

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ   FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOLARIN KISA DEVRE KOŞULLARINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Burcu TORUN

504001145

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliğı

Programı : Elektrik Mühendisliğı

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

MAYIS 2003

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ X FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOLARIN KISA DEVRE KOŞULLARINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Burcu TORUN

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

MAYIS 2003

**KABLOLARIN KISA DEVRE KOŞULLARINDAKİ
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Burcu TORUN

504001145

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05 Mayıs 2003

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Mayıs 2003

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Adnan KAYPMAZ

Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU

MAYIS 2003

ÖNSÖZ

Tez konumun belirlenmesi ve hazırlanması aşamasında hiçbir yardımını esirgemeyen değerli hocam **Doç. Dr. Özcan KALENDERLİ**'ye sonsuz teşekkür ederim.

Bugüne kadar maddi ve manevi desteklerini ve bu tezin hazırlanması aşamasında ellerinden gelen hiçbir yardımı esirgemeyen sevgili **aileme** minnettarım.

Mayıs 2003

Burcu TORUN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Kabloların Sınıflandırılması	1
1.2. Kabloların Anma Gerilimleri	1
1.2.1. F ve N-kabloların anma gerilimi	2
1.2.2. Y-kabloların anma gerilimi	2
1.3. Kablo İletkeni	4
1.4. Kablo Yalıtkanları	7
1.5. Yalıtıcı Kılıflar	8
1.5.1. Yalıtkan kılıf	10
1.5.2. Ortak dolgu ve ortak kılıf	11
1.5.3. İç kılıf	13
1.5.4. Ayraç kılıf	14
1.5.5. Dış kılıf	15
1.6. Metal Kılıflar	16
1.6.1. Kurşun kılıf	16
1.6.2. Alüminyum kılıf	17
1.7. Sarmal Bakır İletken	18
1.8. Elektrostatik Siperler	19
1.8.1. Yarı iletken siper	20
1.8.2. Metal siper	20
1.9. Çelik Zırh	21
1.10. Kablo Simgeleri	23

1.10.1. VDE'ye göre kablo simgeleri	27
2. KISA DEVRE KOŞULLARI	29
2.1. Kısa Devre Akımı	29
2.1.1. Kısa devre akımının etkileri	29
2.1.2. Kısa devre akımının hesabı	30
2.1.3. Kritik kısa devre akımları	35
2.1.4. Toprak-hata akımı	37
2.2. Faz-Toprak Kısa Devresinde Akımlar ve Yük Kapasitesi	39
2.2.1. Faz-toprak kısa devresinde iletken ve kılıf akımları	39
2.2.2. Faz-toprak kısa devresinde yük kapasitesi	42
3. KISA DEVRE TERMİK KAPASİTESİ	52
3.1. Kısa Devre Koşullarında Performans	52
3.2. Kısa Devre İşletmesi	53
3.2.1. Generatörden uzak kısa devre	55
3.2.2. Generatöre yakın kısa devre	56
3.3. İletkenin Kısa Devre Termik Kapasitesi	56
3.4. Ekran, Metal, Kılıf ve Zırhların Kısa Devre Kapasiteleri	60
3.5. Kısa Devre Kapasitesinin Hesabı	63
3.5.1. Adyabatik sıcaklık artış yöntemi	63
3.5.2. Adyabatik olmayan sıcaklık artış yöntemi	68
3.5.3. Kısa devre süresince sıcaklık artışı	73
3.6. Yalıtılmış İletkenlerin Kısa Devre Isınma Hesabı	73
3.6.1. Giriş	73
3.6.2. İletkenin adyabatik ve kayıplı ısınması	74
3.7. Termal-Mekanik Kuvvetler ve Genleşme	81
3.7.1. Genel	81
3.7.2. Kablolarda termik genleşmenin etkisi	83
3.7.3. Tek damarlı kabloların montajı	84
3.7.4. Aksesuarlar	88

4. MEKANİK KISA DEVRE KAPASİTESİ	90
4.1. Elektromanyetik Kuvvetler	90
4.1.1. Giriş	90
4.1.2. Elektromanyetik kuvvetlerin etkileri	90
4.2. Çok Damarlı Kablo	96
4.2.1. Gerilme kuvveti F_B'	97
4.2.2. Yüzey basıncı F_F'	100
4.2.3. Kablo yapısı	100
4.2.4. Deney ve hesap büyüklükleri	100
4.2.5. Tutucu elemanlar	102
4.3. Tek Damarlı Kablolar ve Tutturma Yöntemleri	105
4.3.1. Genel	105
4.3.2. Bükme zorlaması	107
4.3.3. Yüzey basıncı F_F	112
4.3.4. Kelepçelerin ve bağlayıcıların zorlanması	113
4.3.5. Aksesuarlar	116
5. KABLOLARDA KISA DEVREYE KARŞI KORUMA	118
5.1. Kısa Devre Korumasından Vazgeçmek	118
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	120
KAYNAKLAR	123
EKLER	125
ÖZGEÇMİŞ	152

KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
DA	: Doğru Akım
kV	: Kilovolt
PVC	: Polivinil Klorür (Polynvnyl chlorur)
PE	: Polietilen (Polyethylene)
VDE	: Verband der Electrotechnik Elektronik Informationstechnik
XLPE	: Çapraz bağlı polietilen (Cross-linked Polyethylene)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1.	Üç fazlı ve bir fazlı AA tesisatlarında kullanılan Y-kablolar için en büyük işletme gerilimleri.....	4
Tablo 1.2.	İletkenin bir telli veya çok telli olduğunu ve kesit biçimini belirten simge harfler	5
Tablo 1.3.	Faz iletkenlerinin en küçük anma kesitleri	7
Tablo 1.4.	Polimerlerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılması	8
Tablo 1.5.	Kablo yapımında kullanılan en önemli polimerler	9
Tablo 1.6.	F-kablolarda kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri.....	10
Tablo 1.7.	N-kablolarda kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri	11
Tablo 1.8.	Y-kablolarda kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri	11
Tablo 1.9.	Damar iletkeni kesitleri birbirine eşit olan beşten çok damarlı daire kesitli kablolarda her katta bulunması gereken damar sayıları	13
Tablo 1.10.	Y-kablolarda iç çekme anma et kalınlıkları	14
Tablo 1.11.	F-kablolarda kullanılan dış kılıf malzemeleri	15
Tablo 1.12.	N-kablolarda kullanılan dış kılıf malzemeleri	15
Tablo 1.13.	Y-kablolarda kullanılan dış kılıf malzemeleri	16
Tablo 1.14.	NYPV (NYBUY) kabloda kurşun kılıfın anma et kalınlıkları	17
Tablo 1.15.	Damar sayısı beşten çok olan kablolarda sarmal bakır iletkenin anma kesitleri	19
Tablo 1.16.	Bakır tutucu sargıya ilişkin değerler	19
Tablo 1.17.	Anma gerilimine ve yalıtkan kılıfın maddesine göre, iç ve dış yarı iletken siper bulunan kablolar	20
Tablo 1.18.	Bakır siperin en küçük kesitleri ve 20°C’de DA dirençleri	21
Tablo 1.19.	Zırh yapımında kullanılan yuvarlak tellerin anma çapları.....	22
Tablo 1.20.	Zırh yapımında kullanılan yassı tellerin ve şeritlerin anma boyutları	23
Tablo 1.21.	TS 621’e göre kablo simgelerini belirleyen harflerin anlamları.....	24
Tablo 1.22.	VDE 0250’ye göre iç tesisat kablolarının (F ve N kabloların) simgelerini belirleyen harflerin anlamları	27
Tablo 2.1.	İletkenler ve ekranlar için kritik kısa devre ve toprak-hata akımları	36
Tablo 3.1.	İzin verilen kısa devre sıcaklıkları ve anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} (bakır iletkenli kablolar için)	58
Tablo 3.2.	İzin verilen kısa devre sıcaklığı ve anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} (alüminyum iletkenli kablo için)	59
Tablo 3.3.	İletken, kılıf ve ekran malzemeleri için fiziksel sabitler.....	64
Tablo 3.4.	Ekran, kılıf ve zırh için kısa devre kapasite değerleri.....	64

Tablo 3.5.	IEC 724'e göre 0,6/1 kV'luk kablonun yapısal elemanlarının izin verilen kısa devre sıcaklıkları.....	66
Tablo 3.6.	Etkin kısa devre enine kesit alanı q_k ve etkin ekran kalınlığı δ_k	70
Tablo 3.7.	Farklı kısa devrelere göre adyabatik ve adyabatik olmayan ısınma	76
Tablo 3.8.	Bakır ve alüminyum için termik genleşme ve esneklik değerleri....	81
Tablo 4.1.	İzin verilen Δ sapması ve I_{Dmin} en küçük tutturma mesafesi.....	108
Tablo 4.2.	Kablo yapısında kullanılan malzemelerin esneklik modülleri.....	109
Tablo A.1.	Bir telli daire kesitli iletkenlerin çapları ve 20°C'de DA dirençleri	125
Tablo A.2.	Çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi a olan tel sayıları, tel çapları, iletken çapları, 20°C'de DA dirençleri	125
Tablo A.3.	Çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi b ve c olan tel çapları, tel sayıları, iletken çapları, 20°C'de DA dirençleri.....	126
Tablo B.1.	F-kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları	127
Tablo B.2.	N- kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları.....	128
Tablo B.3.	Bir damarlı Y- kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları.....	129
Tablo B.4.	Çok damarlı Y- kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları	129
Tablo C.1.	Y- kablolarda ortak çekme kılıfın anma et kalınlıkları	130
Tablo C.2.	PVC yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kablolarda ortak çekme kılıfın anma et kalınlıkları.....	130
Tablo C.3.	Y-kablolarda ortak sargı kılıfın anma et kalınlıkları.....	131
Tablo C.4.	PVC yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kablolarda ortak sargı kılıfın anma et kalınlıkları.....	131
Tablo D.1.	F-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları.....	132
Tablo D.2.	N-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları.....	132
Tablo D.3.	Y-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları.....	133
Tablo G.1.	220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'a göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 25'den 150 mm ² 'e kadar olan PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunlukları	150
Tablo G.2.	220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'a göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 25'den 150 mm ² 'e kadar olan PVC yalıtkanlı alüminyum kabloların maksimum izin verilen uzunlukları	151

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	: a) Üç fazlı AA tesisatlarında bir damarlı üç kablo ve nötr iletkeni topraklanmış olan dört damarlı kablo için $U = \sqrt{3}U_o$ b) İletkenlerinden her ikisi de topraklanmamış olan bir fazlı AA tesisatlarında bir damarlı iki kablo ve iki damarlı kablo için $U = U_o$ c) İletkenlerinden biri topraklanmış olan bir fazlı AA tesisatlarında bir damarlı iki kablo için $U = U_o$	3
Şekil 1.2	: Kablolarda damar iletkeni kesitleri. a) Bir telli daire kesitli b) Çok telli daire kesitli c) Bir telli kesme kesitli d) Çok telli kesme kesitli	4
Şekil 1.3	: Sıkıştırılmış iletkenler. a) Daire kesitli iletken b) Kesme kesitli sıkıştırılmış iletken.....	5
Şekil 1.4	: a) Şerit telli iletken b) Şerit telin yapılışı.....	6
Şekil 1.5	: NVV (NYM) kabloda yalıtkan kılıf.....	10
Şekil 1.6	: 06/1 kV YVV (NYY) kabloda a) ortak çekme kılıf b) ortak sargı kılıf.....	12
Şekil 1.7	: 5,8/10 kV YVŞV (NYFY) kablo	13
Şekil 1.8	: 3,5/6 kV YE ₃ SHŞV (2XSEYFY) kablo	14
Şekil 1.9	: 8,7/15 kV YE ₃ SV (N2XSY) kablo	14
Şekil 1.10	: 5,8/10 kV (NKRA) kablo.....	16
Şekil 1.11	: 0,6/1 kV (NAKLEY) kablo	17
Şekil 1.12	: 0,6/1 kV YVMV(NYCY) kablo	18
Şekil 1.13	: 0,6/1 kV (NYCWY) kablo.....	18
Şekil 1.14	: 0,6/1 kV YVŞÇV (NYFGY) kablo	22
Şekil 2.1	: Basit bir besleme sistemi	32
Şekil 2.2	: $\kappa = 1,8$ ve başlangıç simetrik kısa devre gücü S_k'' 'ne bağlı olarak başlangıç simetrik kısa devre akımları I_k'' ve maksimum kısa devre akımları I_s	37
Şekil 2.3	: Toprak hatası koşullarında kablodaki kapasitif ve işletme akımları	41
Şekil 2.4	: a) Şarj ve toprak akımları vektör diyagramı b) Şekil 2.3'e göre kapasitif akım ve işletme akımları vektör diyagramı.....	42
Şekil 2.5	: Toprağa döşenmiş NA2XS2Ş 1 x 150 RM/25 12/20 kV kabloda izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımları I_{Cz} a) Toprak-hata kompanzasyonlu şebeke b) Nötrü yalıtılmış şebeke	47
Şekil 2.6	: Toprak-hata kompanzasyonlu şebekede toprağa döşenmiş tek damarlı XLPE yalıtkanlı 12/20 kV'luk kablolar için izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımları I_{Cz} a) Bakır	

	iletken b) Alüminyum iletken.....	48
Şekil 3.1	: Kısa devre koşullarında termik işletme akımı I_{thz} ve anma termik akımı I_{th}	52
Şekil 3.2	: Termik eşdeğer kısa devre akımı I_{th} 'ın hesabı için a) m faktörü b) n faktörü.....	54
Şekil 3.3	: Generatörden uzak kısa devrede kısa devre akımının değişimi	55
Şekil 3.4	: Generatöre yakın bir kısa devrede kısa devre akımının Değişimi	56
Şekil 3.5	: Düşük dirençle topraklamalı şebekede üç damarlı ortak ekranlı kablo da faz-toprak kısa devresi	62
Şekil 3.6	: Yalıtılmış şebekedeki üç ekranlanmış tek damarlı kabloda çift toprak hatası.....	62
Şekil 3.7	: $t_k = 1s$ kısa devre süresi ve adyabatik olmayan sıcaklık artışı için bakır tel ekranlı kablolar ile polimer yalıtkanlı kurşun kılıflı emprenye edilmiş kabloların I_{thz} kısa devre akımlarının karşılaştırılması	67
Şekil 3.8	: Kısa süre akım faktörü k_3	71
Şekil 3.9	: Eşdeğer termik devre a) İletken ve yalıtkan için b) Sadece iletken için.....	75
Şekil 3.10	: NA 2XSY 1x150/25 kablonun ekranının hesaplanmış sıcaklık artışı (sabit akım kaynağı ile).....	78
Şekil 3.11	: Sabit akım kaynağı ve sabit gerilim kaynağı durumunda NA2XS2Y 1 x 150/25 kablonun ekranının hesaplanmış sıcaklık artışı.....	78
Şekil 3.12	: Kısa devre olan devrenin iki ayrı elektriksel şeması	79
Şekil 3.13	: İletken için genişletilmiş eşdeğer termik devre, ara tabaka ve yalıtkan	80
Şekil 3.14	: Zamana bağlı olarak hesaplanmış kablo sıcaklıkları	80
Şekil 3.15	: Alüminyum iletkenin termik genleşmesi.....	82
Şekil 3.16	: Sinüs biçiminde döşenen kabloda sapmalar	84
Şekil 3.17	: Termik genleşmeye bağlı olarak kablonun sapmasının belirlenmesi	86
Şekil 4.1	: Akımların sebep olduğu etkili kuvvetler	91
Şekil 4.2	: Kısa devredeki zorlanmaların hesabı için faktörler	92
Şekil 4.3	: Daire kesmesi şekilli iletkenli kabloda kısa devre kuvvetlerinin hesabı için eksenel kuvvetler	97
Şekil 4.4	: Özel bağırsız veya kuvvetlendirmesiz, polimer yalıtkanlı çok damarlı kabloların mekanik kısa devre kapasitesi I_{sz}	101
Şekil 4.5	: Yan yana döşenmiş ve kablo rafına manyetik olmayan kelepçelerle bağlanmış bir damarlı kablolar.....	106
Şekil 4.6	: Üçgen bohçalanmış ve kablo rafına tutturulmuş bir damarlı kablolar.....	106
Şekil 4.7	: Tek damarlı kablolar için minimum tutturma mesafesi l_z 'in hesaplanması.....	107

Şekil 4.8	: Δ sapması	108
Şekil 4.9	: İletkenin ve kaplamaların J_0 ataletinin aksenal momentinin hesaplanması.....	109
Şekil 4.10	: Üçgen şeklinde demetlenmiş tek damarlı kablolar için yapıya ve maksimum kısa devre akımı I_s 'e bağlı olarak, sapma Δ 'ya bağlı tutturma mesafesi l_D a) Bakır iletken b) Alüminyum iletken	110
Şekil 4.11	: İzin verilen yüzey basıncı F_{F2} 'in tutturma mesafesi L_f ile değişimi	113
Şekil 4.12	: Üçgen bohçalanmış tek damarlı kablolar da kablo yapısı ve maksimum kısa devre akımı I_s gözönüne alınarak, izin verilen yüzey basıncı F_{Fz} 'e bağlı olarak tutturma mesafesinin kelepçe veya bandaj genişliğine oranı.....	113
Şekil 4.13	: Üzengi kelepçesindeki kısa devre kuvvetleri.....	114
Şekil E.1	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 70^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 160$ (140) $^\circ\text{C}$ bakır iletkenli PVC kabloların kısa devre akımları	134
Şekil E.2	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 70^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 160$ (140) $^\circ\text{C}$ alüminyum iletkenli PVC kabloların kısa devre akımları	135
Şekil E.3	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 250^\circ\text{C}$ bakır iletkenli XLPE kabloların kısa devre akımları.....	136
Şekil E.4	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 250^\circ\text{C}$ için alüminyum iletkenli XLPE kabloların kısa devre akımları	137
Şekil E.5	: $\kappa = 1.8$, $\theta_e - \theta_a = 100$ K için 0,6/1 kV'dan 6/10 kV'a kadar bakır iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları.....	138
Şekil E.6	: $\kappa = 1.8$, $\theta_e - \theta_a = 100$ K için 0,6/1 kV'dan 6/10 kV'a kadar alüminyum iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları	139
Şekil E.7	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 65^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 155^\circ\text{C}$ için 12/20 kV'luk bakır iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları	140
Şekil E.8	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 65^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 155^\circ\text{C}$ için 12/20 kV'luk alüminyum iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları	141
Şekil E.9	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 140^\circ\text{C}$ için 18/30 kV'luk bakır iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları	142
Şekil E.10	: $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 140^\circ\text{C}$ için 18/30 kV'luk alüminyum iletkenli empenye edilmiş kabloların kısa devre akımları.....	143
Şekil F.1	: Polimer yalıtkanlı, bakır tel ekranlı kabloların kısa devre kapasitesi $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 650^\circ\text{C}$, $b = 0,12 \times 10^{-3} m / \sqrt{s}$ için ve ekran teli çapı $d_D = 0,7; 0,8; 0,9$ mm ve sırasıyla ekranların anma enine kesit alanı ile; ekranın	

	anma enine kesit alanı q_k parametre olarak alınmıştır.	144
Şekil F.2	: Polimer yalıtkanlı, düz çelik tel zırlı kabloların $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 200^\circ\text{C}$, $b = 0,17 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{s}$ ve düz çelik tellerin kalınlığı $\delta_A = 0,8 \text{ mm}$ için kısa devre kapasitesi. Düz çelik tel zırh üzeri çapı d_A parametre olarak alınmıştır.	145
Şekil F.3	: Kurşun kılıflı emprenye edilmiş yalıtkanlı kablonun $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 200^\circ\text{C}$, $b = 0,38 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{s}$ için kısa devre kapasitesi. Kurşun kılıf üzeri çapı d_M parametre olarak alınmıştır.	146
Şekil G.1	: 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'ya göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm^2 'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunlukları belirlemek için grafik.....	147
Şekil G.2	: 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0641'e göre faz-koruma devre kesicileri ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm^2 'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunlukları belirlemek için grafik	148
Şekil G.3	: 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'ya göre devre kesiciler ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm^2 'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunlukları belirlemek için grafik	149

SEMBOL LİSTESİ

a	: Kısa devre kuvvetlerinin hesabı için iletkenler arası eksenel uzaklık
b	: Band veya kelepçenin genişliği; Ekran sabiti
c	: Özgül ısı
c_i	: Ekranın alt ve üst kaplamalarının özgül ısısı
d	: Kablonun dış çapı
d_{Mm}	: Ekranın ortalama dış çapı
d_D	: İletkenin veya ekranın tek bir telinin çapı
d_L	: İletken çapı
f_q	: Enine yük faktörü
h₀	: Minimum ortam sıcaklığındaki yüksüz kablounun termik genleşmeye bağlı sapması
h₁	: Tesis esnasında θ_1 sıcaklığındaki sapma
h₂	: Kablo tavaasının boyutlandırılması için θ_2 iletken sıcaklığındaki termik genleşmeye bağlı sapma
k	: Termik kısa devre kapasitesinin hesabı için katsayı
k₁	: Termik kısa devre kapasitesinin hesabı için malzeme katsayısı
k₂	: Termik kısa devre kapasitesinin hesabı için sıcaklık faktörü
k₃	: Kısa süre akım faktörü
l	: Kablo veya iletken uzunluğu
l_b	: Tutturma mesafesi
l_{th}	: Termik genleşmeye göre kabloyu bir yapıya tutturmak için kelepçe merkezleri arasındaki mesafe
l_z	: İzin verilen maksimum kelepçeleme mesafesi
l_B	: Kelepçe veya bandaja bağlı tutturma mesafesi
l_D	: Sapmaya bağlı tutturma mesafesi
l_F	: Yüzey basıncına bağlı tutturma mesafesi
m	: Doğru akım bileşeninin termik etki faktörü
n	: Alternatif akım bileşeninin termik etki faktörü
n_D	: İletkendeki büküm sayısı
q_{el}	: Elektriksel enine kesit alanı
q_g	: Ağırlık bakımından enine kesit alanı
q_{geo}	: Geometrik enine kesit alanı
q_n	: Anma enine kesit alanı
r	: İletken sektörün yarıçapı
r_h	: İletkenler üzerindeki grup dairenin yarıçapı
s	: Laplace operatörü
t_k	: Kısa devre süresi
t_{kr}	: Anma kısa devre süresi (1 saniye)
t_{kz}	: İzin verilen kısa devre süresi
w	: Bağlayıcının birim uzunluktaki sarım sayısı
w'	: Radyal birim uzunluğunun direnci
z	: k ₃ hesap faktörü

$z+1$	: Boyuna ek faktörü
A	: Ekranın eşdeğer soğuma alanı çevresi
C'_E	: Kablonun birim uzunluk kapasitesi, iletken-toprak
C'_L	: Kablonun birim uzunluk kapasitesi, iletken-iletken
C'_{EN}	: Şebekenin iletken-toprak kapasitesi
C_{LN}	: Şebekenin iletken-iletken kapasitesi
E	: Esneklik modülü
F	: Temas faktörü
F	: Ekran tellerinin ısı transferi için iletim faktörü
F'_s	: İki paralel iletken arasındaki birim uzunluk elektromanyetik kuvvet
F_{th}	: Termo-mekanik kuvvet
F'_B	: Bir sistemin tüm iletkenlerini saran kaplamadaki etkin kuvvet
F'_L	: İletken üzerindeki etkin kuvvet
F_{Bz}	: $F_B = F'_B l_z$ 'e ilişkin esnek kelepçenin veya bağlayıcının izin verilen dayanımı
F_{Fz}	: İzin verilen yüzey basıncı (kuvveti)
F_{Lz}	: $F_L = F'_L l_z$ 'e ilişkin rijit kelepçenin izin verilen dayanımı
I_a	: Simetrik açma akımı
I_{bb}	: I_b işletme akımının ohmik bileşeni
I_{bw}	: I_b işletme akımının reaktif bileşeni
I_g	: Toprak hatası altında iletken akımların geometrik ortalama değeri
I_{gM}	: Toprak hatası altında kılıf akımların geometrik ortalama değeri
I_k	: Sürekli işletme kısa devre akımı
I''_k	: Başlangıç simetrik kısa devre akımı
I''_{kz}	: İzin verilen başlangıç simetrik kısa devre akımı
I_s	: Maksimum kısa devre akımı
I_{sz}	: Mekanik kısa devre kapasitesi
I_{th}	: Termik eşdeğer kısa devre akımı
I_{thr}	: Anma kısa süre akımı
I_{thz}	: Termik kısa devre kapasitesi
I_C	: Şebekenin kapasitesine bağlı kapasitif faz-toprak hata akımı
I_{Cz}	: Kabloda sıcaklık artışı göz önüne alındığındaki izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımı
I_{C1}	: Şebekenin hatalı bölümünden çıkan iletkendeki şarj akımı
I_F	: Tek toprak hatalı sistemde hata noktasından akan akım, faz-toprak hata akımı
I_{Rest}	: Toprak-hata kompanzasyonlu şebekede akan toprak-hata artık akım

J_0	: Atalet momenti
J_{thr}	: $t_{kr} = 1s$ için anma kısa devre akım yoğunluğu
$\overline{P}$	: Ortalama sabit kayıplar
P_T	: Isı akısı
P'_{VM}	: Kılıf kayıpları toplamı
R'_{L20}	: 20°C'deki iletkenin birim uzunluğunun DA direnci
P'_{VM}	: İletkenin birim uzunluğunun AA direnci
R'_y	: Toprak arızası koşullarındaki kablonun birim uzunluğunun etkin direnci
R'_A	: Zırhın birim uzunluğunun DA direnci
R'_y	: Metal kılıfın birim uzunluğunun DA direnci
R'_9	: 9 sıcaklığındaki iletkenin birim uzunluğunun DA direnci
S''_k	: Başlangıç simetrik kısa devre gücü
S_a	: Bağlama donanımının kesme gücü
T	: Sıcaklık
T_{ad}	: Adyabatik sıcaklık
T''_{Kie}	: Toprak arızası koşullarında kablonun görünür termik direnci
T''_{Kd}	: Dielektrik kayıplar gözönüne alındığında kablonun görünür termik direnci
T'_x	: Sürekli işletmede çok damarlı kablonun veya üç fazlı sistemde üç tek damarlı kablonun görünür toprak-termik direnci
T'_{xy}	: Çok damarlı kablonun veya üç tek damarlı kablonun günlük yükü içinde görünür toprak termik direnci
$\Delta T'_x$	: Gruplamaya bağlı olarak sürekli işletmedeki ek görünür termik direnci
T'_1	: Yarı iletken tabakalı yalıtkanın termik direnci
T'_2	: Ekran veya metal kılıf ile zırh arasındaki koruyucu tabakanın termik direnci
T'_3	: Dış koruyucu kılıfın termik direnci
Z	: Karakteristik empedans
Θ	: Karşılıklı sıcaklık katsayısı
U_e	: Normal işletmedeki iletken-toprak gerilimi $U_e = U_b \sqrt{3}$
U_n	: Şebekenin/sistemin anma gerilimi
X'_M	: Metal kılıfın birim uzunluğunun reaktansı
α	: Kısa devre koşulunda iletkenin mekanik zorlanma faktörü
α_{20}	: 20°C'deki elektriksel direncin sıcaklık katsayısı
α_{th}	: Termik genleşme katsayısı
β	: Kısa devrede kaplamaların ve tabakaların mekanik zorlanma faktörü

β_i	: Termik nüfuz (penetrasyon) miktarı
δ	: Duvar kalınlığı
δ_k	: Kısa devre koşulunda etkin ekran kalınlığı
δ_I	: Yalıtkan kalınlığı
δ_s	: Dış kılıfın kalınlığı
λ	: Termik iletkenlik
λ_{1e}	: Toprak arızasında kılıf ve ekran kayıpları hesabında kullanılan katsayı
λ_{2e}	: Toprak arızasında zırh kayıpları hesabında kullanılan katsayı
ρ	: Termik özdirenç
ρ_i	: Ekranın üstünde veya altındaki kılıfın termik özdirenci
ρ_{20}	: 20°C'deki elektriksel özdirenç
ρ_x	: Nemsiz toprağın termik özdirenci
ρ_E	: Nemli toprağın termik özdirenci
σ_F	: Yalıtkan kalınlığı ile ilgili olarak izin verilen yüzey basıncı
θ	: Sıcaklık
θ_E	: Yüksüz kablolu toprağın sıcaklığı, ortam sıcaklığı
θ_a	: Kısa devrenin başlangıcındaki iletken sıcaklığı
θ_e	: İzin verilen kısa devre sıcaklığı
θ_0	: Minimum ortam sıcaklığı
θ_1	: Tesisat esnasındaki ortam sıcaklığı
θ_2	: Kablo tavasının ölçülendirilmesi için iletken sıcaklığı
$\Delta\theta_x$	: Toprak sıcaklığı üzerinde, eş termik sınırın sıcaklık yükselme sınırı
μ	: Simetrik kesme akımını belirleme faktörü
κ	: Maksimum k.d. akımını belirleme faktörü
Δ	: Sapma
Λ	: Kılıf veya ekran kayıplarını hesaplama faktörü
γ	: Yayılma sabiti
ζ	: Kısa süre ısınma faktörü

KABLolarIN KISA DEVRE KOŞULLARINDA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Kablolar, endüstriyel ve dağıtım şebekelerinde kullanılan önemli ve vazgeçilmez bağlantı elemanlarıdır. İşletme koşullarına kullanma amacına ve kullanma yerine göre özellikleri değişen çok çeşitli kablo bulunmaktadır. Kablolar için araştırılması ve geliştirilmesi gereken önemli konulardan biri de kabloların kısa devre koşullarındaki davranışdır. Bir kablonun oluşabilecek birçok kısa devreden sonra bile güven içinde çalışması ve çalışmasını etkilemeyecek sınırlarda deforme olması beklenir. Kablo tesisatlarının planlanmasında, kabloların ve kablo donanımlarının termik (ısı) ve mekanik kısa devre zorlanmaları için yeterli olup olmadıklarını göz önüne alınması gereklidir.

Bu tezde kabloların kısa devre koşullarındaki davranışı incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, kısa devrede oluşan kısa devre akımı hesapları yapılmış ve etkileri incelenmiştir. İletken, ekran, kılıf ve zırhların kısa devre kapasiteleri ve ısınma hesapları iki farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Kısa devre süresi boyunca yüksek sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelen termo-mekanik kuvvet ve genişleme hesapları yapılmış ve etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kısa devrede oluşan elektromanyetik kuvvetlerin hesabı yapıp, etkileri değerlendirilmiştir. Tezin son bölümünde ise kablolarda kısa devreye karşı koruma düzenleri incelenmiştir.

Sonuç olarak, bir kablo tesisatında kısa devre meydana geldiği zaman kabloların iletken bölümlerinde ve dolayısıyla yalıtkan ve koruyucu tabakalarda önemli bir sıcaklık artışının olduğu, akım taşıyan elemanlar arasında termo-mekanik ve elektromanyetik kuvvetlerin olduğu ve bu kuvvetlerin kablolar üzerinde zorlanmalara yol açtığı, uygulamada bu durumların göz önüne alınması gerektiği görülmüştür.

INVESTIGATION OF BEHAVIOUR OF CABLES IN SHORT-CIRCUIT CONDITIONS

SUMMARY

Cables are important and major connecting elements which have been used in industrial and distribution networks. There are several types of cable that their properties changes according to operating conditions, purpose of using and the place of use. Another important subject, which should be investigated and developed, is the behavior of cables in short-circuit conditions. It is expected, that a cable installation will remain safe in operation and that any deformation remains within tolerable limits even after several short circuits. In planning cable installations both cables and its supports must be investigated for thermal and mechanical short circuit stresses.

In this thesis behavior of cables in short circuit conditions is researched. For this purpose, short circuit current, which exists in short circuit, is calculated and its effects are investigated. The short-circuit capacity and heating calculations of the conductors, screens, sheath and armours are made with two different methods. Thermo-mechanical forces and expansion calculations, which exists as a result of high temperature increase during short-circuit time, are made and their effects are investigated. In addition, the electro-magnetic forces, which exist in short circuit, are calculated and their effects are researched. In the last section of the thesis, protection against short circuit and protection devices are examined.

As a result, when a short circuit exists in a cable installation, an important temperature increase exists in the conducting and insulation and protective covers of the cables; thermo-mechanical and electro-magnetic forces between the current carrying components exist and these forces causes stresses on the cables.

1. GİRİŞ

Kabloların kısa devre koşullarındaki davranışlarını incelemeyden önce genel olarak kablolar hakkında bilgi verilecektir [1].

1.1 KABLOLARIN SINIFLANDIRILMASI

Kablolar, elektrik gücünü ileten, elektrik aygıtlarını elektriksel olarak bağlamaya yarayan önemli ve vazgeçilmez bağlantı elemanlarıdır. Kablolar işletme koşullarına, kullanma amacına ve kullanma yerine göre üç sınıfa ayrılır [1].

1. F Tipi Kablolar: F tipi kablolar normal ve hafif işletme koşullarına dayanıklı, hareketli ve taşınan elektrik aygıtlarında kullanılan, serbest olarak salınan bükülgen kablolar veya kordonlardır.

2. N Tipi Kablolar: N tipi kablolar normal ve hafif işletme koşullarına dayanıklı, boru içinde sıva altına veya borusuz olarak duvara sabit döşenen iç tesisat kablolarıdır.

3. Y Tipi Kablolar: Y tipi kablolar yeraltı, maden ocağı gibi mekanik ve kimyasal etkilerin fazlaca bulunduğu yerlerde kullanılan, ağır işletme koşullarına dayanıklı, yeraltına, beton kanala veya duvara sabit döşenen güç kablolarıdır. Bu kablolar yeraltı kablosu da denir.

VDE 0250’de kablolar, F ve N-kablolar bir sınıfta toplanarak iç tesisat kabloları (F ve N-kablolar) ve güç kabloları (Y-kablolar) olmak üzere iki sınıfa ayrılmıştır.

1.2 KABLOLARIN ANMA GERİLİMLERİ

Alternatif akım (AA) ve doğru akım (DA) tesisatlarında kullanılan kabloların anma gerilimi U_0 ve U gerilimlerinin oranı olan U_0/U yazılarak belirtilir.

1.2.1 F ve N-Kablolarının Anma Gerilimleri

U_o : Bir faz ile toprak arasındaki gerilimin etkin değeri [V],

U : Çok damarlı kablolarda veya üç fazlı kablolarda iki faz iletkeni arasındaki gerilimin etkin değeri [V]'dir.

AA tesisatlarında kablonun anma gerilimi, en az tesisin anma gerilimine eşit olmalıdır. DA tesisatlarında ise kablonun anma gerilimi, tesisin anma geriliminin 1,5 katına kadar olabilir.

Sürekli işletme gerilimi, üç fazlı ve bir fazlı AA ile DA tesisatlarında kullanılan kablonun anma geriliminin 1,15 katından büyük olmamalıdır. DA tesisatlarında kullanılan kablolarda sürekli işletme gerilimi, izin verilen alternatif işletme geriliminin 1,5 katına kadar olabilir. İletkenlerinden biri topraklanmış olan DA tesisatlarında bu değerin yarısı alınır. Sonuç olarak, izin verilen sürekli işletme gerilimi kablonun anma geriliminin:

- Üç fazlı ve bir fazlı AA tesisatlarında 1,15, DA tesisatlarında $1,15 \times 1,5 = 1,725$ katından,
- İletkenlerinden biri topraklanmış olan bir fazlı AA tesisatlarında $1,15/\sqrt{3} = 0,664$, DA tesisatlarında $1,725/2 = 0,86$ katından büyük olmamalıdır.

1.2.2 Y-Kablolarının Anma Gerilimleri

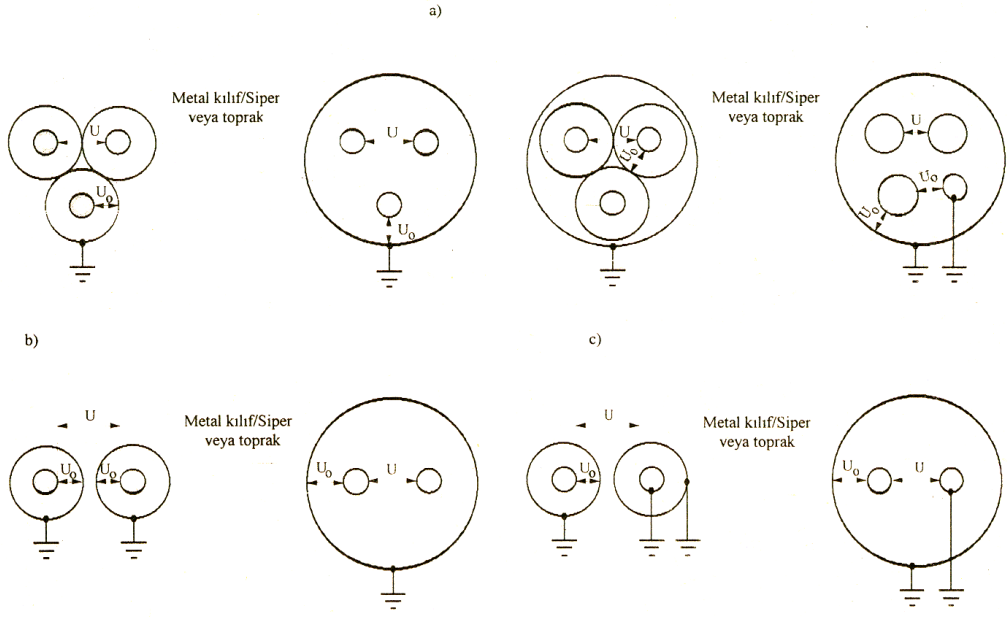
U_o : Bir faz iletkeniyle metal kılıf/siper veya toprak arasındaki gerilimin etkin değeridir.

U : Üç fazlı bir sistemde faz iletkenleri arasındaki gerilimin etkin değeridir.

$$U = \sqrt{3} U_o \quad (1.1)$$

- Anma gerilimi $U_o/U = 0,6/1$ kV olan kablolarda 1,15 katından,
- Anma gerilimi $U_o/U = 8,7/15$ kV olan kablolarda 1,15 katından,
- Anma gerilimi $U_o/U = 20,3/35$ kV olan kablolarda ise, üç fazlı AA tesisatlarında 1,20 bir fazlı AA tesisatlarında 1,15 katından büyük olmalıdır.
- Sonuç olarak, üç fazlı bir sistemin en büyük işletme gerilimi, kablonun anma geriliminin:

- Üç fazlı AA tesisatlarında, anma gerilimi 0,6/1 kV, 3,5/6 kV ve 5,8/10 kV olan kablolarda 1,15, 8,7/15 kV olan kablolarda yaklaşık 1,15 ve 20,3/35 kV olan kablolarda 1,20 katından, (Şekil 1.1a),
- İletkenlerinden her ikisi de topraklanmamış olan bir fazlı AA tesisatlarında, anma gerilimi 0,6/1 kV, 3,5/6 kV ve 5,8/10 kV olan kablolarda $1,15 \times 2U_0 = 1,15 \times 2U/\sqrt{3} = 1,328U$, 8,7/15 kV olan kablolarda $2 \times 17,5/\sqrt{3} = 20,2$ kV ve 20,3/35 kV olan kablolarda $1,15 \times 2U/\sqrt{3} = 1,328U$ 'dan, (Şekil 1.1b),



Şekil 1.1 Kablolarda gerilim tanım şekilleri.

- Üç fazlı AA tesisatlarında bir damarlı üç kablo, üç damarlı kablo, bireysel siperli üç damarlı kablo ve nötr iletkeni topraklanmış olan dört damarlı kablo için $U = \sqrt{3}U_0$
- İletkenlerinden her ikisi de topraklanmamış olan bir fazlı AA tesisatlarında bir damarlı iki kablo ve iki damarlı kablo için $U = 2U_0$,
- İletkenlerinden biri topraklanmış olan bir fazlı AA tesisatlarında bir damarlı iki kablo ve iki damarlı kablo için $U = U_0$.

- İletkenlerinden biri topraklanmış olan bir fazlı AA tesisatlarında, anma gerilimi 0,6/1kV, 3,5/6 kV ve 5,8/10 kV olan kablolarda $1,15 \times U_0 = 1,15U/\sqrt{3} = 0,664U$, 8,7/15 kV olan kablolarda $17,5/\sqrt{3} = 10,1$ kV ve 20,3/35 kV olan kablolarda $1,15U/\sqrt{3} = 0,664U$ 'dan büyük olmamalıdır (Şekil 1.1c).

Üç fazlı ve bir fazlı AA tesisatlarında kullanılan Y-kabloları için en büyük işletme gerilimleri Tablo 1.1'de verilmiştir [1].

Tablo 1.1 Üç fazlı ve bir fazlı AA tesisatlarında kullanılan Y-kabloları için en büyük işletme gerilimleri.

Kablunun anma gerilimi [kV]	En büyük işletme gerilimi			Anma darbe dayanma gerilimi (faz-toprak) [kV]
	Üç fazlı AA [kV]	İletkenlerinden her ikisi de topraklanmamış [kV]	İletkenlerinden biri topraklanmış [kV]	
0,6/1	1,15	1,3	0,6	20
3,5/6	6,9	7,9	3,9	60
5,8/10	11,5	13,2	6,6	75
,7/15	17,5	20,2	10,1	95
0,3/35	42	46,4	23,2	190

DA tesisatlarında faz-faz veya faz-toprak arasında en büyük işletme gerilimi 1,8 kV'a kadarsa, VDE'ye göre 0,6/1 kV Y-kabloların kullanılmasına izin verilir.

1.3 KABLO İLETKENİ

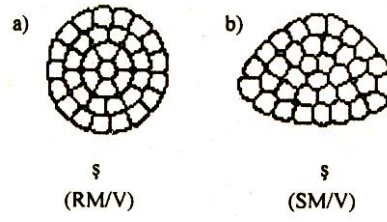
F ve N-kablolarında daima bakır, Y-kablolarında ise genellikle bakır olmak üzere alüminyum iletkenler de kullanılır. Bakır iletkeni oluşturan teller tavllanmış som elektrolitik bakırdır. Teller yalın veya metal (öncelikle kalay) kaplıdır.



Şekil 1.2 Kabloların damar iletkeni kesitleri

- Bir telli daire kesitli,
- Çok telli daire kesitli,
- Bir telli kesme kesitli,
- Çok telli kesme kesitli

Damar iletkeni bir telli veya çok telli olur. Bir telli (som = içi dolu) iletken, dairesel veya biçimlendirilmiş bir tek telden oluşan som iletkenlerdir (şekil 1.2.a, c). Çok telli iletken, tümü veya bir bölümü sarmal sarılmış birden çok telden oluşan iletkenlerdir (şekil 1.2.b, d). Çok telli iletkenlerde teller arasındaki boşlukları azaltarak iletkenin çapını küçültmek için teller biçimlendirilerek bir araya getirilir. Bu iletkenlere sıkıştırılmış iletkenler denir (şekil 1.3.a, b.). Sıkıştırılmış iletkenler daire veya kesme kesitli olabilir. İletkenin sıkıştırılmış olduğu belirtilmezse sıkıştırılmamış olduğu anlaşılır.



Şekil 1.3 Sıkıştırılmış iletkenler

- a) Daire kesitli iletken,
b) Kesme kesitli sıkıştırılmış iletken.

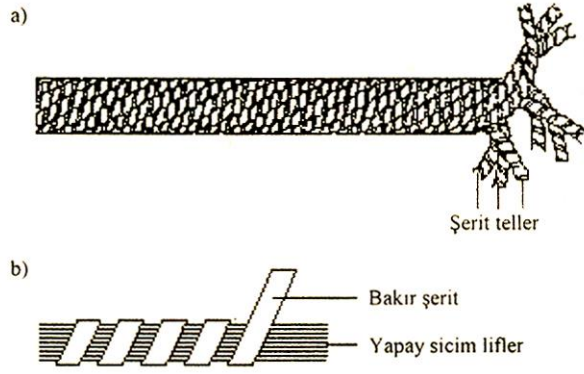
Çok telli iletkeni oluşturan teller üç incelik derecesinde yapılır. Damar iletkeni daire veya kesme kesitli olur. Daire kesitli iletken, kesiti daire biçiminde olan iletkenidir (Şekil 1.2.a, b). İletkenin kesit biçimi belirtilmezse daire kesitli olduğu anlaşılır. Kesme kesitli (sektör) iletken, kesiti daire kesmesi biçiminde olan iletkenidir (Şekil 1.2 c, d).

Tablo 1.2 İletkenin bir telli veya çok telli olduğunu ve kesit biçimini belirten simge harfler

Harf simge		Açıklama
TS 621	VDE 050	
-	R (r)	Daire kesitli iletken
s	S (s)	Kesme kesitli iletken
-	E (e)	Bir telli (som) iletken
ç	M (m)	Çok telli iletken
ş	V (v)	Sıkıştırılmış iletken

- (RE) Bir telli (som) daire kesitli iletken
- ç (RM) Çok telli daire kesitli iletken
- s (SE) Bir telli (som) kesme kesitli iletken
- sç (SM) Çok telli kesme kesitli iletken
- ş (RM/V) Sıkıştırılmış çok telli daire kesitli iletken

F ve N-kablolarında birkaç uygulama dışında daima daire kesitli iletkenler kullanılır. F-kablolarında bükülgenlik arandığından tüm kesitler çok ince tellidir. Çok bükülgen ve çok küçük kesitli olan kordonlarda şerit telli iletkenler kullanılır (şekil 1.4).



Şekil 1.4 Bükülgen kablolar

- a) Şerit telli iletken,
b) Şerit telin yapılışı. Bakır şeritin kalınlığı 0,2 - 0,3 mm, genişliği 0,001 - 0,002 mm.

N-kabloları yalnız döşenme sırasında zorlandığından, 10 mm² kesite kadar bir telli, 16 mm² ve daha büyük kesitler çok tellidir. 10 mm² kesit çok telli yapılabilir. Y-kabloları ise 16 mm² kesite kadar bir telli, 25 mm² ve daha büyük kesitler çok tellidir. 16 mm² kesit çok telli yapılabilir.

İletken kesitine ilişkin tanımlar:

Anma kesiti, geometrik kesitin yuvarlatılmış değeridir.

Geometrik kesit, damar iletkenini oluşturan tellerin çap ve kalınlık x genişlik ölçülerek hesaplanan kesitlerinin toplanmasıyla bulunan kesittir.

Yararlı kesit, iletkenin ölçülen direncinden yararlanılarak hesaplanan kesittir.

Eşdeğer kesit, bakırdan başka metalden veya alaşımdan yapılmış iletkenin direncine eşit olan aynı uzunluktaki bakır iletkenin kesitidir.

İletkenlerin standart anma kesitleri [mm²]:

0,5	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
-----	------	---	-----	-----	---	---	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

0,6/1 kV Y-kablolarında damar iletkenlerinden biri düşük kesitli olabilir.

Düşük kesitli iletkenlerin anma kesitleri

Faz iletkeninin anma kesiti [mm ²]	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500
Düşük kesitli iletkenin anma kesiti [mm ²]	10	16	16	25	35	50	70	70	95	120	150	185	240

Düşük kesitli iletkenin anma kesiti faz iletkeninin anma kesitinin yarısına yakın standart kesittir. Y-kablolarında faz iletkenlerinin anma kesiti, anma gerilimine ve kesit biçimine göre aşağıdaki değerlerden küçük olamaz [1].

