאים: עמידות במתחים של עד 60 ק"ו, גמישות בדומה ל-P.V.C. ועמידות בטמפרטורה של עד 70°C .

פוליאתילן מוצלב X.L.P.E.

פוליאתילן מוצלב הוא סוג משופר של פוליאתילן רגיל. בתהליך ההצלבה מאבד הפוליאתילן חלק מגמישותו אולם לעומת זאת ניתן להשתמש בו לזמן ממושך עד 90°C ובמתחים של עד 400 ק"ו. כיום זהו הבידוד הנפוץ ביותר בכבלים בעולם.

בידוד גומי E.P.R.

בידוד גומי E.P.R. אינו נפוץ בארץ בגלל מחירו הגבוה. בידוד זה הוא בעל נתונים מכניים וחשמליים טובים מאוד. הוא שימושי בכבלים במתחים עד 60kV בהם דרושה גמישות גבוהה.

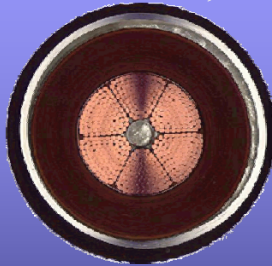
השוואה בין פוליאתילן לפוליאתילן מוצלב

תכונת החומר	פוליאתילן - PE	פוליאתילן מוצלב XLPE
טמפ' ריכוך $[^{\circ}\text{C}]$	115-130	300
טמפ' מוליך מירבית $[^{\circ}\text{C}]$	70	90
טמפ' מוליך מירבית בזמן קצר $[^{\circ}\text{C}]$	150	250
כוח לקריעה ב- 20°C $[\text{Nt/mm}^2]$	10	12.5
התארכות לקריעה $[\%]$	300	200

בידוד כבלים למתח גבוה ומתח עליון

בידוד שמן

שמן משמש כחומר בידוד רק בכבלים במתח עליון מעל 69kV. בכבל זה המוליך מבודד בנייר צף בתוך השמן שהוא בעל תפקידי בידוד וקירור. קיימים בעולם כבלים מסוג זה בחתכים של עד 2,600 מ"ר ולמתחים של 500kV ויותר.



בידוד גז

בדומה לשמן משמש גז SF_6 לבידוד כבלים במתח עליון. ההבדל בין כבל זה לכבל בעל בידוד שמן הינו בחיזוקים שבאמצעותם מחוזקים המוליכים במקומם.

גם בסוג זה קיימים בחתכים גבוהים מאוד (מעל 2000 מ"ר) ומתחים של עד 600kV.

מבנה כבלים למתח גבוה ומתח עליון

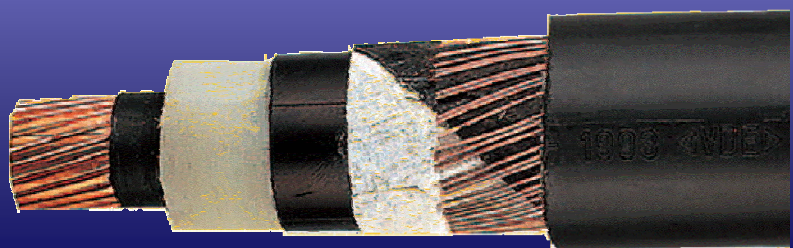
מעטה חיצוני

המעטה החיצוני של הכבל מורכב ממספר שכבות שלכל אחת תפקיד משלה. מחלקים את התפקידים לתפקידים חשמליים ותפקידים מכניים.

תפקידים חשמליים:

סיכור

סיכור היא שכבה דקה של חומר מתכתי שתפקידה להשלים את תהליך פיזור השדה החשמלי והעברת הפוטנציאל שמופיע על פני הבידוד לאדמה, על ידי חיבור קצות הכבל להארקה. שכבת סיכור משולבת רק בכבלים למתח של 5kV ומעלה.



מבנה כבלים למתח גבוה ומתח עליון

שכבת חצי מוליך:

שכבת החצי מוליך עשוי מפוליאטילן וגרפית. שכבה זו נקראת באנגלית Conductive layer. השיכבה העליונה של גידי המוליך והסיכוך אינה ישרה. תפקיד השיכבה החצי מוליכה למלא את החריצים תוך מניעת בועות אויר בחומר שהפוטנציאל שלו שווה לפוטנציאל המוליכים או הסיכוך. שכבת החצי מוליך צמודה לשכבת הבידוד מ-2 צידיה ואינה מותירה מקום לבועיות אויר.

בועיות אויר גורמות להתפרקויות חלקיות שהולכות ומתפתחות בבידוד עד לפריצת הבידוד, הפסקת המעגל החשמל ונזק בלתי הפיך לכבל.

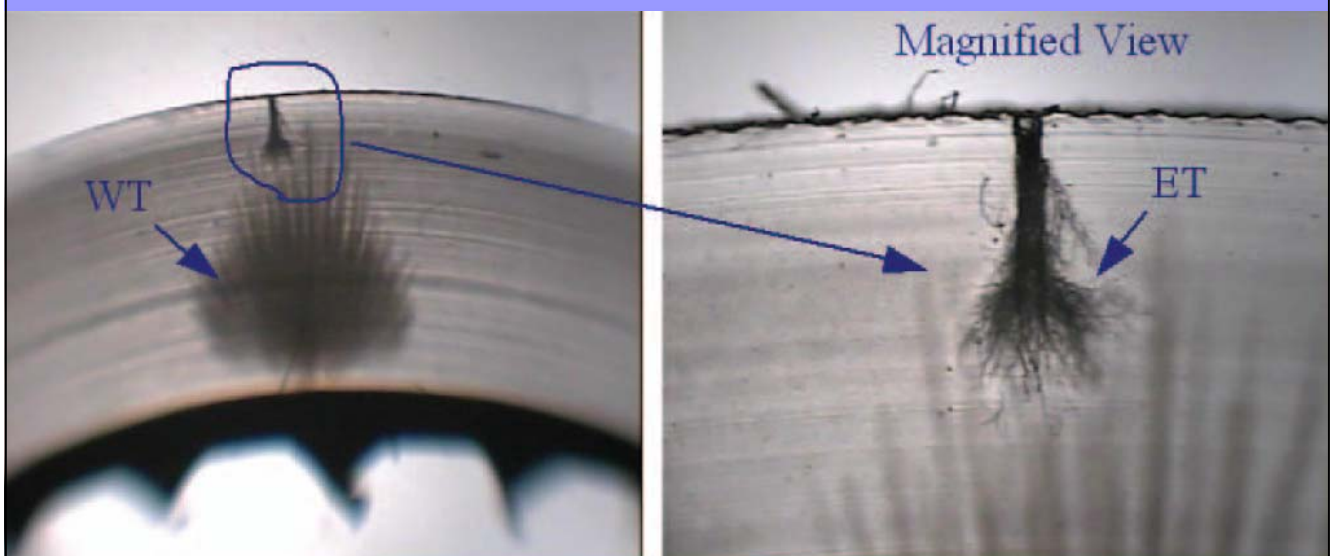


כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

9

נזק בבידוד כבלים



תוצאה של מים בבידוד

תוצאה של התפרקויות חלקיות

מבנה כבלים למתח גבוה ומתח עליון

תפקידים מכניים:

שיריון:

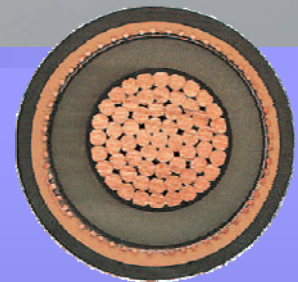
היות והכבל נמצא באדמה ללא תוואי מדויק במפות קיימת אפשרות של פגיעה מכנית. מסיבות אלה יש להגן על הכבל. ההגנה מתבצעת באמצעות שיריון עשוי מפסי פלדה. בדרך כלל יש 2 שכבות של פסים. הפסים חייבים להיות מגלוונים או מוגנים בשיטה אחרת מפני חלודה.

עטיפה חיצונית:

תפקיד השיכבה החיצונית להגן על הכבל מפני חדירה של מים או רטיבות לכבל. על פי רוב מיוצר הבידוד החיצוני מ-P.E או P.V.C. בכבלים ישנים בעלי בידוד נייר רווי שמן ניתן למצוא גם בידוד חיצוני מסוג פסי יוטה בשילוב זפת.

בכבלים רבים משלבים שיכבה נוספת בין הסיכוך לעטיפה החיצונית שיכבה זו מכילה חומר סופח לחות שבמגע עם לחות מתנפח ומגביל את התפשטות המים ליתר חלקי הכבל.

מבנה כבל למתח גבוה

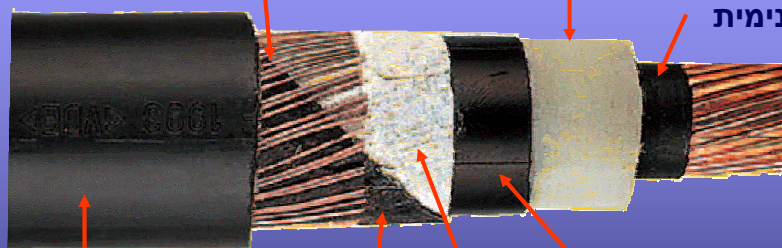


סיכוך מחוטי נחושת וסרט נחושת

בידוד פוליאתילן מוצלב XLPE

שכבה חצי מוליכה פנימית

מוליך מנחושת או אלומיניום



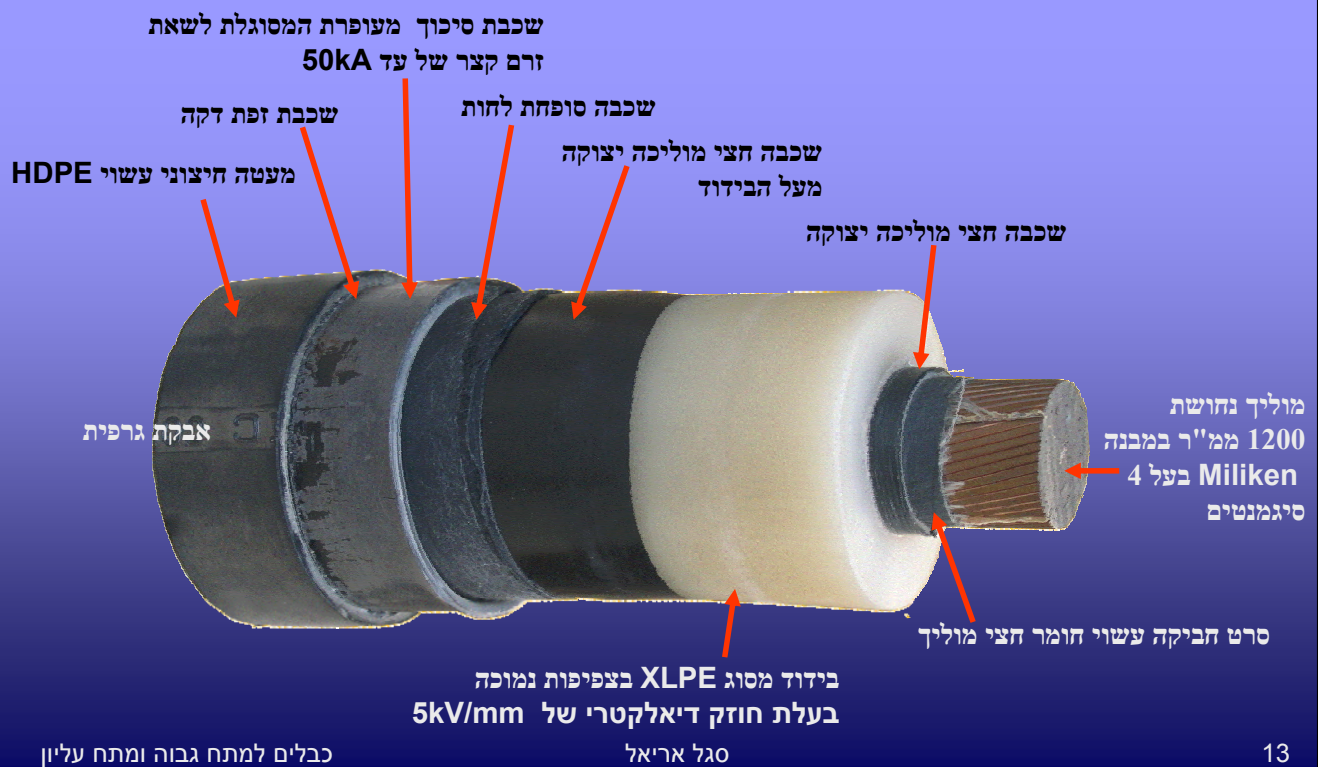
שכבה חצי מוליכה חיצונית

חומר סופח לחות

מצע

מעטה חיצוני מפוליאתילן PE

מבנה כבל למתח עליון



13

תופי כבלים במתח עליון



כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

14

סוג כבלים לפי חומרי הבידוד ומבנה

כבלים בעלי נייר רווי שמן

כבלים אלה ניתן למצא ב-2 סוגים.