Tablo 1.3 Faz iletkenlerinin en küçük anma kesitleri [mm²].

Kablonun anma gerilimi [kV]	Daire kesitli	Kesme kesitli
0,6/1	1,5	25
3,5/6	25	35
5,8/10, 8,7/15 ve 20,3/35	25	-

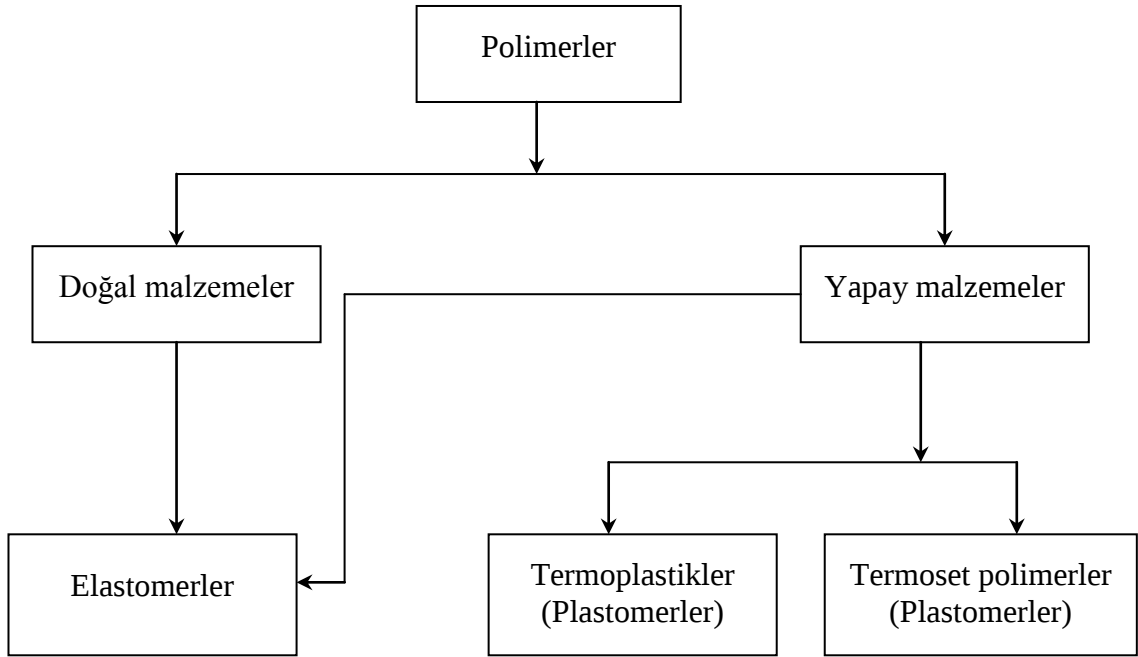
Gerilim büyüdükçe ve iletken çapı küçüldükçe elektrik alan şiddeti büyüyeceğinden, yalıtkanın delinmemesi ve bu yüzden yalıtkan kılıfın kalınlığının ekonomik sınırın dışında aşırı artmaması için kablo kesitlerine bu sınırlama getirilmiştir.

Ek A'da tablo A.1'de bir telli daire kesitli iletkenlerin çapları ve 20°C'de DA dirençleri; tablo A.2'de çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi a olan tel sayıları, iletken çapları, 20°C'de DA dirençleri; tablo A.3'de ise, çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi b ve c olan tel sayıları, iletken çapları, 20°C'de DA dirençleri verilmiştir.

1.4 KABLO YALITKANLARI

Yalıtkanlar, kabloların yapısında yer alan ve işlevi gerilime dayanmak olan yalıtım malzemeleridir. F ve N-kablolarında yalıtkan olarak yapay malzemeler ve doğal kauçuk, Y-kablolarında ise öncelikle emdirilmiş kağıt ve polimerler kullanılmaktadır. Bugün, çok yüksek gerilimli kablolarda emdirilmiş kağıdın vazgeçilmez olarak kullanılmasına karşın, gerilimi 35 (içinde) kV'a kadar olan Y-kablolarında emdirilmiş kağıt yerini polimerlere bırakmıştır. Teknik önemi olan polimerler fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılır (Tablo 1.4).

Tablo 1.4 Polimerlerin fiziksel özelliklerine göre sınıflandırılması



Elastomerlerin çapraz bağlama (vulkanizasyon) ile esneklik özellikleri geliştirilmiştir. Örneğin, bu malzemeler çok küçük çekme kuvvetinde büyük uzama gösterirler. Plastomerler yüksek sıcaklıklarda plastik olarak şekillendirilebilen, soğutulduğunda sertleşen, fakat yeniden ısıtıldığında plastik özelliği kazanan makromoleküller malzemelerdir. Duromerler kritik sıcaklığın üzerinde ısıtıldıklarında sertleşen ve geri dönüşlü plastik özelliğe sahip olmayan polimerlerdir. Bu sınıflara girmeyen yalıtkan malzemeler de kablo yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar kritik ergime noktasının üzerinde elastomerler gibi davranan çapraz bağlı poliolefinler (Örneğin, çapraz bağlı polietilen) içerir. Bu sınıfta, işlem sıcaklığında termoplastik ve işletme sıcaklığında elastomer özelliği gösteren termoplastik elastomerler de vardır. En önemli polimerler Tablo 1.5’te verilmiştir [1].

1.5 Yalıtıcı Kılıflar

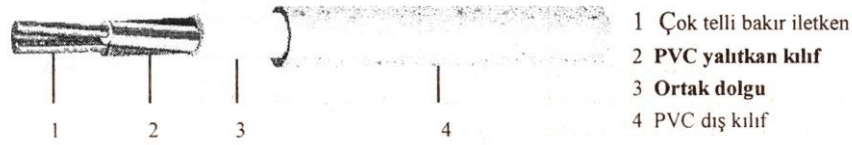
Yalıtıcı kılıf, iletkeni elektriksel bakımdan yalıtmak, mekanik ve hafif kimyasal etkilerden korumak amacıyla kullanılan, iletkeni ve damarları saran gömlektir. Yalıtıcı kılıflar ya çekme işlemiyle boru biçiminde veya şerit sargının sarmal sarılmasıyla sargı biçiminde olur. Yalıtıcı ve koruyucu kılıflar sırasıyla anlatılmıştır.

Tablo 1.5 Kablo yapımında kullanılan en önemli polimerler

Termoplastikler (Plastomerler)					Elastomerler		Duroplastikler (Duromerler)	
PVC	Polivinilklorür	XLPE	Çapraz bağlı polietilen	Polifin ve doğal kauçuk karışımları Üç blok polimer stiren-alkilin-stiren Termoplastik poliüretan (PUR) ve poliester	NR	Doğal kauçuk	EP	Epoksi reçine
PE	Polietilen				IIR	Butel kauçuk (İzopren izobutilen kauçuk)	PUR	Poliüretan reçine
EVA	Etilen vinil-asetat kopolimer (VA≤%30)				SBR	Stiren-butadien Kauçuk		
	Etilen-akrilit Kopolimer. Örneğin,				NBR	Nitril-butadien kauçuk		
EEA	Etilen-etil-akrilit				EPR	Etilen-propilen kauçuk		
EBA	Etilen-butil-akrilit				EPDM	Etilen-propilen dien monomer kauçuk		
PP	Polipropilen				CR	Poliklonopren		
PA	Poliamid				CSM	Klorsülfonil polietilen		
ETFE	Etilen-Tetrafluoretilen Kopolimer				CM	Klorlanmış polietilen		
FEP	Tetrafluoretilen-Heksafluorpropilen Kopolimer (Fluorine edilmiş etilen propilen)				SIR	Silikon kauçuk		
					ECO	Epiklorodrin kauçuk		
					EVA	Etilen-vinil-asetat kopolimer (VA>%30)		

1.5.1 Yalıtkan kılıf

Yalıtkan kılıf, her bir damar iletkenini saran ve iletkeni ilk yalıtan çekme yalıtıcı kılıftır (Şekil 1.5)



Şekil 1.5 NVV (NYM) kablo

Y-kablolarında yalıtkan kılıfın üzerine ayrıca şerit sargı sarılmış olabilir. Yalıtkan kılıfın üzerinde yarı iletken siper varsa, şerit sargı da yarı iletken maddeden yapılır. Kablolar yalıtkan kılıfın yapımında kullanılan yalıtkan malzemeye göre adlandırılır. Örneğin, lastik kablo, PVC kablo, XLPE kablo, vb.

Yalıtkan kılıfın herhangi bir yerinde ölçülen et kalınlığı “0,1 mm + %10 x anma et kalınlığı”ndan büyük, ortalama et kalınlığı ise anma et kalınlığından küçük olmamalıdır [1].

Tablo 1.6 F-kablolarında kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri

Yalıtkan kılıf	Simge	Temel madde	F-kablosu
Lastik	L ₁	NR ve SBR veya SBR	FLÖ (NSA), FLL (NLH), FLL-n (NMH), FLL-nvg (NMHÖU)
Termoplastik	L ₂	PVC	FİV (NLYZ), FV (NYZ), FVV (NYLHrd), FVV-ş (NYLHfl), FVV-n (NYMHYrd), FVV-yn (NYMHYfl)

Tablo 1.7 N-kablolarında kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri.

Yalıtkan kılıf	Simge	Temel madde	N-kablo
Lastik	L ₁	NR ve SBR veya SBR	NLRÖ (NPL), INLL-y (NIFLÖU)
	L ₃	IIR	NLL (NSGAÖU), NLL-b (NSGAFÖU), NLLSL-b (NSGAFCMÖU)
	L ₄	SiR	NLÖ-t (N4GA), NLÖ-bt (N4GAF)
Termoplastik	V ₁	PVC	NV (NYA), NV-b (NYAF), NVI (NSYA), NVI-b (NSYAF), NVI-n (NSYAW), NVL-r (NYIF), NVV-r (NYIFY), NVV (NYM), NVSV (-), NVOV (NYZM), NVPV (NYBUY), NV-u (NYFA), NV-bu (NYFAF), NV-y (NYFAZ), İNV (NYL), İNVPV (NYLRZY)
	V ₆	PVC	NV-ut (NYFAW), NV-but (NYFAFW), NV-yt (NVFAZW), NVRV-t (NYPLYW)

Tablo 1.8 Y-kablolarında kullanılan yalıtkan kılıf malzemeleri.

Yalıtkan kılıf	Simge	Temel madde	Anma gerilimi [kV]				
			0,6/1	3,5/6	5,8/10	8,7/15	20,3/35
Lastik	L ₂	IIR	x	x	x		
	L ₆	EPR	x	x	x	x	x
Termoplastik	V ₄	PVC	x				
	V ₅	PVC	x	x	x	x	
Polietilen	E ₁	PE	x	x	x	x	x
Çapraz bağlı polietilen	E ₅	XLPE	x	x	x	x	x

EK B’de verilen tablolarda F, N, bir damarlı Y ve çok damarlı Y kablolarındaki yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları verilmiştir [1].

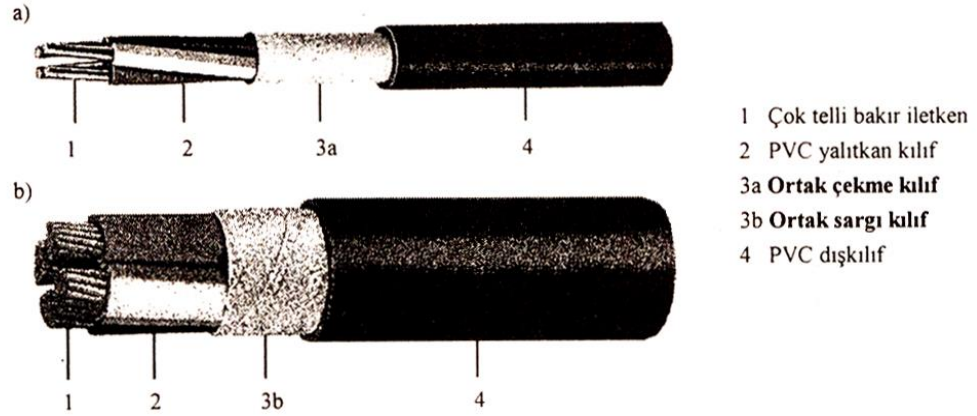
1.5.2 Ortak Dolgu ve Ortak Kılıf

Ortak dolgu, çok damarlı kablolarında damarlar arasındaki boşlukları doldurmak ve damarlar demetine istenen çevre biçimini vermek amacıyla uygulanır. Dolgu olarak pamuk veya yapay yün iplikler, lastik veya termoplastik maddeler kullanılır. Dolgu maddesi, kablonun en büyük işletme sıcaklığına uygun olmalı, kablonun komşu kılıflarını olumsuz etkilememeli, nem çekici olmamalı ve yalıtkan kılıfın zedelenmesine yol açmadan damarların birbirinden kolaylıkla ayrılmasını sağlamalıdır.

Ortak dolgu, damarlar demetini doldurmak amacıyla kullanıldığından koruyucu kılıf özelliklerini taşımaz. Bu yüzden ortak dolgu F ve N-kablolar için tanımlanır. (Şekil

1.6). Ağır mekanik zorlamalara dayanıklı bükülgen kablolarda ve ağır işletme koşullarına dayanıklı kablolar olan Y-kablolarda ortak dolgu yerine ortak kılıf kullanılır.

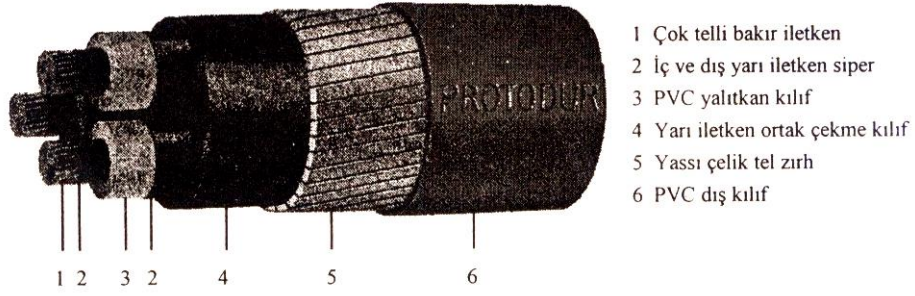
Ortak kılıf, ortak dolgu yerine güçlendirilmiş olarak uygulanan yalıtıcı ve koruyucu kılıftır. Ortak kılıf çekme kılıf veya sargı kılıf olabilir (Şekil 1.6 a.b). Ortak kılıf sargı kılıf ise damarlar arasındaki boşluklar kör damarlarla doldurulabilir.



Şekil 1.6 0,6/1 kV YVV (NYY) kablo.
a) Ortak çekme kılıf,
b) Ortak sargı kılıf.

Kör damar, damarlar arasındaki boşluklara yerleştirilen yalıtkan ip veya iplerdir. Ortak kılıf maddesinin, kablonun ilgili standardına belirtilmemişse ortak dolgunun özelliklerinde olması istenir. Ortak dolgu kılıf uygulanmadan önce damarlar, kendileri burulmaksızın birlikte burulurlar. Burulmuş damarların üzerinde aralıklı veya birbirine örtecek biçimde bez şerit veya iplik sargı bulunabilir. Ortak kılıf üzerine doğrudan bakır sargı, metal kılıf, metal siper ve zırh uygulanabilir.

Çekme ortak kılıf üzerine şerit sargı sarılmış olabilir. Ortak kılıf üzerinde yarı iletken siper, ayrıca ortak kılıf üzerinde metal siper veya siper görevini ve yapan zırh bulunan kablolarda ortak kılıf yarıiletken maddeden yapılır. (Şekil 1.7). Yalıtkan kılıf üzerinde metal siper bulunan kablolarda ortak kılıf yarıiletken maddeden yapılmaz [1].



Şekil 1.7 5,8/10 kV'luk YVŞV (NYFY) kablo

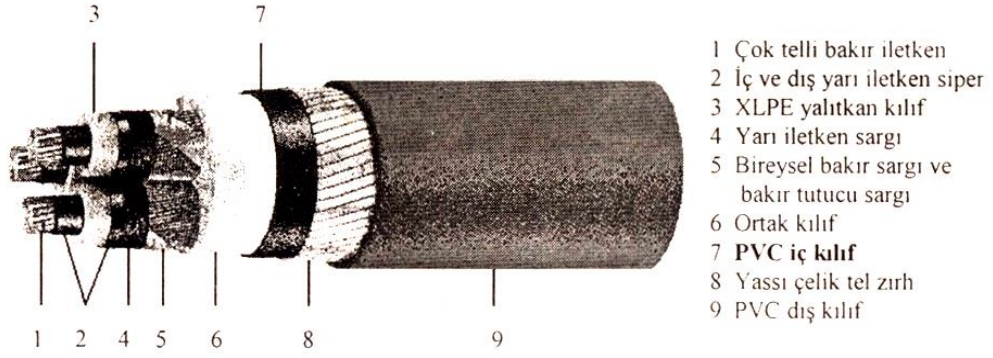
Tablo 1.9 Damar iletkeni kesitleri birbirine eşit olan beşten çok damarlı daire kesitli kablolarda her katta bulunması gereken damar sayıları.

Damar sayısı	Katlar				
	1	2	3	4	5
7	1	6	-	-	-
8	1	7	-	-	-
10	25	8	-	-	-
12	3	9	-	-	-
14	4	10	-	-	-
16	5	11	-	-	-
19	1	6	12	-	-
21	1	7	13	-	-
24	2	8	14	-	-
30	4	10	16	-	-
40	1	7	13	19	-
52	4	10	16	22	-
61	1	6	12	18	24

EK C’de verilen tablolarda kılıfların anma et kalınlıkları verilmiştir [1].

1.5.3 İç Kılıf

İç kılıf, zırhlı kablolarda ortak kılıftan ayrı olarak zırhın altında yer alan ve zırha yastıklık yapan koruyucu kılıftır. (Şekil 1.8). İç kılıf maddesi 20,3/35 kV Y-kabloların dışındaki kablolarda KV₁ termoplastik, 20,3/35 kV Y-kablolarda dış kılıf malzemelerinden birinden olmalıdır. İç kılıf maddesi kablonun en büyük işletme sıcaklığına uygun olmalı, nem çekici olmamalı, kablonun komşu kılıflarını olumsuz etkilememelidir. Ortak kılıfın, üzerine iç kılıf özelliklerine taşıyan malzemeden sargı kılıf eklenerek güçlendirilmesiyle de iç kılıf oluşturulabilir. Sargı kılıfın anma et kalınlığı, zırh şeridin kalınlığı 0,2 mm ve daha küçükse 0,5 mm, 0,2 mm’den büyükse 0,8 mm olmalıdır [1].



Şekil 1.8 3,5/6 kV'luk YE₃SHSV (2XSEYFY) kablo

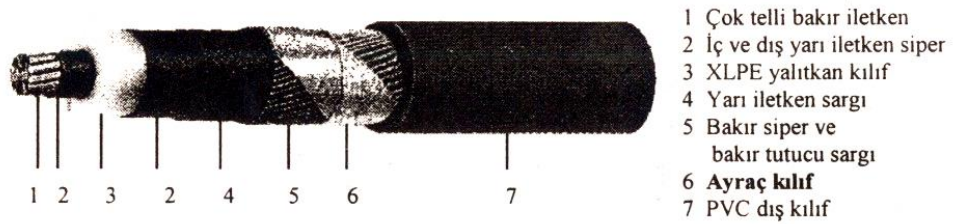
İç kılıfın herhangi bir yerinde ölçülen et kalınlığı “0,2 mm + %20 x anma et kalınlığı”ndan büyük, ortalama et kalınlığı ise anma et kalınlığından küçük olmamalıdır [1].

Tablo 1.10 Y-kablolarda iç kılıfın anma et kalınlıkları.

İç kılıf altındaki saymal çap [mm]	İç kılıfın anma et kalınlığı [mm]
$D'_f \leq 30$	1,2
$30 < D'_f \leq 40$	1,4
$40 < D'_f \leq 50$	1,6
$50 < D'_f \leq 60$	1,8
$60 < D'_f \leq 70$	2,0
$D'_f > 70$	2,2

1.5.4 Ayraç Kılıf

Ayraç kılıf, kablounun farklı kılıflarının karşılıklı zararlı etkileşimini önlemek amacıyla bu kılıflar arasında yer alan ince bir çekme koruyucu kılıftır (Şekil 1.9)



Şekil 1.9 8,7/15 kV'luk YE₃SV (N2XSY) kablo.

1.5.5 Dış Kılıf

Dış kılıf, kabloyu dış etkilere koruyan ve kablonun en dışında bulunan çekilmiş koruyucu kılıftır (şekil 3.1 ara 3.1). Dış kılıf yalıtkan kılıf özelliğini taşımaz. Kağıt yalıtkanlı kablolarla dış kılıf çekme olmayan lifli maddeden sarılarak yapılmışsa koruyucu kılıf ismini alır. Dış kılıf düzgün, sert ve kablonun en büyük işletme sıcaklığına uygun olmalı, yapısında kabarıklıklar, yumuklar ve benzer yapı kusurları bulunmamalı, kabloyu iyice sarmalı, fakat altındaki kılıfa yapışmamalıdır. Dış kılıf F ve N-kablolarla iplik örgü ve sargı biçiminde olabilir. Örneğin, FLÖ (NSA), NLRÖ (NPL) kablo.

Dış kılıfın herhangi bir yerinde ölçülen et kalınlığı:

- F ve N-kablolarla Y-kablolarla dış kılıfın düzgün bir yüzeyin üzerine uygulanması durumunda “0,1 mm + 15 x anma et kalınlığı”,
- Y-kablolarla dış kılıfın pürüzlü bir yüzeyin üzerine uygulanması durumunda “0,2mm + %20 x anma et kalınlığı”ndan büyük, ortalama et kalınlığı her iki durumda da anma et kalınlığından küçük olmamalıdır [1].

Tablo 1.11 F-kablolarla kullanılan dış kılıf malzemeleri

Dış kılıf	Simge	Temel madde	F-kablo
Lastik yalıtkan	KL ₁	NR ve SBR veya SBR	FLL (NLH), FLL-n (NMH)
	KL ₁ -vg	CR	FLL-nvg (NMHÖU)
Termoplastik yalıtkan	KV ₂	PVC	FVV (NYLHrd), FVV-n (NYMHYrd), FVV-yn (NYMHYfl)

FLÖ (NSA): Dış kılıf yapay ipek veya benzer maddeden iplik örgüdür.

Tablo 1.12 N-kablolarla kullanılan dış kılıf malzemeleri.

Dış kılıf	Simge	Temel madde	F-kablo
Lastik yalıtkan	KL ₁	NR ve SBR veya SBR	NVL-r (NYIF)
	KL ₁ -vg	CR	İNLL-y (NIFLOU)
	KL ₃ -vg	CR	NLL (NSGAÖU), NLL-b (NSGAFÖU), NLLSL-b (NSGAFCMÖU)
Termoplastik yalıtkan	KV ₁	PVC	NVV-r (NYIFY), (NVV/NYM), NVSV(-), NVOV (NYMZ), NVPV (NYBUY), İNVPV (NYLRZY)
	KV ₄	PVC	NVRV-t (NYPLYW)

NLÖ-t (N4GA), NLÖ-bt (N4GAF): Dış kılıfın cam ipliği veya ısıya dayanıklı bir madde ile emdirilmiş eşdeğer iplikten örgüdür.

NLRÖ (NPL): Dış kılıf yapay ipek, floş veya eşdeğer iplikten örgüdür.

Tablo 1.13 Y-kablolarda kullanılan dış kılıf malzemeleri

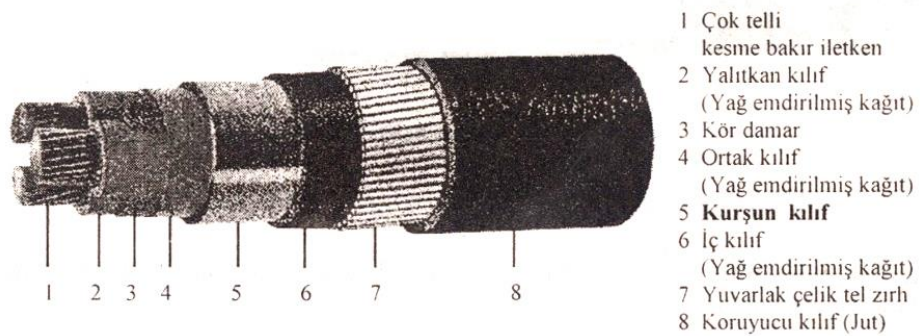
Simge	Temel madde	Anma gerilimi				
		0,6/1 kV	3,5/6 kV	5,8/10 kV	8,7/15 kV	20,3/35 kV
KL ⁵ ₍₃₀₎	NR ve SBR veya SBR	x	x	x		x
KV ₃	PVC				x	
KV ₅	PVC	x	x	x	x	x

EK D’de verilen tablolarda F, N ve Y kablolarda dış kılıfların et kalınlıkları verilmiştir [1].

1.6 METAL KILIFLAR

1.6.1 Kurşun Kılıf

Kurşun kılıf, yalıtıcı ve koruyucu kılıflar nem çekici ise (örneğin, yağ emdirilmiş kağıt) kabloyu nemden, aynı zamanda mekanik ve hafif kimyasal etkilerden korumak amacıyla ortak kılıf üzerine uygulanır (Şekil 1.10). Kurşun kılıfın üzerinde PVC dış kılıf bulunan NVPV (NYBUY) kablo yangın ve patlama sakıncası bulunan yerlerde, örneğin benzin istasyonlarında kullanılır. Bu kablo, aynı zamanda mekanik ve hafif kimyasal etkilere karşı da dayanıklıdır. Kurşun kılıfın herhangi bir yerinde ölçülen et kalınlığı “0,1 mm + %10 x anma et kalınlığı”ndan büyük, ortalama et kalınlığı ise anma et kalınlığından küçük olmamalıdır [1].



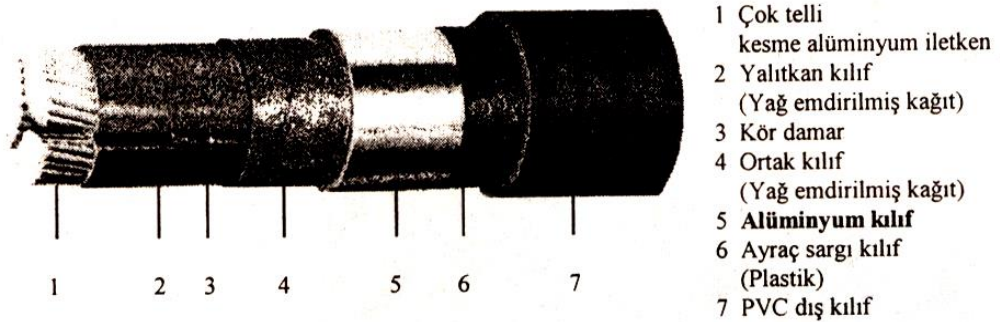
Şekil 1.10 5,8/10 kV'luk (NKRA) kablo

Tablo 1.14 NVPV (NYBUY) kabloda kurşun kılıfın anma et kalınlıkları

Kablunun anma kesiti [mm ²]	Damar sayısı			
	2	3	4	5
1,5	0,8	0,8	0,8	0,8
2,5	0,8	0,8	0,8	0,8
4	0,8	0,8	0,9	0,9
6	0,8	0,9	0,9	0,9
10	0,9	0,9	0,9	-
16	1,0	1,0	1,0	-
25	1,0	1,1	1,1	-
35	1,1	1,1	1,2	-

1.6.2 Alüminyum Kılıf

Alüminyum kılıf da kurşun kılıf gibi kabloyu mekanik ve hafif kimyasal etkilerden korur (Şekil 1.11).

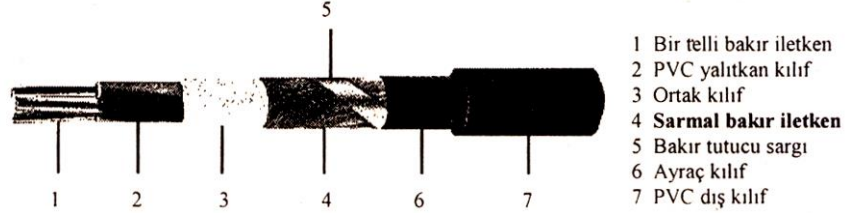


Şekil 1.11 0,6/1 kV'lık (NAKLEY) kablo

Kimyasal ve elektrolitik etkileşimi önlemek için alüminyum kılıf üzerinde termoplastik ayraç sargı kılıf bulunur. Alüminyum, hafif kimyasal etkilere karşı güvenilirdir. Alüminyum, iletkenliği iyi olduğundan nötrü topraklı üç fazlı-dört iletkenli AA da nötr iletkeni olarak kullanılabilir. Bunun için alüminyum kılıfın kesiti gerekli nötr iletkenin kesitine eşit veya daha büyük olmalıdır. Alüminyumun iletkenliğinin iyi olması siper görevi yapmasını da sağlar. Alüminyum mekanik etkilere karşı dayanıklı olduğundan, alüminyum kılıflı kablolarda ayrıca zırh bulunması gerekmez. Alüminyum titreşime karşı da dayanıklıdır.

1.7 SARMAL BAKIR İLETKEN

Sarmal bakır iletken (konsantrik iletken), bir damarlı kablolarda yalıtkan kılıfın, çok damarlı kablolarda genellikle ortak kılıfın üzerine uygulanan, bakır tel veya şeritten sarmal sargıdır (Şekil 1.12.).



Şekil 1.12 0,6/1 kV YVMV (NYCY) kablo.

Sarmal iletken olarak alüminyum kullanılamaz. Sarmal bakır iletken metal siper görevini de yapar. Sarmal bakır iletkenler dalgalı biçimde boyuna yerleştirilmiş olabilir (Şekil 1.13.)



Şekil 1.13 0,6/1 kV'luk (NYCWY) kablo. "CEANDER kablo".

Sarmal bakır iletkenin üzerinde zırh varsa, ikisinin arasında PVC ayraç kılıf bulunur. Sarmal bakır iletken PE, PEN ve nötr iletkeni olarak, aynı zamanda dokunmaya karşı koruma amacıyla kullanılabilir. Ancak, faz iletkeni olarak kullanılamaz. Bir ve üç damarlı bakır kablolarda sarmal bakır iletkenin kesiti faz iletkenin kesitine eşit olmalıdır. Sarmal bakır iletken düşük kesitli iletken olarak kullanılacaksa, anma kesiti [3.3]'te faz iletkeninin kesitine karşılık gelen kesitten küçük olmamalıdır [1].

Sarmal bakır iletkenin kesiti, kablo simgesinde kesekten sonra yazılır. Örneğin, YVMV 3 x 95 sç/50 0,6/1 kV. Sarmal bakır iletkenin 20°C'de DA direnci Tablo 1. ve 1.'de verilen değerlere uygun olmalıdır.

Tablo 1.15 Damar sayısı beşten çok olan kablolarda sarmal bakır iletkenin anma kesitleri [mm²].

Damar sayısı	Kablonun anma kesiti [mm ²]		
	1,5	2,5	4
7	2,5	2,5	4
8	2,5	2,5	6
10	2,5	4	6
12	2,5	4	6
14	2,5	6	6
19	4	6	10
24	6	10	-
30	6	10	-
37	10	10	-

Sarmal bakır iletkenin üzerinde, dağılmasını önlemek için bakır şerit tutucu sargı bulunur. Tutucu sargının kalınlığı en az 0,1 mm, en çok 0,3 mm olmalıdır [1].

Tablo 1.16 Bakır tutucu sargıya ilişkin değerler.

Sarmal bakır iletkenin altındaki saymal çap [mm]	Tutucu sargı sayısı	Tutucu sargının kesiti [mm ²]	Tutucu sargının iki elemanı arasındaki uzaklık
D ≤ 15	1	0,5	4D
	2		
D > 15	1	1,0	4D
	2	0,5	2D

Bakır tutucu sargının geometrik kesitinden hesaplanan 20°C'deki DA öz direnci $\rho_{20} = 0,01786 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ 'den büyük olmamalıdır [1].

1.8 ELEKTROSTATİK SİPERLER (EKRANLAR)

Siper, işlevi kablo yalıtkanının içindeki elektrik alanını düzgünleştirmek ve sınırlamak olan, her bir damar veya ortak kılıf üzerine uygulanan metal (öncelikle bakır) veya metal olmayan (yarıiletken) malzemeden çekme veya sargı kılıftır. Sipere, her bir damar üzerindeyse bireysel siper, ortak kılıf üzerindeyse ortak siper denir.

1.8.1 Yarı İletken Siper

İletken yüzeyinin düzgün olmaması, çıkıntılı noktalarda alan şiddetinin büyümesine ve yalıtkan kılıfın aşırı zorlanmasına yol açar. Elektrik alanını sınırlamak için yüzey düzgünleştirici olarak, anma gerilimi 3,5/6 kV ve daha büyük olan kablolarda her bir faz iletkenin (iç) ve ayrıca yalıtkan kılıfın (dış) üzerinde yarıiletken maddeden birer yarıiletken siper bulunur. İç ve dış yarıiletken siper, yarıiletken sargı veya çekme kılıftır. Yarı iletken maddenin hacimsel öz direnci 20°C’de $5 \times 10^3 \Omega \text{ cm}$ ’den, 75°C’de $5 \times 10^4 \Omega \text{ cm}$ ’den büyük olmamalıdır [1]. Dış yarı iletken siper üzerinde yarıiletken sargı bulunur. Yarıiletken siper ve sargı yalıtkan kılıfı içten ve dıştan, boşluk kalmayacak biçimde sarmalı ve yalıtkan kılıfı olumsuz etkilememelidir.

Tablo 1.17 Anma gerilimine ve yalıtkan kılıfın yalıtkan maddesine göre, iç ve dış yarı iletken siper bulunan kablolar.

Yalıtkan kılıf	Anma gerilimi
PVC EPR	5,8/10 kV ve daha büyük
PE XLPE	3,5/6 kV ve daha büyük

1.8.2 Metal Siper

Metal siper olarak genellikle bakır şerit, yuvarlak ve yassı bakır teller kullanılır. Metal siper, bir damarlı kablolarla bireysel metal siperli kablolarda bakır olmalıdır. Ortak metal siperli çok damarlı kablolarda metal siper galvaniz çelik telden yapılmış zırh biçiminde de olabilir. Galvanizli çelik telden yapılmış olan metal siper ortak kılıfın üzerine uygulanır.

Anma gerilimi 3,5/6 kV ve daha büyük olan kablolarda metal siper bulunur. Anma gerilimi 3,5/6 kV ve daha büyük olan ve yarı iletken siper bulunmayan kablolarda bakır siper, kablo bir damarlıysa yalıtkan kılıfın, çok damarlıysa ortak kılıfın üzerinde bulunur. Anma gerilimi 5,8/10 kV daha büyük olan kablolarda, bakır siper her bir damarın ve doğrudan yarı iletken siperin üzerinde bulunur. Bakır siperi oluşturan tellerin çapı en az 0,5 mm, şeritlerin kalınlığı ise en az 0,1 mm olmalıdır [1].

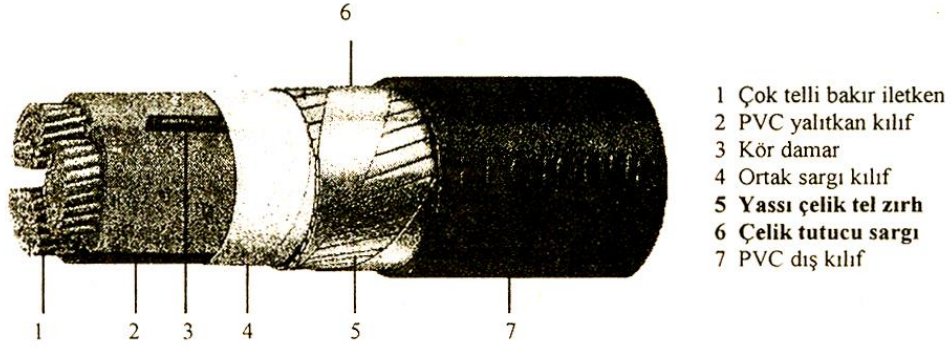
Tablo 1.18 Bakır siperin en küçük kesitleri ve 20°C’de DA dirençleri.

Faz iletkeninin anma kesiti [mm ²]	Bakır siperin	
	Anma kesiti (En küçük) [mm ²]	20°C’de DA direnci [Ω/km]
25	16	1,15
35	16	1,15
50	16	1,15
70	16	1,15
95	16	1,15
120	16	1,15
150	25	0,722
185	25	0,722
240	25	0,722
300	25	0,722
400	35	0,524
500	35	0,524

Metal siper örgü veya sargı biçimindeyse, metal siperin üzerinde, dağılmasını önlemek için bir veya çapraz iki tutucu sargı bulunur. Metal siper bakır tellerden yapılmışsa tutucu sargı da bakır şeritten yapılmalıdır. Tutucu sargının kalınlığı en az 0,1 mm, en çok 0,3 mm olmalıdır. Tutucu sargıya ilişkin değerler Tablo 1.18’e uygun olmalıdır. Metal siperin altındaki saymal çap 15 mm ve daha küçükse tutucu sargı plastik olabilir. Bakır siper ve tutucu sargının geometrik kesitinden hesaplanan 20°C’deki DA öz direnci $\rho_{20} = 0,01786 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ’den büyük olmamalıdır [1].

1.9 ÇELİK ZIRH

Zırh, kabloyu mekanik etkilerden koruyan, ortak kılıfın üzerine ve genellikle dış kılıfın altına uygulanan, şerit, yuvarlak veya yassı tellerden sarmal sargıdır (Şekil 1.14).



Şekil 1.14 0,6/1 kV'luk YVŞÇV (NYFGY) kablo

Zırh, zırhın altındaki saymal çapı 15 mm ve daha küçük olan kablolarda kesinlikle yuvarlak tellerden yapılmalıdır. Ortak kılıf sargı kılıf değilse, ortak kılıfla zırh arasına iç kılıf uygulanması önerilir. Zırh sarmal bakır iletkenin veya metal siperin üzerine uygulanmışsa zırhın altında iç kılıf bulunur.

Yassı çelik tel zırh, anma gerilimi 0,6/1 kV'tan büyük olan çok damarlı kablolarda bakır siper yoksa, siper görevi de yapar. Şeritler galvaniz çelik, alüminyum veya alüminyum alaşımlarından, yuvarlak ve yassı teller ise galvaniz çelik, kurşun kaplı çelik, alüminyum veya alüminyum alaşımlarından yapılır. Zırh, özellikle siper görevini de yapıyorsa, kimyasal etkilenmemesi için boşluksuz olmalı ve kuruyup çatlamayan koruyucu bir madde ile kaplanmalıdır.

Tablo 1.19 Zırh yapımında kullanılan yuvarlak tellerin anma çapları [mm].

Zırhın altındaki saymal çap [mm]	Yuvarlak telin anma çapı [mm]
$D' \leq 15$	0,8
$15 < D' \leq 25$	1,6
$25 < D' \leq 35$	2,0
$35 < D' \leq 60$	2,5
$D' > 60$	3,15

Tablo 1.20 Zırh yapımında kullanılan yassı tellerin ve şeritlerin anma boyutları.

Zırhın altındaki saymal çap [mm]	Yuvarlak telin anma çapı [mm]	Şeritin anma kalınlığı [mm]	
		Galvaniz çelik	Alüminyum veya alüminyum alaşımı
$D' \leq 30$	0,8	0,2	0,5
$30 < D' \leq 70$	0,8	0,5	0,5
$D' > 70$	1,2	0,8	0,8

AA tesisatlarında kullanılan bir damarlı kablolarda zırh varsa, zırhın manyetik olmayan malzemeden yapılmış olması gerekir. Bu amaçla alüminyum zırh kullanılabilir. Alüminyum tellerin anma çapı aşağıdaki çizelgede yuvarlak tellerin anma çaplarına uygun olmalı, şeritlerin kalınlığı, zırhın altındaki saymal çap 70 mm ve daha küçükse 0,5 mm, 70 mm'den büyükse 0,8 mm olmalıdır [1].

Zırh yapımında kullanılan tellerin ve şeritlerin boyutları anma boyutlarından, yuvarlak tellerde %5, yassı tellerde %8 ve şeritlerde %10'dan daha küçük olmamalıdır. Zırh yapımında kullanılan teller düzgün ve çapaksız olmalıdır. Zırhın üzerinde, dağılmasını önlemek için bir veya çapraz iki galvaniz çelik şerit tutucu sargı bulunur. Tutucu sargının kalınlığı en az 0,3 mm olmalıdır. Zırhın altındaki saymal çap 35 mm ve daha küçükse tutucu sargı plastik şerit olabilir. Tutucu sargı, uygulanan yüzeyin en az %50'sini kaplayacak sıklıkta olmalıdır [1].

1.10 KABLO SİMGELERİ

Kablo türleri simgelerle, istenirse simgelerle birlikte adları da yazılarak belirtilir. Simgeler, kablonun kullanma amacını, işletme koşulunu, yapısını, özelliklerini, damar sayısını, damarların mm² olarak kesitini, iletkenin malzemesini ve yapısını, düşük kesitli iletkenin veya siperin yararlı kesitini, V veya kV olarak anma gerilimini gösterir. Kablo simgelerinde, kabloyu oluşturan katmanlara ilişkin simge harfler yalıtkan kılıftan başlayarak içten dışa doğru sıralanarak yazılır [1].

Tablo 1.21 TS 621'e göre, kablo simgelerini belirleyen harflerin anlamları.

İlgi	Harf simge	Anlam
Kullanma amacı ve yeri	O	Yeraltı maden ocaklarında kullanılan kablo
	S	Sinyal ve kumanda kablosu
	T	Telefon kablosu
	-	Güç kabloları için harf simge kullanılmaz.
İşletme koşulu ve döşeme biçimi	F	F-kablo: Normal ve hafif işletme koşullarında, devinen ve taşınan elektrik aygıtlarında kullanılan bükülgen kablolar ve kordonlar
	N	N-kablo: Normal ve hafif işletme koşullarında, iç tesisatlarda boru içinde sıra altına veya borusuz olarak duvara sabit döşenen kablolar
	Y	Y-kablo: Ağır işletme koşullarında, yeraltına, beton kanala veya duvara sabit olarak döşenen güç kabloları (Yer altı kabloları)
	B	B-kablo: Ağır işletme koşullarına dayanıklı, devinen elektrik aygıtlarında, iç ve dış tesisatlarda kullanılan bükülgen kablolar.
İletken malzeme	A	Alüminyum iletken
	-	Bakır iletken için harf simge kullanılmaz
Yalıtkan malzeme	L	Lastik yalıtkan
	V	Polivinilklorür (PVC)
	E	Polietilen (PE)
	E3	Çapraz bağlı polietilen (XLPE)
	E6	Etilen propilen lastik (EPR)
	K	Kağıt yalıtkan
	C	Lak
	Z	Yağ yalıtkan
	G	Gaz yalıtkan
	M	Mineral yalıtkan
	J	İpek sargı
	İ	İpek sargı (Keten, pamuk ipliği, vb)
	Ö	İplik örgü (Pamuk, ipek, yapay ipek)
	D	Bez sargı
Kılıf, sargı, siper ve zırh	A	Alüminyum kılıf
	Z	Çinko kılıf
	M	Sarmal bakır iletken (Konsantrik iletken)
	MH	Bireysel sarmal bakır iletken (Her bir damar üzerinde)
	S	Metal (Öncelikle bakır) siper
	SH(*)	Bireysel bakır siper (Her bir damar üzerinde)
	U(**)	Yarı iletken katman
	Ç	Çelik tutucu sargı
	ÇÇ	Çelik çapraz tutucu sargı
	Ş	Galvaniz yassı çelik tel zırh
	ŞŞ	Alüminyum şerit zırh
	O	Galvaniz yuvarlak çelik tel zırh
	OO	Alüminyum tel zırh
	P	Kurşun kılıf
	R	Taşıyıcı ip veya örgü (Galvaniz çelik tel örgü için harf simge O)
Dış kılıf		Dış kılıflar yapıldıkları yalıtkan malzemenin harf simgesiyle gösterilir.
Dış etkilere dayanıklılık	- t	Isıya dayanıklı
	- n	Neme (Rutubete) dayanıklı
	- d	Dış etkilere dayanıklı
	- k	Korozyona dayanıklı
	- v	Aleve dayanıklı (Tutuşmaz)
	- p	Pasa dayanıklı
	- z	Ozona dayanıklı
	- g	Yağa dayanıklı
	- f	Yüksek frekansa dayanıklı
	- m	Mekanik etkilere dayanıklı
Kablonun özel biçimi	- r	Ara şeritli kablo
	- u	Burulu veya belik şeklinde örtülü kablo

	- y - e İ	Yassı kablo Emdirilmiş (Emprenye edilmiş) kablo Işık borusu kablosu (Harf simge N harfinden önce yazılır.)
Damar iletkenin kesit biçimi	s -	Daire kesmesi (Sektör) kesitli iletken Daire kesitli iletken için harf simge kullanılmaz.
Damar iletkenin tel sayısı	ç ^(***) - ş ^(****)	Çok telli iletken Bir telli (Som) iletken için harf simge kullanılmaz. Sıkıştırılmış iletken
Tellerin incelik derecesi	- - b - c	Telin incelik derecesi : a (Normal) için harf simge kullanılmaz. Telin incelik derecesi : b (İnce) Telin incelik derecesi : c (Çok ince)
Koruma damarı	- I	Sarı-yeşil iki renkli koruma damarı var

- (*) Bakır siperin her damar üzerinde bulunması gereken kablolarda ayrıca H harfi kullanılmaz.
- (**) Yarı iletken siper bulunması gereken kablolarda U harfi kullanılmaz.
- (***) F ve N-kablolarda tellerin incelik dereceleri belirtildiğinden, ayrıca ç harfi kullanılmaz.
- (****) Sıkıştırılmış iletken çok telli olduğundan, ş harfinin ç harfiyle birlikte kullanılması gerekmez.

Kablo simgeleri üç bölümden oluşur.

1. Bölüm	2. Bölüm	3. Bölüm
Kablonun kullanma amacını ve yerini belirten bölüm	Kablonun kullanıldığı işletme koşullarını, döşeme biçimini ve yapısını oluşturan katmanları belirten bölüm	Kablonun damar sayısını, kesitini, anma gerilimini ve diğer özelliklerini belirten bölüm

Bu bölümlere göre, bir kablonun simgesinin belirlenmesinde:

1. simgenin ilk harfi olarak, kablonun kullanma amacını belirten harf konur. Örneğin, sinyal ve kumanda kabloları için S, telefon kabloları için T harfi başa yazılır. Bu kablo aynı zamanda yeraltı maden ocaklarında kullanılacak türdence ve simgede bu özelliğin de belirtilmesi gerekiyorsa başa ayrıca O harfi eklenir, böylece simgenin birinci bölümü OT olur. Güç kabloları için harf kullanılmaz ve birinci bölüm boş geçer.

2. Kablonun kullanma amacını ve yerini belirten harften sonra işletme koşulunu belirten harf gelir. Örneğin, ağır işletme koşullarına dayanıklı sinyal kabloları için ikinci harf Y olduğundan, simgenin ilk iki harfi SYA olur. Bakır iletkenler için harf simge kullanılmaz ve simge SY olarak bırakılır.