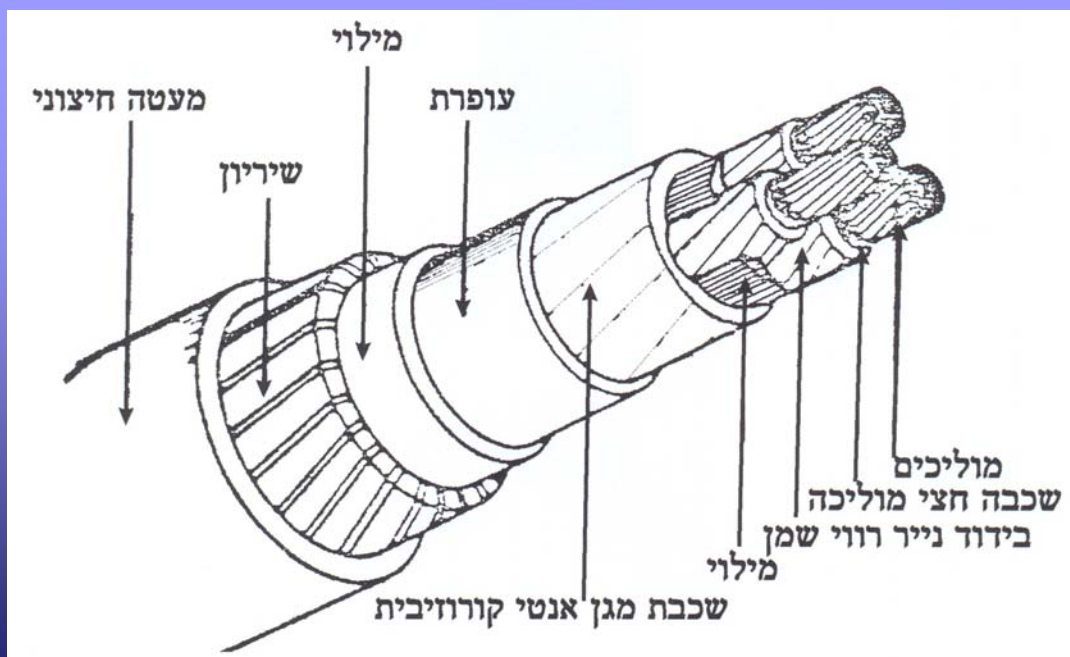
א. עם סיכוך לכל שלשת הפזות.

ב. עם סיכוך לכל פאזה בנפרד.

א. כבל עם סיכוך יחיד לכל שלשת הפזות

מיוצר למתחים של עד 22kV. כבל זה הינו זול יחסית. חסרונו של כבל זה שעוצמת השדה החשמלי שונה בכוונים שונים. לפיכך מתח הפריצה נמוך יחסית. הסיכוך בסוג זה של כבלים עשוי מחצי מוליך, או סרט אלומיניום מחורר ומכוסה בכל מקרה בשכבת עופרת. שכבת העופרת מגינה על הכבל בפני חדירת מים לתוך הבידוד. (עופרת מאבדת את כושר האטימה בשל חימצון). כבלים אלה מוכרים בעולם ובישראל בשם Belted type.

כבל בידוד נייר רווי שמן סיכוך יחיד

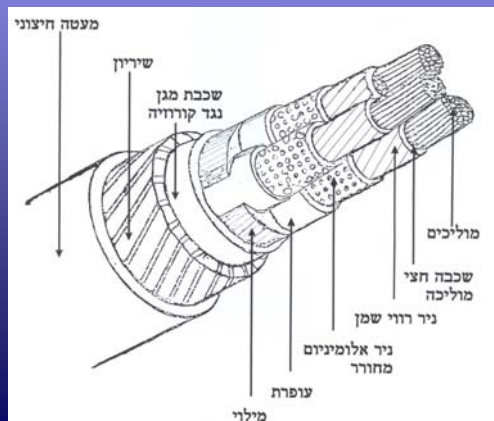


סוג כבלים לפי חומרי הבידוד ומבנה

כבלים בעלי נייר רווי שמן

ב. עם סיכוך לכל פאזה בנפרד

מיוצר למתחים של עד 33kV. עוצמת השדה אחידה לכל הכוונים. חיסרון קירור שונה לכוונים שונים. נוצר הפרש טמפרטורות הבידוד בכוונים שונים. כתוצאה נגרמים סדקים והתיישנות הבידוד. הסיכוך עשוי מסרט אלומיניום מחורר ועליו שכבת עופרת לכל אחד מהגידים.



כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

17

מבנה המוליכים

לבניית המוליכים משתמשים בתיילים מנחושת או אלומיניום. צורת המוליך תלויה בשימושו או התכו.

1. מוליך עגול העשוי מתיל יחיד (מלא)

סובל מבעיות גמישות לכן נמצא בשימוש בחתכים קטנים בלבד עד 16 מ"מ נחושת. חתכים גדולים יותר ניתן למצוא בפסי צבירה.

2. מוליך עגול שזור

מוליך זה עשוי מתיילים רבים בעלי שטח חתך נמוך השזורים אלה באלה. מבנה זה משפר משמעותית את גמישות הכבל ולכן נפוץ בכל סוגי הכבלים הקיימים היום במתח נמוך ובמתח גבוה.

במתח גבוה יוצר מבנה זה בעיה עקב שדה חשמלי לא אחיד בכבל שניתנת לפיתרון על ידי הוספת שכבת חצי מוליך מסביב לקבוצת המוליכים ליצירת פיזור שדה אחיד.

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

18

מבנה המוליך

3. מוליך גזרתי (סקטוריאלי) שזור

בעית קירור הכבל מעסיקה רבות את היצרנים.

אחד הפתרונות לבעית הקירור היא הגדלת שטח מגע המוליך עם המעטה החיצוני של הכבל. המבנה הגזרתי מבטיח שטח מגע גדול יותר עם מקדם מילוי טוב יותר כך ששטח הכבל יורד לכ- 94% משטח כבל בעל מוליכים עגולים.

כבל רב תיילי עגול



כבלים למתח גבוה ומתח עליון

כבל רב גידי עגול



סגל אריאל

כבל רב גידי סקטוריאלי



סוג כבלים לפי חומרי הבידוד ומבנה

הכבלים למתח גבוה ומתח עליון הנפוצים ביותר בארץ מבוססים על בידוד מפוליאטילן מוצלב – XLPE. כבלים אלה מיוצרים בארץ ממתח נקוב של 1kV עד למתח של 30kV לפי תקן IEC-502 ולמתח עד 160kV ע"פ תקן IEC-840.

צורת הסימון המתח על מעטפת הכבל נראית באופן הבא: 18/30 (36).

המספר הראשון מציין את המתח הפאזי ומכונה U_0 .

המספר השני מציין את המתח הנקוב של הרשת ומכונה U .

המספר השלישי לא תמיד מופיע ומציין את ה-Voltage class.

$$\frac{U_0}{U} = \frac{\text{מתח פאזי}}{\text{מתח נקוב של הרשת}}$$

רמות מתח לכבלים

Voltage class

תקן	-	3.6	7.2	12	17.5	24	36	52
IEC	0.6/1	1.8/3	3.6/6	6/10	8.7/15	12/20	18/30	26/45
BS	0.6/1	1.9/3.3	3.8/6.6	6.3/11	8.7/15	12.7/22	19/33	
VDE	0.6/1	1.7/3	3.5/6	5.8/10	8.7/15	11.6/20	17.3/30	

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

21

דף נתונים של כבל אופייני במ"ג 18/30kV נחושת

Catalog Number	No., Nominal cross sectional area of conductors & screen	Minimum No. of wires in conductor	Nominal insulation thickness	Nominal sheath thickness	Approximate outer diameter	Approximate cable weight	Minimum Bending Radius	Max. conductor DC resistance at 20°C	Short Circuit rating conductor (1 sec) (1)	Current Rating (2)				Reactance @50Hz (5)	Capacitance	Standard supply lengths
										In air (3)	In ground (4)	In air (3)	In ground (4)			
	No. x mm ² /mm ²		mm	mm	mm	kg/km	mm	Ω/km	kA	A	A	A	A	Ω/km	μF/km	m
N2XS(F)2Y 18/30 (36) kV COPPER CONDUCTOR																
168050	1x50/16	6	8.0	2.0	33	1400	495	0.387	7.2	241	225	282	251	0.146	0.13	1000
168072	1x70/16	12	8.0	2.0	35	1650	525	0.268	10.0	299	274	350	304	0.137	0.15	1000
168095	1x95/16	15	8.0	2.1	37	2000	555	0.193	13.6	363	327	425	362	0.131	0.16	1000
168125	1x120/16	18	8.0	2.1	38	2250	570	0.153	17.2	418	371	488	409	0.125	0.18	1000
168150	1x150/25	18	8.0	2.2	40	2700	600	0.124	21.5	472	414	548	449	0.121	0.19	1000
168185	1x185/25	30	8.0	2.2	42	3100	630	0.0991	26.5	539	466	624	502	0.117	0.20	1000
168241	1x240/25	34	8.0	2.3	44	3750	660	0.0754	34.3	635	539	728	574	0.112	0.22	500
168300	1x300/25	34	8.0	2.4	47	4300	705	0.0601	42.9	725	606	828	640	0.108	0.24	500
168400	1x400/35	53	8.0	2.5	52	5200	780	0.0470	57.2	831	680	922	695	0.103	0.27	500
168502	1x500/35	53	8.0	2.6	54	6450	810	0.0366	71.5	953	765	1045	773	0.100	0.29	500
168635	1x630/35	53	8.0	2.7	60	7900	900	0.0283	90.1	1070	855	1160	861	0.098	0.32	500

(1) The conductor 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 in trefoil touching formation or flat formation with one cable diameter clearance. The screens are bonded and earthed at both ends of the cables. According to VDE 0276-620.

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

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

(5) Calculated inductive reactance per core in trefoil touching formation. The screens are bonded and earthed at both ends of the cables.

TEMPERATURE RATING FACTORS

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	-	-	-

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

22

דף נתונים של כבל אופייני במ"ג 18/30kV אלומיניום



Catalog Number	No., Nominal cross sectional area of conductors & screen	Minimum No. of wires in conductor	Nominal insulation thickness	Nominal sheath thickness	Approximate outer diameter	Approximate cable weight	Minimum Bending Radius	Max. conductor DC resistance at 20°C	Short Circuit rating conductor (1 sec) (1)	Current Rating (2)				Reactance @50Hz (5)	Capacitance	Standard supply lengths
										In air (3)	In ground (4)	In air (3)	In ground (4)			
	No. x mm ² /mm ²		mm	mm	mm	kg/km	mm	Ω/km	kA	A	A	A	A	Ω/km	μF/km	m
NA2XS(F)2Y 18/30 (36) kV ALUMINIUM CONDUCTOR																
168047	1x50/16	6	8.0	2.0	33	1000	495	0.641	4.7	187	174	219	195	0.146	0.13	1000
168073	1x70/16	12	8.0	2.0	35	1200	525	0.443	6.6	232	213	273	238	0.137	0.15	1000
168090	1x95/16	15	8.0	2.1	37	1400	555	0.320	8.9	282	254	331	283	0.131	0.16	1000
168129	1x120/16	15	8.0	2.1	38	1500	570	0.253	11.3	325	289	382	321	0.125	0.18	1000
168162	1x150/25	15	8.0	2.2	40	1850	600	0.206	14.1	367	322	429	354	0.121	0.19	1000
168193	1x185/25	30	8.0	2.2	42	1900	630	0.164	17.4	421	364	492	399	0.117	0.20	1000
168242	1x240/25	30	8.0	2.3	44	2200	660	0.125	22.6	496	422	578	458	0.112	0.22	1000
1683001	1x300/25	30	8.0	2.4	47	2500	705	0.100	28.2	568	476	659	514	0.108	0.24	1000
168411	1x400/35	53	8.0	2.5	52	2850	780	0.0778	37.6	659	541	750	570	0.103	0.27	1000
168503	1x500/35	53	8.0	2.6	54	3300	810	0.0605	47	764	616	861	642	0.100	0.29	500
168636	1x630/35	53	8.0	2.7	60	3800	900	0.0469	59.2	880	709	880	736	0.098	0.32	500

- (1) The conductor 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 in trefoil touching formation or flat formation with one cable diameter clearance. The screens are bonded and earthed at both ends of the cables. According to VDE 0276-620.
 (3) Cable laid in freely circulating air at 30 °C, protected against direct thermal radiation due to sun, etc.
 (4) Cable directly buried at 0.7 m deep in soil at 20 °C, with 1 K . m/W thermal resistivity. Load factor 0.7.
 (5) Calculated inductive reactance per core in trefoil touching formation. The screens are bonded and earthed at both ends of the cables.