3. Bu harflerden sonra iletken malzemesini belirten harf yazılır. Örneğin, alüminyum iletkenler için A harfi konur ve simge SYA olur. Bakır iletkenler için harf simge kullanılmaz ve simge SY olarak bırakılır.

4. İletken malzemesini belirten harften veya bu harf boş geçildikten sonra yalıtkan kılıfın malzemesini belirten harf yazılır. Örneğin, bakır iletkenli ve termoplastik (PVC) yalıtkanlı kablolar için üçüncü harf V olduğundan, simge SYV olur.

5. Bu harflerden sonra kablonun yapısında yer alan siper, zırh, vb katmanları belirten harfler, yalıtkan kılıftan başlanarak içten dışa doğru sıralanır. Örneğin, yalıtkan kılıfı termoplastik (PVC) olan, yassı çelik tel zırhlı ve termoplastik (PVC) dış kılıfı bulunan ağır işletme koşullarına dayanıklı bakır iletkenli güç kablosu YVŞV simgesiyle belirtilir.

6. Kablonun yapısını oluşturan katmanları belirten harflerden sonra, kablonun dış etkilere dayanıklılığını (ısıya, neme, korozyona, vb dayanıklı) ve özel biçimini belirten küçük harfler yazılır. Bu küçük harfler tire ile büyük harflerden ayrılır. Örneğin, ağır işletme koşullarına dayanıklı, kağıt yalıtkanlı, yassı çelik tel zırhlı ve zırhın üzerine uygun bir madde sürülerek pasa karşı korunmuş olan bakır iletkenli güç kablosu YKŞ-p simgesiyle belirtilir.

7. Birinci ve ikinci bölümü oluşturan harflerden sonra, kablonun damar sayısının yanına çarpı konarak her bir damar iletkeninin mm^2 olarak anma kesiti yazılır. Örneğin, YVV 3 x 70. Düşük kesitli iletken de varsa, bu düşük kesitli iletkenin kesiti araya bölme işareti konarak yazılır. Örneğin, YVV 3 x 70/35. Damar çiftleri 2x yazılarak belirtilir. Örneğin, damar iletkeninin kesiti $0,75 \text{ mm}^2$ olan ve 7 çift damarı bulunan kablo için 7 x 2 x 0,75 yazılır.

8. Y-kablolarda kablonun damar sayısını ve damar iletkeninin kesitini belirten sayılardan sonra, damar iletkeninin kesit biçimini, damar iletkeninin çok telli olduğunu belirten harfler konur. Örneğin, damar iletkeni kesme kesitli ve çok telli ise simge YAVV 3 x 70sç/35'dir. Çok telli F ve N-kablolarda tellerin incelik dereceleri harflerle belirtildiğinden, ayrıca ç harfi kullanılmaz. Tellerin incelik derecesini belirten küçük harf, kablonun yapısını belirten büyük harflerden sonra araya tire konarak yazılır. Örneğin, NV-b.

Kabloda sarmal bakır sargı (konsantrik iletken) veya siper varsa bunun kesiti, damar iletkeninin kesitini ve biçimini, çok telli olduğunu belirten harflerden sonra araya bölme işareti konarak yazılır. Örneğin, YVMV 3 x 70sç/35.

1.10.1 VDE'ye Göre Kablo Simgeleri

Ülkemizde, kablolarda Alman standartları uzun süreden beri kullanılmakta olduğundan, VDE'ye göre kablo simgeleri de verilecektir [1]. Bu simgeler parantez içinde gösterilmiştir.

Tablo 1.22 VDE 0250'ye göre, iç döşen kabloların (F ve N-kablolar) simgelerini belirleyen harflerin anlamları

Harf simge	Anlam	Örnek
N	Standardlara uygun (Norm) kablo Kablo simgesinin önüne yazılır	
Y -	Termoplastik (PVC) yalıtkan Lastik yalıtkan için harf simge kullanılmaz.	<u>NYA</u>
L, M, S	Hafif (<u>L</u> eicht), orta (<u>M</u> itte), ağır (<u>S</u> tark) işletme koşullarına dayanıklı kablo Yalıtkanı belirten harf simge, N harfinden ve işletme koşulunu belirten L, M, S harflerinden birinden sonra yazılır.	<u>NLYZ</u>
LH, MH, SH, SSH	Hafif, orta, ağır ve çok ağır işletme koşullarına dayanıklı, damarları dış kılıfın içinde oynayabilen (Dış kılıfı hortum biçiminde), el aygıtlarında kullanılan kablo (<u>L</u> eichte – <u>M</u> ittlere – <u>S</u> tarke – <u>S</u> ehr <u>S</u> tarke <u>H</u> and apparateileitung)	<u>NLH</u> , <u>NYLHY</u> rd <u>NMH</u> , <u>NYMHY</u> <u>NSH</u> <u>NSSH</u>
A M S S IF L F F R	Damar (<u>A</u> der-Leitung) NYA = Yalıtılmış iletken Manto kılıf (<u>M</u> antel) NYM = Dış kılıflı kablo Özel (<u>S</u> onder) dış kılıf S harfi yalıtkanı belirten harfin önüne yazılır. İplik örgü (<u>S</u> chnur-Ader) Sıva altına döşenen ara şeritli kablo (SIFLA kablo) (<u>I</u> mputzleitung <u>F</u> lach) Işık borusu kablosu (<u>L</u> euchtröhrenleitung) Lamba duyu kablosu (<u>F</u> assungs-Ader) Asansör kablosu (<u>F</u> ahrstuhl-Leitung) Boru kılıf (<u>R</u> ohrdracht)	<u>NYA</u> , <u>NSA</u> , <u>NYM</u> , <u>NSYA</u> , <u>NSYAF</u> , <u>NSA</u> , <u>NYIF</u> , <u>NYL</u> , <u>NYLRZY</u> , <u>NYFA</u> , <u>NYFAZ</u> , <u>NFLG</u> , <u>NYRUAY</u> , <u>NYLRZY</u> , <u>NYRUZY</u> .
A B Z C	Alüminyum kılıf (<u>A</u> luminiummantel) U = Ortak alüminyum kılıf (<u>U</u> mhült <u>A</u> luminiummantel) Kurşun kılıf (<u>B</u> leimantel) U = Ortak kurşun kılıf (<u>B</u> leimantel <u>U</u> mhüllung) Çinko kılıf (<u>Z</u> inkmantel) U = Ortak çinko kılıf (<u>U</u> mhült <u>Z</u> inkmantel) Bakır siper (<u>C</u> u-Schirm)	<u>NYRUAY</u> <u>NYBUY</u> <u>NYLRZY</u> <u>NYRUZY</u> <u>NYLC</u>
T	Taşıyıcı ip, tel, vb (<u>T</u> ragorgan)	<u>YSLT</u>
SL SL Si Z, D Rd FL, fl	Kumanda kablosu (<u>S</u> teuer- <u>L</u> eitung) Kaynak kablosu (<u>S</u> chweiß- <u>L</u> eitung) Yüksek ısıya dayanıklı kablo (SINOTHERM kablo) İki damarlı (<u>Z</u> willing) ve Üç damarlı (<u>D</u> rilling) yassı kablo Yuvarlak (<u>r</u> und) kablo Yassı (<u>F</u> lach) kablo	<u>NYSLYCY</u> <u>NSLFÖU</u> <u>SIA</u> , <u>SIAF</u> <u>NYZ</u> <u>NYD</u> <u>NYLHYrd</u> <u>NYFLY</u> , <u>NYLHYfl</u>

F	İnce çok telli (<u>Feindrähtig</u>) kablo	NYA <u>E</u> , NSYA <u>E</u> , SIA <u>E</u> ,
FF	Çok ince çok telli (<u>Feindrähtig</u>) kablo	NSLFF <u>Ö</u> U
Ö	Yağa dayanıklı (<u>Ölfest</u>)	NSH <u>Ö</u> U
U	Aleve dayanıklı = Tutuşmaz (<u>Unentflammbar</u>)	NSH <u>U</u>
W	Dış hava koşullarına dayanıklı (<u>Wetterfeste</u>)	NSYA <u>W</u>
-J	Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı var	NYM- <u>J</u>
-O	Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı yok	NYM- <u>O</u>

İletkenin bir telli (som) veya çok telli olduğunu ve kesit biçimini belirten simge harfler [3.3]’de verilmiştir.

VDE 0265, 0271, 0272 ve 0273’e göre, güç kablolarının (Y-kablolar) simgelerini belirleyen harflerin anlamları

Harf simge	Anlam	Örnek
N	Standardlara uygun (<u>N</u> orm) kablo Kablo simgesinin önüne yazılır	
A	Alüminyum iletken (<u>A</u> luminiumleiter)	N <u>A</u> YY
-	Bakır iletken için harf simge kullanılmaz.	NY <u>Y</u>
Y	Termoplastik (PVC) yalıtkan	N <u>Y</u> Y
2Y	Polietilen (PE) yalıtkan	N <u>2Y</u> HSY
2X	Çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtkan	N <u>2X</u> SY
C	Sarmal bakır sargı (Konstantrik iletken) (<u>C</u> u-drähte)	NY <u>C</u> Y
CE	- Ortak sarmal bakır sargı	NY <u>C</u> EY
CW	- Bireysel sarmal bakır sargı (<u>E</u> inzel)	NYC <u>E</u> Y
	- Dalgalı biçimde boyuna bakır sargı (<u>W</u> ellenförmig)	NYC <u>W</u> Y
S	Bakır siper (Cu- <u>S</u> chirm)	NY <u>S</u> Y
SE	- Bir damarlı ve ortak siperli çok damarlı kablolar	NY <u>S</u> EY
	- Çok damarlı kablolarda bireysel siper	NY <u>S</u> EY
R	Zırh	NK <u>R</u> A
F	- Yuvarlak çelik tel zırh (<u>R</u> unddrahtbewehrung)	NY <u>F</u> Y
G ^(*)	- Yassı çelik tel zırh (<u>F</u> lachdrahtbewehrung)	NY <u>F</u> G <u>Y</u>
	Çelik tutucu sargı (R ve F için)	NY <u>F</u> G <u>Y</u>
-J	0,6/1 kV, sarmal bakır sargı bulunmayan kablolarda	NY <u>Y</u> - <u>J</u>
-O	- Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı var	NY <u>Y</u> - <u>O</u>
	- Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı yok	NY <u>Y</u> - <u>O</u>
-J	0,6/1 kV, sarmal bakır sargı bulunmayan kablolarda	NY <u>Y</u> - <u>J</u>
-O	- Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı var	NY <u>Y</u> - <u>O</u>
	- Yeşil-sarı iki renkli koruma damarı yok	NY <u>Y</u> - <u>O</u>

^(*) Eski simge Gb (Gegenwendel aus Stahlband). Örneğin, NYFGbY.

2. KISA DEVRE KOŞULLARI

2.1 KISA DEVRE AKIMI

2.1.1 Kısa Devre Akımının Etkileri

Sistemde bir kısa devre oluştuğunda devre koruması çalışıncaya kadar genellikle 0,2 ve 3,0 saniye arasında değişen bir süre geçer. Bu geçen süre içerisinde damar iletkeni, ekran, metal kılıf, zırh gibi kabloların iletken bölümlerinde sıcaklık artışı meydana gelir. Dolaylı olarak bu iletken bölümlere bitişik yalıtkan ve koruyucu tabakalarda da sıcaklık artışı olur [2].

Sıcaklık artışına ek olarak, akan yüksek akım, akım taşıyan iletkenler arasında akımın karesiyle orantılı olarak termo-mekanik ve elektromanyetik kuvvetler üretir. İletkenlere etkileyen manyetik kuvvetler, kabloda yıkıcı mekanik zorlamalar üretirler.

Eskime, sıcaklık basınç karakteristikleri gibi etkileri sebebiyle kablolarda sıcaklık artışı önemlidir. Sıcaklık artışı izin verilen bir kısa devre sıcaklığı ile sınırlandırılmalıdır.

Verilen bir kısa devre koşulu için, bir kablo tesisatının kısa devre kapasitesi, tüm bu parametrelere göre incelenmelidir.

Çok damarlı kablolar normal olarak yeterli mekanik dayanıklılığa sahiptir, yani dinamik zorlanmalara karşı dayanımı yeterlidir. Bu sebeple termik etki, hata akımının büyüklüğüne ve süresine bağlı olarak kritik bir parametredir. Tek damarlı kablolarda termik etkinin yanı sıra mekanik etki de önem kazanacağından, kablonun ve tutucuların mekanik dayanımı da denetlenmelidir. Ayrıca, kablo aksesuarları termik ve mekanik kısa devre zorlanmalarına göre tasarlanmalıdır.

Bir kablonun kısa devre dayanımı, nicelik bakımından izin verilen tekrar sayısına, şekilsel bozulma derecesine, yıkım veya zarar niteliğine göre tanımlanamaz. Bir kablo tesisatının, birçok kısa devreden sonra bile güven içinde çalışması ve çalışmasını etkilemeyecek sınırlarda deforme olması beklenir.

Kablo tesisatlarının planlanmasında, kabloların ve kablo donanımlarının dinamik ve termik kısa devre zorlanmaları için yeterli olup olmadıklarının kontrol edilmesi gereklidir.

2.1.2 Kısa Devre Akımının Hesabı

IEEE Standardı 434-02-01’de şöyle ifade edilmiştir: “Hem kısa devre hem de toprak-hata koşullarında, tüm tesisatın her ilgili noktasındaki olası kısa devre akımı belirlenecektir [3]. Bu, ya hesaplama ile ya da ölçümle yapılacaktır”.

Bir elektrik tesisatını tasarlarken, her zaman gerekli bilgiyi elde etmek mümkün olmaz. Olası kısa devre akımının gerçek değerini doğru olarak hesaplamak zordur. Bunun yerine kabaca bir tahmin yeterli olur. Bu, aşağıdaki şekilde yapılabilir.

Örneğin; eğer 215 V’luk bir besleme gerilimi, 50 A’lık bir yük 210 V’a düşüyorsa, o zaman yaklaşık kısa devre akımı:

$$z = \frac{\text{Gerilim düşümü}}{\text{Yük akımı}} = \frac{5 \text{ V}}{50 \text{ A}} = 0,1 \Omega \quad (2.1)$$

Böylece;

$$\text{Yaklaşık kısa devre akımı} = \frac{V}{z} = \frac{215}{0,1} = 2150 \text{ A}$$

Herhangi bir sistemde kısa devre koşullarındaki hata akımının değeri sadece sistemin empedansları tarafından sınırlandırılır. Bu yüzden herhangi bir sistemin kısa devre hesabının temeli bu empedansların belirlenmesi olmalıdır.

Empedans, direnç ve reaktanstan oluşan kompleks bir büyüklüktür. Direnç değeri motorlar ve transformatörlerde nispeten küçüktür. Motorların ve transformatörlerin reaktansını yüzde olarak ifade etmek alışılmıştır. Yani % x’lik reaktansı olan bir

elemanda, normal değerin yerini tutan tam yük akımı taşırken normal gerilimin % x'i kadar bir reaktif gerilim düşümü olacaktır.

Güç kabloları durumunda, direnç ve reaktans değeri kabloların üreticisi tarafından kabloların kilometresi başına ohm cinsinden verilir ve empedansını oldukça hassas hesaplamak için kullanılabilir. Bu şekilde ortaya çıkabilecek olası hata akımının değeri daha doğru olarak belirlenebilir.

Pratik hesaplamalar çoğunlukla, aygıt üreticileri tarafından sağlanan reaktans değerlerini kullanarak “yüzde reaktans yöntemi” ile yapılır [3].

Başlangıçta devre şeklinin belirlenmesi gerekir; bunun için eşdeğer elemanlar kullanılır. Sonra sistemdeki en güçlü elemanın gücü veya bütün güçlerin toplamı olan güç, temel güç olarak seçilir, veya bu seçim keyfi olarak yapılır. Örneğin 100 000 kVA gibi. Bu şekilde, 1000 kVA gücünde bir elemanın reaktansı %10 olacaktır çünkü 100 000 kVA temel gücü için reaktans %100 seçilmiştir.

Aşağıdaki ifadeyi kullanarak, bütün reaktans yüzdelerini ortak bir tabana getirmek mümkündür [3]:

Yüzde olarak temel (baz) reaktans, X_b ,

$$X_b = \frac{\text{Temel (baz) güç (kVA)}}{\text{Elemanın gücü (kVA)}} \times \text{yüzde olarak elemanın reaktansı} \quad (2.2)$$

Örneğin, yukarıdaki 10 000 kVA temel gücü durumunda,

$$\%X_b = \frac{100\,000 \times 10}{10\,000} = \%100$$

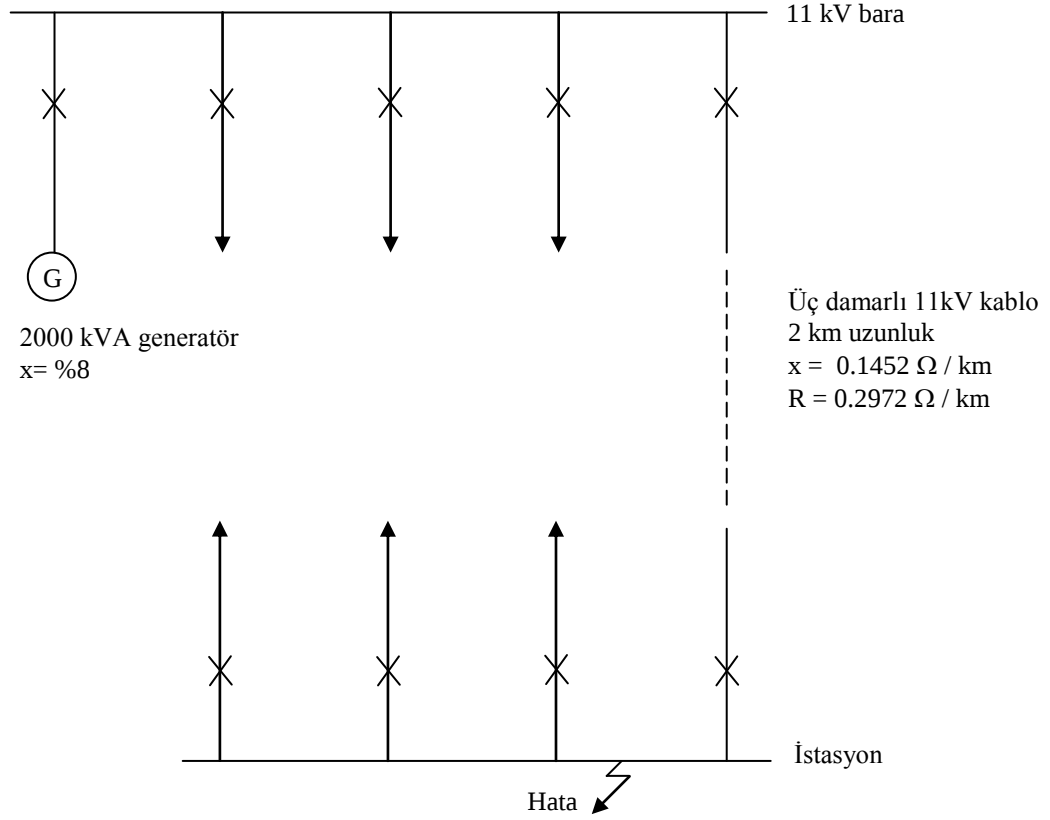
Kablon reaktansının ohmik değerini kullanarak, yüzde olarak reaktans değeri aşağıdaki gibi bulunabilir:

Verilen kVA tabanındaki X ohm değeri için yüzde olarak reaktans

$$= \frac{100\,000 \times \text{kVA temeli} \times X \text{ ohm}}{\text{Gerilim}^2} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki formül, yüzde reaktans hesaplama yöntemini gösteren basit bir örneğe uygulanabilir.

Örnek 2.1



Şekil 2.1 Basit bir besleme sistemi

Şekil 2.1’de gösterilen basit besleme sistemini göz önüne alalım. 2000 kVA’lık bir generatör, 11 kV’luk bir bara üzerinden bir kablo bağlantısıyla uzaktaki bir istasyonu beslemektedir. 2 km uzunluğunda bir kablo üzerinden beslenen bu istasyonda bir kısa devre oluşmuştur. Sistemde yalnızca bir generatör bulunduğundan baz değer olarak onun gücü esas alınır. MVA cinsinden bu güç aşağıdaki denklemle hesaplanabilir [3].

$$S_a = \frac{kVA(Baz) \times 100}{\%reaktans \times 1000} \quad (2.4)$$

Örnekteki değerler denklemde yerine koyulursa:

$$S_a = \frac{2000 \times 100}{8 \times 1000} = 25 \text{ MVA}$$

bulunur. Aşağıdaki formül kullanılarak

bulunur. Devrenin empedansını hesaplamak için vektörel toplam kullanılmasıdır:

n

Empedans EMBED Equation.3

EMBED Equation.3

nur.

??

Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

ktörel toplam kullanılmasıdır:

n

Empedans EMBED Equation.3

EMBED Equation.3

nur.

??

Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

EMBED Equation.3

EMBED Equation.3

nur.

??

Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

nur. Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun

??

reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

nur. Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun

??

reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

nur. Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

nur. Bu devre üzerinde düşünülürse, generatörün reaktansı (%8) ile kablonun reaktansının (0,2904 Ω) seri olduğu görülür, denklem (2.3) uygulanarak aşağıdaki denklem elde edilir [3]:

2000 kVA baz (temel) değeri için kablonun yüzde olarak reaktansı

$$= \frac{100\ 000 \times 2000 \times 0,2904}{11\ 000^2} = \%0,48$$

Devrenin yüzde reaktansı, yukarıdaki değere generatörünkini (%8) ekleyerek bulunur, toplam %8,48 eder. Bu değer denklem (2.4)'de yerine koyulursa:

$$S_a = \frac{2000 \times 100}{8,48 \times 1000} = 23,58\ MVA$$

Kısa devre akımının etkin değeri, denklem (2.5)'den aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_a = \frac{23,58 \times 1000}{11 \times \sqrt{3}} = 1237\ A(\text{etkin})$$

Örnekten, kablonun toplam direncinin, reaktans değerinin yaklaşık iki katı olduğu görülür. Bu da kısa devre akımının değerinin azalmasına katkıda bulunur.

Bir kez daha denklem (2.3)'ü kullanarak:

2000 kVA tabanındaki kablonun yüzde direnci

$$= \frac{100\ 000 \times 2000 \times 0,5944}{11\ 000^2} = \%0,982$$

bulunur. Devrenin empedansını hesaplamak için vektörel toplam kullanılmalıdır:

$$\begin{aligned} \text{Empedans} &= \sqrt{\text{Direnc}^2 + \text{Reaktans}^2} \\ Z &= \sqrt{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

j büyüklüğü kullanılarak generatör ve kablo için aşağıdaki empedans ifadeleri yazılır:

$$\text{Generatör empedansı} = R + j X_1 \quad (2.7)$$

$$\text{Kablo empedansı} = R + j X_2 \quad (2.8)$$

$$\text{Empedans} = R + j (X_1 + X_2) \quad (2.9)$$

Örneğe dönülür ve sayısal değerler yerleştirilirse:

$$\text{Generatör empedansı} = 0 + j 8$$

$$\text{Kablo empedansı} = 0,98 + j 0,48$$

$$Z = 0,98 + j 8,48 = \sqrt{0,98^2 + 8,48^2} = \%8,536$$

bulunur. Buna göre,

$$S_a = \frac{2000 \times 100}{8,536 \times 1000} = 23,430 \text{ MVA}$$

olur. Bu sebeple ani kısa devre akımı:

$$I_k = \frac{23,430 \times 1000}{11 \times 1,732} = 1229 \text{ A (etkin)}$$

Böylece kablo direncini hesaba katarak hata akımında sadece %1 gibi küçük bir azalma meydana geldiği görülecektir, uygulamada kablo direnci, tüm devrenin reaktansının üçte birinden daha küçüktür. Özet olarak; genellikle ortak bağlama donanımının ve şebeke bileşenlerinin kesme gücü S_a bilinir. Kesme gücü S_a ve anma gerilimi U_n 'den simetrik açma akımı I_a 'yı hesaplayabiliriz [2].

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3} U_n} \quad [kA] \quad (2.10)$$

Eğer kısa devrenin olduğu andaki S_k'' kesme gücü biliniyorsa, başlangıç kısa devre akımı:

$$I_k'' = \frac{S_k''}{\sqrt{3} U_n} \quad [kA] \quad (2.11)$$

ve tepe kısa devre akımı:

$$I_s = \kappa \sqrt{2} I_k'' \quad [kA] \quad (2.12)$$

dir. Formüllerde S_a ve S_k'' [MVA], U_n [kV] cinsinden birimle kullanılır.

Kesme akımı I_a ile başlangıç kısa devre akımı I_k'' arasındaki bağıntı:

$$I_a = \mu I_k'' \quad [kA] \quad (2.13)$$

dir. κ ve μ katsayıları bilinmiyorsa;

- κ katsayısı = 1,8
- μ katsayısı şehir şebekelerinde 1, endüstri işletmelerinde 0,8 ayrıca
- açma süresi gecikmesiz açmada 0,1 ile 0,2 saniye, gecikmeli açmada 0,5 ile 1 saniye arasında alınabilir.

Örnek 2.2: 20 kV'ta çalışan bir şebeke, 250 MVA kesme gücüne göre tasarlanmıştır.

$$\kappa = 1,8 \text{ ve } \mu = 1,0$$

$$I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3} U_n} = \frac{250 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 20 \times 10^3} = 7,2 \text{ kA}$$

$$I_k'' = I_a / \mu = 7,2 / 1 = 7,2 \text{ kA}$$

$$I_s = K \sqrt{2} I_k'' = 1,8 \times \sqrt{2} \times 7,2 = 18,3 \text{ kA}$$

2.1.3 Kritik Kısa Devre Akımları

İletkenler ve ekranlar için kritik kısa devre akımları Tablo 2.1'de verilmiştir. Kesme veya kısa devre akımından hesapla bulunan kısa devre akım değerleri üç faz kısa devre için uygulanabilir ve iletkenlerin boyutlandırılmasında temel oluşturur. İletkenlerdeki maksimum zorlanma normal olarak üç kutuplu simetrik kısa devrede oluşur [2].

Tablo 2.1 İletkenler ve ekranlar için kritik kısa devre ve toprak-hata akımları

Yıldız noktasının durumu	Faz iletkenlerindeki maksimum kısa	Ekranlardaki ve kılıftaki maksimum kısa devre
--------------------------	------------------------------------	---

		devre akımı	akımı
Yıldız noktası yalıtılmış şebekeler		I''_{k3}	Çift toprak-hata akımı $I'_{kEE} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3}$
Toprak-hata kompanzasyonlu şebekeler		I''_{k3}	Çift toprak-hata akımı $I'_{kEE} \leq \frac{\sqrt{3}}{2} I''_{k3}$
Yıldız noktası düşük dirençle topraklanmış şebekeler	Bütün transformatörlerin direkt topraklanması ile	$I''_{k2} < 1,5 I''_{k3}$	$I''_{k1} < 1,5 I''_{k3}$
	Bir veya daha fazla transformatörün direkt topraklanması ile	I''_{k3}	$I''_{k1} \leq I''_{k3}$
	Ek empedanslar yoluyla topraklama	I''_{k3}	$I''_{k1} = 1' \text{ den } 2 \text{ kA' e}$

I''_{k1} : Faz-toprak kısa devresinde başlangıç kısa devre akımı (toprak kısa devre akımı)

I''_{k2} : Faz-faz kısa devresinde başlangıç kısa devre akımı

I''_{k3} : Dengeli üç faz kısa devresinde başlangıç simetrik kısa devre akımı (I''_k ile de gösterilir.

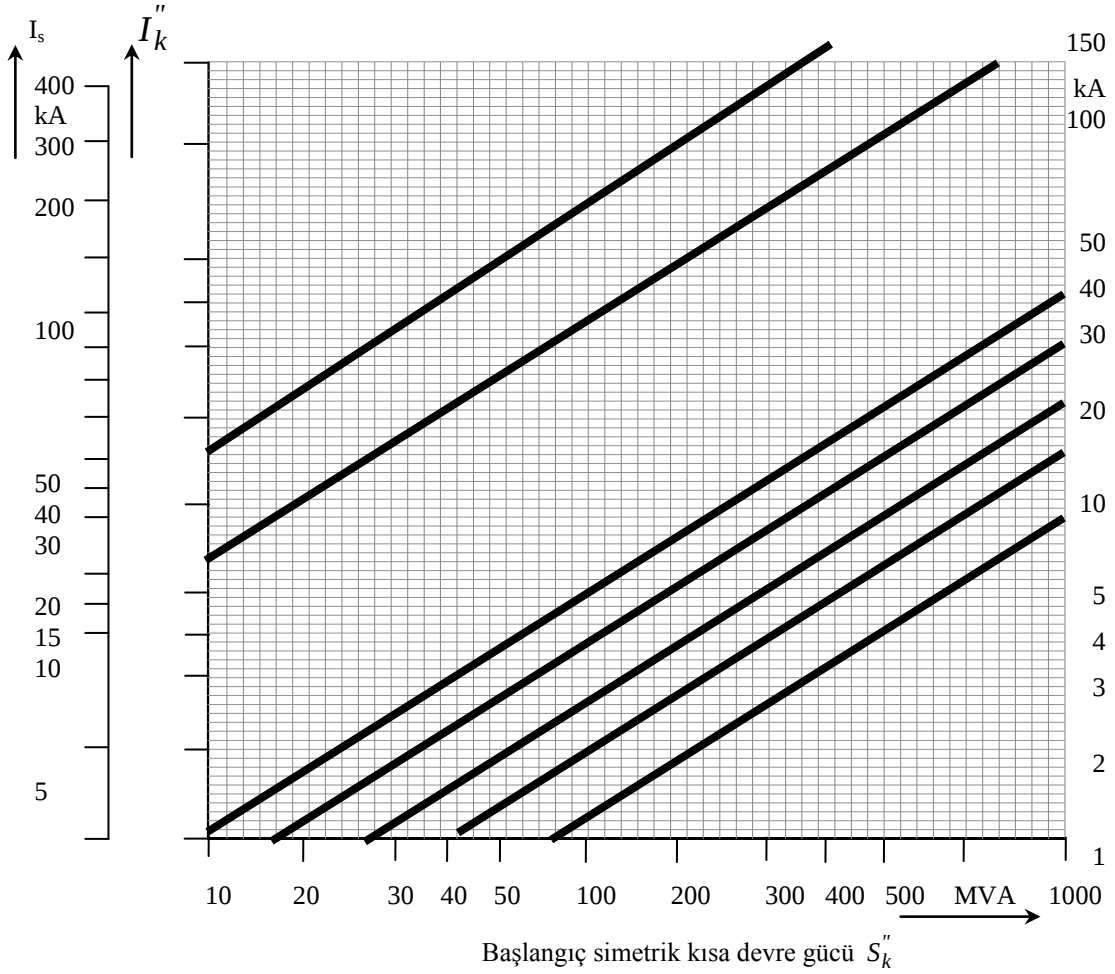
I''_{kEE} : Çift toprak bağlantısı yardımıyla başlangıç faz-faz kısa devre akımı (çift toprak-hata akımı)

Yıldız noktası küçük değerli dirençle topraklanmış şebekelerde, yıldız noktası topraklaması için VDE 0111'e göre yapılmış, faz-toprak veya faz-faz kısa devresi süresince hata akımı üç fazlı kısa devreninkinden daha büyük değer alabilir.

Toprak bağlantısı olmayan faz-faz kısa devresinde ve üç faz kısa devresinde sadece iletkenler zorlanır. Toprak hatası olmayan faz-faz bir kısa devre için akımın değeri üç fazlı kısa devreninkinin $\sqrt{3}/2$ katıdır. Faz-toprak hatasıyla ya da toprak bağlantılı faz-faz kısa devresiyle veya çift toprak bağlantısı yoluyla kabloların ekran veya metal kılıfları zorlanır.

Ekran veya metal kılıf üzerindeki zorlanmanın büyüklüğü, şebeke yıldız noktasının davranışına ve asimetrik kısa devre akımına bağlıdır.

Aşağıda $\kappa = 1,8$ ve başlangıç simetrik kısa devre gücü S''_k 'ne bağlı olarak başlangıç simetrik kısa devre akımları I''_k ve maksimum kısa devre akımları I_s verilmiştir [2].



Şekil 2.2 $\kappa = 1,8$ ve başlangıç simetrik kısa devre gücü S_k'' 'ne bağlı olarak başlangıç simetrik kısa devre akımları (I_k'') ve maksimum kısa devre akımları (I_s).

2.1.4 Toprak-Hata Akımı

Toprak-hata akımı I_F , toprak-hata noktası bulunan sistemdeki hata noktasında, sistemden toprağa ya da topraklanmış kısımlara akan akımdır. Yıldız noktası yalıtılmış bir şebekede, toprak-hata koşullarında toprak-hata akımı I_F , kapasitif akım ise I_C 'dir. Bu akımın büyüklüğü, tüm şebekenin toprağa göre kapasitelerinin toplamı olan C_{EN} tarafından belirlenir [4].

$$I_F = I_C = U_e 3 \omega C_{EN} \quad (2.14)$$

Kablo şebekelerinde I_C , birçok örnekte, 100 A'den küçüktür. Çok özel durumlarda daha yüksektir. Genel olarak gerilimi 10 kV'a kadar olan küçük yerel şebekelerde yıldız noktası yalıtılır. Eğer toprak-hata akımı 10 A'yi aşmazsa, toprak-hata arkı kendi kendine söner ve bundan dolayı karışıklıklar engellenir. Bununla beraber, şebekenin

çalıştığı yerde toprak-hata akımı 100 A'e erişebilir ve daha fazla arkın kendi kendine sönmesi beklenmez. Kendiliğinden tekrar tutuşan ark, kısa devre koruma donanımı tarafından kesilerek tekrar çoklu hatalara yol açabilecek (çift-toprak hatası veya faz-faz kısa devresi toprak bağlantılı hata) yüksek geçici gerilimler doğurabilir. Ayrıca sıcaklık artışı olabilir. Yıldız noktası yalıtılmış bir şebekede toprak arızası dengelemesi (kompanzasyonu) olsa da çift-toprak hataları gelişebilir. Böyle bir çift-toprak hatası akımının büyüklüğü şebekenin karakteristiklerine, hatanın iki noktası arasındaki uzaklığa ve ekranın kesitine bağlıdır, fakat hiçbir zaman bu akım $\frac{\sqrt{3}}{2} I_k''$ değerini aşmaz [4].

Rezonans (ark söndürme bobinli) topraklama sisteminde toprak hatası durumunda artık akım iletkenlerden ekrana ve toprağa akar. Bu akım kapasitif toprak-hata akımından daha küçük bir akımdır. Büyük şebekelerde toprak-hata kompanzasyonu yapılır. Bunun için bir veya daha çok transformatörün yıldız noktaları, ark söndürme bobinleri üzerinden topraklanır.

Ark söndürme bobininin L endüktansı, şebekenin C_{EN} kapasitesine göre ayarlanarak

$$\omega L = \frac{1}{3\omega C_{EN}} \quad (2.15)$$

hata noktasındaki toprak-hata akımı I_F , küçük değerli bir dengesiz artık akım haline getirilir. Bu akım iki bileşenden oluşur. Bileşenlerden biri üç fazlı akımdır, bu akım bobindeki ve bağlantılardaki kayıplarla ilgilidir. Diğer bileşen endüktif ve kapasitif büyüklükler arasındaki farktan oluşan reaktif akımdır. Eğer faz akımı ihmal edilirse:

$$I_F = I_{Rest} \approx U_e \left(3\omega C_{EN} - \frac{1}{\omega L} \right) \quad (2.16)$$

olur. Hava hattı şebekelerinde veya karışık hava hattı ve kablo şebekelerinde, toprak-hata arkları kendiliğinden sönen bir karakteristiğe sahiptir [4].

Bütün hataların sadece küçük bir bölümü uzun süreli hatalara yol açar. Toprak-hata akımının büyüklüğü, kompanze edilmiş şebekelerde birkaç yüz amperi aşabilir.

Yıldız noktası düşük dirençle topraklanmış şebekelerde; toprak-hata akımı, başlangıç faz-toprak kısa devre akımı I_{k1}'' olur. Akımın değeri, kaynağın (temel olarak) sıfır

bileşen empedansı ile yıldız noktasının topraklandığı yerden belirlenir. Çift toprak hataları normal olarak bu şebekelerde oluşmaz. Şebekeler için üç temel çalışma modu vardır [2]:

- Bütün transformatörlerin yıldız noktaları doğrudan topraklanmış şebekeler. Bu durumda, faz-toprak kısa devre akımı, üç fazlı bir kısa devredeki akımı aşabilir:

$$I''_{k1max} < 1,5 I''_{k3}$$

- Bir veya daha çok transformatörün yıldız noktası doğrudan topraklanmış şebekeler (örneğin santral başına bir yıldız noktası topraklaması). Faz-toprak kısa devre akımı daha küçük bir değere sahiptir: $I''_{k1max} < I''_{k3}$

- Akım sınırlaması için yıldız noktası ek empedanslar üzerinden topraklanmış şebekeler. Bu düzenleme orta gerilimli şebekelerde kullanılır. Faz-toprak kısa devre akımı, bu yolla 1 ila 2 kA arasında bir maksimum değerle sınırlanır [4].

2.2 FAZ-TOPRAK KISA DEVRESİNDE AKIMLAR VE YÜK KAPASİTESİ

2.2.1 Faz-Toprak Kısa Devresinde İletken ve Kılıf Akımları

Toprak akımı koşullarında besleme sürerse; işletme akımı tarafından endüklenmiş kılıf veya ekran akımları, iletkende toprak hatasından ortaya çıkan kapasitif hata akımlarıyla birlikte işletme akımlarına eklenir. Kablodan kaynaklanan toprak-hata akımları, şebekeden kaynaklanan toprak-hata akımlarına göre ihmal edilecek kadar küçüktür.

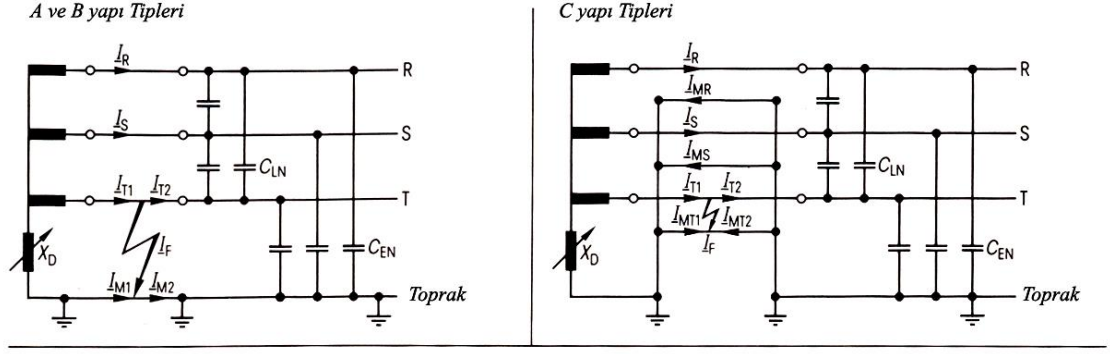
Proje tasarımlarında çoğunlukla sadece toprak-hata akımı I_C bilinir veya dikkata alınır. İletkenler, bununla beraber, şarj akımları ve parçalarının etkisi altında kablonun sıcaklık artışının etkilenmesinde hesaba katılmalıdır [4]. Hava hatları için ve A yapısı tipindeki (“kuşaklı kablo”, polimer yalıtkanlı ve ortak ekran, kılıf veya zırhlı kablolar) kablolar için kapasite oranları $C_L / C_E \approx 1/4$ dir ki hem hava hatları hem de kablolar içeren karma şebekelerde $I_{CL} = I_C/4$ yaklaşıklığı kullanılabilir. Eğer işletme akımı, faz bileşeni I_{bw} ve reaktif bileşeni I_{bb} ’yle birlikte toprak-hata akımına eklenirse Şekil 2.3’de verilen denklemler elde edilir. B yapısı tipi (ortak ekran, kılıf veya zırhlı üç damarlı kablolar ve tek damar ekranlı üç damarlı kablolar) kablolar için şebekeden kaynaklanan şarj akımı kısmı A yapısı tipiyle aynı şekilde

düşünülmelidir. Bütün yapı tipleri için iletken akım denklemleri aynıdır ($\cos \varphi = 0,96$; $I_c/I_b = 0,77$; $I_c/I_{CL} = 4$). Şekil 2.4’de akımların vektör diyagramları gösterilmiştir.

A ve B yapı tipinde kılıf ve ekran akımları için formül aynı şekilde özdeştir. C yapı tipinde, kılıf ve ekran akımlarına iletken akımı tarafından endüklenen akım da eklenmelidir. En kötü durum düşünüldüğünde, toplam faz-toprak akımının sadece kablunun metal kısımlarından geçtiği ve topraktan geçmediği kabul edilir. Aynı zamanda kurşun kılıflı ve çelik band zırhlı emprenye edilmiş yalıtkanlı kablolarda toprak-hata akımının sadece kurşun kılıftan geçtiği kabul edilir [4].

Bir şebekede besleme kablosunda olabilecek en yüksek zorlanma, kablunun sonuna yakın bir yerde toprak-hatasının meydana gelmesiyle ortaya çıkar. Bu durum izleyen örnekte göz önüne alınmıştır. Bu yüzden izin verilen toprak-hata akımının ve sıcaklık artışının büyüklüğü hakkında hesaplanan sonuç güvenilirdir. Dahası, eğer akım topraktan akarsa, kablunun zorlanması azalır.

Yıldız noktasının yalıtıldığı yerde kılıf veya ekran ve toprakla arasındaki akım dağılımını kolayca hesaplamak mümkün değildir. İdeal kompanzasyonla toprak-hata koşulunda, kılıf veya ekrandan akım akmaz. Bu sebepten dolayı kılıf akımları için formüle göre Şekil 2.3’te $I_c = 0$ ’dır. İdeal olmayan kompanzasyonla, kılıftan ve ekrandan akım akar fakat bunları doğru bir şekilde hesaplamak zordur [2].



Yalıtılmış yıldız noktalı:

$$\begin{aligned} \underline{I}_R &= I_{bw} + I_C / 2\sqrt{3} - j(I_{bb} - 3I_C / 4); & I_R &= \sqrt{(I_{bw} + I_C / 2\sqrt{3})^2 + (I_{bb} - 3I_C / 4)^2}; \\ \underline{I}_S &= I_{bw} + I_C / 2\sqrt{3} - j(I_{bb} - 3I_C / 4); & I_S &= \sqrt{(I_{bw} + I_C / 2\sqrt{3})^2 + (I_{bb} - 3I_C / 4)^2}; \\ \underline{I}_{T1} &= a[I_{bw} - j(I_{bb} - 5I_C / 4)]; & I_{T1} &= \sqrt{I_{bw}^2 + (I_{bb} - 5I_C / 4)^2}; \\ \underline{I}_{T2} &= a[I_{bw} - j(I_{bb} - I_C / 4)]; & I_{T2} &= \sqrt{I_{bw}^2 + (I_{bb} - I_C / 4)^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{M1} &= 0 & \underline{I}_{MR} &= -j I_g \Lambda + j a I_C / 3; \\ \underline{I}_{M2} &= j a I_C; I_{M2} = I_C; & \underline{I}_{MS} &= -j a^2 I_g \Lambda + j a I_C / 3; \\ & & \underline{I}_{MT1} &= +j a I_g \Lambda + j a 2I_C / 3; \\ & & \underline{I}_{MT2} &= -j a I_g \Lambda + j a I_C / 3; \\ & & \underline{I}_{MR} &= \sqrt{(\Lambda I_g - I_C / 6)^2 + (I_C / 2\sqrt{3})^2}; \\ & & \underline{I}_{MS} &= \sqrt{[(\sqrt{3}\Lambda I_g / 2) + (I_C / 2\sqrt{3})]^2 + [(\Lambda I_g / 2) - (I_C / 6)]^2}; \\ & & \underline{I}_{MT1} &= I_g \Lambda + 2I_C / 3; \\ & & \underline{I}_{MT2} &= I_g \Lambda - 2I_C / 3; \end{aligned}$$

İdeal kompanzasyon ile ($X_D = 1/3 \omega C_E$) (yukarıda verilen diğer tam formüller değişmez):

$$\begin{aligned} \underline{I}_{T1} &= \underline{I}_{T2} = a[I_{bw} - j(I_{bb} - I_C / 4)]; & I_{T1} &= I_{T2} = \sqrt{I_{bw}^2 + (I_{bb} - I_C / 4)^2}; \\ \underline{I}_{M1} &= I_{M2} = j a I_C; & \underline{I}_{MT1} &= \underline{I}_{MT2} = -j a I_g \Lambda + j a I_C / 3; \\ \underline{I}_{M1} &= I_{M2} = I_C; & I_{MT1} &= I_{MT2} = I_g \Lambda - I_C / 3; \end{aligned}$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \Lambda = \sqrt{\frac{1}{1 + (R'_M / X'_M)^2}}$$

A yapı tipi: “Kuşaklı kablo” (örneğin NKBA), ortak eleman, kılıf veya zırlı polimer yalıtkanlı kablolar (örneğin NYFGY), hava hatları gibi.

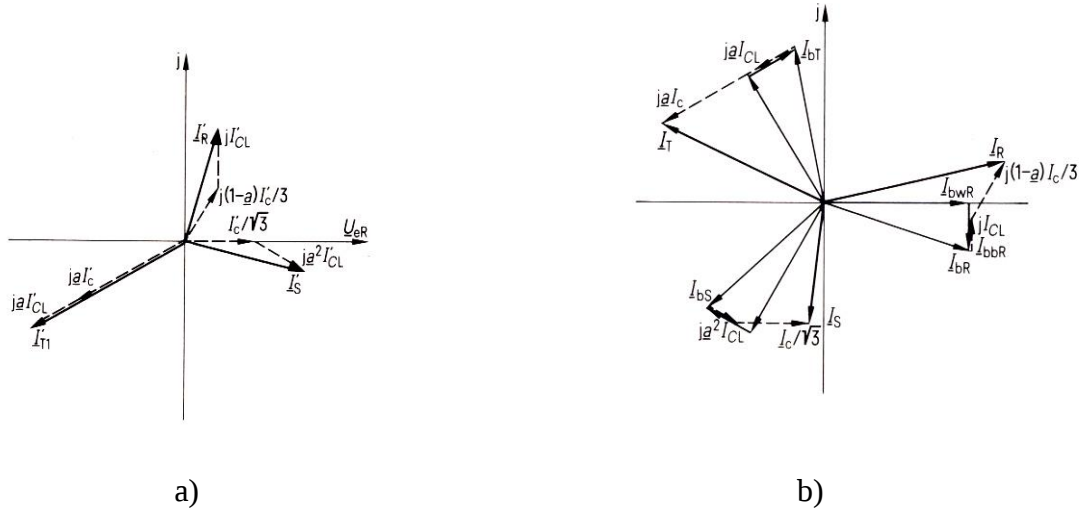
B yapı tipi: Ortak ekran, kılıf veya zırlı üç damarlı radyal alanlı kablolar (örneğin N2XS2Y)

C yapı tipi: Ekranlı tek damarlı kablolar (örneğin N2XS2Y) veya tek damarlı ekranlı üç damarlı kablolar (örneğin N2XSE2Y)

Faz iletkenleri R, S, T ile; ekran, kılıf ve zırh ise M ile gösterilmiştir.