TEMPERATURE RATING FACTORS

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	-	-	-

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

23

דף נתונים של כבל אופייני במתח 26/45kV נחושת



Catalog Number	No., Nominal cross sectional area of conductors & screen	Minimum No. of wires in conductor	Nominal insulation thickness	Nominal sheath thickness	Approximate outer diameter	Approximate cable weight	Minimum bending radius	Max. conductor DC resistance at 20°C	Short Circuit rating conductor (1 sec) (1)	Current Rating (2)		Reactance @50Hz (5)	Capacitance	Standard supply lengths
										In air (3)	Buried (4)			
	No. x mm ² /mm ²		mm	mm	mm	kg/km	mm	Ω/km	kA	A	A	Ω/km	μF/km	m
COPPER CONDUCTOR														
168092	1x95/16	15	10.5	2.3	42	2170	629	0.193	13.6	377	324	0.140	0.139	1000
168131	1x120/16	18	10.5	2.4	44	2470	654	0.153	17.2	433	367	0.135	0.150	1000
168147	1x150/25	18	10.5	2.4	45	2860	674	0.124	21.5	489	409	0.131	0.158	1000
168191	1x185/25	30	10.5	2.5	47	3280	704	0.0991	26.5	560	461	0.127	0.170	1000
168239	1x240/25	34	10.5	2.5	49	3890	738	0.0754	34.3	659	532	0.121	0.186	1000
168312	1x300/25	34	10.5	2.6	52	4560	776	0.0601	42.9	754	598	0.117	0.201	500
168414	1x400/35	53	10.5	2.7	55	5540	823	0.0470	57.2	867	673	0.113	0.219	500
168491	1x500/35	53	10.5	2.8	58	6660	873	0.0366	71.5	997	759	0.109	0.239	500
168627	1x630/50	53	10.5	3.0	63	8340	948	0.0283	90.1	1140	841	0.105	0.267	250

- (1) The conductor 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. The screens are bonded and earthed at both ends of the cables. According to IEC 60287.
 (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) Calculated inductive reactance per core in trefoil touching formation. The screens are bonded and earthed at both cable ends.

TEMPERATURE RATING FACTORS

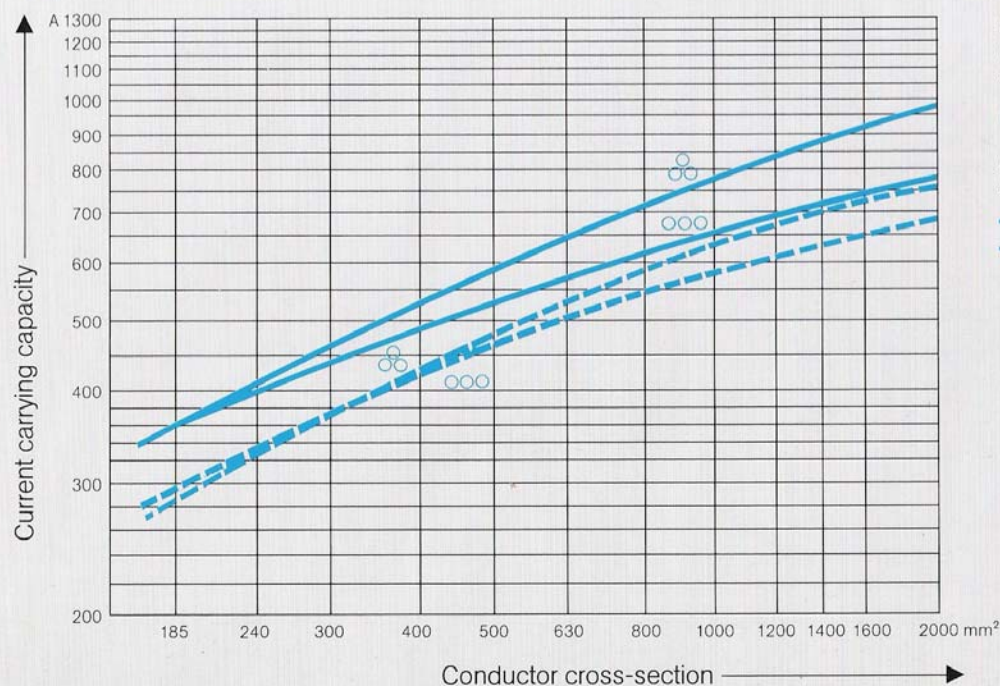
Ambient Temperature °C	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Correction factor air	1.08	1.04	1.00	0.96	0.91	0.87	0.82	0.76	0.71	0.65
Correction factor ground	1.00	0.96	0.93	0.89	0.85	0.80	0.76	-	-	-

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

24

יכולת הולכת זרם כתלות בשיטת ההנחה וסוג המוליך



רמות מתח לכבלים

בחברת החשמל לישראל עבור מתח של 22kV משתמשים על פי רוב בכבלים מסוג 18/30 למרות שהם שייכים לקטגוריה 36kV.

הסיבות:

1. אורך החיים המשופר.
 2. משטר נקודת האפס- ברשתות בעלות נק' אפס מוארכת דרך סליל פטרסון צפוי להיות מתח פאזי של 22kV ויותר בפזות התקינות במקרה של קצר חד פאזי לאדמה. במתקנים בהם צפוי להיות מצב של מתח יתר ליותר מאשר 8 שעות ברציפות או יותר מ-125 שעות בשנה, מומלץ לקחת כבל בקטגוריה גבוהה יותר.
- בירושלים המתח השלוב 33kV למרות זאת בוחרים כבלים בקטגוריה 36kV היות ונק' האפס מוארכת ישירות.
- בדרום הארץ במתח שלוב 33kV משתמשים בכבל מקטגוריה 52kV בשל העובדה שנק' האפס מחוברת לאדמה באמצעות סליל פטרסון.

כבלים למתח עליון בעלי בידוד XLPE

כבלים בעלי בידוד XLPE מיוצרים בעולם בטווח מתחים מ-1kV עד 500kV. עובי הבידוד מגיע לפיכך עד 32 מ"מ. שטחי חתך עד 3000 מ"ר.

בשטחי חתך מעל 800 מ"ר מיצרים את הכבל מסקטורים (גזרות) במבנה שנקרא מבנה מיליקן. במבנה זה לפחות 4 סקטורים הסקטורים מבודדים זה זה באמצעות בידוד ע"פ רוב נייר בשמן.