Şekil 2.3 Toprak hatası koşullarında kablodaki kapasitif ve işletme akımları.

C_{LN} ve C_{EN} şebeke kapasiteleridir, faz-faz ve faz-toprak; toprak hatası altındaki kablonun kapasiteleri ihmal edilir; toprak-hata akımının sadece kılıflar veya ekranlar yoluyla aktığı kabul edilmiştir.



Şekil 2.4

- a) Şarj ve toprak akımları vektör diyagramı
- b) Şekil 2.3'e göre kapasitif akım ve işletme akımları vektör diyagramı

2.2.2 Faz-Toprak Kısa Devresinde Yük Kapasitesi

Toprak-hata koşullarında iletken akımları gibi kılıf akımlarının da hepsi dengesizdir. Bu yüzden genelde hesaplamaların, kabloların yük kapasitesi için bilinen denklemler kullanılarak I_g ve I_{gM} akımlarının geometrik ortalama değerleriyle yapılması önerilir.

İletkenler dengesiz akımlar nedeniyle eşit olarak ısınmaz, ortalama değerden büyük akım akan iletkenler daha fazla sınır ve sıcaklık hesaplanan değeri aşabilir [2]. Bu

yüzden, ayrıca bu anda bir yüksek gerilim zorlanması ortaya çıktığında, daha yüksek iletken sıcaklığının normal işletme sıcaklığını aşmayacağını garantileyen hesaplamaların yapılması gerekir [2]. Yük kapasitesi için aşılmaması gereken veya izin verilen sıcaklık artışı $\theta_{Lr} - \theta_E$:

$$\theta_{Lr} - \theta_E = n I_g^2 R'_{we} (T'_{Kie} + T'_{xy}) - [(\rho_x / \rho_E - 1) \Delta\theta_x] \quad (2.17)$$

Burada;

$$I_g = \sqrt[3]{I_R I_S I_T}, \quad (2.18)$$

$$R'_{we} = R'_y (1 + \lambda_{1e} + \lambda_{2e}), \quad (2.19)$$

$$T'_{Kie} = \frac{(T'_1 / n) + (1 + \lambda_{1e}) T'_2}{1 + \lambda_{1e} + \lambda_{2e}} + T'_3 \quad (2.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde;

θ_{Lr} : İzin verilen anma işletme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

θ_E : Toprağın sıcaklığı, ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)

n : Kablodaki yüklü damar sayısı

I_g : Toprak arızasında iletkenlerden akan akımların geometrik ortalama değeri (A)

R'_{we} : Toprak arızasında kablonun birim uzunluğunun etkin direnci (Ω/m)

T'_{Kie} : Toprak arızasında kablonun görünür termik direnci ($^{\circ}\text{K m/N}$)

T'_{xy} : Çok damarlı kablonun veya üç tek damarlı kablonun günlük yükü içinde görünür toprak termik direnci ($^{\circ}\text{K m/W}$)

ρ_x : Nemsiz toprağın termik öz direnci ($^{\circ}\text{K m/W}$)

ρ_E : Nemli toprağın termik öz direnci (nemli bölgelerde) ($^{\circ}\text{K m/W}$)

$\Delta\theta_x$: Toprak sıcaklığı üzerinde, eş termik sınırın sıcaklık yükselme sınırı ($^{\circ}\text{K}$)

R'_y : İletkenin birim uzunluğunun A.A. direnci (Ω/m)

λ_{1e} : Toprak arızasında kılıf ve ekran kayıpları hesabında kullanılan

katsayı

λ_{2e} : Toprak arızasında zırh kayıpları hesabında kullanılan katsayı

T_1' : Yarı iletken tabakalı yalıtkanın termik direnç ($^{\circ}\text{K m/W}$)

T_2' : Ekran veya metal kılıf ile zırh arasındaki koruyucu tabakanın termik direnci ($^{\circ}\text{K m/W}$)

T_3' : Dış koruyucu kılıfın termik direnci ($^{\circ}\text{K m/W}$)

A yapı tipindeki metal kılıflı veya çelik band zırhlı kablolar için veya ekranlı kablolar için ek kayıplar dikkate alınmalıdır. Kılıftaki (ekran) toprak-hata akımından dolayı, kılıf kayıp faktörü λ_{1e} 'e ek olarak, endüksiyon akım kayıpları için omik kayıplar $I_M^2 R_M'$ hesaba katılmalıdır. Bu, toprak arızasında kılıf kayıp faktörü [4]:

$$\lambda_{1e} = \lambda_1 + (I_M / I_g)^2 (R_M' / n R_y') \quad (2.21)$$

dir. Sadece çelik tel zırhlı olan A yapı tipindeki kablolar için $\lambda_1 = 0$ 'dır. Toprak-hata akımının neden olduğu zırhtaki ohmik kayıplar (birim uzunluk direnci R_A' kullanılarak), zırh kayıp faktörü λ_2 'yle ilgili olarak endüksiyon akımı ve histerizis kayıplarına eklenmelidir:

$$\lambda_{2e} = \lambda_2 + (I_M / I_g)^2 (R_A' / n R_y'). \quad (2.22)$$

B yapı tipindeki kablolar için toprak-hata akımının neden olduğu ek kayıplar, kabloların ekran ve/veya düz bir çelik tel zırhının olup olmamasına bağlı olarak, (2.21) ve (2.22) denklemleri kullanılarak hesaplanmalıdır.

C yapı tipindeki kablolar için gerilimler, emprenye kılıf devrelerinde dolaşım akımları ile sonuçlanan kılıf veya ekranlarda endüklenir. Toprak-hata koşullarında iletken akımları eşit değildir. Kılıfta endüklenen I_{Mi} akımı, iletken akımları I_g 'nin geometrik ortalama değeri kullanılarak basitleştirilmiş bir şekilde hesaplanabilir [2]:

$$I_{Mi} = I_g \Lambda \quad (2.23)$$

$$\Lambda = 1 / \left[1 + (R_M' / X_M')^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.24)$$

Ayrı ayrı ekranlanmış veya kılıflanmış damarları olan üç damarlı kabloların, üç tek damarlı demetlenmiş kablo gibi, endüklenmiş kılıf akımları her zaman eşittir. Kabloların yan yana döşendikleri yerlerde kılıf akımları dengesizdir. Değişen birim uzunluk reaktansı X_M hesabını kolaylaştırmak için iletken ile kılıf arasındaki mesafeler yerine geometrik ortalama değeri kullanılabilir.

Yukarıda sözü edilen endüklenmiş akımlar toprak hatası sebebiyle kılıf akımına eklenmelidir (Şekil 2.3). Bu toplama akımlar da farklı büyüklüklerde olduğundan; toplam kılıf kayıpları, kılıf akımının geometrik ortalama değeri kullanılarak hesaplanır [2]:

$$P'_{VM} = I_{gM}^2 R'_M, \quad (2.25)$$

$$I_{gM} = \sqrt[3]{I_{MR} I_{MS} I_{MT}} \quad (2.26)$$

Sıcaklık artışı için, genel denklemde kullanmak için toprak-hata koşullarında kılıf kayıp faktörü:

$$\lambda_{1e} = (I_{gM} + I_g)^2 (R'_M / n R'_y). \quad (2.27)$$

Yıldız noktası topraklanmış şebekelerde, izin verilen toprak-hata akımını hesaplamak için, transformatörle toprak-hata noktası arasındaki 1. bölgedeki akımlar, en çok sıcaklığın gelişeceği bölgedeymiş gibi alınmalıdır. Toprak-hata noktasının ötesindeki 2. bölgedeki akımlar daha az kritiktir. Doğru kompanzasyonlu şebekelerde akım, her iki bölgeyi de eşit şekilde böler.

10 kV için PVC yalıtkanlı kablolarda (2.17) sıcaklık artış denkleminin sol tarafındaki dielektrik sıcaklık artışı, izin verilen sıcaklık artışından çıkarılmalıdır. İncelenen kablunun hata oluşan damarında dielektrik kayıplar doğmaz fakat diğer iki damarda normal işletmedekinden üç kat daha büyük kayıplar olur. Bu yüzden, üç damarlı kabloda dielektrikteki sıcaklık artışı:

$$\Delta \theta_d = 2 \times 3 U_e w C'_E \tan \delta (T'_{kd} + T'_x), \quad (2.28)$$

tek damarlı kablo için

$$\Delta\theta_d = 2 \times 3 U_e^2 w C_E' \tan \delta (\Delta T_x' + T_{kd}' + T_x'), \quad (2.29)$$

$$T_{kd}' = (T_1' / 2\pi) + T_2' + T_3', \quad (2.30)$$

$$T_x' = (\rho_x / 2\pi) \ln(4h / d), \quad (2.31)$$

$$\Delta T_x' = (\rho_x / 2\pi) \ln \sqrt{(2h / a)^2 + 1}. \quad (2.32)$$

olur [2]. Burada;

U_e : Faz-toprak gerilimi

C_E' : Kablonun birim uzunluğunun kapasitesi

T_{kd}' : Dielektrik kayıplar gözönüne alındığında kablonun görünür termik direnci

T_x' : Sürekli işletmede çok damarlı kablonun veya üç fazlı kabloda üç tek damarlı kablonun görünür toprak-termik direnci

$\Delta T_x'$: Gruplamaya bağlı olarak sürekli işletmedeki ek görünür termik direnç

h : Kablonun döşenme derinliği

d : Kablonun dış çapı

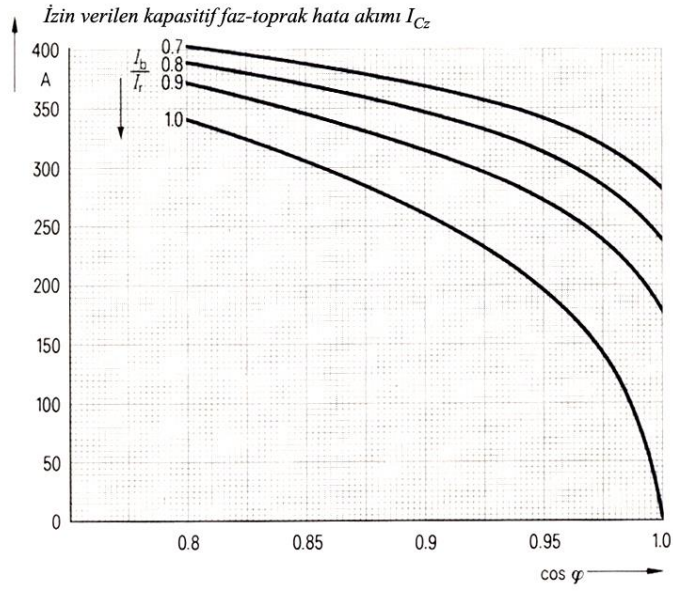
a : Tek damarlı kablonun eksenel uzunluğu

$\tan \delta$: Dielektrik kayıp faktörü.

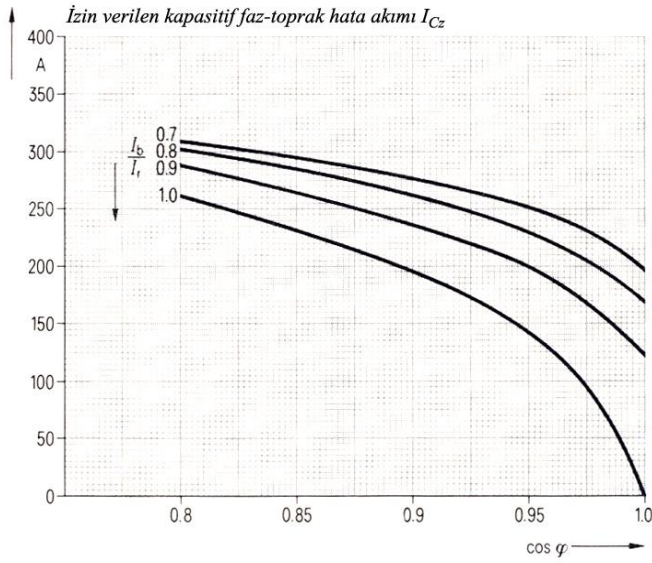
Ayrıca, aynı kanaldaki diğer kabloların sebep olduğu sıcaklık artışı için $\Delta\theta_g$ miktarı, izin verilen sıcaklık artışından çıkarılmalıdır. Eğer aynı kanalda döşenmiş bulunan kablo grupları için azaltma faktörü kullanılmışsa (VDE 0298 Bölüm 2), o zaman izin verilen sıcaklık artışı bu faktörün karesiyle çarpılmalıdır [4].

Şekil 2.5.'de, örnek olarak, hesaplanmış izin verilen faz-toprak hata akımı I_{Cz} , 20 kV için $\cos \phi$ güç faktörü ile ilişkisi gösterilmiştir. Parametre olarak, işletme akımı I_b 'nin normal işletme koşullarındaki yük kapasitesine oranı olan I_r seçilmiştir. VDE 0298 Bölüm 2'ye göre demet tesisatın yük faktörü $m = 0,7$ (genel elektrik beslemesi) alınır [4].

a)



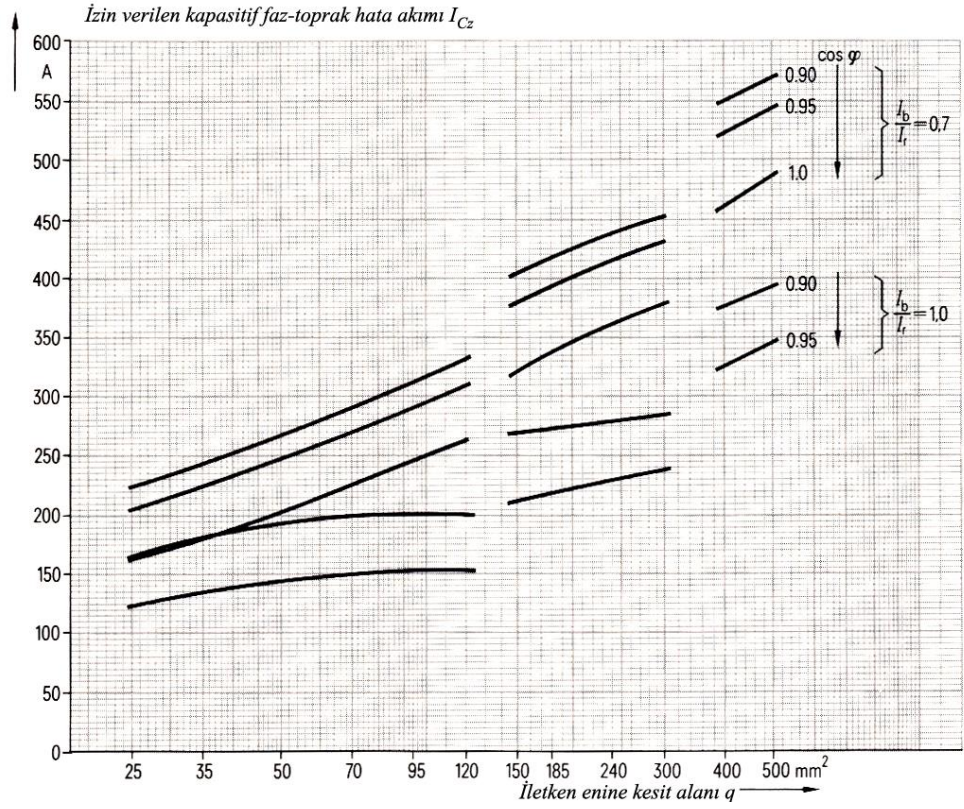
b)



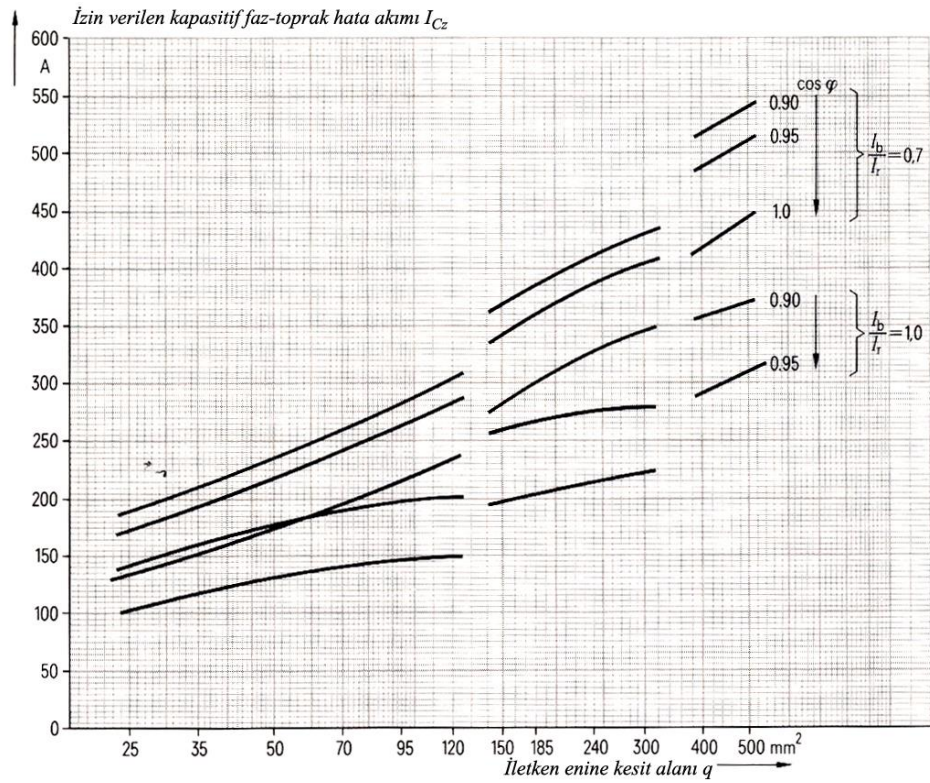
Şekil 2.5 Toprağa döşenmiş NA2XS2Ş e1x150 RM125 12/20 kV kabloda izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımları I_{Cz}

- a) Toprak-hata kompanzasyonlu şebeke
- b) Yalıtılmış yıldız noktalı şebeke

Şekil 2.6 ise, VDE 0298 Bölüm 2'ye göre toprağa döşenmiş XLPE yalıtkanlı 12/20 kV kablolar için izin verilen I_{Cz} kapasitif faz-toprak hata akımlarını gösterir. Önceki yükleme %70 ($I_b/I_r = 0,7$) ve %100 ($I_b/I_r = 1.0$) dir. %100'lük önceki yüklemde $\cos \varphi = 1.0$ ile $I_{Cz} = 0$ olur. 6/10 kV'luk kablolarda yük kapasitesi yaklaşık olarak %2 azaltılır. 18/30 kV'luk kablolar için yük kapasitesi yaklaşık olarak %2 arttırılır.



a) Bakır İletken



b) Alüminyum İletken

Şekil 2.6 Toprak-hata kompanzasyonlu şebekede toprağa döşenmiş tek damarlı XLPE yalıtkanlı 12/20 kV'lık kablolar için izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımları I_{Cz} .

Örnek 2.3: $m = 0,7$ katsayısına sahip toprağa döşenmiş üç tek-damarlı NA2XS2Y 1x150 RM/25 12/20 kV'luk kablolar için, izin verilen kapasitif faz-toprak hata akımı I_{Cz} akımı kompanze edilmiş bir şebeke için hesaplanacaktır. Güç faktörü $\cos\varphi = 0,8$ 'dir.

$$\begin{aligned} I_b &= I_r = 320 A, \\ I_{bw} &= I_b \cos \varphi = 320 \times 0.8 = 256 A, \\ \sin \varphi &= \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6, \\ I_{bb} &= I_b \sin \varphi = 320 \times 0.6 = 192 A. \end{aligned}$$

Birçok iterasyondan sonra $\theta_{Lr} - 20^\circ K \approx 70^\circ K$ koşulu için $I_{Cz} = 344 A$ bulunur.

Hesaplama: Şekil 2.3'ten yararlanarak

$$\begin{aligned} I_R &= \sqrt{(I_{bw} + I_c / 2\sqrt{3})^2 + (I_{bb} - 3I_c / 4)^2} \\ &= \sqrt{(256 + 344 / 2\sqrt{3})^2 + (192 - 3 \times 344 / 4)^2} \\ &= 361.4 A, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_S &= \sqrt{(I_{bw} + I_c / 2\sqrt{3})^2 + (I_{bb} - 3 \times 344 / 4)^2} \\ &= \sqrt{(256 - 344 / 2\sqrt{3})^2 + (192 - 3 \times 344 / 4)^2} \\ &= 170 A, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{(I_{bw}^2 + (I_c / 4 - I_{bb})^2} \\ &= \sqrt{(256^2 + (344 / 4 - 192)^2} \\ &= 277.1 A, \end{aligned}$$

bulunur. (2.18) denkleminde yararlanarak

$$\begin{aligned} I_g &= (I_R I_S I_T)^{1/3} \\ &= (361.4 \times 170 \times 277.1)^{1/3} \\ &= 257.3 A, \end{aligned}$$

bulunur.

$$\begin{aligned}
M' &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(2 \times 1.11d / d_{Mm}) \\
&= \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln(2 \times 1.11 \times 35.7 / 29.2) \\
&= 1.997 \times 10^{-7} \text{ H/m},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
X'_M &= 2\pi f M' \\
&= 2\pi \times 50 \times 1.997 \times 10^{-7} \\
&= 0.0627 \Omega/\text{km},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R'_{M20} &= \frac{(1+z)}{\chi \cdot q_M} \\
&= \frac{1+0.05}{56 \times 10^6 \times 25 \times 10^{-6}} \\
&= 0.75 \Omega/\text{km},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R'_{M9} &= R'_{M20} [1 + (\vartheta_M - 20)\alpha_{20}] \\
&= 0.75 [1 + (79.8 - 20)0.00393] \\
&= 0.9263 \Omega/\text{km},
\end{aligned}$$

(2.24)'ten yararlanarak

$$\begin{aligned}
\Lambda &= [1 + (R'_{M9} / X'_M)^2]^{-\frac{1}{2}} \\
&= [1 + (0.9263 / 0.0617)^2]^{-\frac{1}{2}} \\
&= 0.0675,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Lambda I_g &= 0.0675 \times 257.3 \\
&= 17.4 \text{ A},
\end{aligned}$$

bulunur. Şekil 2.3'ten yararlanarak

$$\begin{aligned}
I_{MR} &= \sqrt{(\Lambda I_g - I_c / 6)^2 + (I_c / 2\sqrt{3})^2} \\
&= \sqrt{(17.4 - 344 / 6)^2 + (344 / 2\sqrt{3})^2} \\
&= 107.0 \text{ A},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{MS} &= \sqrt{(\sqrt{3}\Lambda I_g / 2 + I_c / 2\sqrt{3})^2 + (\Lambda I_g / I_c / 6)^2} \\
&= \sqrt{(\sqrt{3} \times 17.4 / 2 + 344 / 2\sqrt{3})^2 + (17.4 / 2 - 344 / 6)^2} \\
&= 124.3 \text{ A},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{MT} &= \sqrt{(\Lambda I_g - I_c / 3)^2} \\
&= \sqrt{(17.4 - 344 / 3)^2} \\
&= 97.3 \text{ A},
\end{aligned}$$

bulunur. (2.26)'dan yararlanarak

$$\begin{aligned}
I_{gM} &= (I_{MR} I_{MS} I_{MT})^{1/3} \\
&= (107.0 \times 124.3 \times 97.3) \\
&= 109.0 \text{ A},
\end{aligned}$$

hesaplanır. (2.21)'den yararlanarak

$$\begin{aligned}
\lambda_{1e} &= (I_{gM} / I_g)^2 (R'_M / nR'_y) \\
&= (109.0 / 257.3)^2 (0.9263 / 0.2647) \\
&= 0.6280,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R'_{we} &= R'_y (1 + \lambda_{ie}) \\
&= 0.2647 (1 + 0.6280) \\
&= 0.4309 \Omega / km
\end{aligned}$$

elde edilir. (2.20)'den

$$\begin{aligned}
T'_{Kie} &= (T'_1 / n) / (1 + \lambda_{ie}) + T'_3 \\
&= [(0.376 / 1) / (1 + 0.6280) + 0.099] = 0.330 \text{ Km} / \text{ W}
\end{aligned}$$

ve (2.17)'den

$$\begin{aligned}
\theta_L - \theta_E &= n I_g^2 R'_{we} (T'_{Kie} + T'_{xy}) - [(\rho_x / \rho_E) - 1] \Delta \theta_x \\
&= 1 \times 257.3^2 \times 0.4309 \times 10^{-3} (0.330 + 3.445) - [(2.5 / 1) - 1] 25 = 70.19^\circ \text{ K},
\end{aligned}$$

$$\theta_{Lr} - \theta_E = (90 - 20) = 70^\circ \text{ K}$$

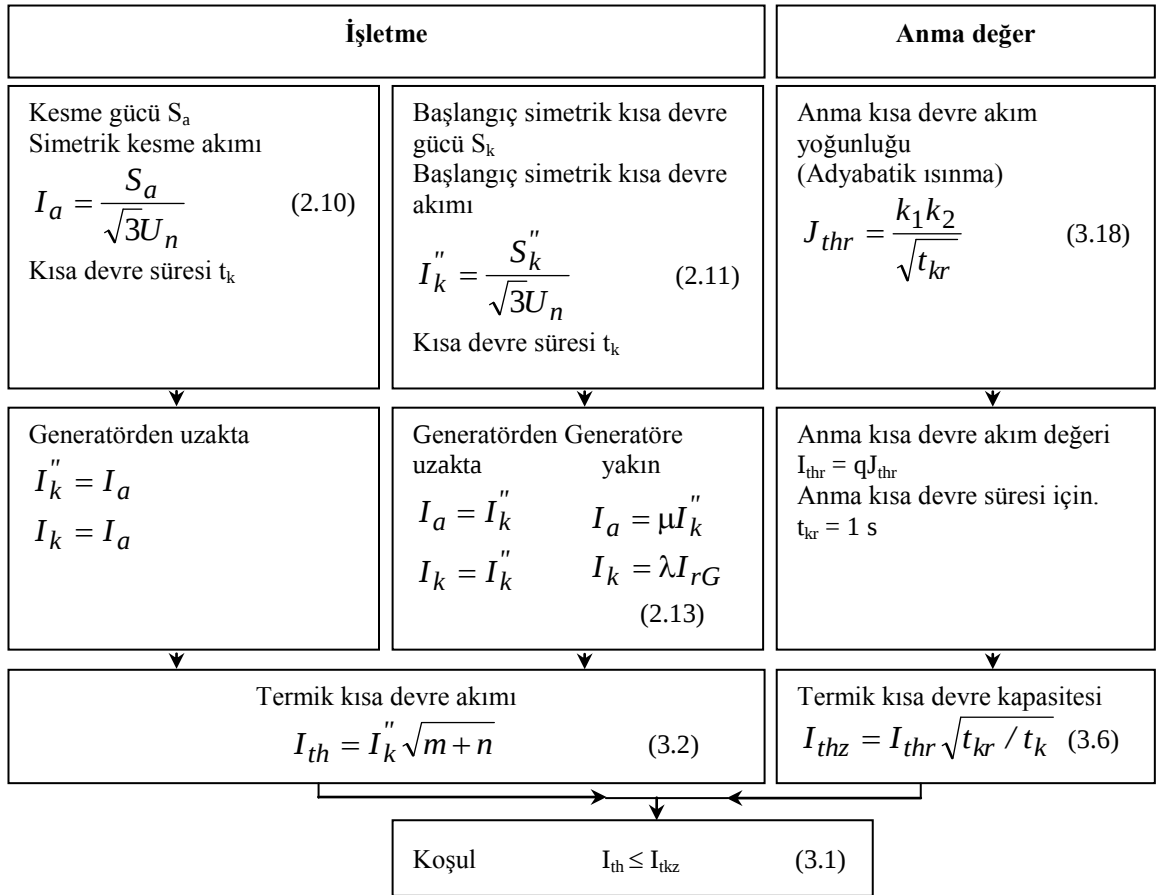
bulunur.

3. KISA DEVRE TERMİK KAPASİTESİ

3.1 KISA DEVRE KOŞULLARINDA PERFORMANS

Kablolarda iletken ve ekran kesitlerinin, kısa devre termik zorlanmasına göre Şekil 3.1'deki bilgi kullanılarak belirlenmesi gerekir. Uygun iletken kesiti için t_k süresine sahip termik kısa devre akımı I_{th} ile termik kısa devre kapasitesi I_{thz} arasında aşağıdaki koşulun sağlanması gerekir [2]:

$$I_{th} \leq I_{thz} \quad (3.1)$$



Şekil 3.1 Kısa devre koşullarında termik kısa devre akımı I_{th} ve termik kısa devre kapasitesi I_{thz}

3.2 KISA DEVRE İŞLETMESİ

Termik kısa devre akımı I_{th} 'yı hesaplamak için S_k'' simetrik kısa devre gücünü veya S_a kesici kesme gücünü bilmek gerekir. Kısa devre süresi boyunca kısa devre akımının termik etkisi, I_{th} 'nın etkin değerine bağlıdır. En elverişsiz koşullar normal olarak üç fazlı kısa devrede oluşur. Kısa devre süresi boyunca akan I_{th} akımı, doğru akım bileşeni (m faktörü) ve alternatif akım bileşeni (n faktörü) sebebiyle sönen gerçek kısa devre akımı ile aynı miktarda ısı üretir. Bu faktörleri hesaba katarak termik kısa devre akımı bulunur [2]:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n} \quad (3.2)$$

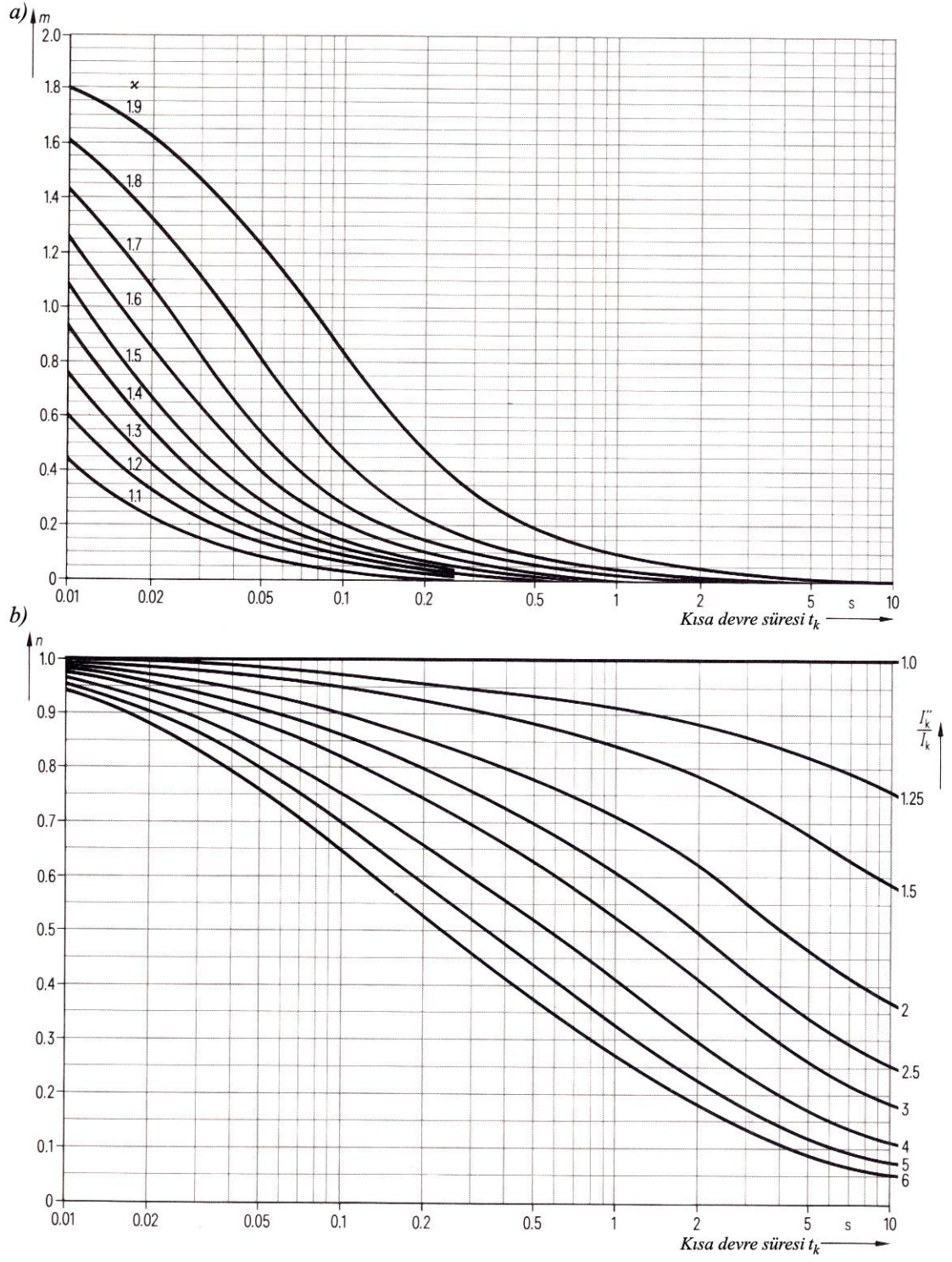
Ard arda oluşan birden çok kısa devrede toplam termik kısa devre akımı ve süresi:

$$I_{th} = \frac{1}{t_k} \sum_{i=1}^i I_{thi}^2 t_{ki}, \quad (3.3)$$

$$t_k = \sum_{i=1}^i t_{ki}. \quad (3.4)$$

olur. Başlangıç I_{thi} akımları (3.2) denkleminde bulunur.

Doğru akım bileşeni (m faktörü), tepe faktörü κ ve kısa devre süresi t_k 'nin bir fonksiyonu iken; alternatif akım bileşeni (n faktörü) kısa devre süresi t_k 'nin ve I_k'' / I_k oranının bir fonksiyonudur (Şekil 3.2) [2].



Şekil 3.2 Termik kısa devre akımı I_{th}' 'in hesabı için

a) m faktörü

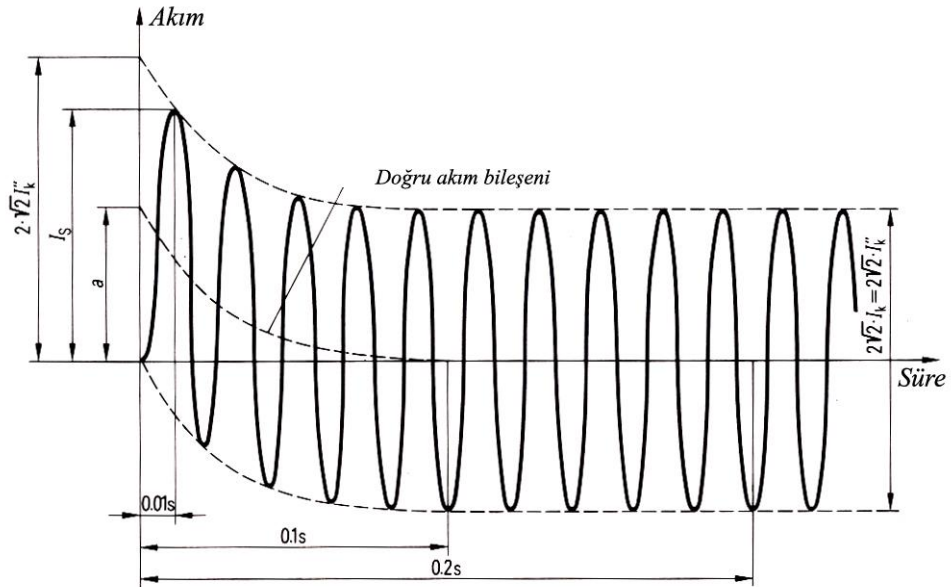
b) n faktörü

3.2.1 Generatörden Uzak Kısa Devre

Generatörden uzak kısa devre için kısa devre akımının değişimi Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Bu örnekte $I_k = I_k''$ ve alternatif akım bileşeni $n = 1$ 'dir ve I_{th} 'yı hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır [4]:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+1}. \quad (3.5)$$

Üç fazlı kısa devreyi besleyen generatörler, anma akımlarından en fazla iki kat daha büyük başlangıç kısa devre akımına sebep oldukları zaman kısa devre generatörden uzaktır. Bu koşul, normal olarak direkt generatörler tarafından beslenmeyen şebekelerde uygulanır. $t_k > 0,1$ s olduğu kısa devre süreleri için alternatif akım kesme akımı I_a , başlangıç simetrik kısa devre akımı I_k'' 'ne eşittir. I_k'' değeri denklem (2.11) kullanılarak kaynak devre kesicisinin kesme gücünden veya şebekenin maksimum kısa devre gücünden hesaplanabilir. Maksimum kısa devre akımı I_s bilinmiyorsa, tepe faktörü 1.8 alınabilir [4].

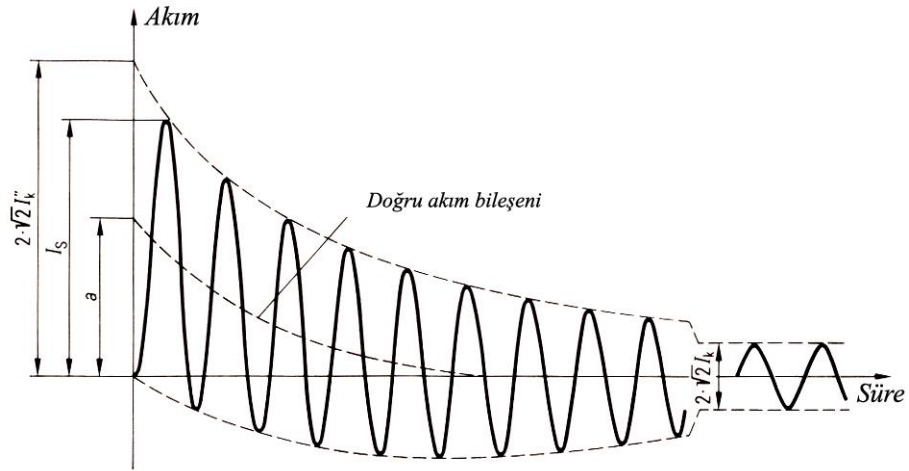


Şekil 3.3 Generatörden uzak kısa devrede kısa devre akımının değişimi

3.2.2 Generatöre Yakın Kısa Devre

Genellikle şebekelerde en çok karşılaşılan kısa devreler generatörden uzak kısa devrelerdir. Generatöre yakın kısa devreler özel şebekelerde, endüstri tesislerinde (fabrikalarda) ortaya çıkar. Generatöre yakın bir kısa devrenin değişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Sürekli işletme kısa devre akımı I_k , başlangıç simetrik kısa devre akımı I_k'' 'den daha küçüktür. $n < 1$ 'dir. Sürekli işletme kısa devre akımının bilinmediği yerde hesaplamalar, $n = 1$ alınarak ve (3.5) denklemiyle yapılır. Eğer sadece başlangıç simetrik kısa devre akımı I_k'' biliniyorsa, tepe faktörü $\kappa = 1,8$ alınabilir. Simetrik kesme akımı I_a temel değer olarak kullanıldığı zaman, başlangıç simetrik kısa devre akımı I_k'' denklem (3.5)'ten ve $\mu \approx 0,8$ alınarak bulunabilir [2].



Şekil 3.4 Generatöre yakın bir kısa devrede kısa devre akımının zamanla değişimi

3.3 İLETKENİN KISA DEVRE TERMİK KAPASİTESİ

Bir kısa devre olayında, kısa devre tarafından oluşturulan ısı, esas olarak iletkenin içinde depolanır. Bu durumda iletken, izin verilen kısa devre sıcaklığının ötesinde ısınmamalıdır. Bu yüzden, kısa devrenin başlangıcında iletken sıcaklığı yanında kısa devre süresi de göz önüne alınmalıdır.

Kısa devrenin başlangıcındaki iletken sıcaklığı θ_a , kısa devreden önceki yüke bağlıdır. Başlangıçtaki θ_a sıcaklığı bilinmiyorsa, izin verilen işletme sıcaklığı Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’den alınmalıdır. Ekran ve metal kılıflar için izin verilen işletme sıcaklığı değerleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.1 ve 3.2’deki izin verilen θ_e kısa devre sıcaklıkları, iletken ile temasta bulunan yalıtkan ve iletken tabakalarını hesaba katmaktadır. Lehim bağlantıları için bunların 160°C ’yi ve kalaylı teller için 200°C ’yi aşmayacağı göz önünde tutulur. Bu değerler 5 s’i aşmayan kısa devre süreleri içindir.

İletken için anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} , anma kısa devre süresi t_k ’nin 1 saniyesi (kısa devre kapasitesinin anma değeri) için tanımlanır. Bu değer, Tablo 3.1 ve 3.2’den kısa süre akım yoğunluğu J_{thr} ile iletkenin anma kesiti q_n ile çarpılarak hesaplanır.

Kısa devre süresi t_k için termik kısa devre kapasitesi:

$$I_{thz} = q_n J_{thr} \sqrt{\frac{t_{kr}}{t_k}} \quad (3.6)$$

bağıntısından hesaplanır [2].

Örnek 3.1 Örnek 2.2’deki değerler kullanılarak generatörden uzak bir kısa devrede 20 kV’luk bir şebekede $S_a = 500$ MVA kesme gücü için $I_k \approx I_a = 14,4$ kA’dır. $\kappa = 1,8$ tepe faktörü ve $t_k = 0,5$ s kısa devre süresi için sürekli işletme kısa devre akımı $I_k = I_k''$, Şekil 3.3’ten;

$$m = 0,1(\kappa = 1,8; t_k = 0,5 \text{ s}),$$

$$n = 1(I_k'' / I_k = 1; t_k = 0,5 \text{ s}) \text{ ve}$$

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m + 1} = 14,4 \sqrt{0,1 + 1} = 15,1 \text{ kA.}$$

bulunur.

Tablo 3.1 İzin verilen kısa devre sıcaklıkları ve anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} (bakır iletkenli kablolar için).

Bakır İletkenli Kablolar

Yapı	İzin verilen işletme sıcaklığı θ_{Lr} °C	İzin verilen kısa devre sıcaklığı θ_e °C	Kısa devrenin başlangıcındaki iletken sıcaklığı θ_a									
			90°C	80°C	70°C	65°C	60°C	50°C	40°C	30°C	20°C	
			$t_{kr}=1s$ için A/mm ² olarak anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr}									
Lehimli ekler	-	160	100	107	115	119	122	129	136	143	150	
XLPE-kablolar	90	250	143	148	154	157	159	165	170	176	181	
PE kablolar	70	150	-	-	109	113	117	124	131	138	145	
PVC kablolar												
≤ 300 mm ²	70	160	-	-	115	119	122	129	136	143	150	
> 300 mm ²	70	140	-	-	103	107	111	118	126	133	140	
Emprenye edilmiş kablolar												
0.6/1-3.6/6 kV	80	180	-	119	126	129	132	139	145	151	158	
6/10 kV	65	165	-	-	-	121	125	132	138	145	152	
Tek damarlı S.L.												
Ve H kabloları												
0.6/1-3.6/6 kV	80	180	-	119	126	129	132	139	145	151	158	
6/10 kV	70	170	-	-	120	124	127	134	141	147	154	
12/20 kV	65	155	-	-	-	116	119	127	134	141	147	
18/30 kV	60	140	-	-	-	-	111	118	126	133	140	

Tablo 3.2 İzin verilen kısa devre sıcaklığı ve anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} (alüminyum iletkenli kablolar için)

Alüminyum İletkenli Kablo

Yapı	İzin verilen işletme sıcaklığı θ_{Lr} °C	İzin verilen kısa devre sıcaklığı θ_e °C	Kısa devrenin başlangıcındaki iletken sıcaklığı θ_a									
			90°C	80°C	70°C	65°C	60°C	50°C	40°C	30°C	20°C	
			$t_{kr}=1s$ için A/mm^2 olarak anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr}									
XLPE-kablolar	90	250	94	98	102	104	105	109	113	116	120	
PE kablolar	70	150	-	-	72	75	77	82	87	91	96	
PVC kablolar												
$\leq 300 mm^2$	70	160	-	-	76	78	81	85	90	95	99	
$> 300 mm^2$	70	140	-	-	68	71	73	78	83	88	93	
Emprenye edilmiş kablolar												
0.6/1 3.5/6 kV	80	180	-	78	83	85	87	92	96	100	104	
6/10 kV Tek damarlı S.L.	65	165	-	-	-	80	83	87	92	96	100	
Ve H kabloları	80	180	-	78	83	85	87	92	96	100	104	
0.6/1 3.5/6 kV	70	170	-	-	80	82	84	89	93	97	102	
6/10 kV	65	155	-	-	-	77	79	84	88	93	98	
12/20 kV	60	140	-	-	-	-	73	78	83	88	93	
18/30 kV												

Örnek 3.2: Termik kısa devre akımı $I_{th} = 15,1$ kA ve kısa devre süresi $t_k = 0,5$ s için, örnek 3.1’de kullanıldığı gibi, $U_o/U = 12/20$ kV’luk XLPE yalıtımlı kablonun iletken kesitini belirleyelim. Denklem (3.6)’yı $I_{th} \leq I_{thz}$ koşulu ile yeniden düzenleyerek $t_{kr} = 1$ s için kesit hesaplanır.

$$q_n \geq \frac{I_{th}}{J_{thr}} \sqrt{\frac{t_k}{t_{kr}}} \quad (3.7)$$

Alüminyum iletkenli XLPE kablo için, Tablo 3.2’den $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığı ve $\theta_e = 250^\circ\text{C}$ son sıcaklık ile, anma kısa süre akım yoğunluğu $J_{thr} = 94$ A/mm² bulunur, bu da bize aşağıdaki denklemi verir:

$$q_n \geq \frac{15.1 \cdot 10^3}{94} \sqrt{\frac{0.5}{1}} \geq 114 mm^2$$

Buna uygun olarak 120 mm²’lik kesit seçilir ve

$$I_{thz} \geq 120.94 \sqrt{\frac{1}{0.5}} = 16 \text{ kA}$$

bulunur.

EK E’de Verilen Grafiklere Ait Bilgi

EK E’de verilen E.1, E.2, E.3, E.4, E.5, E.6, E.7, E.8, E.9 ve E.10 şekillerindeki grafikler termik kısa devre kapasitesi I_{thz} ’yi, iletken kesitine ve kısa devre süresi t_k ’ya bağlı olarak belirlemek için kullanılır. İzin verilen başlangıç simetrik kısa devre akımı I''_{kz} , (3.1) ve (3.2) denklemlerinden türetilir [4].

$$I''_{kz} = \frac{I_{thz}}{\sqrt{m+n}} \quad (3.8)$$

Grafiklerde aynı zamanda izin verilen başlangıç simetrik kısa devre akımı da gösterilmiştir.

İzin verilen kesme süresi t_{kz} , termik kısa devre akımı I_{th} için denklem (3.6) ve aşağıdaki denklemlerden hesaplanır [4]:

$$t_{kz} = \left(\kappa \cdot \frac{q_n}{I_{th}} \right)^2 \quad (3.9)$$

$$\kappa = J_{thr} \sqrt{t_{kr}} \quad (3.10)$$

$$t_{kr} = 1 \text{ s}$$

3.4 EKRAN, METAL KILIF VE ZIRHLARIN KISA DEVRE KAPASİTELERİ

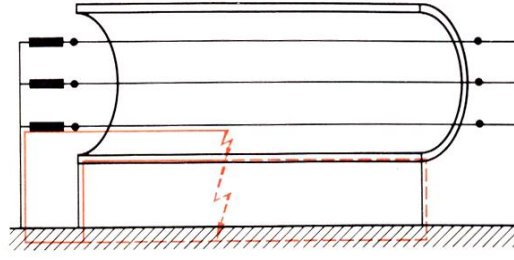
Yıldız noktası yalıtılmış veya bir bobin üzerinden topraklanmış bir şebekede çift-toprak arızası durumu, yıldız noktası düşük dirençle topraklanmış bir şebekedeki faz-toprak kısa devresi varkenki durum gibi gözönüne alınabilir. Ekran, metal kılıf ve zırh, bu (asimetrik) kısa devre akımlarını taşır ve sonra ısınır. Dengeli üç fazlı kısa devrede iletkenin kısa devre kapasitesi temel alınarak seçilen kablolar, bu akımlara göre incelenmelidir.

Ekran, metal kılıf veya zırh tarafından ve aynı zamanda toprak yoluyla taşınan hata akımı, aktığı akım yollarının empedansı ile ters orantılı olarak bölünür. Eğer kısa devre akımı oranının göz önüne alınmasında toprak hatasının veya çift toprak hatasının temel noktaları kablonun dışında yer almışsa, hesaplanması zor olan akım aynı zamanda toprak yoluyla akar. Arıza noktası kablonun içinde ise (Şekil 3.5 ve 3.6), hemen hemen bütün kısa devre akımının kablonun ekranı veya kılıfı tarafından taşınması beklenir. Aynı polimer yalıtkanlı ve tek ekranlı, ekranlar arası elektriksel teması olmayan çok damarlı kablolar için ve aynı zamanda her kılıf üzeri korozyon korumalı kablolar için de geçerlidir. Kısa devre kapasitesi kontrol edilirken bu sorun göz önüne alınmalıdır.

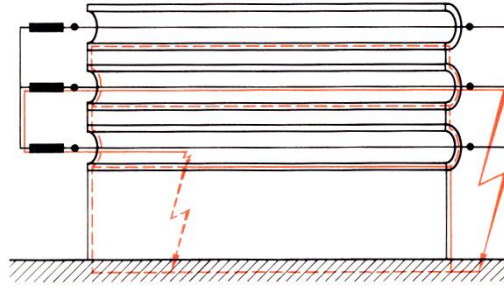
Kablonun yalıtıcı dış kılıfı varsa (örneğin termoplastik malzeme), sadece kısa devre noktasında ve sadece kablonun toprağa döşendiği zaman sezilebilir bir akım toprağa akar. Eğer metal kılıf topraktan yalıtılmamışsa o zaman hata noktasından daha büyük uzaklıkta daha büyük oranda kısa devre akımı toprağa akar.

Havada döşenmiş kablolarda hata noktasındaki kısa devre, akımı bölmez. Akım sadece ekran veya kılıftan akar; kablo kanalı üzerinden akması beklenmez. Akım iletkenlerden toprağa aktığı için raflar önemsizdir. Rafların empedansları normal olarak oldukça küçüktür.

Kısa devre kapasitesinin belirlenmesinde prensipte iletkenler ile aynı kurallar uygulanır. Kısa devre süresi içinde ısının önemli bir bölümü bitişik katmanlara aktarılır. Bu yüzden anma kısa devre akım yoğunluğunun belirlenmesi zordur ve grafikler yardımıyla kısa devre süresi t_k 'ya bağlı olarak kısa devre kapasitesi (akımı) I_{thz} 'in belirlenmesi genel bir uygulamadır (bakınız Şekil F.1, F.2 ve F.3). Bölüm 3.5.1'de bir hesaplama yöntemi açıklanmıştır [2].



Şekil 3.5 Yıldız noktası düşük dirençle topraklanmış şebekede üç damarlı ortak ekranlı kabloda faz-toprak kısa devresi. Arıza noktası kablounun içindedir.



Şekil 3.6 Yıldız noktası yalıtılmış şebekedeki üç ekranlanmış tek damarlı kabloda çift toprak hatası. Arıza noktası kablounun içindedir.

Ek F’de Verilen Grafıklere Ait Bilgi

Ek F’de verilen F.1, F.2 ve F.3 şekillerindeki grafikler, verilen iletken kesiti ve t_k kısa devre süresi için termik kısa devre kapasitesi I_{thz} ’i belirlemek için kullanılabilir.

Başlangıç simetrik kısa devre akımı I''_{kz} , (3.1) ve (3.2) denklemleri ve

$$I''_{kz} = \frac{I_{thz}}{\sqrt{m+n}} \quad (3.11)$$

kullanılarak elde edilir. Hesaplamayı kolaylaştırmak için aynı zamanda grafiklere simetrik kısa devre akımı da eklenmiştir.

Örnek 3.3: NA2XS2Y 1x120 RM/16 12/20 kV’luk XLPE kablo. VDE 0273’e göre 16 mm² anma kesiti vardır. Bu, aynı zamanda tip referansından da yorumlanabilir. Kısa devre yolundaki etkin kesit q_k , en az anma kesit kadar olmalıdır. $t_k = 0,5$ s kısa devre süresi için, ekranın akım kapasitesi Şekil B.1’e göre $I_{thz} = 4,5$ kA ve generatörden uzak bir kısa devreyle ve $\kappa = 1,8$ ile, en büyük izin verilen kısa devre akımı

$$I_{kz}'' = I_{az} = I_{kz} = 4,3 \text{ kA}$$

olur.

3.5 KISA DEVRE KAPASİTESİNİN HESABI

3.5.1 Adyabatik Sıcaklık Artış Yöntemi

Kısa devre süresi gibi kısa sıcaklık artış periyotlarında, elektriksel iletken içinde oluşan toplam sıcaklığın, yine o iletken içinde kaldığı kabul edilir:

$$I^2 R_g dt = K d\theta \quad (3.12)$$

(3.12) denkleminin verilen kısa devre süresi t_k için çözümü kısa devre kapasitesini verir:

$$I_{thz} = q_k k_1 k_2 \frac{1}{\sqrt{t_k}} \quad (3.13)$$

Burada;

$$q_k = \sqrt{q_{el} q_g} = \frac{q_{geo}}{\sqrt{f_g}} \approx q_{geo}, \quad (3.14a)$$

q_{el} , elektriksel kesit,

$$q_{el} = \frac{q_{geo}}{(1+z) f_g}, \quad (3.14b)$$

q_g , ağırlıkta dikkate alınan kesit,

$$q_g = q_{geo} (1+z), \quad (3.15)$$

k_1 , malzeme katsayısıdır:

$$k_1 = \sqrt{\frac{c(\Theta + 20^\circ C)}{\rho_{20}}} \quad (3.16)$$

k_2 , sıcaklık faktörüdür:

$$k_2 = \sqrt{\ln \frac{\Theta + \Theta_e}{\Theta + \Theta_a}} \quad (3.17)$$

Anma kısa devre akım yoğunluğu şöyle tanımlanır:

$$J_{thr} = \frac{k_1 k_2}{\sqrt{t_{kr}}} \quad (3.18)$$

$t_{kr} = 1$ s anma kısa devre süresidir.

İletken, kılıf ve ekran malzemeleri için uygun değerler Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3 İletken kılıf ve ekran malzemeleri için fiziksel sabitler

Malzeme	Elektriksel özdirenç ρ_{20} Ωm	Elektriksel özdirençin sıcaklık katsayısı α_{20} 1/K	$\Theta =$ $\frac{1}{\alpha_{20}} - 20^\circ C$ K	Termik özdirenç ρ Km/W	Özgül ısı c J/K m ³	Malzeme katsayısı k_1 $A\sqrt{s/m^2}$
Bakır	1.7241×10^{-8}	3.93×10^{-3}	234.5	2.7×10^{-3}	3.45×10^6	226×10^6
Alüminyum	2.8264×10^{-8}	4.03×10^{-3}	228	4.8×10^{-3}	2.5×10^6	148×10^6
Kurşun	21.4×10^{-8}	4.0×10^{-3}	230	28.7×10^{-3}	1.45×10^6	41.2×10^6
Çelik	13.8×10^{-8}	4.5×10^{-3}	202	19.1×10^{-3}	3.8×10^6	78.2×10^6

Tablo 3.4 Ekran, kılıf ve zırh için kısa devre kapasite değerleri

Metal kaplama	Bakır ekran		Çelik zırh (Galvanizli)		Kılıf	
	Yuvarlak tel	Aralıklı şerit	Yuvarlak tel	Yassı tel	Kurşun alaşım	Alüminyum
Etkin duvar kalınlığı δ_k	0,8 d_D	δ_B	0,8 d_D	δ_A	δ_M	δ_M
Metal kaplama altındaki temas tabakası Isı penetrasyon (nüfuz) değeri $\beta_i = \sqrt{c_i / \rho_i}$	İletken vernik veya yapışkan grafitli veya emprenye edilmiş kağıt veya bez şerit $300W\sqrt{s}(K m^2)$		Grafitli veya emprenye edilmiş kağıt veya bez şerit veya doğal-kauçuk iç kılıf $230W\sqrt{s}(K m^2)$		Emprenye edilmiş kağıt $500W\sqrt{s}(K m^2)$	
Metal kaplama üzerindeki temas tabakası Isı penetrasyon değeri $\beta_i = \sqrt{c_i / \rho_i}$	Bez şerit veya kağıt $300W\sqrt{s}(K m^2)$		PVC-dış kılıf $705W\sqrt{s}(K m^2)$		Aşınmadan koruma $210W\sqrt{s}(K m^2)$	Aşınmadan koruma $640W\sqrt{s}(K m^2)$

İletken tabakaların ekranlama sabiti, b	$0.12 \times 10^{-3} m / \sqrt{s}$		$0.17 \times 10^{-3} m / \sqrt{s}$	$0.38 \times 10^{-3} m / \sqrt{s}$	$0.34 \times 10^{-3} m / \sqrt{s}$
Yalıtkan başlangıç sıcaklığı θ_a	PVC 60°C	XLPE 80°C	PVC 60°C	Emprenye edilmiş kağıt 70°C	
İzin verilen sıcaklık θ_e	350°C	350°C	200°C	200°C	
Malzeme katsayısı k_1	$226 \times 10^6 A\sqrt{s} / m^2$		$78.2 \times 10^6 A\sqrt{s} / m^2$	$41.2 \times 10^6 A\sqrt{s} / m^2$	$148 \times 10^6 A\sqrt{s} / m^2$
Sıcaklık faktörü k_2	0.828	0.787	0.654	0.600	0.602

Başlangıç sıcaklığı θ_a , kısa devreden önceki işletme koşullarına bağlıdır. Normal olarak iletkenler için izin verilen işletme sıcaklığı Tablo 3.1 ve 3.2’de verildiği gibi seçilecektir. Ekran, kılıf ve zırh için tablo 3.4’de verilen bilgiler uygundur.

Bir kısa devre esnasında kısa zorlanma süresinden ve sonrasındaki hızlı soğumadan dolayı, 5 s’e kadar olan kısa devre süreleri için normal işletmedekinden daha yüksek sıcaklıklara izin verilir.

İletkenler için izin verilen kısa devre sıcaklıkları θ_e ’ler VDE 0298 Bölüm 2’de verilmiştir ve Tablo 3.1 ve 3.2’de tekrar oluşturulmuştur. Ekran, kılıf ve zırh için değerler Tablo 3.4’de verilmiştir ve termik koruma fonksiyonu olan temas tabakaları hesaba katılmalıdır.

IEC 724’deki bilgiler izlenirse; izin verilen kısa devre sıcaklıkları tek bir kısa devre kabloya zarar vermeyecek şekilde seçilir, bununla beraber tekrarlanan kısa devreler başarısızlığa yol açabilir. İzin verilen iletken sıcaklıkları, yalıtkan ve iletken bağlantılarının izin verilen sıcaklıklarına göre seçilir; oysa izin verilen ekran, kılıf ve zırh sıcaklıkları yalıtkan ve dış kılıfı sınırlandırılır (Tablo 3.5). Bütün bu değerlerin en küçüğü belirleme faktörüdür. “Uygun malzemeli” ve “yeterli kalınlıklı” koruyucu tabaka oluştururken dış kılıfın izin verilen kısa devre sıcaklığı, yalıtkan ile ekranının arasında seçilebilir.

Sadece birkaç istisna dışında VDE’ye göre izin verilen kısa devre sıcaklıkları, IEC’ye göre olanlarla aynıdır. 250°C’nin altındaki değerleri kullanmak eskiden beri alışılmıştır. Tesisatlar halen bu seviyelere göre oluşturulmaktadır. 0,6/1 kV’luk emprenyeli kablolu yeni tesislerde ve orijinal standart kalıntıların kısa devre kapasitesini arttırmak gerekli değildir. Polimer yalıtkanlı, uygun bitişik ısı dirençli

katmanları olan kabloların ekranları için, izin verilen kısa devre sıcaklıkları 350°C’de deney yapılarak ayarlanmıştır (Tablo 3.4).

Kısa devre etkin kesit alanı q_k , elektriksel olarak etkin kesit alanı q_{el} ile ağırlık bakımından kesit alanın q_g ’nin geometrik ortalama değeridir. q_{el} ve q_g , (3.14) ve (3.15) denklemleri ile verilmiştir. Bu denklemler damar ve diğer yapı elemanları döşendikten sonra göz önüne alınır. f_q faktörü, ekranın başlı başına yapısal elemanları arasındaki enine iletkenlik gibi elektriksel teması gösterir. Enine iletkenlik değişkendir ve yeni kablolarda, daha önce işletmede bulunmuş kablolardan daha elverişlidir. Enine iletkenliğin hesaplaması zor olduğundan, yapısal elemanlar arasındaki temas ihmal edilir ve $f_q = 1$ kullanılır. (3.13) denkleminde bir yaklaşıklık olarak, enine kesit kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

İletkenler, anma kesiti q_n ile belirtilir. Bu yüzden genel olarak hesaplamaların anma kesit alanı q_n ile yapılması hatırlatılır.

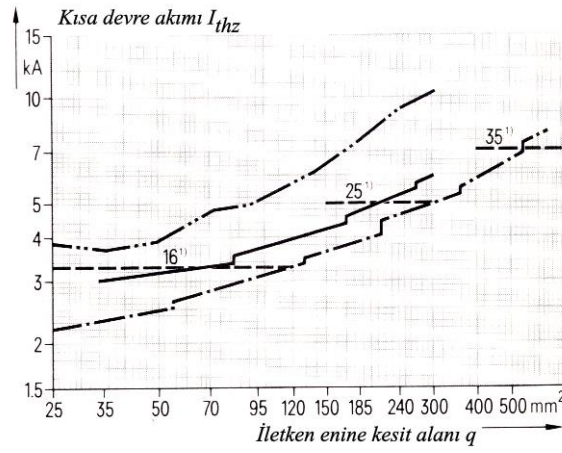
Tablo 3.5 IEC 724’e göre 0,6/1 kV’luk kablonun yapısal elemanlarının izin verilen kısa devre sıcaklıkları

Yapı elemanının malzemesi	İzin verilen kısa devre sıcaklığı θ_e		
	Yalıtım °C	Dış kılıf °C	Metal kılıf ve iletken ekleme °C
Emprenye edilmiş kağıt	250	-	-
300mm ² ,ye kadar PVC	160	200	-
300mm ² ,den büyük PVC	140	-	-
Butil kauçuk	220	-	-
Doğal Kauçuk	200	-	-
XLPE	250	-	-
EPR	250	-	-
Silikon kauçuk	350	-	-
PE	-	150	-
CSP	-	220	-
SEI	-	200	-
Yumuşak lehim bağlantı	-	-	160
Kaynaklı bağlantı	-	-	250
Burulmuş bağlantı	-	-	250
Kurşun kılıf	-	-	170
Kurşun alaşımı kılıf	-	-	200

Ekranlar için geometrik kesit q_{geo} , VDE özelliklerinde koşula bağlanmıştır. Bu, tip referansındaki anma kesitten küçük olmamalıdır. Eğer (her bir damarı ayrı ekranlı)

çok damarlı kablolarda ekranlar arasında temas sağlanamazsa o zaman her bir ekranın tam geometrik enine kesit alanı olmalıdır.

Ekranlar her zaman elektriksel iletkenliği 56×10^6 S/m'den az olmayan bakır malzemeden yapılır (bkz. VDE 0271 veya VDE 0273). Anma enine kesit alanları, iletken enine kesit alanları tarafından belirlenir. Ekranın kısa devre kapasitesi her zaman yaklaşık olarak 12/20 kV'luk kurşun kılıflı S.L kablonunki kadardır (Şekil 3.7). Bu karşılaştırma adyabatik olmayan sıcaklık artışı baz alınarak yapılır.



- PVC ve XLPE kablolar 6/10 kV'tan 18/30 kV'a kadar
- 1/30 kV'luk SL kablo
- - - - - 12/20 kV'luk SL kablo
- 6/10 kV'luk Kuşaklı kablo

Şekil 3.7 $t_k = 1$ s kısa devre süresi ve adyabatik olmayan sıcaklık artışı için bakır tel ekranlı kablolar ile polimer yalıtımlı kurşun kılıflı emprenye edilmiş kabloların I_{thz} kısa devre akımlarının karşılaştırılması.

Örnek 3.4: 3.2 ve 3.3 örneklerindeki NA2XS2Y 1x120 RM/16 12/20 kV'luk kabloların iletkenlerinin anma kısa devre akım yoğunluğu J_{thr} ; $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığı ve $\theta_e = 250^\circ\text{C}$ son sıcaklık için Tablo 3.3'deki değerler kullanılarak, adyabatik sıcaklık artışı için hesaplanacaktır. (3.16)'dan

$$k_1 = \frac{2,5 \times 10^6 (228 + 20)}{2,8264 \times 10^{-8}} = 148 \times 10^6 \text{ A} / \sqrt{s} / m^2,$$

(3.17)'den

$$k_2 = \sqrt{\ln \frac{228 + 250}{228 + 90}} = 0,638$$

(3.18)'den

$$J_{thr} = \frac{148 \times 10^6 \times 0,638}{\sqrt{1}} = 94.4 \times 10^6 \text{ A/m}^2$$
$$\approx 94 \text{ A/mm}^2$$

bulunur. Bakır tel ekran için Tablo 3.3'deki değerler kullanılarak, $\theta_a = 80^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığı ve $\theta_e = 350^\circ\text{C}$ son sıcaklığı ile:

$$k_1 = \sqrt{\frac{3.45 \times 10^6 (234,5 + 20)}{1,7241 \times 10^{-8}}} = 226 \times 10^6 \text{ A}\sqrt{s} / \text{m}^2$$
$$k_2 = \sqrt{\ln \frac{234,5 + 350}{234,5 + 80}} = 0,787$$

bulunur. Adyabatik sıcaklık artışı ve $t_k = 0,5$ s kısa devre süresi için ekranın kısa devre akımı, (3.12)'den

$$I_{thz} = 16 \times 10^{-6} \times 226 \times 10^6 \times 0,787 \frac{1}{\sqrt{0,5}} = 4025 \text{ A}$$

hesaplanır. Adyabatik olmayan sıcaklık artışı için yük kapasitesi örnek 3.5'de hesaplanmıştır.

3.5.2 Adyabatik Olmayan Sıcaklık Artışı Yöntemi [2]

Enine kesit alanlarıyla bağlantılı olarak nispeten geniş soğuma yüzeylerine sahip elektriksel iletkenler, büyük miktarda sıcaklığı kısa devre süresince çevreye dağıtırlar. Bu yüzden verilen bir sıcaklık artışı için gerçek kısa devre kapasitesi, adyabatik hesaplamayla verilen değerden daha yüksektir. Bu, kısa süre akım faktörü k_3 ile hesaba katılır:

$$I_{thz} = q_k \cdot k_1 k_2 k_3 \frac{1}{\sqrt{t_k}} \quad (3.19)$$

Kısa devre akım faktörü basitleştirilmiş deneysel yöntem ile hesaplanır:

$$k_3 = \sqrt{1 + \frac{A}{q_g c} \beta_i \sqrt{\frac{3}{2\pi}} t_k^2} \quad (3.20)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{1,382}{\delta_k c} \beta_i t_k^2} \quad (3.21)$$

$$= \sqrt{1 + \frac{b}{\delta_k} t_k^2} \quad (3.22)$$

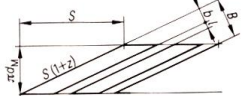
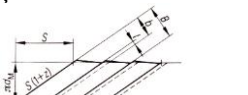
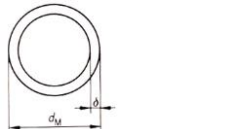
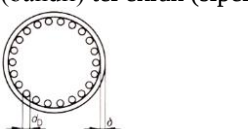
Karşılık daire çevresi A ile ilgili olarak soğuma çevresi alanı için denklemler, kısa devre süresi boyunca etkili duvar kalınlığı δ_k ile beraber ağırlık bakımından enine kesit alanı q_g ile Tablo 3.6'den bulunabilir. İletkenin özgül ısısı c , Tablo 3.3'den bulunabilir. Çevreleyen araçların termik etki miktarı β_i ile birlikte ekranlama sabiti b Tablo 3.4'den alınabilir (sıcaklık etki miktarlarının belirlenmesi çok zordur ve özellikle sadece birkaç katmanın kaplama miktarı, havayla belirsiz birleşme ile, güvenilir olarak hesaplanamaz). Bunda seçilen miktarlar güvenilirdir. Eğer ekranın yukarısı ve aşağısındaki çevrenin karakteristikleri farklıysa, o zaman hesaplamalar sıcaklık etki miktarlarının aritmetik ortalaması kullanılarak yapılmalıdır.

z üsleri yapılan deneylerden belirlenmiştir [2].

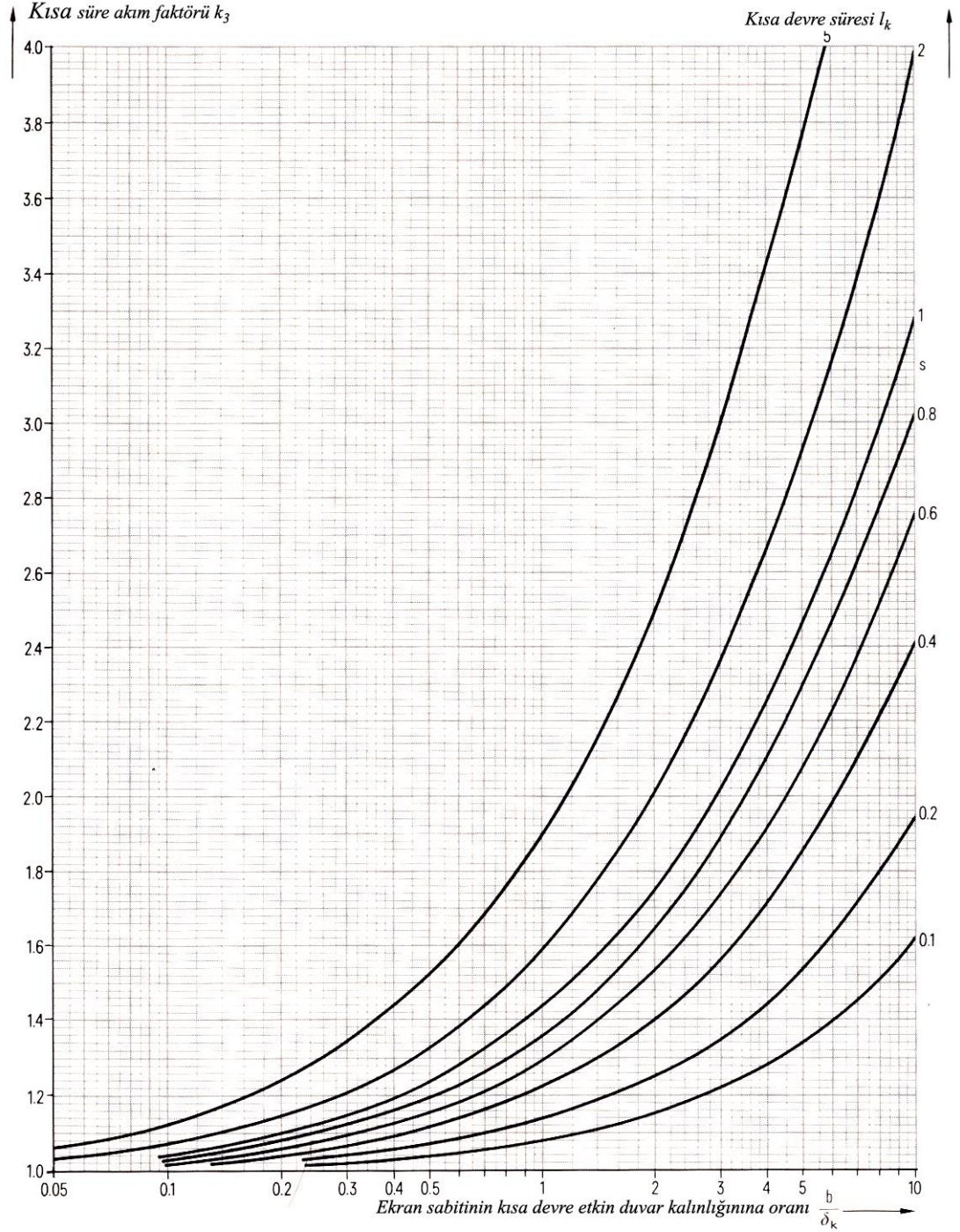
$0,1 \text{ s} \leq t_k \leq 1 \text{ s}$ için $z = 0,8$ ve

$1,0 \text{ s} \leq t_k \leq 5 \text{ s}$ için $z = 0,6$

Tablo 3.6 Etkin kısa devre enine kesit alanı q_k ve etkin ekran duvar kalınlığı δ_k

	Helisin boyuna katsayı uzunluğu için $1+z = \frac{S(1+z)}{S}$ $= \frac{\pi d_M}{B}$	Geometrik enine kesit alanı q_{geo}	Ağırlıkta dikkate alınan enine kesit alanı $q_g = q_{geo}(1+z)$ (19.33)	Elektriksel enine kesit alanı $q_{el} = \frac{q_{geo}}{(1+z)f_a}$ (19.32)	Soğutma ortamı A	Etkin kısa devrede	
						Enine kesit alanı $q_k = \sqrt{q_g \cdot q_{el}}$ (19.35)	Ekran duvar kalınlığı $\delta_k = 2 \frac{q_g}{A}$
<i>l</i> aralıklarla helisel sarılmış n_B şerit 	$B = n_B(b+1)$	$n_B b \delta$ δ Band kalınlığı (şerit)	$n_B b \delta (1+z)$	$\frac{n_B b \delta}{(1+z)f_a},$ $f_a = 1.0$	$2n_B b(1+z)$	$n_B b \delta$	$\delta_k = \delta$
Örtüşen helisel sarımlı n_B şerit 	$B = n_B(b+1)$	$n_B b \delta$ δ Band kalınlığı	$n_B b \delta (1+z)$	$\frac{n_B b \delta}{(1+z)f_a},$ $\frac{1}{1+z} < f_a < 1.0$	$2\pi d_M$	$n_B b \delta$	$\frac{n_B b \delta (1+z)}{\pi d_m} =$ $\frac{b \delta}{b-l}$
Kılıf 	$z = 0$	$n \delta (d_M - \delta)$	$n \delta (d_M - \delta)$	$n \delta (d_M - \delta),$ $z = 0; f_a = 1.0$	$2\pi (d - \delta)$	$n \delta (d_M - \delta)$	$\delta_k = \delta$
Ters yönlü helisel şeritli (bandlı) tel ekran (siper) 	$1+z$ ters yönlü helisel şerit için $1+z_D$ teller için	$b \delta + n_D \frac{\pi d_D^2}{4}$	$b \delta (1+z) +$ $n_D \frac{\pi d_D^2}{4} (1+z_D)$	$\frac{b \delta}{(1+z)} +$ $n_D \frac{\pi d_D^2}{4(1+z_D)f_a},$ $\frac{1}{1+z_D} < f_a < 1.0$	Yalnızca göz önüne alınan teller $F n_D \pi d_D (1+z_D),$ $F \approx 0.6$	$b \delta + n_D \frac{\pi d_D^2}{4}$	Yalnızca göz önüne alınan teller $\frac{d_D}{2F} \approx 0.8 d_D$
Dairesel iletken 	$z = 0$	$\approx q_n$	$\approx q_n$	$\approx q_n$	td_L	$q_n^{1)}$	$\frac{d_L}{2}$

Tablo 3.4'deki değerler ve yukarıda sözü edilen hesaplama yöntemleri; ekranlar (Şekil B.1), düz çelik tel zırh (Şekil B.2) ve kurşun kılıf (Şekil B.3) için diyagramları hazırlamada kullanılır. Bundan aynı zamanda kısa süre akım faktörü k_3 'ü hazırlamak için de yararlanır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Kısa süre akım faktörü k_3

Dairesel iletkenlerin iletken çapı, enine kesit alanından yaklaşık olarak hesaplanır. Kısa devre süresince, etkili duvar kalınlığı bu sebeple (tablo 3.6):

$$\delta_k = \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} \quad (3.23)$$

olur. Daire kesmesi şekilli iletkenlerin, verilen bir anma enine kesit için, daireesel iletkeninden yaklaşık %11 daha büyük bir çevre uzunluğuna sahiptir;

$$\delta_k = \frac{1}{1,11} \sqrt{\frac{q_n}{\pi}} \quad (3.24)$$

$q_n < 10 \text{ mm}^2$ küçük enine kesit alanlar için veya daha uzun kısa devre süresi için adyabatik büyüklükle karşılaştırıldığında kısa devre kapasitesinde belirgin bir artış görülür. Kısa devre süresinin anma iletken enine kesit alanına oranı $0,1 \text{ s/mm}^2$ veya yük kapasitesinde daha az artış ihmal edilebilir, bu yüzden basit adyabatik hesaplama yöntemini kullanmak uygundur [2].

Örnek 3.5 Örnek 3.4'ü izleyerek, ekranın kısa devre anma değeri adiabatik olmayan sıcaklık artışı kabul edilerek hesaplanır. Ekran telinin çapı $d_D = 0,7 \text{ mm}$, kısa devre süresince etkili duvar kalınlığı tablo 3.4'den:

$$\delta_k = 0,8 d_D = 0,8 \times 0,7 = 0,56 \text{ mm} = 0,56 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

Ekranın üstünde ve altında genellikle kullanılan, zayıf ısı iletkenliği olan ve bu yüzden düşük ısı etki miktarı olan kaplamalar, $b = 0,12 \times 10^{-3} \text{ m}/\sqrt{\text{s}}$ ekran sabiti ile hesaplanacağı kabul edilir.

$$k_3 = \sqrt{1 + \frac{b}{\delta_k} t_k^z} = \sqrt{1 + \frac{0,12 \times 10^{-3}}{0,56 \times 10^{-3}} 0,5^{0,8}} = 1,06$$

Bu değer, şekil 3.8'den $b/\delta_k = 0,21$ oranından da bulunabilir. Örnek 3.5'deki sonuç kullanıldığı zaman, adyabatik olmayan sıcaklık artışı için kısa devre kapasitesi:

$$\begin{aligned}
I_{thz} &= q_k k_1 k_2 k_3 \frac{1}{\sqrt{t_k}} \\
&= 4025 \times 1.06 = 4267 \text{ A} \\
&\approx 4,3 \text{ kA}
\end{aligned}$$

Bu değer $\theta_a = 80^\circ\text{C}$ başlangıç sıcaklığı için hesaplanmıştır. Örnek 3.3'deki 4,5 kA değeri, şekil 3,6'den 60°C başlangıç sıcaklığı için sabittir ve küçük sapmadan dolayı pratik uygulamalar için kabul edilebilirdir.

3.5.3 Kısa Devre Süresince Sıcaklık Artışı

I_{th} kısa devre akımının sebep olduğu, ısınma için, son sıcaklık [2] :

$$\vartheta_e = \left[\exp \left(\frac{I_{th} \sqrt{t_k}}{q_k k_1 k_3} \right)^2 \right] (\Theta + \vartheta_a) - \Theta. \quad (3.25)$$

Adyabatik hesaplama için $k_3 = 1$ 'dir. Kısa devre sıcaklıklarını daha doğru hesaplamak için daha kesin hesaplama yöntemleri halen araştırılmaktadır.

Örnek 3.6: Örnek 3.5'den kablunun ekranı 4.3 kA yerine sadece 3,5 kA taşıyorsa fakat diğer bütün koşullar değişmeden kalıyorsa, şimdi ekran sıcaklığı son değerine erişecektir:

$$\begin{aligned}
\vartheta_e &= \left[\exp \left(\frac{3500 \sqrt{0,5}}{16 \times 10^{-6} \times 226 \times 10^6 \times 1.06} \right)^2 \right] (234,5 + 80) - 234,5 \\
&= 243^\circ\text{C}
\end{aligned}$$

3.6 YALITILMIŞ İLETKENLERİN KISA DEVRE ISINMA HESABI [5]

3.6.1. Giriş

Kısa devrede yalıtılmış iletkenler öyle kuvvetli bir şekilde ısınır ki, bunun belirli durumlarda işlev üzerinde etkisi olabilir. İletkendeki ve yalıtım alanındaki sıcaklıklar, farklı yapısal elemanlara ve besleme devresine bağlı olarak yüksek derecelere erişir. Bu bölümde; ölçümlerden ve matematiksel-fiziksel yöntemlerden

geliştirilmiş, iletkendeki veya kabul olunabilir akımlardaki sıcaklıkların belirlenmesine olanak veren bir hesaplama yöntemi sunulmuştur.

3.6.2 İletkenin Adyabatik ve Kayıplı Isınması

Büyük kesitli iletkenlerde adyabatik sıcaklığı kullanmaya izin verilir. Daha küçük kesitli iletkenlerde, iletkenin termik kapasitesi ve termik direnci iletkenin direncine bağlı olduğundan, iletkenin sıcaklığı çevreye dağılan ısı ile azalır.

Elektriksel donanımların sabit ve geçici ısınması birçok durumda Ohm'un ısı iletimi ve iletim hattı teorisi gibi iyi bilinen yöntemlerle oldukça kolay değerlendirilir. Eksenel değişikliğin olmadığı veya ısının akması anlamına gelen "uzun" bir iletken kabul edilir. Sadeleştirme için önce iletkenin sadece homojen bir yalıtkanla kaplandığı kabul edilir. İyi termik iletkenliğe bağlı olarak iletken böylece yüksek termik kapasite tarafından belirlenir [5]:

$$K = q l \sigma_c \quad (3.26)$$

Burada, l uzunluk ve q iletkenin enine kesiti anlamındadır.

Buna zıt olarak bitişik yalıtkan, dağıtılmış ısı iletimli ve depolama kapasiteli bir hacmi gösterir. Isı yalıtkanla yavaş yavaş girer. Bu sebeple, normal kısa devre süresi için şekil 3.9a'ya göre düzgün dağılmış W-K hattı ile eşeksenli yalıtkanı yer değiştirmeye izin verilir. Sadeleştirme için yalıtkanın temas alanı iletkenin yüzeyine eşit alınır. Radyal birim uzunluğun termik direnci ve kapasitesi şöyle belirlenir:

$$W' = \frac{1}{2\pi r l \lambda} \quad (3.27)$$

$$K = 2\pi r l \sigma \quad (3.28)$$

Burada λ termik iletkenlik ve σ yalıtkan malzemenin hacimsel özgül ısısıdır. Karakteristik empedans Z ve yayılma sabiti γ , Laplace operatörü s 'ye bağlı olarak belirlenir:

$$Z = \frac{1}{2\pi r l} \frac{1}{\sqrt{\sigma \lambda} \sqrt{s}} \quad (3.29)$$

$$P = K \cdot \frac{dT}{dt}$$

Deneysel ölçümler ve fiziksel-matematiksel modeller, η faktörünün kısa devre süresi $\sqrt{t}$ 'ye bağlı olduğunu gösterir. Bu, tablo 3.7'nin 1. ve 2. satırlarında şematik olarak gösterildiği gibi sabit kayıpların özel durumu için (3.31) denklemi ile

$$\Delta T = \frac{P \cdot t}{K} \eta \quad (3.35)$$

veya kayıplı ısınma diferansiyel denklem ile kolaylıkla ispat edilir. Sıcaklığın Laplace dönüşümü, karakteristik empedans Z ile belirlenir:

$$\Delta T = \frac{P \cdot t}{K} \cdot \frac{1}{t} \cdot \frac{1/s}{s + m\sqrt{s}} = \Delta t_{ad} \cdot H(s). \quad (3.36)$$

Tablo 3.7 Farklı kısa devrelere göre adyabatik ve adyabatik olmayan ısınma [5].

Durum	Adyabatik	Adyabatik olmayan
1) Genel	$T = \vartheta + 0 \text{ ve } \Delta T = \Delta \vartheta$	$P = K \cdot \frac{dT}{dt} + P_Z$
2) P = Sabit	$\Delta T = \frac{P}{K} = t$	$\Delta T = \frac{P \cdot t}{K} \cdot \eta(x) \quad x = m\sqrt{t_k}$
3) I = Sabit P = $R_m I^2$	$\frac{I^2 R_{m20}}{K \cdot T_{20}^\alpha} \cdot t = 1n \frac{T}{T_o} \rightarrow T = T_o e^{\alpha t}$ $R_m = R_{m20} \cdot \frac{T}{T_{20}}$	$\Delta T = \frac{P_0 \cdot t}{K} \zeta(x_1, x_2)$ $x_{1/2} = m_{1/2} \sqrt{t} \text{ ve } m_{1/2} = \sqrt{\frac{m^2}{4} + \alpha} \mu \frac{m}{2}$
4) Yaklaşık	$\frac{I^2 R_{m20}}{In \frac{T}{T_o}} \cdot \frac{\Delta T}{T_{20}} \cdot t = \bar{P} \cdot t \rightarrow K \Delta T$	$\Delta T = \frac{\bar{P} \cdot t}{K} \cdot \eta(x) = T_o (e^{\alpha \eta} - 1)$
5) E = Sabit $P = \frac{E^2}{R_m}$	$\Delta T = \sqrt{2 \frac{E^2 T_{20}}{K R_{m20}} \cdot t + T_o^2} - T_o$	-
6) Yaklaşık	$\frac{2E^2}{R_{m20}} \cdot \frac{T_{20}}{T + T_o} \cdot t = \bar{P} \cdot t \rightarrow K \cdot \Delta T$	$\Delta T = \sqrt{2 \frac{E^2 T_{20}}{K R_{m20}} \cdot t \cdot \eta(x) + T_o^2} - T_o$
7) $P = \frac{E^2 R_{m20} v}{c_0 + c_1 v + c_2 v^2}$	$\frac{-E^2 R_{m20} (v - v_0)}{c_0 In \frac{v}{v_0} + c_1 (v - v_0) + \frac{c_2}{2} (v^2 - v_0^2)} \cdot t = K \cdot \Delta T$ $V = \frac{T}{T_{20}}$	-
8) Yaklaşık	$\rightarrow$	$\frac{E^2 R_{m20} \cdot \eta(x) \cdot t}{K \cdot T_{20}} = c_0 In \frac{v}{v_0} + c_1 (v - v_0) + \frac{c_2}{2} (v^2 - v_0^2)$

$$m = \frac{F \cdot \sqrt{s}}{Z K} = F \frac{2\pi r \sqrt{\sigma \lambda}}{q \sigma_c} \quad (3.37)$$

parametresi, iletken malzemesinin niteliğini (K) ve yalıtkan malzemesinin niteliğini (Z) içerir. Temas faktörü F, iletkenin ve yalıtkanın yüzeyi arasındaki termik temasın

derecesini gösterir. (3.31)'e göre $H(s)$ terimi, istenilen faktör η 'in Laplace dönüşümünün bölümüdür. $x = m\sqrt{t}$ kısaltması ile ters dönüşümle

$$\eta(x) = \frac{1}{x^2} \left(e^{x^2} (1 - \operatorname{erf}(x)) - 1 + 2 \frac{x}{\sqrt{\pi}} \right) \quad (3.38)$$

elde edilir. Etkin akım değeri durumundaki gibi hareketle iletkenin sıcaklığı (3.33) denkleminde uygun olarak değişir. Laplace dönüşümünden, iki parametreye bağlı olan (Tablo 3.7, satır 3) kısa süre ısıtma faktörü $\zeta(x_1, x_2)$ elde edilir.

$$\Delta T = \frac{P_o t}{K} \zeta(x_1, x_2) = \Delta t_{O_{ad}} \zeta(x_1, x_2) \quad (3.39)$$

$$\zeta(x_1, x_2) = \frac{1}{x_1 + x_2} \left(-\frac{1}{x_1} \{1 + e^{x_1^2} [1 + \operatorname{erf}(x_1)]\} \right) - \frac{1}{x_2} \{1 - e^{x_2^2} [1 - \operatorname{erf}(x_2)]\} \quad (3.40)$$

ve

$$x_{1/2} = m_{1/2} \sqrt{t} = \left(\sqrt{m^2 / 4 + \alpha} \pm \frac{m}{2} \right) \sqrt{t} \quad (3.41)$$

$$\alpha = \frac{I^2 R_{m20}}{K T_{20}} \quad (3.42)$$

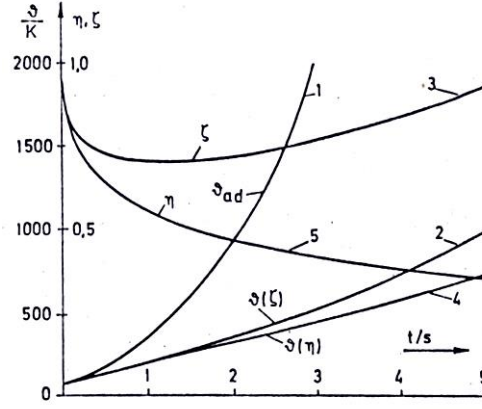
(3.35)-(3.42) çözümleri benzer şekilde yapılır ve (3.39) denkleminde $\alpha \rightarrow 0$ ile çevrilebilir. İkinci çözüm kısa devrenin başlangıcında P_o kayıplarını gösterir, ve ζ faktörü kısa devre süresine ve bir α (3.42) parametresine özetlenebilen diğer parametrelere bağlıdır. Daha basitleştirilmiş çözümlere ve hatta daha karmaşık elektrik devrelerine göre, (3.35) denkleminde benzer bir yaklaşım bulunmaya çalışılmıştır. Bu; R_m direnci ile artan, ΔT ile aynı adyabatik sıcaklık ΔT 'yi üreten ortalama sabit kayıplar P ile başarılır (Tablo 3.7, satır 3):

$$\bar{P} t = K \Delta T_{ad} \quad (3.43)$$

Adyabatik olmayan sıcaklık ΔT , sabit kayıplar durumuna benzer şekilde şimdi η (3.35) faktörü ile yaklaşımda bulunulur.

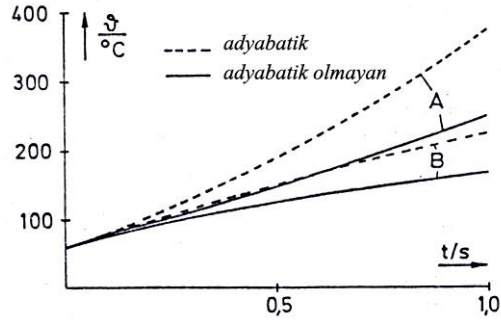
$$\Delta T = \frac{\bar{P} t}{K} \eta(x) \quad (3.44)$$

$$= T_o (e^{\alpha \eta(x)} - 1) \quad (3.45)$$



Şekil 3.10 NA 2XSY 1x150/25 kablunun ekranının hesaplanmış sıcaklık artışı (sabit akım kaynağı ile)

- 1) Adyabatik
- 2) Adyabatik olmayan
- 3) $\zeta (x_1, x_2)$ faktörü
- 4) Adyabatik olmayan, yaklaşımla
- 5) $\eta(x)$ faktörü $\theta_a = 60^\circ\text{C}$, $I = 5\text{kA}$



Şekil 3.11 Sabit akım kaynağı (A) ve sabit gerilim kaynağı (B) durumunda NA2XS2Y 1x150/25 kablunun ekranının hesaplanmış sıcaklık artışı ($I_o = 5\text{kA}$).

Bu adyabatik ısınma (3.43) denkleminde ortalama sabit kayıplar $\bar{P}$ 'nin hesaplanması ve kısa süre ısınma faktörü η ile onları birleştirme yöntemi, orijinal olarak sabit kayıplar için tanımlanmış, farklı elektrik devrelerine uygulanabilir. Sabit bir gerilim kaynağı için tanımlanmış sonuçlar Tablo 3.7'nin 4. satırında verilmiştir. Şekil 3.11 sözü edilen kablo ekranının ısınması için farklı değerleri gösterir.

Bunlardan biri sabit akımdan ve diğeri sabit gerilim kaynağından elde edilir. Bütün eğriler $t = 0$ anında aynı P_0 başlangıç kayıplarından başlar. Bir saniye sonra zaten sıcaklıklar oldukça farklı gelişir. Sabit gerilim kaynağından adyabatik sıcaklık, sabit akım kaynağından kayıplı sıcaklıktan daha düşüktür. Gerçek bir elektrik devresinden elde edilen sıcaklık, herhangi bir noktada iki kayıplı eğri arasında dolaşır. Şekil 3.12'ye göre böyle bir devre sadece bir parçası (3.33), (3.34) ve (3.35) denklemlerine göre t sıcaklığına bağlı olarak yaklaşık olarak iki parçaya bölünebilir. R_m direnci deney kısmını gösterir. Şimdi ilgili sıcaklığın akıma bağlılığı $v = T/T_{20}$ öncekinden daha karmaşıktır [5]:

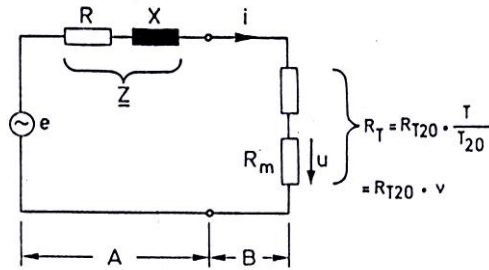
$$I^2 = \frac{E^2}{c_0 + c_1 v + c_2 v^2} \quad (3.46)$$

$c_{0,1,2}$ parametreleri kısa devre elemanlarını gösterir (Şekil 3.12):

$$c_0 = R^2 + X^2$$

$$c_1 = 2 R R_{T20}$$

$$c_2 = R_{T20}^2$$



Şekil 3.12 Kısa devre olan devrenin iki ayrı (A ve B parçaları ile) elektriksel şeması, yalnızca B parçası sıcaklığa bağlıdır.