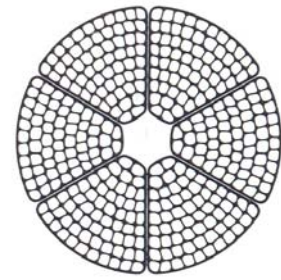
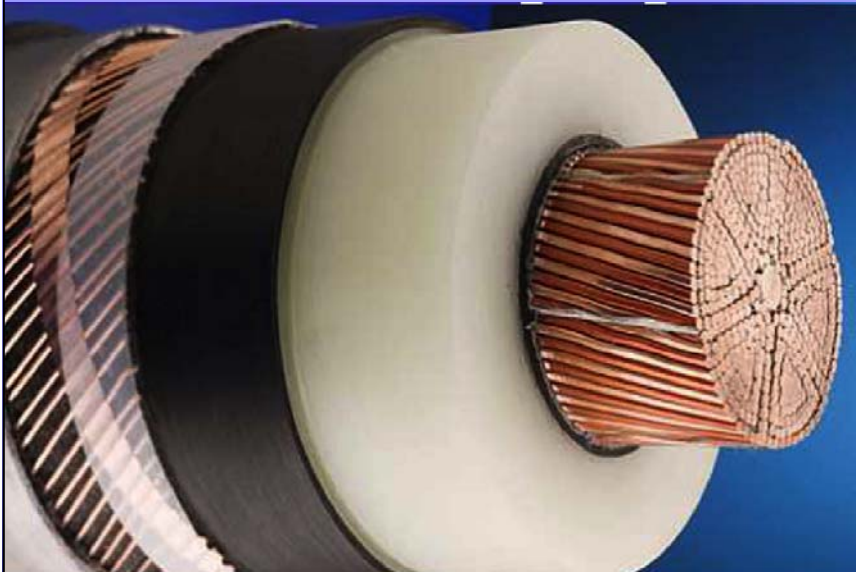
רוב הכבלים במתחים אלה אינם מוגנים מכנית באמצעות שריון. לפיכך יש לדפן את מסלול הכבל בלבנים, צינורות או אמצעי מיגון אחרים. המעטה החיצוני עשוי על פי רוב מפוליאטילן או PVC למניעת חדירת מים.

מבנה מיליקן לכבלים למתח עליון



להקטנת השפעת אפקט הקרום בכבלים בעלי שטחי חתך מעל ל-800 מ"ר משתמשים במבנה גזרתי הנקרא מבנה מיליקן. במבנה זה נוצרות 4 או יותר גזרות מבודדות מעין מספר כבלים במקביל.

כבל במתח 420kV שטח חתך 2500mm^2



Low-loss conductor for oil-filled cables (Milliken conductor)

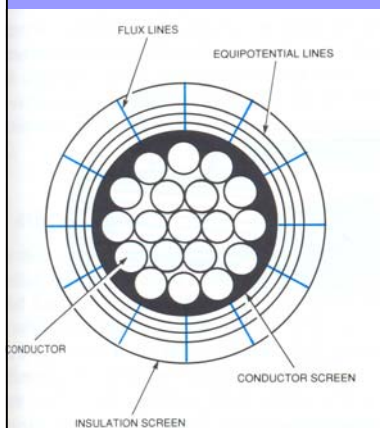
מבנה מיליקן לכבלים למתח עליון



Fig. 1
2XS(FL)2Y or
A2XS(FL)2Y

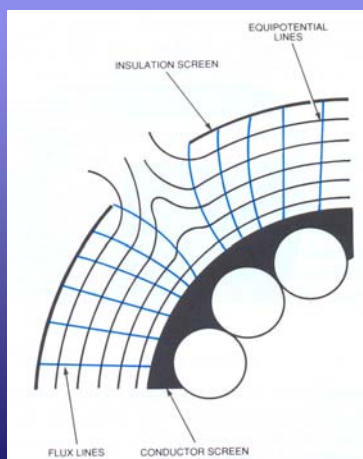
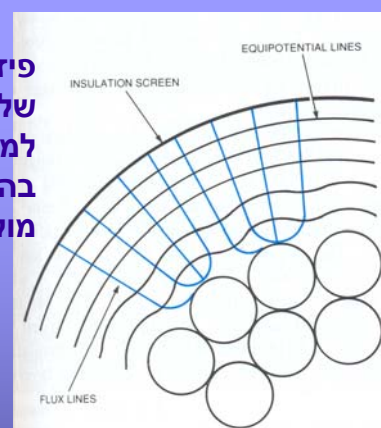
- | | |
|--|--|
| 1 Copper or aluminium conductor | 5 Copper screen |
| 2 Extruded conductor screen | 6 Longitudinally water-tight embedding of screen wires |
| 3 Insulation of cross-linked polyethylene (XLPE) | 7 Semi-conducting tapes |
| 4 Insulation screen consisting of: | 8 Laminated sheath of: |
| 4.1 Extruded, fix-bonded semi-conducting layer | 8.1 Aluminium tape |
| 4.2 Semi-conducting tape | 8.2 Polyethylene (PE) outer sheath |

השפעת הסיכוך על השדה החשמלי מסביב לכבל



פיזור אחיד של
השדה כשקיימת
שיכבה חצי מוליכה
וסיכוך תקין

פיזור בלתי אחיד
של השדה הגורם
למאמצים בבידוד
בהעדר שיכבה חצי
מוליכה וסיכוך תקין



פיזור בלתי אחיד
של השדה ויציאת
שדה חשמלי החוצה
בעת תקלה בסיכוך

קוי מתח גבוה ועליון בכבלים

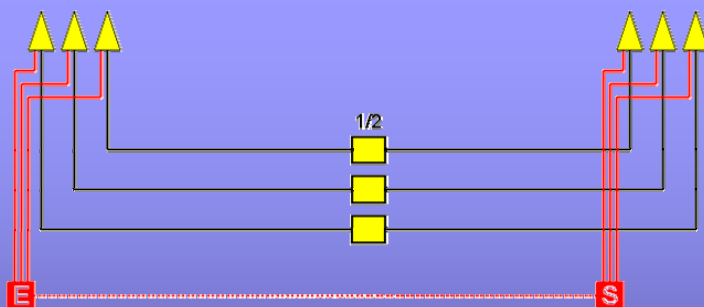
- הסיכוכים של כבלי מתח גבוה מוארקים ב-2 קצותיהם כשאורך הכבל מעל המצוין בטבלה ובצד אחד בכבל קצר יותר. כבלי מתח עליון מוארקים תמיד מ-2 הצדדים.