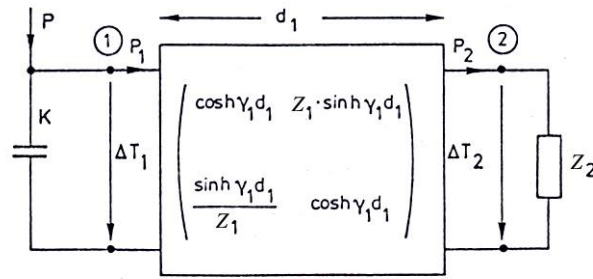
Gerçek yalıtkanlar birçok katmandan yapılır. Şekil 3.13'e göre uzun hat için karakteristik empedansı Z_2 ile son bulmuş kısa bir hat gibi benzetimi yapılır. Hatta giriş 1'de hemen bir analitik çözümde tamamlanamayan $Z_1(s)$ empedansının şekli çizilmiştir. Şekil 3.14 kısa devre süresi boyunca bir rampa tarafından uygun bir şekilde yaklaşıtırlan iletken sıcaklığının değişimini gösterir. Giriş empedansı $Z_1(s)$ ve homojen bir fazın karakteristik empedansı, bir sıcaklık rampası ile yüklenir. $\sqrt{\sigma\lambda}$ istenen değerleri talepten belirlenir. T anındaki ısı akışı yassı hattınki ile aynıdır. Zamana bağlı sonucun değerleri homojen hatta yerine konursa yassı hattın basitçe hesabına izin verir [5]:

$$\sqrt{\sigma\lambda} = \sqrt{\sigma_2\lambda_2} \left\{ 1 - \left\{ 1 - \frac{\sigma_1\lambda_1}{\sigma_2\lambda_2} \frac{\pi}{2} \frac{1}{x} [1 - e^{x^2}(1 - \text{erf}(x))] \right\} \right\} \quad (3.48)$$

$$x = \frac{\lambda_1}{d_1} \frac{1}{\sqrt{\sigma_2\lambda_2}} \sqrt{t} \quad (3.49)$$

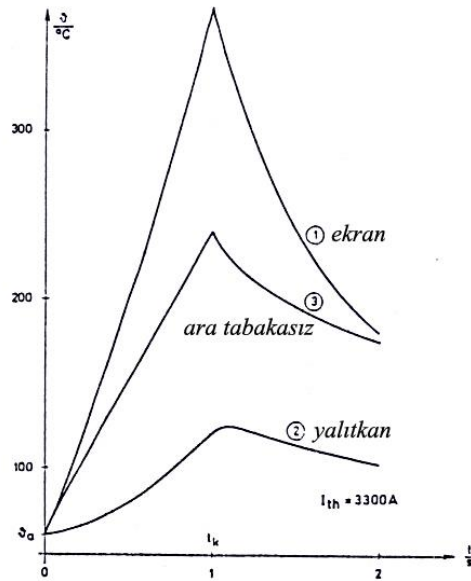
Yalıtıkandaki $\Delta\theta_2$ sıcaklığı aynı ifadelerle belirlenebilir:

$$\Delta\theta_2 = \Delta\theta_1 \frac{1}{x^2} \left\{ 1 + x^2 - 2 - \frac{x}{\sqrt{\pi}} - e^{x^2}[1 - \text{erf}(x)] \right\} \quad (3.50)$$



Şekil 3.13 İletken için genişletilmiş eşdeğer termik devre, ara tabaka 1 ve yalıtkan 2

Şekil 3.14, kağıt bir tabakanın bir kablo ekranındaki ve yalıtkanındaki sıcaklıklar üzerindeki etkisini gösterir.



Şekil 3.14 Zamana bağlı olarak hesaplanmış kablo sıcaklıkları

Bütün hesap yöntemleri için yaklaşımlar geliştirilmiştir. Katsayılar karesel ortalama ile hesaplanmıştır. Bunlar Tablo 3.7’de gösterilmiştir ve basit hesaplamalar için uygundur.

3.7 TERMO-MEKANİK KUVVETLER VE GENLEŞME

3.7.1 Genel

Kısa devre süresi boyunca yüksek sıcaklık artışına bağlı olarak, önemli bir iletken genleşmesi olur [2]. Eğer iletken uzunluğu l genleşme için serbest ise; sıcaklık artışı $\Delta\theta$, Δl uzunluk artışına sebep olur (Şekil 3.15)

$$\Delta l = l \alpha_{th} \Delta\theta \quad (3.51)$$

Eğer iletken her iki uçtan tutturulmuş ise, merkez bir taraftan diğerine hareket eder. Eşit aralıklarla tutturulmuş bir kablo için kablo ekseninin sinüs dalgası şeklinde hareket ettiğini kabul ederek boyuna uzamanın (hareketin) sonunda $\Delta l = 0$ olma durumunun korunduğu varsayıldığında sapma [2]:

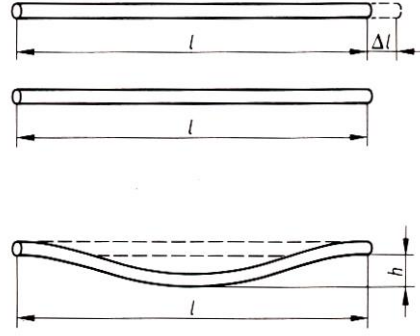
$$h = \frac{2l}{\pi} \sqrt{\alpha_{th} \Delta\theta} \quad (3.52)$$

Yer değiştiremeyen ($h = 0$) ve genleşemeyen ($\Delta l = 0$) bütün bölümlerde sınırlandırılmış bir iletken F_{th} kuvveti meydana gelir.

$$F_{th} = q E \alpha_{th} \Delta\theta \quad (3.53)$$

Tablo 3.8 Bakır ve alüminyum için termik genleşme ve esneklik değerleri

Malzeme	Bakır	Alüminyum
Termik genleşme α_{th} 'in 1/K olarak katsayısı	$16,2 \times 10^{-6}$	$23,8 \times 10^{-6}$
Esneklik, E (N/m ²)	115×10^9	65×10^9



İletken uzunluğu	$l = 2.0 \text{ m}$
İletken kesiti	$q = 300 \text{ mm}^2$
İletken çapı	$d = 19.54 \text{ mm}$
Sıcaklık artışı	$\Delta\theta = 90^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$

Şekil 3.15 Alüminyum iletkenin termik genleşmesi

Örnek 3.7: Şekil 3.15'e iletken baradaki veya alüminyum iletkenindeki sıcaklık artışının etkisini göstermek için örnek bir hesaplama eklenmiştir.

2.0 m uzunluğunda ve 19.54 mm çapındaki bir bara, 60°K 'lik sıcaklık artışı ile 2,86 mm genleşir. Eğer boyuna hareket ve radyal sapma önlenirse, 28 kN'luk bir kuvvet ortaya çıkar. Eğer sadece boyuna hareket önlenirse, o zaman radyal sapmalar çapın 2,5 katı olur.

Boyuna artış ($h = 0$; $F = 0$):

$$\Delta l = \alpha_{th} l \Delta\theta = 23,8 \times 10^{-6} \times 2 \times 60 = 2,86 \text{ mm}$$

Termo-mekanik kuvvet ($\Delta l = 0$; $h:0$):

$$\begin{aligned} F_{th} &= q E \alpha_{th} \Delta\theta \\ &= 300 \times 10^{-6} \times 65 \times 10^9 \times 23,8 \times 10^{-6} \times 60 \\ &= 27,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

Sapma ($\Delta l = 0$; $F = 0$):

$$\begin{aligned} h &= \frac{2l}{\pi} \sqrt{\alpha_{th} \Delta\theta} \\ &= \frac{2 \times 2}{\pi} \sqrt{23,8 \times 10^{-6} \times 60} = 48,1 \text{ mm} \end{aligned}$$

3.7.2 Kablolarda Termik Genleşmenin Etkisi

(3.53) denkleminde iletkenin gövdesinin esnek olduğu kabul edilir ve bu yüzden sıcaklık artışı koşullarında sıcaklıkla değişen doğrusal bir kuvvet üretir. Gerçekte malzemenin işlenmesine, şekline ve iletkenin yapısına bağlıdır ve düşük sıcaklık artışlarıyla bir sınır değere ulaşana kadar lineerdir. 50 N/mm^2 'ye kadar kuvvetler beklenmelidir. Böyle bir kuvvet deformasyonunun etkisi altında, örneğin etkin kısılma, özellikle alüminyum iletkenlerle soğutulan bir iletkende mekanik bir gerilme gelişebilir. Eğer normal işletmede kablo az yük taşırsa, tavllanmış dolu alüminyum iletkenlerde 40 N/mm^2 'ye kadar gerilme kuvvetleri görülebilir [4].

Bir iletkendeki sıcaklık artışı, iletken tipine, iletkenle yalıtkanın yapışma şekline, kablo tipine ve bağlama (tutturma) yöntemine bağlı olarak boyuna genleşme ve sıkıştırma kuvvetleri yaratır.

Çok damarlı kablolarda iletkenlerin genleşmesi engellenir ve bu yüzden iletkende boyuna kuvvetler gelişir ve iletkenlerin, ve bu sebeple kablonun boyundaki artış tamamen etkili olmaz. Genelde boyuna kuvvetler, bağlama tipine bağlı olarak veya toprağa monte edildiğinde iletkenlerin genleşmesi ve kablonun sapmasına engel olduğu zaman oluşur. Boyuna genleşme kablonun tüm uzunluğu boyunca eşit olarak bölünecek ve sadece birkaç noktada oluşmayacak şekilde kablolar döşenmeli ve korunmalıdır.

Havada düz şekilde döşenmiş, uzun çok damarlı kablolar, dalgalı bir hat boyunca ve her tutturulduğu geçiş noktasında serbest bir göz bırakacak şekilde düzenlenmelidir. Toprağa döşenmede özel ölçümler gerekli değildir.

Topraktaki ve havadaki tek damarlı kablolar, uzun düz bir güzergahta dalgalı şekilde döşenmelidir. Havada döşenmiş kablolar, saptmaya izin vermek için yeterli derecede büyük aralıklarla tutturulmalıdır. Kısa devrede elektromanyetik kuvvetlerin ve normal işletmedeki termo-mekanik kuvvetlerin dikkate alınmasıyla kabloların tutturulmasını sağlayarak kısa devre olayında termo-mekanik kuvvetlerin birbirini dengelediği kabul edilir.

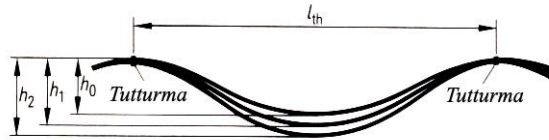
Kabloların döşenmesi esnasında bükmelerdeki aşırı radyal zorlanmalardan sakınmak ve böylece yalıtkan ve dış kılıfa zarar vermesi tehlikesinden korunmak için

minimum bükme yarıçapı kuralına uymak gerekir. Bu yüzden kablolar bükmelerde değil, düz olduğu geçiş noktalarında tespit edilmelidir.

Toprağa döşenmiş kablolar için veya kabloların havada kısa aralıklarla tutturulduğu yerlerde, kablo ekleri üzerine kuvvetlerin etkisini önlemek için uygun önlemler alınmalıdır.

3.7.3 Tek Damarlı Kabloların Montajı

Tek damarlı kablolarla termik genleşme etkisine izin vermek için “termik genleşmeden zarar görmeyecek şekilde tesis edilmelidir” (VDE 0298 Bölüm 1) [2]. Bu durum kabloları yaklaşık bir sinüs dalgası yeklinde döşeyerek ve Şekil 3.16’de gösterildiği gibi noktalardan tutturarak elde edilir.



Şekil 3.16 Sinüs biçiminde döşenen kabloda sapsmalar

Yüksüz kablolarla ve olası en düşük çevre sıcaklığı θ_o ’da, h_o sapsması, kablodaki gerilme zorlanmasına yol açmayacak kadar olmalıdır. Bunun için kablonun ısınan kısmının doğrultusu önemlidir. Aksi durumda ısı ile boyuna basınç yaratan kuvvetler oluşabilir.

Minimum çevre sıcaklığı θ_o ve h_o sapsmasındaki kavisin uzunluğu l_{B0} tutturma noktaları arasındaki mesafe l_{th} ile karşılaştırıldığında kabloların gerçek uzunluğu):

$$l_{B0} = l_{th} \left[1 + \left(\frac{\pi h_o}{2 l_{th}} \right)^2 \right]. \quad (3.54)$$

Eğer döşeme esnasında çevre sıcaklığı θ_1 ise, kavisin uzunluğu

$$\begin{aligned} l_{B1} &= l_{B0} [1 + \alpha_{th} (\theta_1 - \theta_o)] \\ &= l_{th} \left[1 + \left(\frac{\pi h_o}{2 l_{th}} \right)^2 \right] [1 + \alpha_{th} (\theta_1 - \theta_o)], \end{aligned} \quad (3.55)$$

ve sapma:

$$h_1 = \frac{2l_{th}}{\pi} \sqrt{\frac{l_{B1}}{l_{th}} - 1}. \quad (3.56)$$

Eğer kablo, iletken $\theta_2 = \theta_{Ln}$ izin verilen işletme sıcaklığına erişene kadar yüklenirse, kavisin uzunluğu:

$$l_{B2} = l_{BO} [1 + \alpha_{th} (\theta_2 - \theta_o)] \quad (3.57)$$

ve sapma

$$h_2 = \frac{2l_{th}}{\pi} \sqrt{\frac{l_{B2}}{l_{th}} - 1} \quad (3.58)$$

Normal işletmede kablonun h_2 değerini maksimum sapmasını tolere etmek için kablo tavaları üzerinde yeterli boşluk sağlanmalıdır.

Tutturucular arası mesafe l_{th} , 50 d ile 100 d arasında seçilebilir. Sapmanın seçimi için bilgi Şekil 3.17'den alınabilir. Bu diyagramda tutucular arasındaki mesafe l_{th} , $l_{th}/d = 50$, $l_{th}/d = 100$ ile kablo çapıyla bağıntılı olarak seçilir. Bu değerleri kullanarak, bir taraftan kabloların bükme yarıçapı çok küçük olmayacaktır, diğer taraftan kablo tavalarının genişliği çok aşırı olmayacaktır. (böylece maliyet düşecektir). En düşük çevre sıcaklığı θ_o 'daki sapma, $h_o = 0,5 d$ ile seçilir [2].

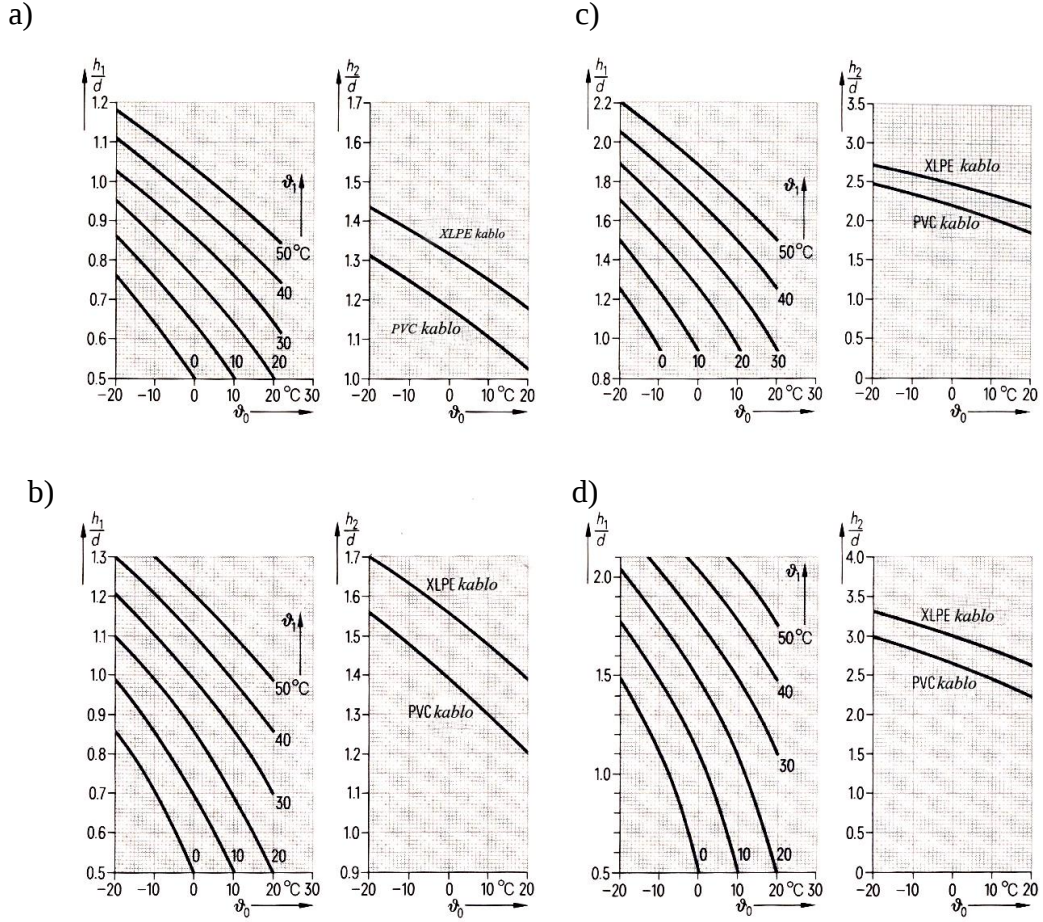
Aşağıda verilen şekil 3.17 ile ilgili olarak:

θ_1 çevre sıcaklığında döşendiği zaman: $h_1/d = f(\theta_o)$

$\theta_2 = \theta_{Lr}$ iletken sıcaklığına kadar tam akım yüklenmesi ile: $h_2/d = f(\theta_o)$

XLPE kablo için $\theta_{Lr} = 90^\circ\text{C}$

PVC kablo için $\theta_{Lr} = 70^\circ\text{C}$



Şekil 3.17 Termik genleşmeye bağlı olarak kablonun sapamasının belirlenmesi

- a) Bakır iletken $I_{th} = 50$ d
- b) Alüminyum iletken $I_{th} = 50$ d
- c) Bakır iletken $I_{th} = 100$ d
- d) Alüminyum iletken $I_{th} = 100$ d

Örnek 3.8: NA2XS2Y 1x120 RM/16 12/20kV'luk XLPE kablonun $d = 34$ mm dış çapı vardır ve 20°C çevre sıcaklığında döşenecektir. En düşük çevre sıcaklığı -10°C 'dir.

İlk önce $I_{th} = 50$ d ile kelepçeler arasındaki kablonun serbest gerçek uzunluğunu belirlemek için hesaplama yapılır. Yüksüz kablodaki ve en düşük çevre sıcaklığındaki sapa $0,5$ d'dir.

$$h_o = 0,5d = 0,5 \times 34 \times 10^{-3} = 17 \times 10^{-3} m,$$

$$l_{th} = 50d = 50 \times 34 \times 10^{-3} = 1,7 m.$$

$$l_{BO} = l_{th} \left[1 + \left(\frac{\pi 17 \times 10^{-3}}{2 \times 1,7} \right)^2 \right] = l_{th} \ 1,000247,$$

$$l_{B1} = l_{th} 1.000247 [1 + 23.8 \times 10^{-6} (20(-10))] \\ = l_{th} \cdot 1,000961,$$

$$h_1 = \frac{2 \times 1,7}{\pi} \sqrt{\frac{1,7 \times 1,000961}{1,7}} - 1 = 0,0335m \\ = 0,99 d,$$

$$l_{B2} = l_{th} 1.000247 [1 + 23.8 \times 10^{-6} (90 - (-10))] \\ = l_{th} \cdot 1,00263.,$$

$$h_2 = \frac{2 \times 1,7}{\pi} \sqrt{\frac{1,7 \times 1,000263}{1,7}} - 1 = 0,0555m \\ = 1,63 d.$$

Şekil 3.17'deki b diyagramından aynı değerler bulunabilir:

$$\theta_o = -10^\circ\text{C} \text{ ve } \theta_1 = 20^\circ\text{C} \text{ için } \frac{h_1}{d} = 0,99d,$$

$$\theta_o = -10^\circ\text{C} \text{ ve XLPE kablo için } \frac{h_2}{d} = 1,63d,$$

Merdiven tipi kablo tavaalarındaki basamaklar arasındaki mesafe normal olarak 0,3 m'dir ve buna göre kelepçe noktaları arasındaki açıklık 1,8 m olur. Döşeme için izin verilen sapma:

$$h_1 = 0,99d \frac{1,8}{1,7} = 1,05 d = 36mm$$

ve kablo tavaasının genişliğini belirlemek için tam yük altındaki sapmaya, izin verilen işletme sıcaklığına erişildiği noktaya kadar izin verilmelidir, bu:

$$h_2 = 1,63d \frac{1,8}{1,7} = 1,73 d = 59mm.$$

Eğer kelepçeleme mesafesi

$$l_B = 100 d = 3,4 m$$

olarak seçilirse, o zaman şekil 3.17d'deki diyagramlardan

$\theta_0 = -10^\circ\text{C}$ ve $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$ için $h_1 = 1,68$ d ve

$\theta_0 = -10^\circ\text{C}$ ve XLPE kablo için $h_2 = 3,15$ d.

0,3 m'lik basamak aralığı ve 3,6 m'lik kelepçeleme mesafesi şöyle sonuçlanır:

$$h_1 = 1,68d \frac{3,6}{3,4} = 1,78 \quad d = 60\text{mm} \text{ ve}$$

$$h_2 = 3,15d \frac{3,6}{3,4} = 3,34 \quad d = 113\text{mm}$$

Bu gösterir ki, daha büyük bir kelepçeleme mesafesi seçerek kelepçe sayısı azalır fakat h_2 değerini tolere etmek için daha geniş kablo tavaları gereklidir.

3.7.4 Aksesuarlar

Aksesuarlar, kısa devrede gelişen termik zorlanmalara bağlı olarak seçilmeli ve döşenmelidir. Aksesuar veya bağlantı kutuları içindeki termo-mekanik kuvvetlerin etkisinden kaçınmak için bağlantı içindeki damarlar üst üste bindirme ile bağlanmalı ve kablo uçları, kablo yerleştirildikten sonra kelepçelerle tutturulmalıdır. Özellikle de eksenel (boyuna) kuvvetlerin kontrol edilemediği dirseklerde buna ayrıca dikkat edilmelidir.

Emprenye edilmiş kablolarda emprenye maddesinin genleşmesi önemli bir sıvı basıncı yaratabilir. Aksesuarın yerleştirilmesi bu basınca dayanacak kadar yeterli güçte olmalıdır. Kısa devre sıcaklığının sınırlanması, belirli durumlarda gerekli olabilir.

İletkendeki eklerin elektriksel dirençleri, kısa devre zorlanmalarını arttırılmamalıdır. Lehim bağlantıları sadece 160°C 'ye kadar olan kısa devre sıcaklıkları için uygundur. Kılıflar, ekranlar ve zırh daha yüksek bir kısa devre sıcaklığına zorlanabilir. Toprağa bağlantılar yaparken veya lehim bağlantıları ile uçları eklerken yeterli derecede geniş ısı dağıtma düzenekleri kullanılmalıdır, böylece kısa devre koşullarında eklerdeki sıcaklık 160°C 'yi aşmaz.

Ekranlar, ısı dağılımları eşit enine kesitli birbirine bitişik iletkenlerden daha uygun oldukları için normal olarak adyabatik olmayan sıcaklık artışı için boyutlandırılır.

Eğer ekranı toprağa bağlamak için kablonun sonunda ekran telleri burularak demetlenmişse, bu demetlenmiş ekran telleri kablo içindeki her bir ekran telinden daha sıcak duruma gelir.

4. MEKANİK KISA DEVRE KAPASİTESİ

4.1 ELEKTROMANYETİK KUVVETLER

4.1.1. Giriş

Kısa devrenin ve kesme kapasitesinin artışı ile, kısa devre akımlarına göre kabloların ve bağlantı elemanlarının boyutlandırılması daha önemli olur. Bir kısa devre sırasında kısa devre dayanımı, kısa devre akımının termik etkilerinden çok mekanik etkileri tarafından belirlenir.

Kısa devre akımlarının mekanik etkileri çok az bilinmektedir. Deney sonuçlarının yardımı ile proje hazırlamak için geliştirilmiş hesaplama yöntemleri bağlantılı, birçok şekilde geliştirilebilir ve genişletilebilir bir rehber sunulmuştur [2, 4, 6]. Termik ve mekanik etkiler pratik bir durumda ayırlamadığı için, bütün durumlarda normal işletmede işletme sıcaklığı başlangıç sıcaklığı olarak seçilmelidir. Sadece kabloun ve aksesuarlarının dayanımı değil, aynı zamanda tutucuların ve kablo taşıyıcılarının da düşünülmesi önemlidir.

4.1.2 Elektromanyetik Kuvvetlerin Etkileri

Yanyana döşeli iletkenlerden akan akımlar, iletkenler arasında elektromanyetik kuvvetler üretir. Eğer yanyana iki iletkenin akan akımlar ters yönde ise itme kuvveti oluştururlar. Eğer akımlar aynı yönde akıyorsa, çekme kuvveti oluştururlar.

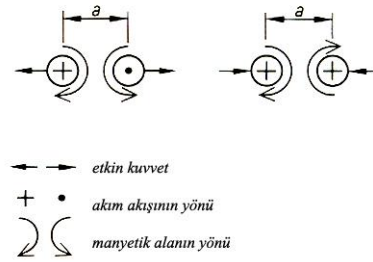
En yüksek etki kuvveti, maksimum kısa devre akımının karesi ile orantılıdır. Bunu işletme frekansının iki katı frekansa sahip titreşimli gerilme izler. Genel uygulamalar izlenerek, en yüksek mekanik zorlanma, kısa devre dayanımının hesabında kullanılır.

Kısa devre sırasında oluşan kuvvetler; aksesuarlar, kablolar ve bağlantı elemanları boyutlandırılırken göz önüne alınmalıdır. Bu kuvvetler, bazı durumlarda önemli problemlere yol açabilirler [7-9].

Yan yana iki uzun iletkenlerden akan akım F_s kuvveti oluşturur. Şekil 4.1’de gösterilen düzenleme göz önüne alınarak bu kuvvet [2],

$$F'_s = \frac{\mu_o I_s^2}{2\pi a} \quad (4.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu kuvvet maksimum kısa devre akımı I_s ’nin karesi ile artar ve iletkenler arası a açıklığının artışı ile azalır. a açıklığı, iletkenlerin eksenler arası uzaklığını gösterir. Dairesel iletkenlerde akımın iletkenin ekseninde toplandığı kabul edilir.



Şekil 4.1 Akımların neden olduğu etkin kuvvetler

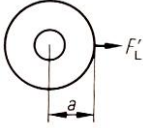
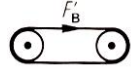
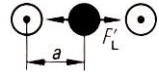
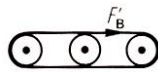
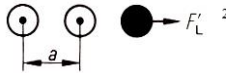
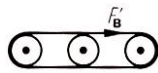
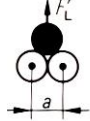
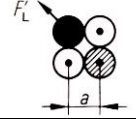
(4.1) denklemi, Şekil 4.1’deki gibi iletken düzenleri için, tek fazlı veya üç faz A.A. sistemlerinde faz-faz kısa devresindeki kuvvetlerin hesabı için kullanılabilir. Diğer düzenlemeler için, iletken üzerindeki etkin kuvvet:

$$F'_L = \alpha F'_s \quad (4.2)$$

Bütün iletkenlerin üstünde, genel kaplamada, kelepçe, bağlayıcı band ve benzeri maddelerdeki etkin kuvvet,

$$F'_B = \beta F'_s \quad (4.3)$$

dir. Etkin kuvvetin maksimum değerini hesaplamak için gerekli radyal ve teğetsel zorlanma faktörleri olan α ve β faktörleri Şekil 4.2’den alınır [2].

Sistem	Kısa devre	Radyal zorlamalar için α faktörü		Teğetsel zorlamalar için β faktörü	
Bir fazlı	Faz-toprak		$\frac{1}{2}$		
Üç fazlı					
Bir fazlı	Faz-faz		1		$\frac{1}{2}$
Üç fazlı	Faz-faz		$\frac{\sqrt{3}}{2}$		0.404
			0.808		
	Dengeli Üç fazlı		$\frac{\sqrt{3}}{2}$		$\frac{1}{2}$
			$\frac{1}{\sqrt{2}}$		$\frac{1}{2}$



İncelenen kablo veya iletken

Etkin bileşke kablo veya kuvvetin yönü

Koruyucu iletken

Şekil 4.2 Kısa devredeki zorlanmaların hesabı için faktörler [2]

F_L' etkin kuvvetinden aşağıdakiler bulunabilir:

- Yalıtkan üzerindeki iletkenin birim yüzeye basıncı
- Çevreleyen kaplama üzerindeki damarın birim yüzeye basıncı
- Destekler üzerindeki tek damarlı kablolar için her bir bağlantı üzerine gelen kuvvet
- Bütün tek damarlı kabloları çevreleyen kelepçe üzerine etkiyen kuvvet, örneğin iki parçalı yarı kelepçenin vidalanmış kısmındaki gerilme zorlanması

Bir sistemin bütün tek damarlı kablolarını çevreleyen bağlayıcı, kelepçe veya benzerlerindeki gerilme zorlanması hesaplanır, bu kuvvet F_B' ile gösterilir. (4.3) denklemi aynı zamanda çok damarlı kablonun bütün iletkenlerinin gerilme kuvvetlerinin hesaplanması için de kullanılır.

Örnek 4.1:

Veriler:

Kesme gücü, $S_a = 750$ MVA

Kısa devre süresi, $t_k = 0,5$ s

Tepe faktörü, $\kappa = 1,8$

İşletme gerilimi $U_b = 10$ kV

Kablonun kısa devre akımlarını ve kuvvetlerini hesaplamak gerekir. (2.10)'dan

$$I_k'' \approx I_a = \frac{S_a}{\sqrt{3}U_b} = \frac{750 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 10 \times 10^3} = 43,3 \text{ kA}$$

Şekil 3.2'den $\kappa = 1,8$ ve $t_k = 0,5$ s için; $m = 0,1$ aynı zamanda $I_k'' / I_k \approx 1,0$ için; $n = 1,0$. Buradan termik işletmeyi belirleyen akım (3.2)'den

$$\begin{aligned} I_{th} &= I_k'' \sqrt{m + n} \\ &= 43,3 \sqrt{0,1 + 1,0} = 45,4 \text{ kA} \end{aligned}$$

Şekil A.3'den bakır iletkenli ve 240 mm^2 enine kesitli bir XLPE kablo için seçilir. $t_k = 0,5$ s kesme süresi için kısa devre akımları

$$I_{thz} = 48,5 \text{ kA ve}$$

$$I_{kz}'' = 46,2 \text{ kA.}$$

Seçilen kablonun tipi; N2XS2Y 1x240 RM/25 6/10 kV, $d = 36 \text{ mm}$ dış çaplı ve $d_{Mm} = 29,1 \text{ mm}$ ortalama ekran çaplı kablo.

Faz-Toprak Kısa Devresi

İletken ve ekran arasında etkiyen kuvvet (toplam faz-toprak kısa devre akımının ekran üzerinden geri döndüğü varsayılır) $a = 0,5 d_{Mm}$ olduğundan (2.12)'den

$$I_s = \sqrt{2} \times 1,8 \times 43,3 = 110,2 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} F_L' &= \alpha \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{0,5d_{Mm}} \\ &= 0,5 \times \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \times \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{0,5 \times 29,1 \times 10^{-3}} \\ &= 83,5 \text{ kN / m} \end{aligned} \quad (4.4)$$

dir. Bu kuvvet, ekranı kablodan uzaklaştırmaya (itmeye) veya aralarındaki boşluğu genişletmeye çalışır. Meydana gelen gerilme zorlanması:

$$\begin{aligned} F_B' &= \beta \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{0,5d_{Mm}} \\ &= \frac{1}{4\pi} 0,2 \times 10^6 \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{0,5 \times 29,1 \times 10^{-3}} \\ &= 13,3 \text{ kN / m} \end{aligned}$$

Bu kuvvet, ekran telleri üzerinden bağlayıcı bandlara ve ayırıcı tabaka üzerinden dış kılıfa etkir.

Faz-Faz Kısa Devresi

$a = 2d$ açıklıkla bir fazlı sistemdeki yan yana döşenmiş iki özdeş tek damarlı kablo için kabloları etkiyen elektromanyetik kuvvet, (4.1)'den:

$$\begin{aligned}
F'_s &= \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{2d} \\
&= 0,2 \times 10^{-6} \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{2 \times 36 \times 10^{-3}} \\
&= 33,7 \text{ kN} / m,
\end{aligned}$$

$\alpha = 1$ ile iletkenler üzerindeki etkin kuvvet, (4.2)'den:

$$F'_L = \alpha F'_s = 1 \times 33,7 = 33,7 \text{ kN} / m$$

Kabloları saran kablo bağındaki etkin kuvvet, (4.3)'ten:

$$F'_B = \beta F'_s = 0,5 \times 33,7 = 16,9 \text{ kN} / m$$

Üç fazlı sistemde, faz-faz kısa devresi ile, I_k'' ve I_s akımları; dengeli üç fazlı kısa devre değerinin $\sqrt{3}/2$ katına eşit olduğu varsayılabilir.

Dengeli Üç Fazlı Kısa Devre,

$a = 2d$ aksenal açıklık ile yan yana döşenmiş tek damarlı kablolardan oluşan bir tesiste kablolara etkiyen elektromanyetik kuvvet:

$$F'_s = 33,7 \text{ kN} / m,$$

ve dış iletkenler üzerindeki etkin kuvvet, (4.2)'den:

$$F'_L = \alpha F'_s = 0,808 \times 33,7 = 27,2 \text{ kN} / m$$

İç iletkenler üzerindeki etkin kuvvet, (4.2)'den:

$$F'_L = \alpha F'_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 33,7 = 29,2 \text{ kN} / m$$

ve bütün kabloları saran kablo bağındaki etkin kuvvet, (4.3)'ten:

$$F'_B = \beta F'_s = 0,404 \times 33,7 = 13,6 \text{ kN} / m$$

$a = d$ ile tek damarlı kabloların demet şeklindeki döşenmesinde, (4.1)'den

$$\begin{aligned}
F'_s &= \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{d} \\
&= 0,2 \times 10^{-6} \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{36 \times 10^{-3}} \\
&= 67,5 \text{ kN} / m,
\end{aligned}$$

ve bir iletken üzerindeki etkin kuvvet

$$F'_L = \alpha F'_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 67,5 = 58,5 \text{ kN} / m.$$

bulunur. Bütün kabloları saran kablo bağındaki veya band kelepçedeki etkin kuvvet:

$$F'_B = \beta F'_s = 1/2 \times 67,5 = 33,8 \text{ kN} / m$$

olur.

4.2 ÇOK DAMARLI KABLO

İletkenlere etki eden kısa devre itme kuvvetleri F'_L , iç iletken tabaka üzerinde ve aynı zamanda yalıtkan üzerinde bir basınç neden olur. Bu basınç öyle bir yayılır ki, damarlar ekrana, zırha ve/veya dış kılıfa karşı sıkıştırılır. Sonuç olarak yüzey basınç kuvvetleri F'_F , iletken tabakalar ve deformasyona yol açan yalıtkan üzerinde sonlanır. Bu damarları saran kaplamalarda kısa devre kuvvetleri, kablunun patlamasına yol açabilen F'_B gerilme kuvveti yaratır [4, 6].

Gerilme kuvvetindeki küçük bir değişiklik döşemenin uzunluğundan bağımsızdır ve damarların bükülme payı tarafından karşılanabilir. Bu, bükümün genişlemesine yol açabilir ve bu yüzden kablo eksen yönündeki gerilme zorlanmasına yol açabilir. Malzemesine, iletken şekline göre farklı iletkenler farklı şekillerde karşılık verirler. Bu yüzden etkiler çok önemli değildir ve kablunun kısa devre dayanımı hesaplanırken ihmal edilebilir.

Basınç alanlarından ve çevreleyen kaplamalardaki gerilme zorlanmasından ayrı, kablo yapısı kablunun mekanik kısa devre dayanımının belirlenmesinde bir kriterdir.

4.2.1 Gerilme Kuvveti F'_B

Damarları saran kaplamadaki gerilme kuvveti [2]:

$$F'_B = \beta \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{a} \quad (4.5)$$

ve izin verilen gerilme kuvveti, gerilme zorlanması σ ve kaplamanın kalınlığı δ_s 'e bağlıdır.

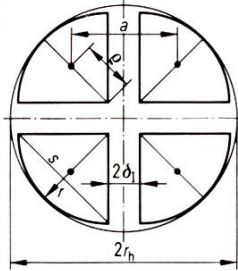
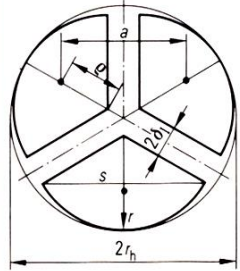
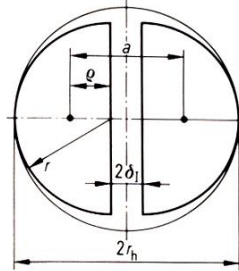
$$F'_{Bz} = \sigma \delta_s. \quad (4.6)$$

Kısa devre tarafından üretilen gerilme kuvveti F'_B , izin verilen gerilme kuvveti F'_{Bz} 'ünü aşmamalıdır.

$$F'_B \leq F'_{Bz}.$$

Buradan mekanik kısa devre kapasitesi I_{sz} :

$$I_{sz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta \mu_o}} \times F_{Bz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta \mu_o}} \sigma \delta_s. \quad (4.7)$$

<i>Yapı</i>			
<i>Kütle merkezinin yeri</i>	$q = \frac{2r}{3} \frac{\sin 45^\circ}{\pi \frac{45^\circ}{180^\circ}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} r$	$q = \frac{2r}{3} \frac{\sin 60^\circ}{\pi \frac{60^\circ}{180^\circ}} = \frac{\sqrt{3}}{\pi} r$	$q = \frac{2r}{3} \frac{\sin 90^\circ}{\pi \frac{90^\circ}{180^\circ}} = \frac{4r}{3\pi}$
<i>İletkenler üzerindeki grup dairenin yarı çapı</i>	$r_h = r + \sqrt{2} \delta_l$	$r_h = r + \frac{2}{\sqrt{3}} \delta_l$	$r_h = r + \delta_l$
<i>Kütle merkezleri arası mesafe</i>	$a = 2\delta_l + \sqrt{2} q$ $= \sqrt{2}(r_h - 0.4r)$ $\approx 0.85r_h + 0.8\delta_l$	$a = 2\delta_l + \sqrt{3} q$ $\approx \sqrt{3}(r_h - 0.45r)$ $\approx 0.95r_h + 0.9\delta_l$	$a = 2(\delta_l + q)$ $\approx 2(r_h - 0.58r)$ $\approx 0.85r_h + 1.15\delta_l$

Şekil 4.3 Daire kesmesi şekilli iletkenli kablolarda kısa devre kuvvetlerinin hesabı için eksenel kuvvetler [2]

Faz-faz veya dengeli üç fazlı kısa devre etkisi altında bırakılan çok damarlı kablolar için şekil 4.2'deki gibi $\beta = 0,5$ değeri uygulanmalıdır. Daire kesmesi şekilli iletkenler için şekil 4.3'de verilen kuvvet noktalarının eksenel merkezleri için eksenel uzaklık a kullanılabilir. Genellikle kaplama olarak kullanılan malzemeler için izin verilen gerilme zorlanması σ aşağıda gösterilmiştir (bütün durumlarda verilmemiştir):

- PVC ve PE dış koruyucu kaplama (dış kılıf),
- Çekilmiş dolgu maddesi veya sarılmış şerit iç koruyucu kaplama,
- Kurşun kılıf ($\sigma \approx 13$ 'den 26 N/mm^2 'ye kadar),
- Alüminyum kılıf ($\sigma \approx 55$ 'den 65 N/mm^2 'ye kadar),
- Emprenye edilmiş kabloda kuşaklı yalıtkan ($\sigma \approx 56 \text{ N/mm}^2$),
- Çelik-tel zırhın spiral bağlayıcısı ($\sigma \approx 400 \text{ N/mm}^2$),
- Bakır tel ekranın enine helezon bandı ($\sigma \approx 120 \text{ N/mm}^2$),
- Ek kuvvetlendirme için polimer veya bez bandlar

Kısa devre tarafından uygulanan darbe kuvveti için dayanım kapasitesinin sürekli yükleme için olandan daha az olması beklenmelidir. Hesaplama bu değerlerin üçte ikisinin kullanılacağı hatırlatılır. Kuşaklı yalıtkan için 56 N/mm^2 'lik değer kısa devrede kullanım için belirlenmiştir ve değiştirilmeden kullanılabilir. Kurşun kablo için 14 N/mm^2 değeri uygulanabilir. Polimer kaplamaların dayanımı sıcaklığa göre ek düşünce ister (aynı zamanda 0°C 'in altındaki sıcaklıklar kritik olabilir, örneğin soğuk bir kablodaki kısa devre; deney bilgisi sonucu mevcut değildir):

İşletme sıcaklığındaki kablolardaki kısa devre deneylerinin sonuçlarından

NY 4x185 SM 0,6/1 kV

PVC dış kılıf için 2 N/mm^2 'lik bir değer tespit edilmiştir. 20°C 'de dış kılıf için 8 N/mm^2 'lik bir değer seçilir; bu VDE 0207 Bölüm 5'de $12,5 \text{ N/mm}^2$ 'lik deney değerlerinin üçte ikisidir [2].

PE kılıflar için aynı değerler hesaplama için kullanılabilir.

Çok damarlı kablolar, örneğin uygun polimer veya bez bandlar kullanılarak takviye edilebilir. Bu bandlar, biriktirilmiş damarların üzerine sarılı üst üste bindirme bandları (n_{BL}) kapsayan bir veya birçok katmanla (n_L) düzenlenir. Bu bandların

gerilme zorlanması σ^* genellikle (b band genişliği olarak) N/m olarak aktarılır. Eğer w' bağlayıcının birim uzunluk dönüş sayısını gösterirse, bağlayıcının izin verilen gerilme dayanımı F'_{Bz} :

$$F'_{Bz} = w' \sigma^* b \quad (4.8)$$

$F'_{Bz} \geq F'_B$ koşulu ile bağlayıcının mekanik kısa devre kapasitesi:

$$I_{sz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta\mu_o}} F'_{Bz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta\mu_o}} w' \sigma^* b \quad (4.9)$$

Birim uzunluktaki sarım sayısı w' :

$$w' = \frac{n_L n_{BL}}{B \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{\pi d_{Bm}}{B}\right)^2 - 1}}} \quad (4.10)$$

Burada; d_{BM} bağlayıcının çapıdır. B faktörü ise

$$B = n_{BL} (b + \varepsilon) \quad (4.11)$$

Eğer bandlar bir ε değeri ile üst üste bindirilirse, $\varepsilon = -\varepsilon$ olur; eğer l boşluğu ile sarılırsa $\varepsilon = 1$ olarak tespit edilmelidir.

Eğer kılıfın ve bağlayıcının dayanımı göz önüne alınırsa, izin verilen tüm gerilme kuvvetlerinin toplamı (4.6) ve (4.8) denklemlerine gelir.

$$\sum F'_{Bz} = \sigma \delta_s + w' \sigma^* b \quad (4.12)$$

ve mekanik kısa devre kapasitesi I_{sz}

$$I_{sz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta\mu_o}} \sum F'_{Bz} \quad (4.13)$$

4.2.2 Yüzey Basıncı F'_F

Çok damarlı kablolarla yüzey basıncı zorlanmaları, tek damarlı kablolarınkinden daha azdır çünkü sadece kelepçeleme bölgesi yerine tüm uzunluk boyunca yayılır. Daha önce sözü edilen çok damarlı kablolar üzerinde yapılan deneylerde damar yüzeyi üzerinde deformasyon gözlenmiştir [2].

d_L çaplı, δ_I yalıtkan kalınlıklı, σ_F özgül basıncı olan iletkenin izin verilen yüzey basıncı F'_{Fz} aşağıda verilen denklem ile bulunabilir:

$$F'_{Fz} = d_L \delta_I \sigma_F \quad (4.14)$$

Bu, her zaman iletkenin maruz kaldığı F'_L kuvvetini yaratan akıma eşit veya daha büyük olabilir.

$$F'_{Fz} \geq F'_L .$$

4.2.3 Kablo Yapısı

En iyi formu bir damarlı olandır. Uygun dolgu maddesinin ve yeterli kaplamanın varlığı önemlidir. Bu şekilde kısa devre sırasında birinin diğerine göre hareket etmesi önlenmiş olur.

Sektör tipi iletkenli kablolarla, damarların önemli hareketi olduğu zaman kenarlarda zarar oluşabilir. Dolgu malzemesi damarlar arasında hareket edebilir ve çentiklere neden olabilir. Bu sebeple, bu, özellikle daire kesmesi şekilli iletkenlerin olması durumunda kaçınılmalıdır.

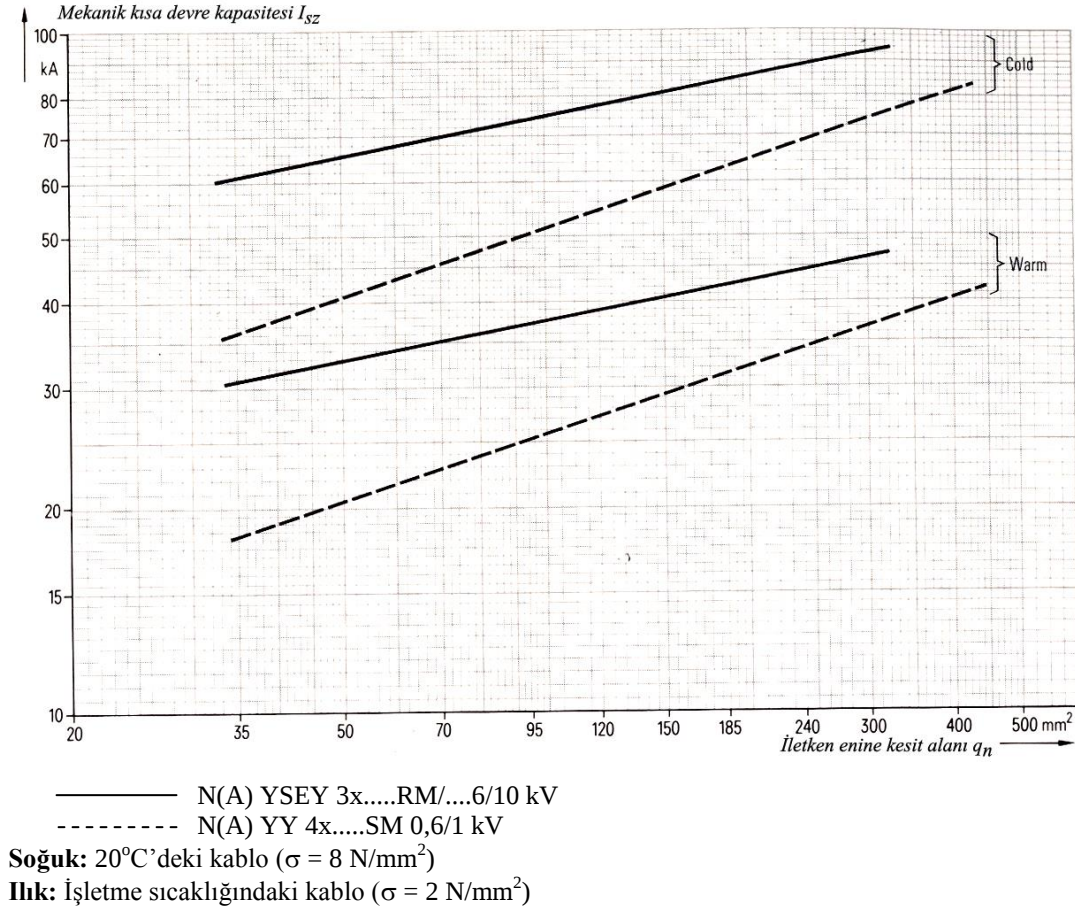
4.2.4 Deney ve Hesap Büyüklükleri

VDE 0298 Bölüm 2'ye göre, küçük değerli kısa devre akımlı sistemlerde kullanılan çok damarlı kablolar için özel kuvvetlendirme ölçümleri gerekli değildir [2]. Bu,

0,6/1kV 40 kA'e kadar olan maksimum kısa devre akımları için,

0,6/1kV'dan yukarı 60 kA'e kadar olan maksimum kısa devre akımları için anma gerilimli kablolarla uygulanır.