שטח החתך ממ"ר	אורך הכבל
1*50	120
1*95	65
1*150	40
1*300	20

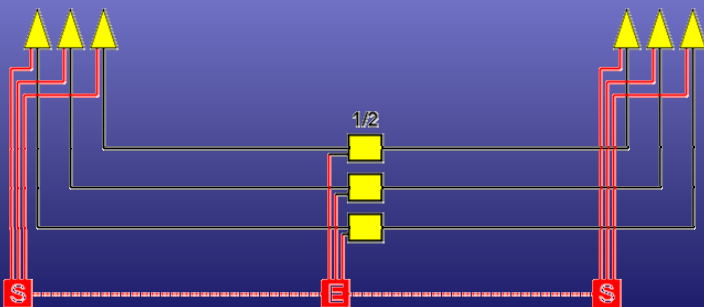
- בכבל שאורכו עולה על 1 ק"מ יש לבצע הארקות ביניים.
- סיכוכי הכבלים בתחנות כח או תחמ"ש יחוברו למערכת הארקה כללית של התחנה. הארקת הכבלים מחוץ לתחנה תתבצע ע"י אלקטרודה מקומית באמצעות מוליכים קצרים ככל האפשר.

הארקת הסיכוך

הארקת הכבל בצד אחד וחיבור הסיכוכים בצידו השני בכבל קצר



הארקת הכבל בצד במרכז וחיבור הסיכוכים בשני הצדדים בכבל כפול באורכו



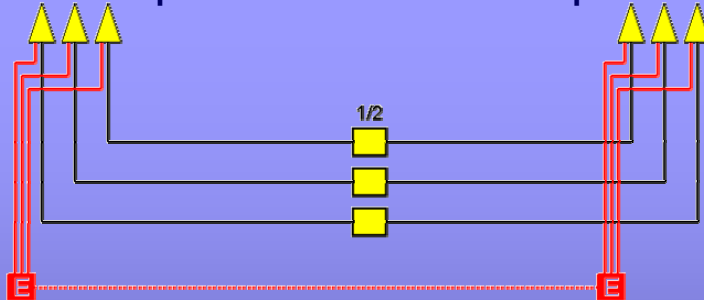
כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

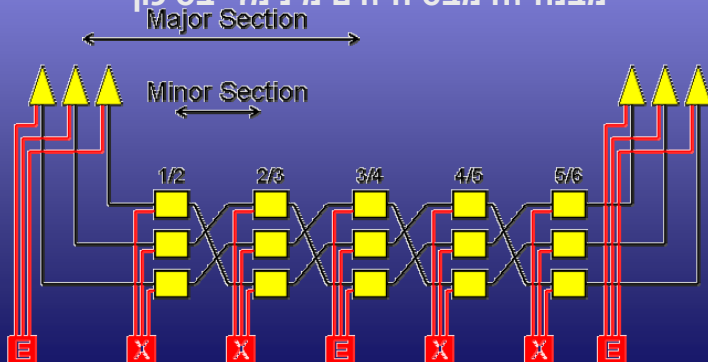
33

הארקת הסיכוך

הארקת הכבל ב-2 הצדדים בכבל ארוך יותר



במרחקים גדולים מבצעים הארקת הכבל ב-3 נקודות תוך הצלבת הסיכוכים Cross bonding
מבנה זה מבטיח זרם מינימלי בסיכוך



כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

34

בדיקות כבלי מתח גבוה

כבלי כוח מחומר מוצק פלסטי למתח נקוב של עד 36kV נבדקים בהתאם לתקן IEC60502-1 כבלי מתח עליון למתח נקוב גבוה יותר נבדקים על פי תקן IEC60840.

בדיקת כבלים מחומר פלסטי מוצק למתח עד 36kV

כבלי כוח מ"ג עוברים במפעל היצרן בדיקות דגם, בדיקות שגרתיות ובדיקה מדגמית.

בדיקת דגם כוללת 6 שלבים:

בדיקה זו מבוצעת על דגם כבל באורך 10-15m.

- א- התפרקויות חלקיות (במתח שווה ל $1.73U_0$) הערך המירבי של ההתפרקויות החלקיות אסור שיעלה על 5pC.
- ב- כיפוף הכבל 3 פעמים הלוך ושוב סביב גליל בקוטר: $20(d+D)$ בכבל ללא שריון ו- $25(d+D)$ בכבל משורין כאשר d קוטר המוליך ו- D קוטר חיצוני של הכבל. אחרי הכיפוף חוזרים שוב על בדיקת התפרקויות חלקיות כמו בסעיף א'.

בדיקות כבלי מתח גבוה

- ג- מדידת δ במתח חילופין של 2kV מעל הנקוב.
- ד- מדידה תרמית מחממים באיטיות את הכבל ב-3 מחזורי חימום לטמפ' גבוהה ב-5 עד 10 מעלות מהמירבית המותרת בהתאם לחומר הבידוד. מחזיקים טמפ' זו למשך שעותיים ומאפשרים קירור איטי. חוזרים שוב על בדיקת התפרקויות חלקיות כבסעיף א'.
- ה- בדיקת עמידה במתח יתר של ברק. כשהכבל בטמפ' גבוהה ב-5 עד 10 מעלות מהטמפ' המירבית המותרת מפעילים על הכבל 10 פולסי מתח שליליים ו-10 חיוביים במתח על פי הטבלה שבהמשך מסוג 1.2/50 μ Sec. לאחר בדיקה זו מבצעים בדיקת עמידה במתח יתר של $3.5U_0$ למשך 15 דקות.
- ו- בדיקת עמידה במתח יתר של $4U_0$ למשך זמן של 4 שעות בטמפרטורת חדר.

בדיקות כבלי מתח גבוה

ערכי מקסימום של $\tan \delta$ והתפרקויות חלקיות

XLPE	EPR	HDPR	חומר בידוד
0.8	4	4	$\tan \delta$ בטמפ' של $5-10^{\circ}\text{C}$ מעל המירבית המותרת
5	5	5	התפרקויות חלקיות במתח $1.73U_0$ [pC]

בדיקת מתחי יתר באימפולסים של ברק

18/30 (36)	12/20 (24)	8.7/15 (17.5)	מתח נקוב של הכבל [kV]
170	125	95	מתח בדיקה [kV]

בדיקת מתחי יתר AC

18/30 (36)	12/20 (24)	8.7/15 (17.5)	מתח נקוב של הכבל [kV]
63	42	30.5	מתח עמידה AC $3.5U_0$ [kV]
72	48	34.8	מתח עמידה AC $4U_0$ [kV]

בדיקות כבלי מתח גבוה

בדיקות שגרתיות:

- כל תוף שיוצא ממפעל היצרן עובר בדיקה שגרתית שכוללת:
- בדיקת התנגדויות המוליכים.
- מדידת התפרקויות חלקיות במתח $1.73U_0$ הערך המירבי של ההתפרקויות החלקיות צריך להיות לא מעל 10pC .
- בדיקה במתח עמידה AC של $3.5U_0$ למשך זמן של 5 דקות

בדיקה מדגמית:

- בדיקה במתח עמידה AC של $4U_0$ למשך זמן של 4 שעות על קטע כבל מהמשלוח באורך של 5 מטר.