Bu büyüklüklerin kısa devre kuvvetlerinin, zırhsız PVC kablolarda dış kılıf tarafından sınırlandırıldığı varsayılır. Kısa devre akımlarının bu değerleri aştığı yerde özel ölçümlerin alınması gereklidir.



Şekil 4.4 Özel bağısız veya kuvvetlendirmesiz, polimer yalıtkanlı çok damarlı kabloların mekanik kısa devre kapasitesi I_{SZ}

Zırhsız PVC kablolar için mekanik kısa devre kapasitesi yukarıda anlatılan yöntemle hesaplanmıştır ve sonuçlar Şekil 4.4'de çizilmiştir. PVC'nin dış kılıfının dayanımı sıcaklıkla ölçülemeyen miktarla değiştiğinden, bu değerler sadece yol gösterici değerler olarak göz önüne alınır. Bu durumda bunlar aynı zamanda PVC veya PE dış kılıflı XLPE kabloları da uygulanır.

Çelik tel zırhlı üç damarlı kabloya ters helisel sarım uygulaması, 100 kA'ı aşan kısa devre akımlarının etkilerine karşı uygun bir önlemdir. Zırhsız kablolarda arttırılmış dayanıklılık, uygun bir bandı damarlar üzerine sararak sağlanır.

Kurşun kılıflı emprenye edilmiş kablolar nispeten darbe kuvvetlerine karşı iyi korunur. Başarısızlık görülmemiştir. Aynı yorum alüminyum kılıflı kablolar için de yapılabilir.

Zırhsız emprenye edilmiş kablolar için kısa devre yüklenmesini sınırlandırmak gerekir. Zırhsız kuşaklı kablolar için, 0,6/1.0 kV ve 6/10 kV için rehber değerler olarak, Şekil 4.4’de verilen 20°C’deki kablolar için verilen değerler de kullanılabilir.

4.2.5 Tutucu Elemanlar

Çok damarlı kabloları kısa devre kuvvetlerinin etkileri kablo dahilinde sığdırılmıştır ve tutucu elemanları zorlamaz. Kabloları kelepçeler ile tutturmak, başlıca bir kablonun ağırlığının ve temiz bir düzenlemenin önemli düşünceler olduğu yerde çok tecrübe konusudur. Raflar veya benzeri yapılarla desteklenen kablolar düz bir düzlemde termo-mekanik kuvvetlerin dikkate alınmasına göre düzenlenir.

Örnek 4.2: Örnek 4.1’deki kısa devre durumuna göre, fakat 0,6 s kısa devre süresiyle, PVC yalıtkanlı ve bakır iletkenli üç damarlı kablo seçilecektir.

Normal işletmede Tablo 19.5’e göre tam yüklü bir kablo için anma kısa devre akım yoğunluğu $J_{thr} = 115 \text{ A/mm}^2$ ’dir. $t_{kr} = 1 \text{ s}$ için, (3.7)’den

$$q_n \geq \frac{I_{th}}{J_{th}} \sqrt{\frac{t_k}{t_{kr}}} = \frac{45.4 \times 10^3}{115} \sqrt{\frac{0,6}{1}} = 305,8 \text{ mm}^2$$

Buna göre 400 mm² enine kesit alanlı bir kablo seçilmelidir. Kablo sadece 65°C’lik bir iletken sıcaklığına kadar yüklendiğinden $J_{thr} = 119 \text{ A/mm}^2$ için

$$q_n \geq \frac{45.4 \times 10^3}{119} \sqrt{\frac{0,6}{1}} = 295,5 \text{ mm}^2$$

anma enine kesit alanı hesaplanır. Bu yüzden 300mm²’lik enine kesit alanı yeterli gelecektir. Seçilen kablonun tip referansı:

NYSEY 3x300 RM/25 6/10kV.

Diğer hesaplamalar için temel veriler:

İletken çapı : $d_L = 20,6 \text{ mm}$

Yalıtkan kalınlığı	: $\delta_I = 4 \text{ mm}$
Ekranlar üzerindeki dış çap	: $d_M = 32 \text{ mm}$
Dış kılıfın kalınlığı	: $\delta_s = 3,4 \text{ mm}$
Toplam çap	: $d = 79 \text{ mm}$

Etkin akımın iletken üzerinde doğurduğu kuvvet, (4.4)'ten:

$$F'_L = \alpha \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{d_M} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0,2 \times 10^{-6} \times \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{32 \times 10^{-3}}$$

$$= 65,7 \text{ kN/m};$$

Akımın doğurduğu kuvvet, bu sebeple, izin verilen yüzey basıncının yerine tutan kuvvetten daha küçüktür. (4.14)'e göre

$$F'_{Fz} = d_L \delta_I \sigma_F = 20,6 \times 10^{-3} \times 4 \times 10^{-3} \times 5 \times 10^9$$

$$= 412 \text{ kN/m}.$$

Dış kılıfta maksimum kısa devre akımı, gelişecek bir gerilme kuvvetine neden olur ($a = d_M = 32 \text{ mm}$), (4.5)'ten

$$F'_B = \beta \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{I_s^2}{a} = 0,5 \times 0,2 \times 10^{-6} \times \frac{(110,2 \times 10^3)^2}{32 \times 10^{-3}}$$

$$= 38,0 \text{ kN/m}.$$

20°C'deki soğuk kablounun dış kılıfının izin verilen çekme kuvveti ($\sigma = 8 \text{ N/mm}^2$), (4.6)'dan

$$F'_{Bz} = \sigma \delta_s = 8 \times 10^6 \times 3,4 \times 10^{-3} = 27,2 \text{ kN/m}$$

ve mekanik kısa devre kapasitesi, (4.9)'dan

$$I_{sz} = \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta \mu_o} F'_{Bz}}$$

$$= \sqrt{\frac{32 \times 10^{-3}}{0,5 \times 0,2 \times 10^{-6}} \times 27,2 \times 10^3}$$

$$= 93,3 \text{ kA}$$

bulunur. Kendi işletme sıcaklığındaki kablo için ($\sigma = 2 \text{ N/mm}^2$)

$$F'_{Bz} = 6,8 \text{ kN} / m \quad \text{ve} \quad I_{sz} = 46,6 \text{ kA}$$

Ilık ve soğuk kablonun izin verilen gerilme kuvveti F'_{Bz} ve aynı zamanda mekanik kısa devre kapasitesi I_{sz} , bu örneği sağlayan değerlerden daha düşüktür. Bu yüzden kablo, mekanik kısa devre dayanımını yükseltmek için bir bağlayıcı ile tutturulmalıdır.

Bağlayıcı bandı, $b = 60 \text{ mm}$ genişlik ve $\sigma^* = 100 \text{ N/m}$ gerilme kuvveti ile seçilmelidir. Band, her tabakada bir şerit ile ($n_{BL} = 1$) %40 örtüşme ile iki katmana uygulanır. Bu yüzden,

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -\ddot{u} = -b \frac{40}{100} = -60 \times \frac{40}{100} = -24 \text{ mm}, \\ B &= n_{BL} (b + \varepsilon) = 1(60 - 24) = 36 \text{ mm}, \\ d_{BM} &\approx 2,15 d_M = 2,15 \times 32 = 68,8 \text{ mm}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w' &= \frac{n_L \times n_{BL}}{B \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{\pi d_{BM}}{B} \right)^2 - 1}}} \\ &= \frac{2 \times 1}{36 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{\pi 68,8 \times 10^{-3}}{36 \times 10^{-3}} \right)^2 - 1}}} \\ &= 54,8 / m \end{aligned}$$

ve

$$F'_{Bz} = w' \sigma^* b = 54,8 \times 100 \times 10^2 \times 60 \times 10^{-3} = 39,2 \text{ kN} / m.$$

İşletme sıcaklığında kablonun dış kılıfının izin verilen gerilme kuvveti F'_{Bz} 6,8 kN/m'dir ve bu yüzden ılık kablonun mekanik kısa devre kapasitesi:

$$\begin{aligned}
I_{sz} &= \sqrt{\frac{2\pi a}{\beta\mu_o} \sum F'_{Bz}} \\
&= \sqrt{\frac{32 \times 10^{-3}}{0,5 \times 0,2 \times 10^{-6}} (32,9 + 6,8) 10^3} \\
&= 112,7 \text{ kA}
\end{aligned}$$

olur.

4.3 TEK DAMARLI KABLolar VE TUTTURMA YÖNTEMLERİ

4.3.1 Genel

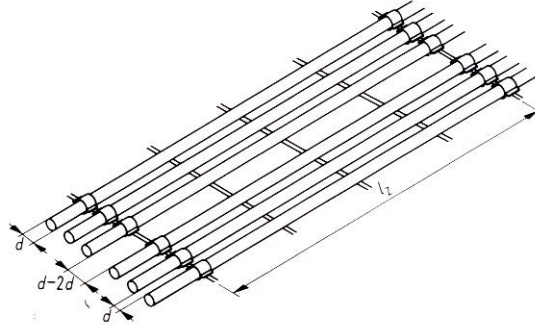
DIN VDE 0298 Bölüm 2 “tek damarlı kabloların maksimum kısa devre akımlarının etkilerine dayanmak için güvenli olarak tutturulmalarını şart koşar, yani kısa devre altında meydana gelen zorlamalara karşı dayanmalıdır, kablo veya tutucu elemanlar zarar görmeden aynı konumda kalmalıdır [2, 4]. Eğer bir tesisatta yüksek kısa devre akımları bekleniyorsa o zaman her kısa devreden sonra bağlantı düzenlemeleri gözden geçirilmelidir. Bağlantılar düzenli aralıklarla kontrol edilmelidir.

Normal olarak kablolar üçgen yerleşimde döşenir. İzleyen kurallar aynı zamanda araya sokulan üç damarlı kablolar için de uygulanır. Tek düzlemde yan yana döşendiği zaman yük kapasitesi artabilir fakat daha çok bağlantılar veya kelepçeleme ve boşluk gereklidir. Eğer geniş enine kesit alanlı yüksek gerilimli kabloların yük kapasitesi tam kullanılırsa, bir düzlemdeki döşeme kılıfların/ekranların tek noktada bağlanması veya çapraz bağlanması ile kılıf/ekran kayıplarının azaltılması ile sağlanır [10-12].

Yan yana döşenen kablolar kablo kelepçeleriyle tutturulur. Kelepçe hiçbir tek damarlı kablo üzerinde manyetik bir devre meydana getirmemelidir, aksi takdirde histerizis kayıpları oluşur ve kabloda ek ısınma oluşur (Şekil 4.5).

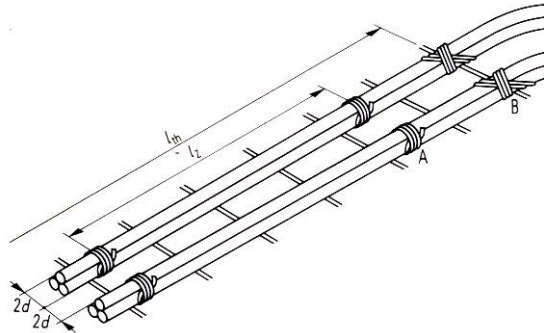
Eğer raflardaki kelepçeler birbirlerine yakın aralıkta ise, kablonun boyuna genişleme kuvvetleri, periyodik yüklenme akımlarına ve kısa devre akımlarına bağlı olarak, özellikle dalgalı döşemenin olduğu yerde tamamen birbirine uygun hale getirilemeyebilir, kablo raf içinde kelepçeler yoluyla taşınır.

Kablo demeti için kelepçeler veya bant sargı kullanılabilir (Şekil 4.6). Rafa koyma bağlantı ve sapması, sıcaklık çevrimi ve kısa devre boyuna genleşme düşüncesiyle Bölüm 3.7.1’de belirlenmiştir. Tutturucular ve kelepçelerin kullanımıyla kabloların demetlenmesi aşağıda gibi uygulanır



Şekil 4.5 Yan yana döşenmiş ve kablo rafına manyetik olmayan kelepçelerle bağlanmış bir damarlı kablolar. VDE 0298’e göre kablo rafının atkıları üzerine izin verilen en büyük tutturma açıklığı $l_2 \leq 1,5$ m olmalıdır [2].

- l_{th} : Kablo rafına tutturma açıklığı
- A : Band sargı veya kablo kayışı
- B : Çapraz band sayı veya tutucu kelepçe



Şekil 4.6 Üçgen bohçalanmış ve kablo rafına tutturulmuş bir damarlı kablolar $l_2 \leq 30$ d olmalıdır.

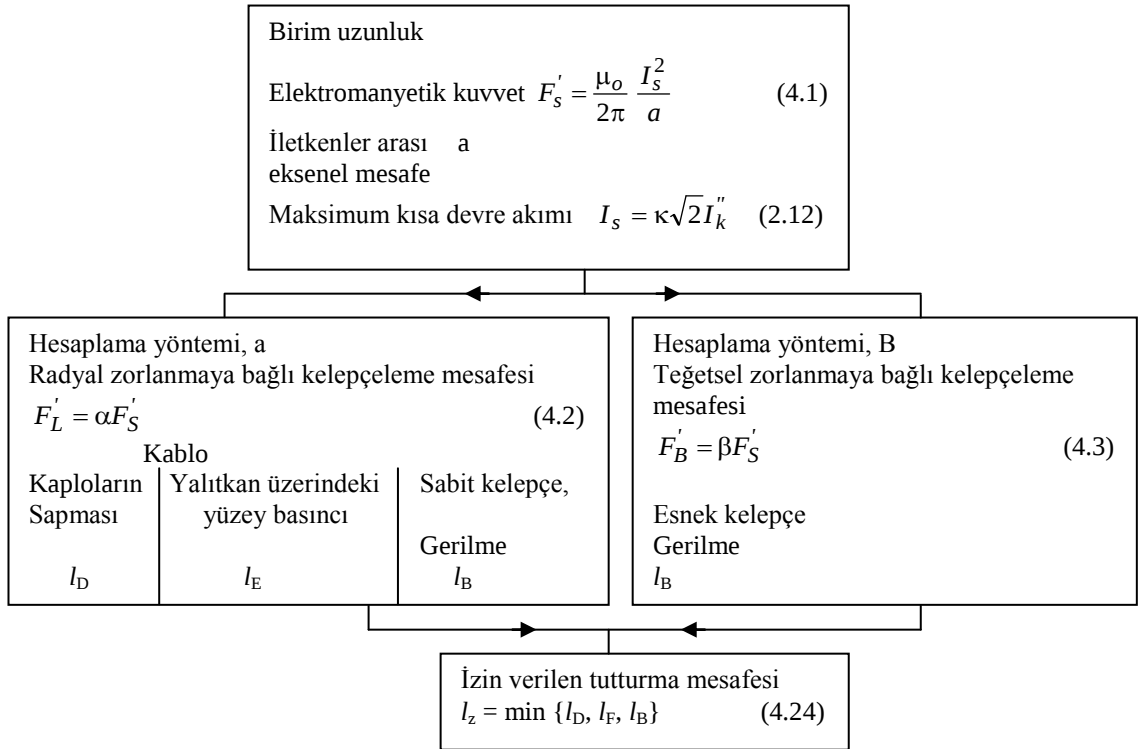
Tutucular arasındaki mesafeler, örneğin kelepçeler, bant sargılar veya bağlar arasındaki mesafeler 3 kritere göre belirlenir (Şekil 4.7):

1. Tutturma noktalarında kabloların düğümlenmesiyle oluşan zarardan kaçınmak için tutturma noktaları arasında izin verilen Δ sapma aşılmamalıdır. Kablonun her uçta kelepçelenmiş sabit bir çubuk gibi olduğu ve tüm uzunluk boyunca birim uzunluk kuvveti F'_L ile düzgün yüklendiği düşünülür.

2. Ayrıca başka bir kriter ise yüzey basıncı ve iletkenin mümkün yer değiştirmesidir. Bu birim uzunluktaki dağılmış F'_L kuvveti ile ilgilidir. Yumuşak yalıtımın sıkıştırılması ve sargı veya band ile tutturulması gerekir.

3. Son olarak kelepçelerin veya sargıların mukavemeti düşünülmelidir çünkü bunlar çekmede zorlanırlar.

Yukarıdaki kriterlerin sonucunda mesafelerin en küçüğü seçilir.



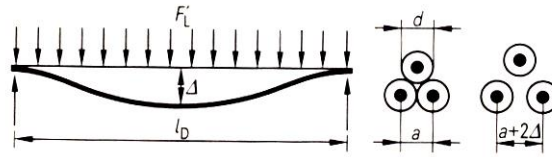
Şekil 4.7 Tek damarlı kablolar için minimum tutturma mesafesi l_z 'in hesaplanması

4.3.2 Bükme Zorlaması

Her iki uçtan tutturulmuş bir çubuk için hesaplama yöntemini kullanmak ve böylece enine sapmayı bir kriter olarak belirlemek kablolar ile genel uygulamadır. Polimer yalıtkanlı kablolar için izin verilen sapma, kelepçeleme uzunluğunun (l_D) yaklaşık %5'i olduğu deneylerden saptanmıştır. Metal kılıflı kablolar için miktarlar minimum

bükme yarı çapı kullanılarak VDE 0298 Bölüm 1 Tablo 4'e göre hesaplanmıştır ve bunlar lineer ölçüye çevrilmiştir [2]. Kısa devre altında bütün yapı tipleri için kabloyu belirtilmiş izin verilen bükme yarı çapından daha keskin bükülmekten kaçınmak gerekirse, o zaman Tablo 4.1'e göre kablonun çapının altı katı kelepçeleme mesafesi kullanılmalıdır.

Kelepçeleme mesafesine bağlı olarak bir kablo mekanik olarak bir çubuk ve ip arasında düşmesine göre sınıflandırılabilir. Salınlı davranış küçük bir sonuçtur ve bu yüzden ihmal edilebilir.



Şekil 4.8 Δ saptması tutturma mesafesi ile ilgilidir.

Yapı tipine bağlı olarak değişecek olan bükme sağlamlığını düşünmek için kablo, yapıdaki önemli elemanların J_0E ürünlerinin toplamı ile gösterilir. Elemanların J_0 ataletinin eksenel momentleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.

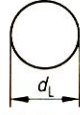
Malzemelerin Tablo 4.2'de listelenen E-sabit değer miktarları bu metaller haricinde değerlendirilmiştir.

Başlı başına yapı elemanlarının arasındaki sürtünmenin etkisi, örneğin spiral yapı bölümleri ve bükülmüş iletkenlerin sıkıştırılması, göz önüne alınmamıştır.

Tablo 4.1 İzin verilen Δ saptması ve l_{Dmin} en küçük tutturma mesafesi [2]

Ölçü	Kabloların tipi		
	Polimer yalıtkanlı kablolar	Emprenye edilmiş kablolar	
		Kurşun kılıf veya alüminyum kılıf	Yumuşak alüminyum kılıf
VDE 0298, bölüm 1, Tablo 4'e göre minimum yarı çapı	15d	25d	30d
Tuturma mesafesinin % olarak izin verilen Δ saptması	%5	%3	%2,5
Minimum tutturma mesafesi l_{Dmin}	6d		

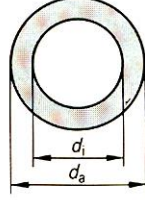
Silindir: Katı iletken



$$J_0 = \frac{\pi d_L^4}{64}$$

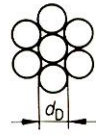
İçi boş silindir:

Yalıtkan, metal kılıf, dış kılıf



$$J_0 = \frac{\pi (d_a^4 - d_i^4)}{64}$$

Paralel silindirler



$$J_0 = \frac{\pi n_D d_D^4}{64}$$

n_D Tel sayısı

Dairesel iletken



$$J_0 = \frac{q_n^2}{4 \pi n_D}$$

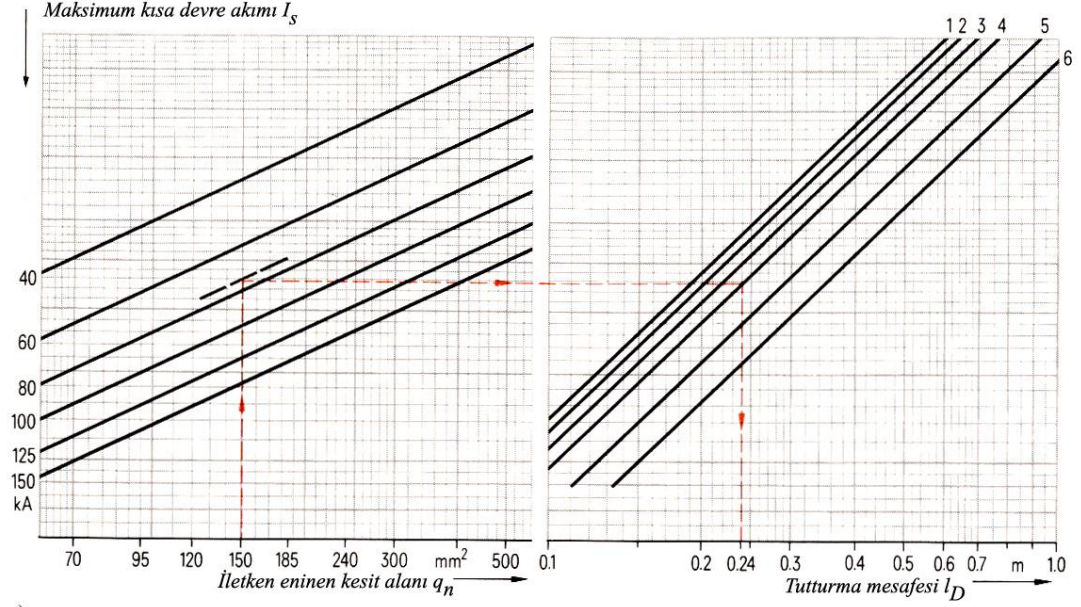
n_D Tel sayısı

q_n Anma enine kesit alanı

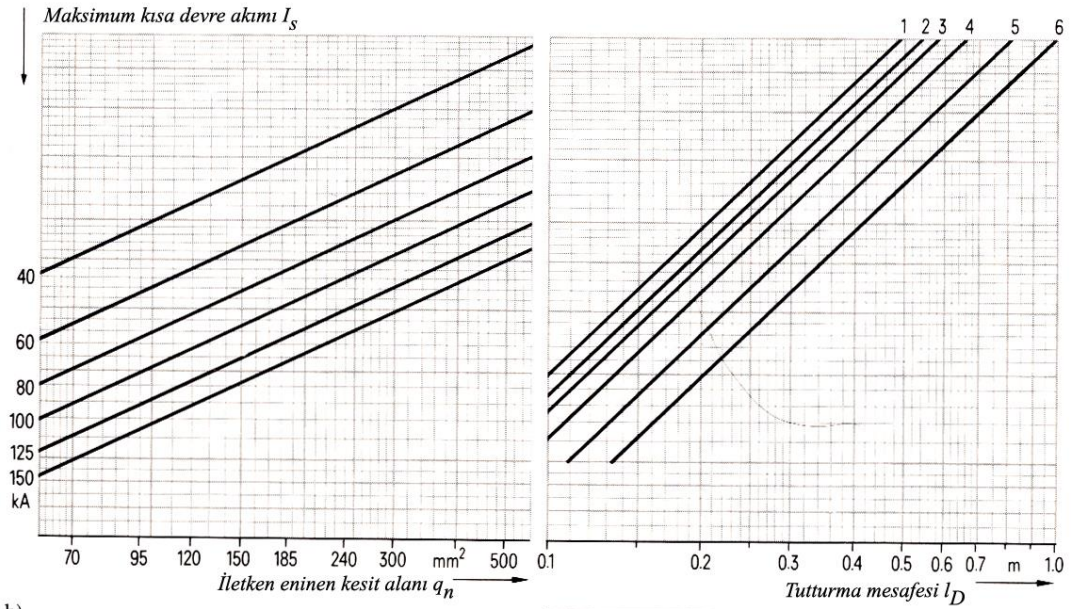
Şekil 4.9 İletkenin ve kaplamaların J_0 ataletinin eksenel momentinin hesaplanması (iletken teller arasındaki sürtünme ve ihmal edilmiştir)

Tablo 4.2 Kablo yapısında kullanılan malzemelerin esneklik modülleri

Malzeme	Esneklik modülü E N/mm ²
Bakır	115000
Alüminyum	65000
Kurşun	17000
PVC yalıtkan	10
PVC kılıf	100
PE yalıtkan	500
PE kılıf	500
XLPE yalıtkan	500



a)



b)

Eğri	PVC kablolar	XLPE kablolar
1	0.6/1 kV	0.6/1 kV
2	3.6/6 kV	—
3	6/10 kV	3.6/6 kV
4	—	6/10 kV
5	—	12/20 kV
6	—	18/30 kV

Şekil 4.10 Üçgen şeklinde demetlenmiş tek damarlı kablolar için yapıya ve maksimum kısa devre akımı I_s 'e bağlı olarak, sapma Δ 'ya bağlı tutturma mesafesi l_D

a) Bakır iletken

b) Alüminyum iletken

Eğer bir F_L' kuvvetli l uzunluğunda her iki uçtan da bağlanmış bir çubuk boyunca düzgün olarak dağılmış ise, çubuğun merkezindeki maksimum Δ sapması (Şekil 4.8):

$$\Delta = \frac{F_L' l^3}{384 \sum J_o E} \quad (4.15)$$

$$k' = \frac{\Delta}{l}$$

sapmaya bağı olarak izin verilen bağlantı mesafesi

$$l_o = \sqrt[3]{\frac{384(\sum J_o E)k'}{F_L'}} \quad (4.16)$$

Çubuğun uzunluğu boyunca ölçülen sapma

$$\Delta_m = 0,53\bar{\Delta} \quad (4.17)$$

Etkili kuvvet aynı zamanda düzeltilmiş mesafeyle de hesaplanabilir.

$$a_k = a + 2 \times 0,53 \bar{l}_D k' \quad (4.18)$$

Ve sapmaya bağı olarak izin verilen bağlantı mesafesi

$$l_D = \sqrt[3]{\frac{384(\sum J_o E)k' a_k}{F_L' a}} \quad (4.19)$$

Bu üçüncü dereceden denklemin sonuçları

$$q^2 + p^3 \geq 0 \text{ için} \quad -q + \sqrt{q^2 + q^3} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^3 + p^3}},$$

$$q^2 + p^3 \geq 0 \text{ için} \quad \lambda_D = 2\sqrt{-p} \cos \frac{\varphi}{3},$$

$$\varphi = \arccos \frac{q}{p\sqrt{-p}}$$

$$q = \frac{l_o^3}{2} \text{ ile ve} \quad p = -l_o^3 2 \times 0,53 \frac{k'}{3a}$$

Genellikle kullanılan polimer yalıtkanlı kablolar için (4.19) no'lu denklemin sonuçlarının değerlendirilmesi Şekil 4.10'da gösterilmiştir.

4.3.3 Yüzey Basıncı F_F

Polimer yalıtkanlı kabloların sıcak basınç davranışı, deformasyonla sonuçlanmayan sadece sınırlandırılmış bir yüzey basıncına izin verir. 240 mm^2 'lik enine kesit alanlı, 4 mm yalıtkan kalınlığı olan 10 kV PVC kabloları üzerinde yapılan kısa devre deneylerinden, iletken sıcaklığının 70°C 'den 160°C 'ye yükseldiği yerde 5 N/mm^3 'lük izin verilen özgül alan basıncı σ_F ayarlanmıştır. Referans alan, iletkenin çapının (d_L) kelepçenin b genişliğine karşı kuvvetin yönündeki yalıtkan izdüşümünden belirlenir. Bundan başka referans değer δ_I yalıtkan kalınlığıdır [2].

Yüzey basıncını elde etmek için, izin verilen anma özgül yüzey basıncı yalıtkan kalınlığı ile çarpılır; böylece deformasyon yeni de oluşur – büyüklüğü yalıtkan kalınlığına bağlıdır.

Başka yalıtkan tipleri henüz bulunmamıştır. Emprenye edilmiş kablolar için yüzey basıncı kritik olmamalıdır. XLPE kablolar için 6 N/mm^3 'lük bir değer güvenle kabul edilebilir [2].

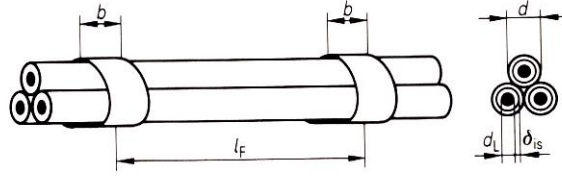
Bağlantı bölgesinde F_L' kuvveti, yalıtkan üzerinde basınca neden olur. Yalıtkan malzemesinin izin verilen özgül basıncı σ_F aşılmamalıdır. Eğer F_{Fz} maksimum izin verilen basınç ise, σ_F 'den ve b kelepçe alan genişliğinden hesaplanabilir (Şekil 4.11):

$$F_{Fz} = \sigma_F \delta_I d_L b, \quad (4.20)$$

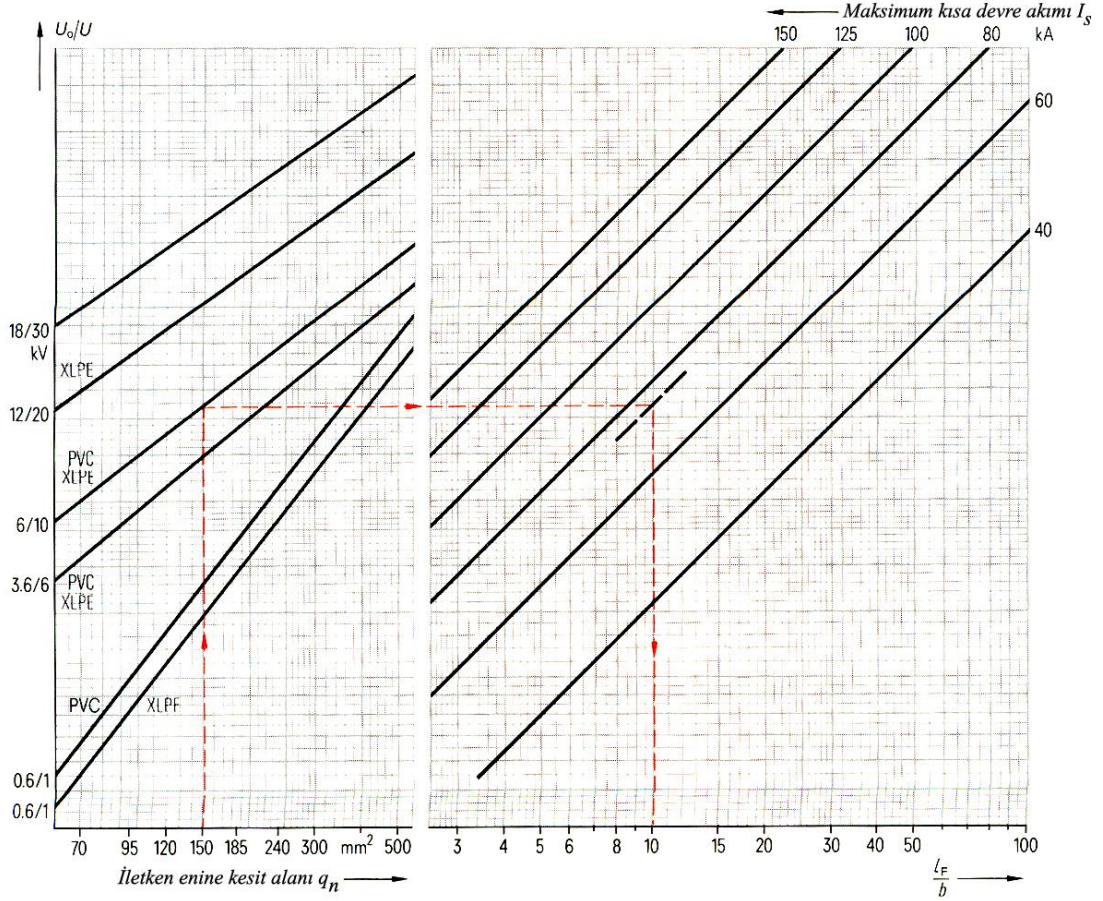
Buradan l_F tutturma mesafesi yüzeysel basınca bağlı olarak

$$l_F = \frac{F_{Fz}}{F_L'} = \frac{\sigma_F \delta_I d_L b}{F_L'} \quad (4.21)$$

bulunur. (4.21) no'lu denklemin sonuçları, çoğunlukla en çok kullanılan polimer yalıtkanlı kabloları göre, Şekil 4.12'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 İzin verilen yüzey basıncı F_{Fz} 'in tutturma mesafesi L_f ile değişim:



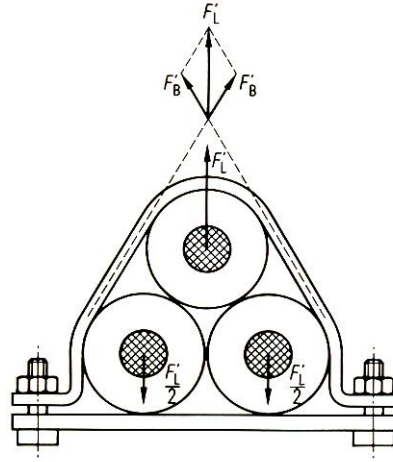
Şekil 4.12 Üçgen bohçalanmış tek damarlı kablolarda kablo yapısı ve maksimum kısa devre akımı I_s göz önüne alınarak, izin verilen yüzey basıncı F_{Fz} 'e bağlı olarak tutturma mesafesinin kelepçe veya bandaj genişliğine oranı.

4.3.4 Kelepçelerin ve Bağlayıcıların Zorlanması

Kelepçeler ve bağlayıcılar, kısa devre altında, radyal kuvvetler (F'_L) ve teğetsel kuvvetler (F'_B) tarafından zorlanırlar. Şekil 4.13'te bu kuvvetlerin etkileri üst kablodaki acil tepe akımı için gösterilmiştir. Üst kablo radyal kuvvet F'_L 'nün etkisi

altında kalır ve alt kabloların her biri $F'_L/2$ radyal kuvvetin etkisi altında kalır ki kuvvetler dengesi sonuçlanır. Kısa devre kuvvetleri, kelepçeyi zorlar ve bu deformasyona veya kırılmaya yol açabilir [2].

$F'_L/2$ kuvveti, gerilmede, Şekil 4.13'te gösterilen iki bağlantı civatasında, aynı miktara sonuçlanır. Üst üzengide ve alt plakada, F'_B teğetsel kuvvetine bağlı olarak gerilme zoru bulunur. Kuvvetlerin yönü, üzengi içinde de Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13 Üzengi kelepçesindeki kısa devre kuvvetleri

Normal olarak üzengi kelepçeleri radyal kuvvetler tarafından zorlanırlar. Mukavemetleri veya izin verilen gerilmeleri F_{Lz} , bu kuvvete göre gösterilmiştir. Karşılık bağlantı mesafesi:

$$l_B = \frac{F_{Lz}}{F'_L} \quad (4.22)$$

Bağlayıcılar ve şerit kelepçeler, teğetsel kuvvet F'_B tarafından zorlanırlar. Eğer Şekil 4.13'de üzengi ve taban plakasının bir bağlayıcı ile yer değiştirirse bu düşünülebilir. Uygun bağlantı mesafesi:

$$l_B = \frac{F_{Bz}}{F'_B} \quad (4.23)$$

Eğer diğer tüm kriterler hesaba katılarak l_z en küçük bağlantı mesafesi ise

$$l_z = \min \{l_D, l_F\} \quad (4.24)$$

o zaman izin verilen gerilme dayanımı kuvveti F_{Bz} 'e sahip bağlayıcı veya band katmanlarının sayısı

$$w = l_z = \frac{F'_B}{F_{Bz}} \quad (4.25)$$

Polyester band yapıştırıcı takviyeli fiberglas her zaman UV dirençli veya hava dirençli veya hava dirençli değildir ve bu yüzden yüksek nemli dış veya iç mekanlarda kullanımı uygun değildir. Yapışkan maddeler ve bandlar yapıştırıcı mukavemetlerini kaybederler. Bağlayıcıların sabit kontrolü ve düzenli aralıklarla yenilenmesi bu yüzden gereklidir.

Bakır ve çelik şeritler, kabloları tavalara doğrudan tespiti için uygun değildir. Eğer kablolar kısa devre kuvvetleri tarafından eksenel yönde hareket ettirilirse, şeritler dış kılıfı kesebilir. Bu yüzden bu şerit demetleme bileşenleri olarak kullanım için uygundur [13, 14].

Üzengi kelepçeleri kısa devre kuvvetlerine dayanmak için şekillendirilmiştir ve kablo eksenini taraflarında eksenlenen kenarları vardır. Bunlar hava değişikliğine dirençlidir ve dış mekanlarda kullanım için uygundur. Hem demetleme hem de tutturucu kelepçeler mevcuttur.

Örnek 4.3: Bu örnekte aşağıdaki ana kriter sistem açma gücünün dört alanına göre belirlenmiştir: anma enine kesit alanı q_n , tutturma mesafesi l_{th} , montaj için sapma h_1 , kablo tavaşı genişliğini belirlemek için de h_2 , tutturma mesafeleri l_D , l_F , l_B ve demetleme için l_z , aynı zamanda tutturucu elemanlar seçilir.

Rijit kablo yerleşiminde 40 x 22 mm'lik C profili rayların kullanıldığı kabul edilir. Böylece üzengi kelepçeler çekiç başlı vidaların kullanılmaya güvenli bir şekilde döşenebilir. Çözümler elde etmek için ilgili diyagramlar veya eğriler kullanılır.

N2XS2Y 1x....RM/.....6/10 kV XLPE kablo için hesaplama, yatay kablo tavaları üzerinde demetlenmiş bir tesisat için yapılır. Sonuçlar 250 MVA açma gücü için

tartışılır. Termik yük, 95 mm^2 enine kesit alanı olan bir bakır iletkenin seçilmesini ister.

Kablonun termik genişmesinin dikkate alınmasında üzengi kelepçeleri raf üzerinde $1,8 \text{ m}$ 'lik l_{th} mesafelerinde gereklidir. Döşemedeki h_1 sapması, yaklaşık olarak kablo çapına eşit olan 27 mm 'dir. Raf genişliği, kablo çapının $1,7$ katına denk olan 48 mm sapma sapma için izin vermelidir (bkz. Şekil 3.16)

Bu hesaplanmış mesafe, $1,5 \text{ kN}$ olan kitleme dayanımı için belirlenir. $1,8 \text{ m}$ 'lik tutturma mesafesi 6 ile bölünebilir ve bu yüzden $0,3 \text{ m}$ 'lik bağlayıcılar için uygun bir aralıktır. Eğer üzengi kelepçeleri demetleme için de kullanılırsa, o zaman $l_z = l_D = 0,34 \text{ m}$.

Her iki mesafe de kelepçelerin merkez noktaları arasında ölçülür. 40 mm genişlikteki bir kelepçe için kelepçeler arasındaki mesafe $1,8/5 = 0,36 \text{ m}$ seçilebilir, $0,36 - 0,04 - 0,32 \text{ m}$ 'lik sapma göz önüne alınarak $0,34 \text{ m}$ 'den az olmayan bir serbest uzunluk bırakılmalıdır. Bunun için $1,8 \text{ m}$ 'lik tutturma mesafesini korumak uygundur. Örneğin tutturma mesafeleri l_b öyle seçilmiştir ki kelepçeler, maksimum izin verilen tutturma mesafesi l_z 'i aşmayan termik genişleme l_{th} mesafe üzerine eşit şekilde dağıtılmıştır.

4.3.5 Aksesuarlar

Aksesuarların kısa devre dayanımı DIN VDE 0278'e göre deneylerle kanıtlanması gerekmektedir [2, 4]. Deneyler $63,80 \text{ kA}$ ve 125 kA tepe kısa devre akımlarına göre istenmiştir. Devrelerdeki kullanım için olan aksesuarların maksimum kısa devre akımları 40 kA 'in altında ise denenmelerine gerek yoktur. Montaj için kataloglarda verilen değerler ve aksesuarlar için montaj bilgileri, örneğin "kısa devre dayanımını arttırmak" gözlemlenmelidir:

Özel önlemlerle bir aksesuarın kısa devre dayanımını arttırmak için aşağıdakiler yapılabilir:

- Kablo başlıklarında ve eklerinde sert lehim, kaynak veya kıvrıma ile eklemeler yapmak.
- Kablo uçlarında güvenliği sağlamak için V-şeklinde veya U-şeklinde şeritlerle uçları kapatmak.

- Çok damarlı kablolarda bağlantı noktalarını kuvvetlendirmek için uygun malzemedan aratutucu kelepçeler ve bandlar kullanmak, gerekirse reçine dökümle desteklemek.

5. KABLOLARDA KISA DEVREYE KARŞI KORUMA

Kısa devre koruma düzenleri, bir devredeki iletkenlerde iletken yalıtkanına, bağlantılara ve kabloların çevrelerine zarar verebilecek sıcaklıklara sebep olmadan önce kısa devre akımlarını kesmek için kullanılır.

Bir koruma düzeninin kesme kapasitesi, tesis yerindeki bir kısa devre tarafından üretilen en yüksek akıma en azından eşit olmalıdır. Yukarıda sözü edilen koşula uygun olarak seçilen bir aşırı akım koruma düzeni, kısa devre akımından az olmayan bir kesme kapasitesi ile, kabloları aşırı yük koruması gibi kısa devreye karşı korur. Eğer özel nedenlerle sistemde genel bir koruma düzeni kullanılmıyorsa; kısa devre koruma düzeni, korunacak iletkenin enine kesit alanına, devrenin uzunluğuna ve sistemin besleme tarafındaki devrenin empedansına uygun olarak seçilir [4].

G.1, G.2 ve G.3 şekilleri; VDE 0636'a göre sigortalar, VDE 0641'e göre faz koruma devre kesicileri ve VDE 0660'a göre devre kesiciler ile korunan 16 mm^2 'ye kadar olan iletkenlerin izin verilen maksimum uzunluklarını belirlemek için kullanılır [4]. Bu grafikler aynı zamanda verilen uzunluk ve kesitli iletkenlere ve devre empedansına uygun izin verilen en yüksek değeri aygıtını belirlemek için kullanılır. Ayrıca, kesitle anma kesme akımı ve büyük kesitli kablolar için maksimum kablo uzunlukları arasındaki ilişkiler tablo G.1 ve G.2'de verilen bakır ve alüminyum iletkenler için verilmiştir.

5.1 KISA DEVRE KORUMASININ YAPILMADIĞI DURUMLAR

Kısa devre korumasından, VDE 0100 Bölüm 430'a uygun olarak aşağıdaki durumlarda vazgeçilebilir [4]:

- Genel elektrik dağıtım sistemlerinde (hava hatları veya kablo şebekeleri);
- Elektrik makinaları, starterler, transformatörler, redresörler, sekonder bataryalar, panolar arasındaki birbirine bağlı uçlarda veya benzeri düzenlerde

ve enstrümantasyon devrelerinde bu gibi yerlerde kullanılan kablolar kısa devreleri karşı dayanıklıdır ve toprak arızaları bu malzemelerin çevresinde beklenmez.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezde kabloların kısa devre koşullarında davranışı incelenmiştir. Bunun için öncelikle kabloları kısaca tanıtmak amacıyla yapısı ve sınıflandırılması hakkında genel bir bilgi verilmiştir.

Kablolar için yüzde reaktans yöntemi baz alınarak kısa devre akımının hesabı yapılmıştır. Toprak-hata akımı ve etkileri incelenmiştir. Faz-toprak kısa devresi koşulunda iletken ve kılıf akımları ile yük kapasitesi hesapları yapılmıştır. Bir şebekede besleme kablosunda olabilecek en yüksek zorlanma, kablonun sonuna yakın bir yerde toprak hatasının meydana gelmesiyle olur. Eğer akım topraktan akarsa, kablonun zorlanması azalır. İletkenlerdeki maksimum zorlanma normal olarak üç fazlı simetrik kısa devrede oluşur. Toprak bağlantısı olmayan faz-faz kısa devresinde ve üç fazlı kısa devrede sadece iletkenler zorlanır. Faz-toprak hatasıyla, ya da toprak bağlantılı faz-faz kısa devresiyle veya çift toprak bağlantısı yoluyla kabloların ekran veya metal kılıfları zorlanır. Ekran veya metal kılıf üzerindeki zorlanmanın büyüklüğü, şebeke yıldız noktasının durumuna ve asimetrik kısa devre akımına bağlıdır.

Tezde kabloların kısa devre koşullarındaki davranışı, termik ve mekanik yönden incelenmiştir. Kısa devre sırasında damar iletkeni, ekran, metal kılıf ve zırh gibi iletken bölümlerde ve dolayısıyla bu iletken bölümlere bitişik yalıtkan ve koruyucu tabakalarda sıcaklık artışı olur. Olumsuz etkileri sebebiyle bu sıcaklık artışı, izin verilen bir sıcaklık artışı ile sınırlandırılmalıdır. Farklı kablolar için iletken, ekran, metal kılıf ve zırh için izin verilen kısa devre sıcaklıkları verilmiştir. Kısa devre sıcaklığının kalaylı iletkenler 200°C'yi, lehim bağlantıları için 160°C'yi aşmaması bağlantıların bozulmaması için önerilir. Kısa devre süresi ve kısa devrenin başlangıcındaki iletken sıcaklığı, kısa devre sıcaklığının artmasına yol açan önemli etkenlerdir. Bu etkenlere göre iletken, ekran ve metal kılıflar için sıcaklık değerleri verilmiştir.

Kısa devre kapasitesinin hesabı, kısa devre süresince sıcaklık artışı ve yalıtılmış iletkenlerin kısa devre ısınma hesabı adyabatik ve adyabatik olmayan, şeklinde iki farklı yöntemle yapılmıştır.

Farklı kısa devre koşulları için termik eşdeğer kısa devre akımı I_{th} hesapları yapılmıştır. Kısa devre sırasında termik eşdeğer kısa devre akımı I_{th} 'ın termik etkisi, I_{th} 'ın etkin değerine bağlıdır.