בדיקות כבלי מתח גבוה

בדיקות הכנסה לניצול אצל הצרכן:

לאחר הנחת הכבלים והרכבת אביזריהם מבצעים את הבדיקות הבאות:

א. בדיקת התנגדות הבידוד במד התנגדות במתח 2.5 או 5kV.

ב. בדיקה במתח עמידה DC בגודל $4U_0$ למשך 15 דקות.

ניתן להחליף את הבדיקה במתח ישר בבדיקה במתח חילופין השווה למתח השלוב למשך 5 דקות או במתח פאזי של הרשת למשך 24 שעות.



זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל

התנגדות התרמית הסגולית של האדמה (בהתאם לתקנות החשמל)

גבולות ההתנגדות התרמית הסגולית °K m/W	סוג הקרקע	מס'
0.7÷1	חול ים עדין	1
1÷1.5	אדמה חומה	2
0.7÷1	אדמת גיר או סלע גיר	3
4÷5	אדמת מילוי עם אבנים (קוטר מעל 10 ס"מ)	4
1.5÷2	אדמת מילוי עם אבנים קטנות (קוטר עד בערך 5 ס"מ)	5
1.2÷2	אדמה חומה עם סלע	6
1.2÷2	אדמה חוורית אפורה יבשה (עמק הירדן)	7
0.8÷1.2	אדמה שחורה	8
1÷1.2	אדמת לס	9
1.2÷2.5	אדמת מילוי - לס ואבנים	10

זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל

כבלים למתח 18/30 ק"ו המותקנים באדמה בטמפרטורה 30°C

 זרם מרבי [A]	 זרם מרבי [A]	מוליך	חתך (ממ"ר)
התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$	התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$		
1.5	2.5	1.5	2.5
426	348	414	337
601	486	601	485
		נחושת	1*150
		נחושת	1*300

כבלים מותקנים באדמה בטמפרטורה 35°C

 זרם מרבי [A]	 זרם מרבי [A]	מוליך	חתך (ממ"ר)
התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$	התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$		
1.5	2.5	1.5	2.5
408	333	397	322
575	465	575	464
		נחושת	1*150
		נחושת	1*300

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

41

זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל

כבלים למתח 18/30 ק"ו כבלים מותקנים באוויר בטמפרטורה 35°C

 זרם מרבי [A]	 זרם מרבי [A]	מוליך	חתך (ממ"ר)
492	407	נחושת	1*150
731	613	נחושת	1*300

כבלים למתח 18/30 ק"ו כבלים מותקנים באוויר בטמפרטורה 40°C

 זרם מרבי [A]	 זרם מרבי [A]	מוליך	חתך (ממ"ר)
463	380	נחושת	1*150
687	572	נחושת	1*300

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

42

זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל

כבלים למתח 26/45 ק"ו המותקנים באדמה בטמפרטורה 30°C

זרם מרבי [A]		זרם מרבי [A]		מוליך	חתך (ממ"ר)
התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$		התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$			
1.5	2.5	1.5	2.5		
335	277	325	267	נחושת	1*95
541	441	534	435	נחושת	1*240

כבלים מותקנים באדמה בטמפרטורה 35°C

זרם מרבי [A]		זרם מרבי [A]		מוליך	חתך (ממ"ר)
התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$		התנגדות טרמית סגולית של הקרקע $^0K \cdot m/W$			
1.5	2.5	1.5	2.5		
321	265	311	256	נחושת	1*150
518	423	512	416	נחושת	1*300

כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

43

זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל

כבלים למתח 26/45 ק"ו כבלים מותקנים באוויר בטמפרטורה 35°C

זרם מרבי [A] 	זרם מרבי [A] 	מוליך	חתך (ממ"ר)
355	315	נחושת	1*150
605	542	נחושת	1*300

כבלים למתח 26/45 ק"ו כבלים מותקנים באוויר בטמפרטורה 40°C

זרם מרבי [A] 	זרם מרבי [A] 	מוליך	חתך (ממ"ר)
331	295	נחושת	1*150
567	506	נחושת	1*300

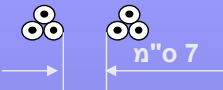
כבלים למתח גבוה ומתח עליון

סגל אריאל

44

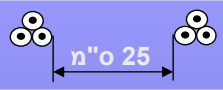
זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל מקדם הכפלה על פי שיטת ההנחה

במקרה של הנחה תת-קרקעית של מספר מערכות תלת-פזיות של כבלים חד-גידיים יש להכפיל את הנתונים במקדמים הנ"ל:

מקדם		מספר מערכות
1		1
0.85		2
0.75		3
0.7		4
0.66		5
0.63		6
0.59		8
0.56		10

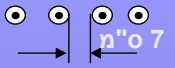
זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל מקדם הכפלה על פי שיטת ההנחה

במקרה של הנחה תת-קרקעית של מספר מערכות תלת-פזיות של כבלים חד-גידיים יש להכפיל את הנתונים במקדמים הנ"ל:

מקדם א'		מספר מערכות
1		1
0.89		2
0.82		3
0.78		4
0.75		5
0.73		6
0.7		8

זרמים מותרים לכבלים מ"ג בחברת החשמל מקדם הכפלה על פי שיטת ההנחה

במקרה של הנחה תת-קרקעית של מספר מערכות תלת-פזיות של כבלים חד-גידיים יש להכפיל את הנתונים במקדמים הנ"ל:

מקדם א'		מספר מערכות
1		1
0.87		2
0.77		3
0.73		4
0.7		5
0.68		6
0.65		8
0.63		10

שטח חתך הכבל להזנת לקוח לפי גודל החיבור

מתח רשת	גודל החיבור	חתך הכבל בממ"ר
עד 22 ק"ו	עד 200 א'	150 Cu
		240 Al
	מעל 200 א'	300 Cu
		300 Cu
33 ק"ו	עד 200 א'	150 Cu
		95 Cu
		150 Al
	מעל 200 א'	300 Cu
		240 Cu
		300 Al