Kısa devre sırasında yüksek sıcaklık artışına bağlı olarak önemli bir iletken genleşmesi olur. Genleşme kuvveti ve sapma hesapları farklı koşullardaki kablolar için yapılmıştır. Termik genleşmenin etkileri incelenmiştir. Kablolar, boyuna genleşme kablonun tüm uzunluğu boyunca eşit olarak bölünecek şekilde döşenmeli ve korunmalıdır. Havada düz şekilde döşenmiş uzun çok damarlı kablolar, kıvrımlı bir hat boyunca ve her tutturulduğu geçiş noktasında serbest bir göz bırakacak şekilde düzenlenmelidir. Havada döşenmiş kablolar, sarmaya izin vermek için yeterli derecede büyük aralıklarla tutturulmalıdır. Kabloların döşenmesi sırasında bükülmedeki aşırı radyal zorlanmaların gelişiminden ve böylece yalıtkan ve dış kılıfa zarar vermesinden kaçınmak için minimum bükme yarıçapına uyulmalıdır. Bu yüzden kablolar bükmelerde değil, düz olduğu geçiş noktalarında tutturulmalıdır. Toprağa döşenmiş kablolar için veya kabloların havada kısa aralıklarla tutturulduğu yerlerde, kablo ekleri üzerine düşen kuvvetlerin etkisini önlemek için önlemler alınmalıdır.

Sapmayı tolere etmek için kablo tavaları üzerinde yeterli boşluk bırakmalıdır. Kablo tavasının genişliğini belirlemek için tam yük altındaki sarmaya, izin verilen işletme sıcaklığına erişildiği durumu göz önüne alarak karar vermelidir.

Kısa devre akımının mekanik etkileri, termik etkilerine göre daha az bilinmektedir. Tezde, literatürden yararlanarak, mekanik kuvvetlerin hesabı için deney sonuçlarının yardımı ile hesaplama yöntemleri ile bağlantılı bir açıklama verilmiştir.

Kısa devreden dolayı oluşan elektro-manyetik kuvvetler; aksesuarlar, kablolar ve bağlantı elemanları boyutlandırılırken göz önüne alınmalıdır.

İletkenlerde oluşan akım kuvveti, kısa devre akımının karesi ile artar ve iletkenler arası açıklığın artışı ile azalır. Tüm mekanik kuvvetler, tek damarlı ve çok damarlı

kablolar için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çok damarlı kablolarda yüzey basıncı zorlanmaları, tek damarlı kablolarinkinden daha azdır.

Tezde verilen tüm hesaplamalar, sayısal örneklerle desteklenmiştir. Son bölümde ise kablolarda kısa devreye karşı koruma düzenleri için gerekli bilgiler verilmiştir.

Sonuç olarak; kablo tesislerinin planlamasında kabloların ve kablo donanımlarının termik ve mekanik kısa devre zorlanmaları bakımından yeterli olup olmadıklarına bakmak gerekir.

KAYNAKLAR

- [1] **Saner, Y.**, 1998. Güç (Enerji) Dağıtımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [2] **Heinhold, L.**, 1990 (3.Ed). Power Cables and Their Application, Part 1, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin.
- [3] **Jones, E.**, 1993. Power Cable Installation Practice, Butterworth-Heinemann Ltd.
- [4] **Seip, G.**, 1987 (2.Ed). Electrical Installations Handbook, Part 2, Siemens, Berlin.
- [5] **Eichhorn, K.F.**, 1989. Short-circuit heating of insulated conductors, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 2, 873-877.
- [6] **Ruger, W., Hosemann, G.**, 1989. Mechanical short-circuit effects of single-core cables, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 1, 68 -74.
- [7] **Barnes, C. C.**, 1966. Power Cables, Their Design and Installation, Chapman and Hall Ltd., London.
- [8] **Thue, W.**, 1999. Electrical Power Cable Engineering, Marcel Dekker, Inc. New York.
- [9] **Gönen, T.**, 1988. Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design, John Wiley and Sons, New York.
- [10] **Duncan, C., Stocks, E.**, 1991. The Installation of Cable Systems, Stam Press, Cheltenham.

- [11] **Hiranandani, A.K.**, 1989. A sensitivity approach to the sizing of insulated power cables in low and medium voltage electrical power distribution systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 3, 1521-1578
- [12] **Parise, G., Adduce, M.**, 1998. Conductor protection against short circuit current: available I* 2t evaluation, *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting*. The 1998 IEEE, **3**, 3, 2336 -2341.
- [13] **Zaninelli, D.; Ballochi, A.**, 2000. Fault analysis on AC/HV cable transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, 2, 616 -622.
- [14] **Patel, M.R.**, 2002. Instability of the continuously transposed cable under axial short-circuit forces in transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **17** 1, 149 -154.

EK A

Tablo A.1 Bir telli daire kesitli iletkenlerin çapları ve 20°C’de DA dirençleri.

İletkenin anma kesiti [mm ²]	İletkenin apı (En büyük) [mm]	20°C’de DA direnci (En büyük)	
		Yalın [Ω/km]	Metal kaplı [Ω/km]
0,5	0,9	36,0	36,7
0,75	1,0	24,5	24,8
1	1,2	18,1	18,2
1,5	1,5	12,1	12,2
2,5	1,9	7,41	7,56
4	2,4	4,61	4,70
6	2,9	3,08	3,11
10	3,7	1,83	1,84
16	4,6	1,15	1,16

Tablo A.2 çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi a olan tel sayıları, tel çapları, iletken çapları, 20°C’de DA dirençleri

İletkenin anma kesiti [mm ²]	Sıkıştırılmamış			Sıkıştırılmış			20°C’de DA direnci (En büyük)	
	Tel sayısı	Tel apı (Yaklaşık) [mm]	İletkenin apı (En büyük)	Tel sayısı	İletkenin apı		Yalın [Ω/km]	Metal kaplı [Ω/km]
					En küçük [mm]	En büyük [mm]		
0,5	7	0,30	1,1	-	-	-	36,0	36,7
0,75	7	0,37	1,2	-	-	-	24,5	24,8
1	7	0,43	1,4	-	-	-	18,1	18,2
1,5	7	0,52	1,7	-	-	-	12,1	12,2
2,5	7	0,67	2,2	-	-	-	7,41	7,56
4	7	0,85	2,7	-	-	-	4,61	4,70
6	7	1,05	3,3	-	-	-	3,08	3,11
10	7	1,35	4,2	-	-	-	1,83	1,84
16	7	1,71	5,3	-	-	-	1,15	1,16
25	7	2,13	6,6	6	5,6	6,5	0,727	0,734
35	7	2,52	7,9	6	6,6	7,5	0,524	0,529
50	19	1,83	9,1	6	7,7	8,6	0,387	0,391
70	19	2,17	11,0	12	9,3	10,2	0,268	0,270
95	19	2,52	12,9	15	11,0	12,0	0,193	0,195
120	37	2,03	14,5	18	12,5	13,5	0,153	0,154
150	37	2,27	16,2	18	13,9	15,0	0,124	0,126
185	37	2,52	18,0	30	15,5	16,8	0,0991	0,1000
240	61	2,24	20,6	34	17,8	19,2	0,0754	0,0762
300	61	2,50	23,1	34	20,0	21,6	0,0601	0,0607
400	61	2,89	26,1	53	22,9	24,6	0,0470	0,0475
500	61	2,65	29,2	53	25,7	27,6	0,0366	0,0369

Tablo A.3 Çok telli daire kesitli iletkenleri oluşturan ve incelik derecesi b ve c olan tel çapları, tel sayıları, iletken çapları, 20°C’de DA dirençleri.

İletkenin anma kesiti [mm ²]	İletkenin çapı (En büyük) [mm]	Sıkıştırılmış				20°C’de DA direnci (En büyük)	
		b		c		Yalın [Ω/km]	Metal kaplı [Ω/km]
		Tel çapı [mm]	Tel sayısı	Tel çapı [mm]	Tel sayısı		
0,5	1,1	0,21	16	0,16	28	39,0	401
0,75	1,3	0,21	24	0,16	42	26,0	26,7
1	1,5	0,21	32	0,16	56	19,5	20,0
1,5	1,8	0,26	30	0,16	85	13,3	13,7
2,5	2,6	0,26	50	0,16	140	7,98	8,21
4	3,2	0,31	56	0,16	228	4,95	5,09
6	3,9	0,31	84	0,21	189	3,30	3,39
10	5,1	0,41	80	0,21	324	1,91	1,95
16	6,3	0,41	126	0,21	53	1,21	1,24
25	7,8	0,41	196	0,21	783	0,780	0,795
35	9,2	0,41	276	0,21	1107	0,554	0,565
50	11,0	0,41	396	0,31	702	0,386	0,393
70	13,1	0,51	360	0,31	999	0,272	0,277
95	15,1	0,51	475	0,31	1332	0,206	0,210
120	17,0	0,51	608	0,31	1702	0,161	0,164
150	19,0	0,51	756	0,31	2109	0,129	0,132
185	21,0	0,51	925	0,41		0,106	0,108
240	24,0	0,51	1221	0,41		0,0801	0,0817
300	27,0	0,51	1525	0,41		0,0641	0,0654
400	31,0	0,51	2013	-	-	0,0486	0,0495
500	35,0	0,61	1769	-	-	0,0384	0,0391

EK B

Tablo B.1 F-kabloları yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Kablonun anma kesiti [mm ²]	FLL (NLH), FLL-n (NMH), FLL-nvg (NMHÖU), FVV-n (NYMHYrd), FVV-yn (NYMHYfl)	FLÖ (NSA), FV (NYZ)
0,5	0,6	0,8
0,75	0,6	0,8
1	0,6	0,8
1,5	0,6	0,8
2,5	0,7	0,9
4	0,8	1,0
6	0,8	1,0

FİV (NLYZ): 0,8 mm

FÖÖ (NYLHYrd), FVV-y (NYLHYfl): 0,5 mm

Tablo B.2 N-kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Kablunun anma kesiti [mm ²]	Anma gerilimi			
	≤1 kV		3 kV	6 kV
	NLRÖ (NPL). NV (NYA). NVV (NYAF). NVV (NYM). NVSV (-). NVOV (NYMZ). NVPV (HYBUY). NV-u (NYFA). NV-bu (NYFAF). NV-y (NYFAZ). NV-ut (NYFAFW). NV-but (NYFAFW), NV-yt (NYFAZW)	NLÖ-t (N4GA). NLÖ-bt (N4GAF). NLL (NSGAFVMÖÜ). NLL-b (SGAFVMÖÜ). İNLL-y (NIFLÖÜ). NVI (NSYA). NVI-b (NSYAF). NVI-n (NSYAW)	NLL (NSGAÖÜ). NLL-b (NSGAFÖÜ). NLLSL-b (NSGAFCMÖÜ)	NLL (NSGAÖÜ). NLL-b (NSGAFÖÜ). NLLSL-b (NSGAFCMÖÜ)
0,5	0,6	0,8	-	-
0,75	0,6	0,8	-	-
1	0,6	0,8	-	-
1,5	0,6	0,8	1,3	2,6
2,5	0,7	0,9	1,3	2,6
4	0,8	1,0	1,3	2,6
6	0,8	1,0	1,3	2,6
10	1,0	1,2	1,5	2,6
16	1,0	1,2	1,5	2,6
25	1,2	1,4	1,8	2,9
35	1,2	1,4	1,8	2,9
50	1,4	1,6	1,8	2,9
70	1,4	1,6	1,8	2,9
95	1,6	1,8	2,2	3,2
120	1,6	1,8	2,2	3,2
150	1,8	2,0	2,2	3,2
185	2,0	2,2	2,4	3,2
240	2,2	2,4	2,6	-
300	2,4	2,6	2,8	-
400	2,6	2,8	-	-
500	3,0	3,2	-	-

NVL-r (NYIF), NVV-r (NYIFY) : 1,5 mm² için 0,4 mm,
2,5 mm² için 0,5 mm,
4 mm² için 0,6 mm.

NVRV-t (NYPLYW) : 0,5 mm

İNV (NYL), İNVPV (NYLRZY) : 3,75 kV için 2,5 mm,
7,5 kV için 4,0 mm

Tablo B.3 Bir damarlı Y-kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Kablunun anma kesiti [mm ²]	Anma gerilimi													
	0,6/1 kV			3,5/6 kV			5,8/10 kV			8,7/15 kV			20,3/35	
	Yalıtkan kılıf													
	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PE	XLPE
1,5	1,5	1,5												
2,5	1,5	1,5												
4	1,5	1,5												
6	1,5	1,5												
10	1,5	1,5												
16	1,5	1,5												
25	1,5	1,5												
35	1,5	1,5												
50	1,5	1,5												
70	1,5	1,5												
95	1,6	1,6												
120	1,6	1,6												
150	1,8	1,8												
185	2,0	2,0												
240	2,2	2,2												
300	2,4	2,4												
400	2,6	2,6												
500	3,0	3,0												

Tablo B.4 Çok damarlı Y-kablolarda yalıtkan kılıfın anma et kalınlıkları [mm]

Kablunun anma kesiti [mm²]	Anma gerilimi													
	0,6/1 kV			3,5/6 kV			5,8/10 kV			8,7/15 kV			20,3/35	
	Yalıtkan kılıf													
	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PVC	PE	XLPE	PE	XLPE
1,5	0,8	0,8	0,7	-	-	-	-	-	-	-			-	-
2,5	0,9	0,8	0,7	-	-	-	-	-	-	-			-	-
4	1,0	1,0	0,7	-	-	-	-	-	-	-			-	-
6	1,0	1,0	0,7	-	-	-	-	-	-	-			-	-
10	1,0	1,0	0,7	3,4	2,5	2,5	-	-	-	-			-	-
16	1,0	1,0	0,7	3,4	2,5	2,5	-	-	-	-			-	-
25	1,2	1,2	0,9	3,4	2,5	2,5	-	-	-	-			-	-
35	1,2	1,2	0,9	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
50	1,4	1,4	1,0	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
70	1,4	1,4	1,1	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
95	1,6	1,6	1,1	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
120	1,6	1,6	1,2	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
150	1,8	1,8	1,4	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
185	2,0	2,0	1,6	3,4	2,5	2,5	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
240	2,2	2,2	1,7	3,4	2,5	2,6	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
300	2,4	2,4	1,8	3,4	2,5	2,8	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
400	2,6	2,6	2,0	3,4	2,5	3,0	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0
500	2,8	2,8	2,2	3,4	2,5	3,2	4,0	3,4	3,4	5,2			9,0	9,0

EK C

Tablo C.1 Y-kablolarda (PVC yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kabloların dışında) ortak çekme kılıfın anma et kalınlıkları.

Burulu damarların saymal üst çapı [mm]	Ortak çekme kılıfın anma et kalınlığı (Yaklaşık) [mm]
$D'_f \leq 25$	1,0
$25 < D'_f \leq 35$	1,2
$35 < D'_f \leq 45$	1,4
$45 < D'_f \leq 60$	1,6
$60 < D'_f \leq 80$	1,8
$D'_f > 80$	2,0

Tablo C.2 PVC Yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kablolarda ortak çekme kılıfın anma et kalınlıkları.

Burulu damarların saymal üst çapı [mm]	Ortak çekme kılıfın anma et kalınlığı (Yaklaşık) [mm]
$D'_f \leq 15$	0,8
$15 < D'_f \leq 25$	1,2
$25 < D'_f \leq 35$	1,5
$35 < D'_f \leq 45$	1,8
$45 < D'_f \leq 55$	2,0
$55 < D'_f \leq 65$	2,2
$D'_f > 65$	2,4

Tablo C.3 Y-kablolarda (PVC yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kabloların dışında) ortak sargı kılıfın anma et kalınlıkları.

Burulu damarların saymal üst çapı [mm]	Ortak sargı kılıfın anma et kalınlığı (Yaklaşık) [mm]
$D_f' \leq 40$	0,4
$D_f' \leq 40$	0,6

Tablo C.4 PVC yalıtkanlı 8,7/15 kV Y-kablolarda ortak sargı kılıfın anma et kalınlıkları.

Burulu damarların saymal üst çapı [mm]	Ortak sargı kılıfın anma et kalınlığı (Yaklaşık) [mm]
$D_f' \leq 25$	0,3
$25 < D_f' \leq 35$	0,4
$35 < D_f' \leq 45$	0,5
$45 < D_f' \leq 55$	0,6
$D_f' > 65$	0,7

EK D

Tablo D.1 F-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Kablunun anma kesiti [mm ²]	FLL-n (NMH) FLL-nvg (NMHÖU)							FVV-n (NYMHYrd), FVV-yn (NYMHYfl)						
	Damar sayısı													
	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
0,75	0,8	0,8	0,8	1,0	1,2	1,2	1,2	-	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
1	0,8	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	-	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0
1,5	0,8	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2	-	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2
2,5	0,8	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	-	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	1,2
4	0,8	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	-	-	-	-	-	-	-

FLL (NLH) : 0,8 mm

FVV (NYLHYrd): 0,6 mm

Tablo D.2 N-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Kablunun anma kesiti [mm ²]	NVL-r (NYIF) NVV-r (NYIFY)				NVV (NYM)					NVSV (-)			
					Damar sayısı								
	2	3	4	5	1	2	3	4	5	2	3	4	5
1,5	0,8	0,8	0,8	0,8	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
2,5	0,9	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	-
4	0,9	0,9	0,9	0,9	1,4	1,4	1,4	1,6	1,6	1,4	1,4	1,6	-
6					1,4	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	-
10					1,4	1,6	1,6	1,6	1,6				
16					1,4	1,6	1,6	1,6	1,6				
25					-	1,6	1,8	1,8	1,8				
35					-	1,8	1,8	1,8	1,8				

NLLSL-b (NSGAFCMÖU): 3,0 mm

İNLL-y (NIFLÖU) . 0,8 mm

İNVPV (NYLRZY) : 3,75 kV için 1,0 mm,

7,5 kV için 1,2 mm

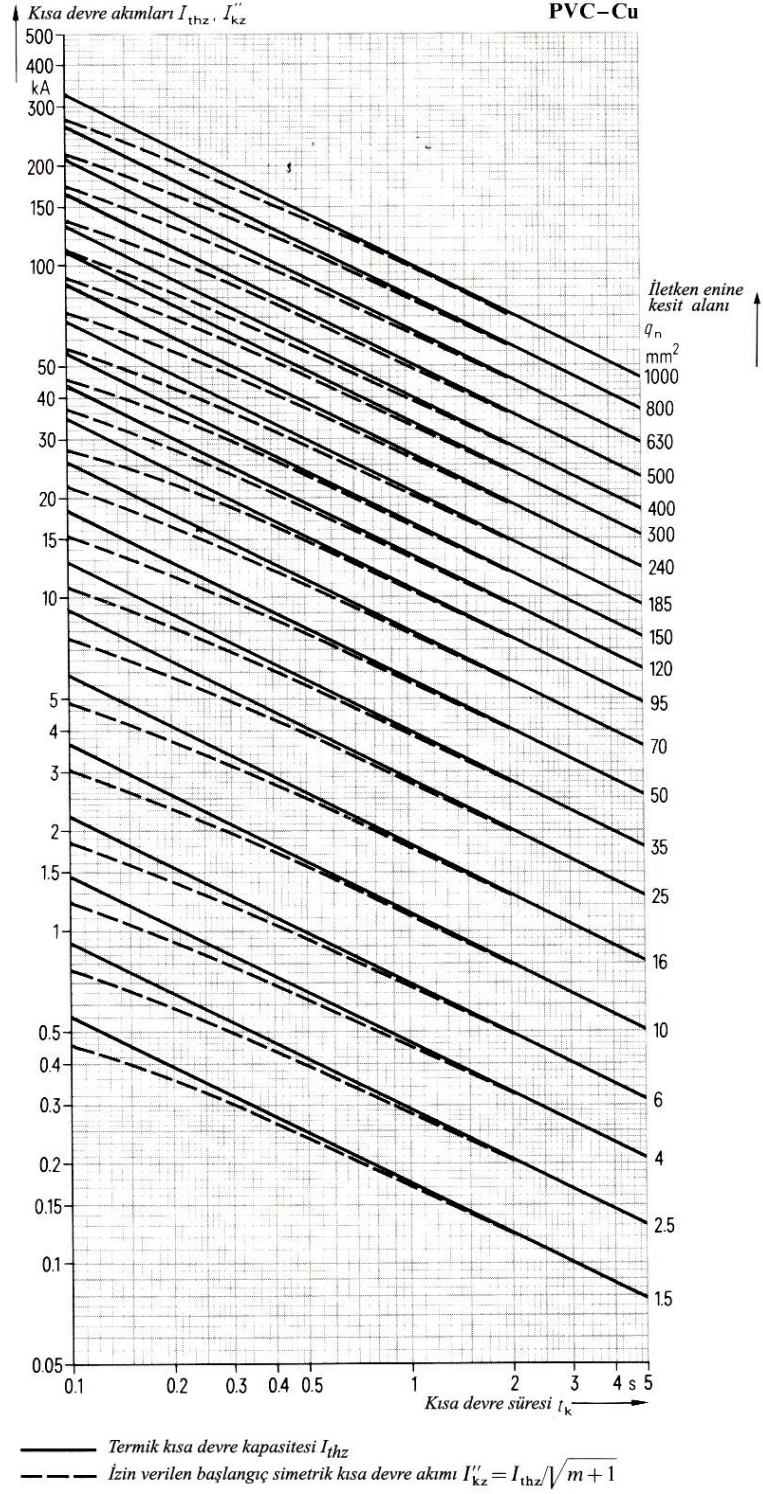
(Devam) N-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Dış kılıf altındaki saymal çap [mm]	NLL (NSGAÖÜ) NLL-b (NSGAFÖÜ)	NVOV (NYMZ)	NVPV (NYBUY)
$D' \leq 10$	0,8	1,4	1,0
$10 < D' \leq 20$	1,0	1,6	1,2
$20 < D' \leq 30$	1,2	1,8	1,4
$D' > 30$	1,4	-	1,6

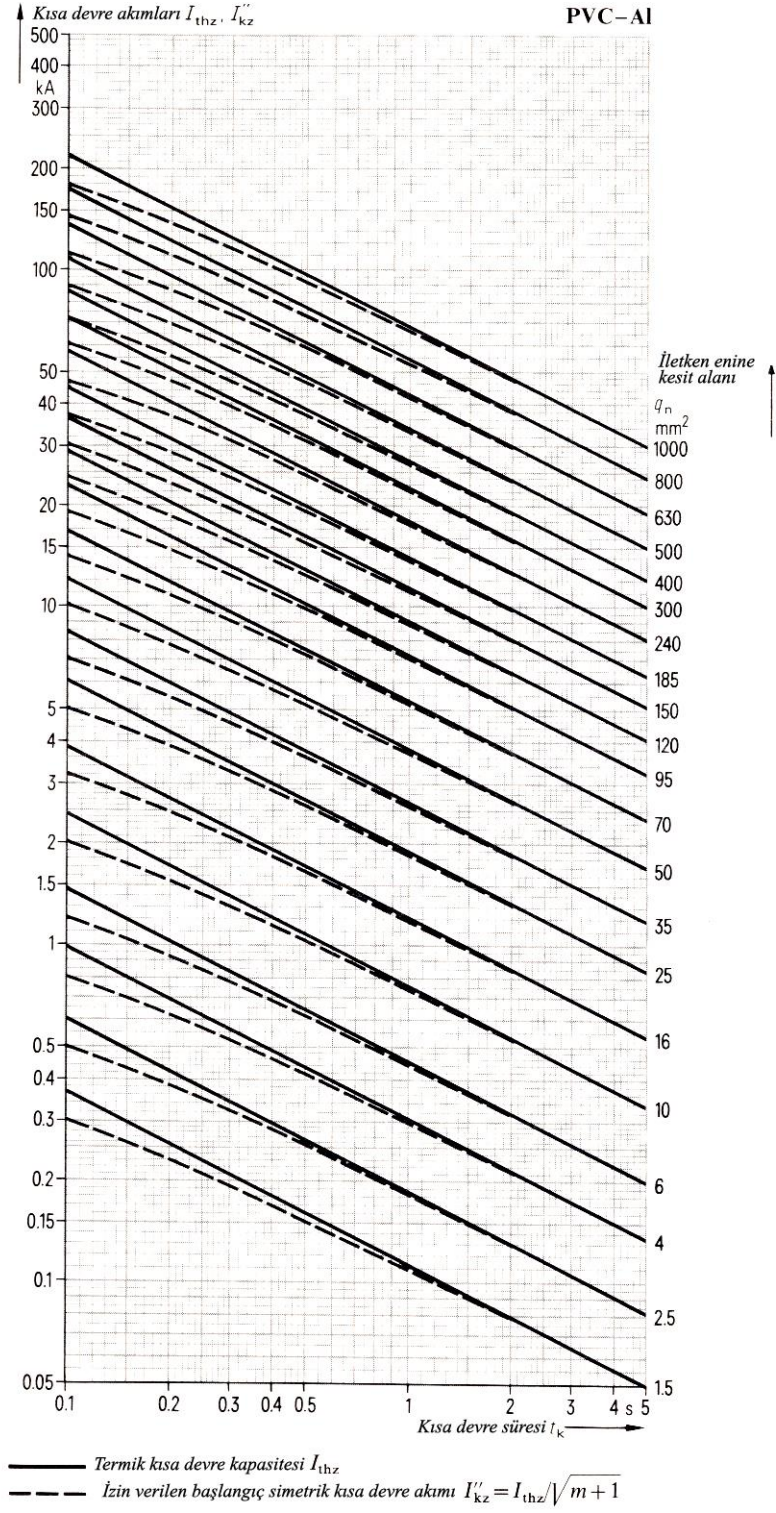
Tablo D.3 Y-kablolarda dış kılıfın anma et kalınlıkları [mm].

Dış kılıf altındaki saymal çap [mm]	Dış kılıfın anma et kalınlığı [mm]
$D' \leq 20$	1,8
$20 < D' \leq 30$	2,0
$30 < D' \leq 40$	2,2
$40 < D' \leq 50$	2,6
$50 < D' \leq 60$	3,0
$60 < D' \leq 70$	3,4
$70 < D' \leq 80$	3,8
$D' > 80$	4,0

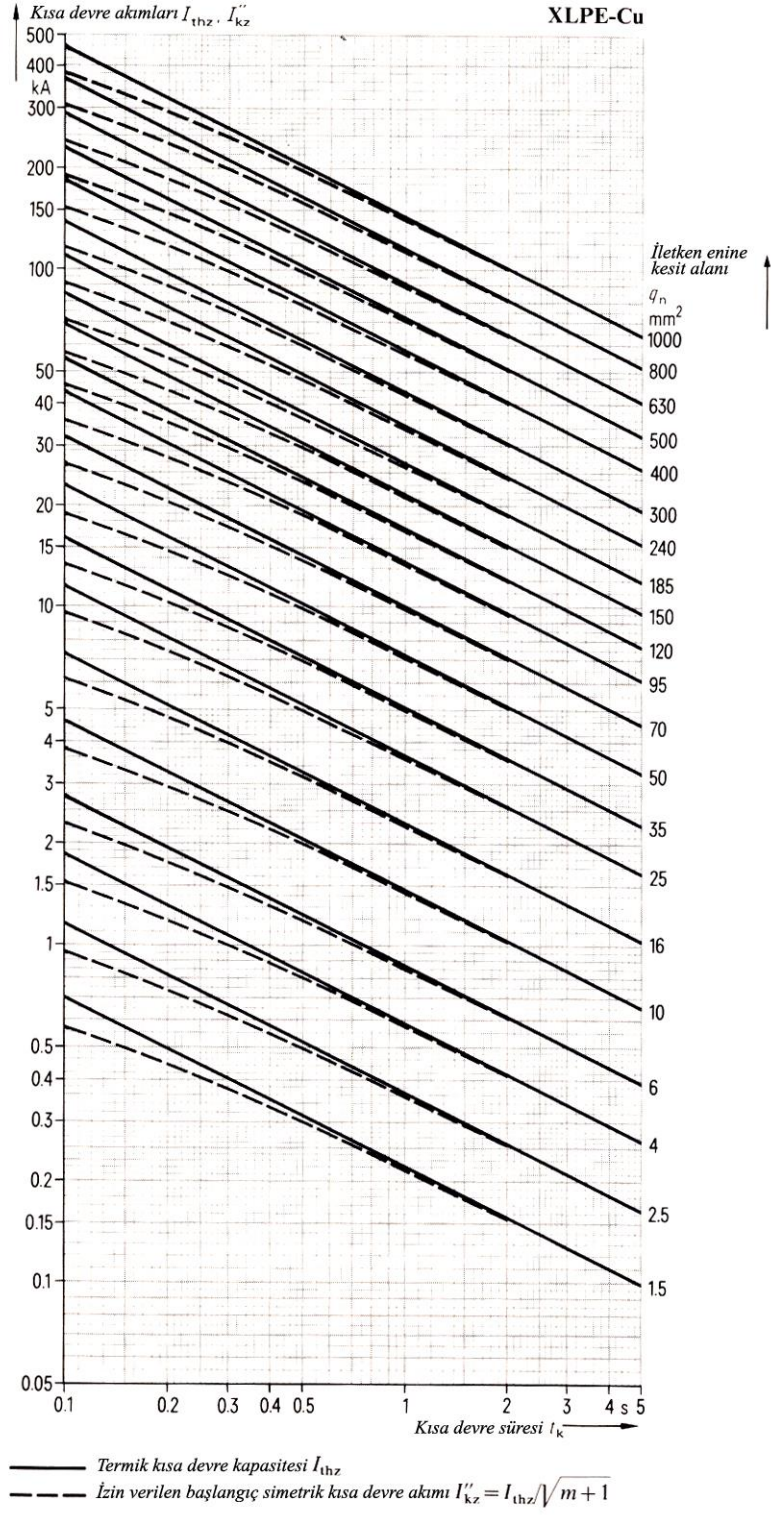
EK E



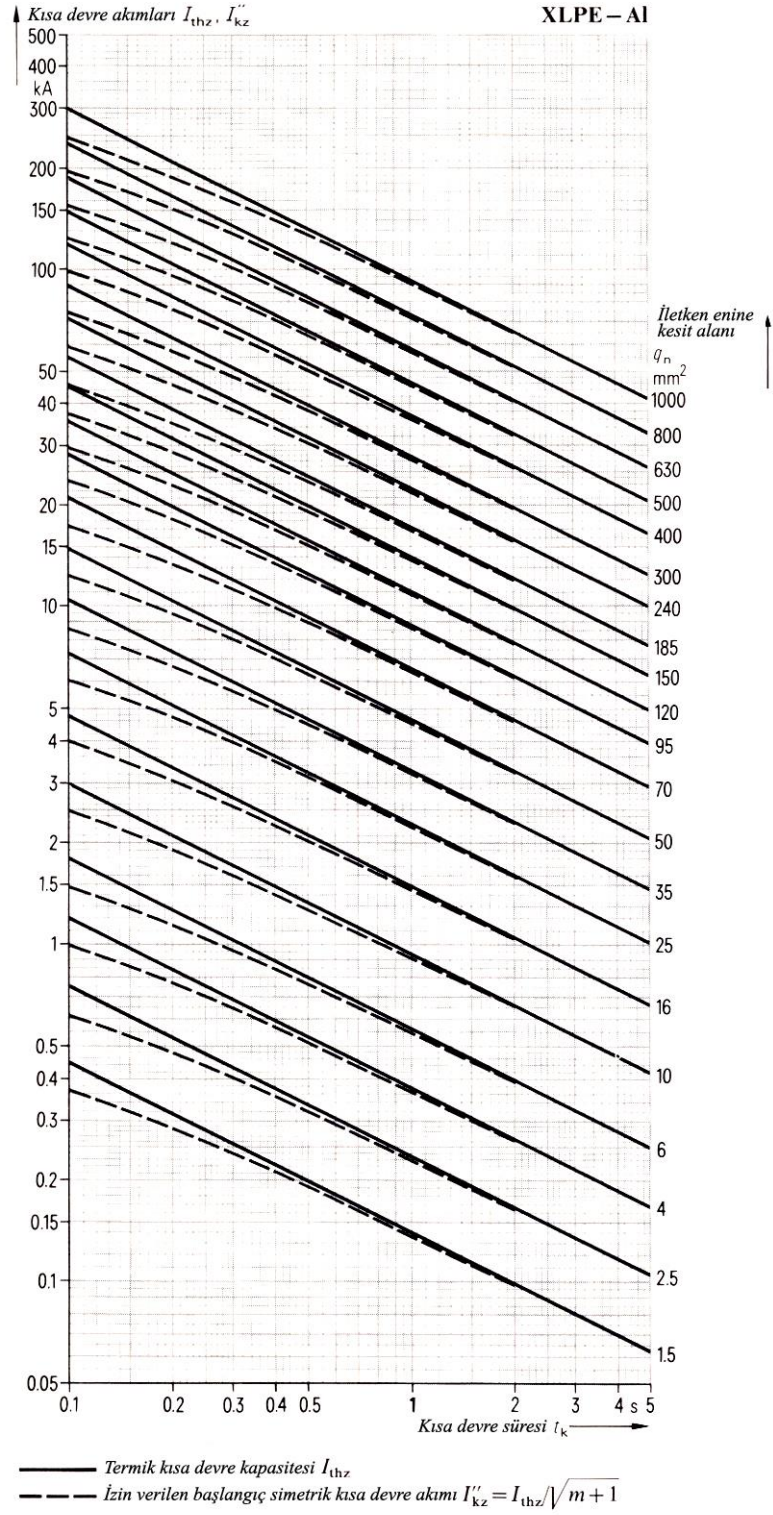
Şekil E.1 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 70^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 160$ (140) $^\circ\text{C}$ bakır iletkenli PVC kabloların kısa devre akımları



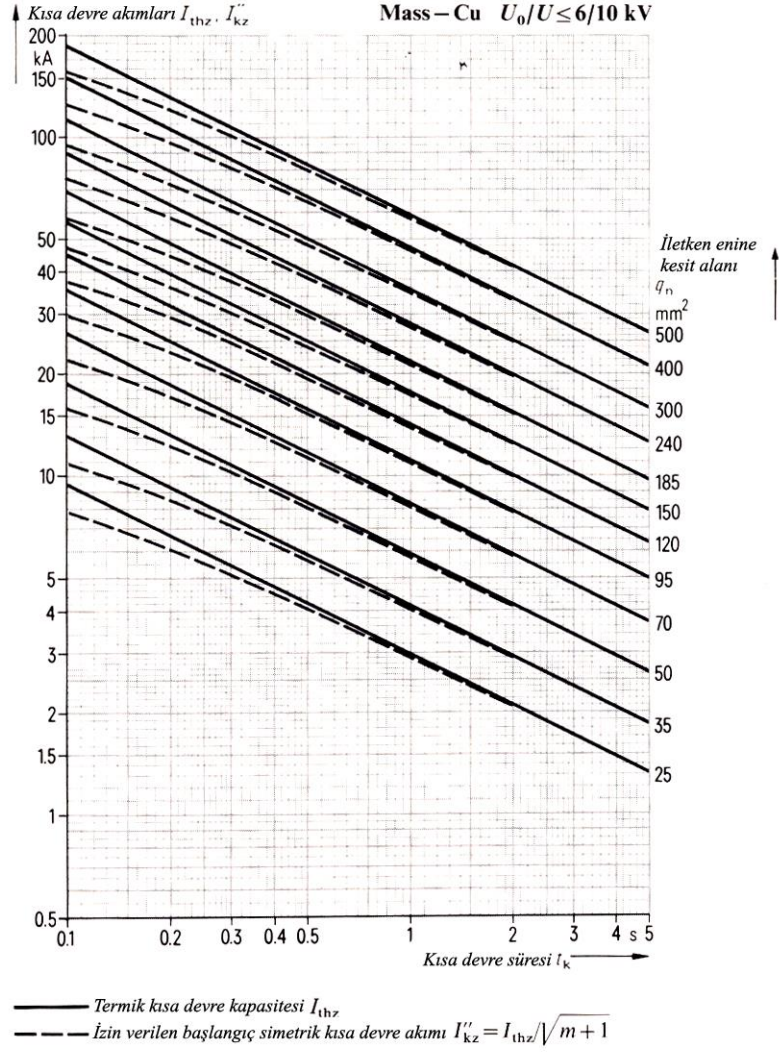
Şekil E.2 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 70^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 160$ (140) $^\circ\text{C}$ alüminyum iletkenli PVC kabloların kısa devre akımları



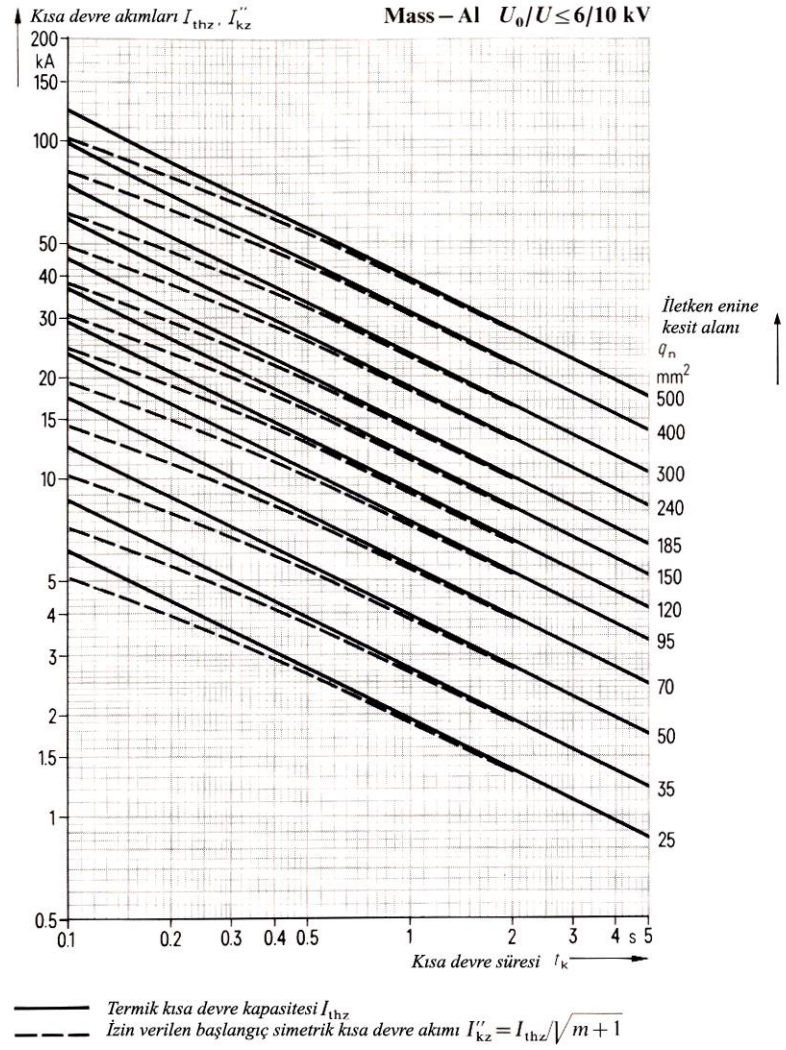
Şekil E.3 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 90^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 250^\circ\text{C}$ bakır iletkenli XLPE kabloların kısa devre akımları



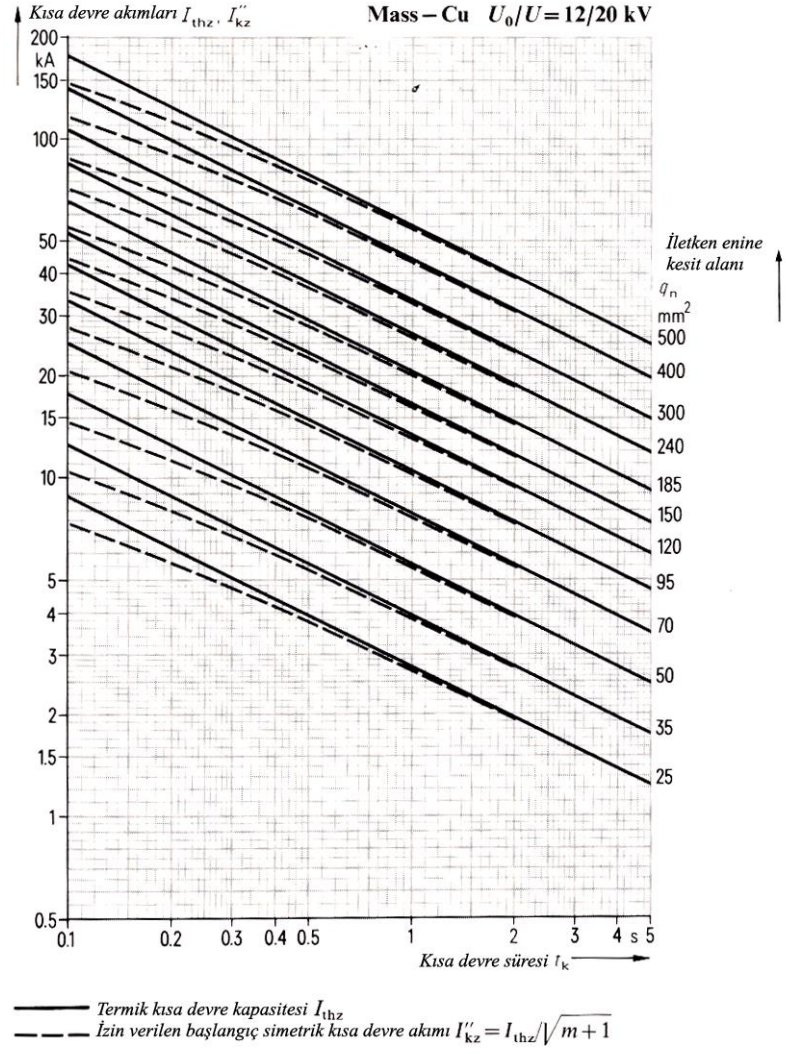
Şekil E.4 $\kappa = 1.8$, $\vartheta_a = 90^\circ\text{C}$ ve $\vartheta_e = 250^\circ\text{C}$ için alüminyum iletkenli XLPE kabloların kısa devre akımları



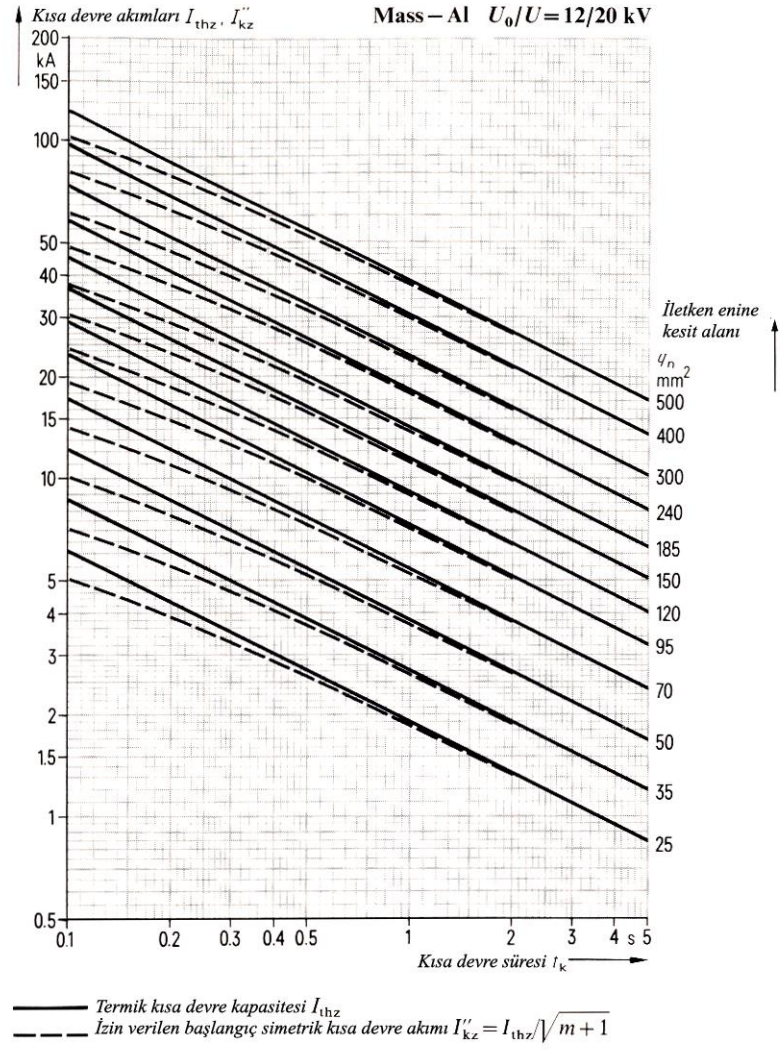
Şekil E.5 $\kappa = 1.8$, $\theta_e - \theta_a = 100$ K için 0,6/1 kV'dan 6/10 kV'a kadar bakır iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları



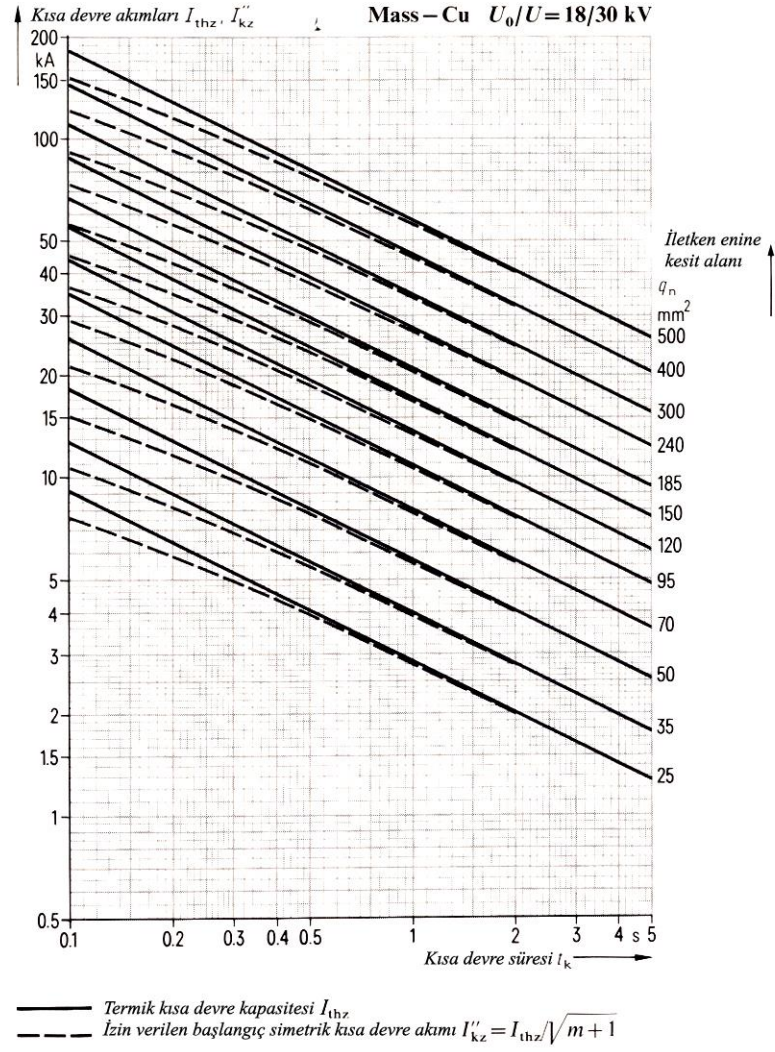
Şekil E.6 $\kappa = 1.8$, $\theta_e - \theta_a = 100$ K için 0,6/1 kV'dan 6/10 kV'a kadar alüminyum iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları



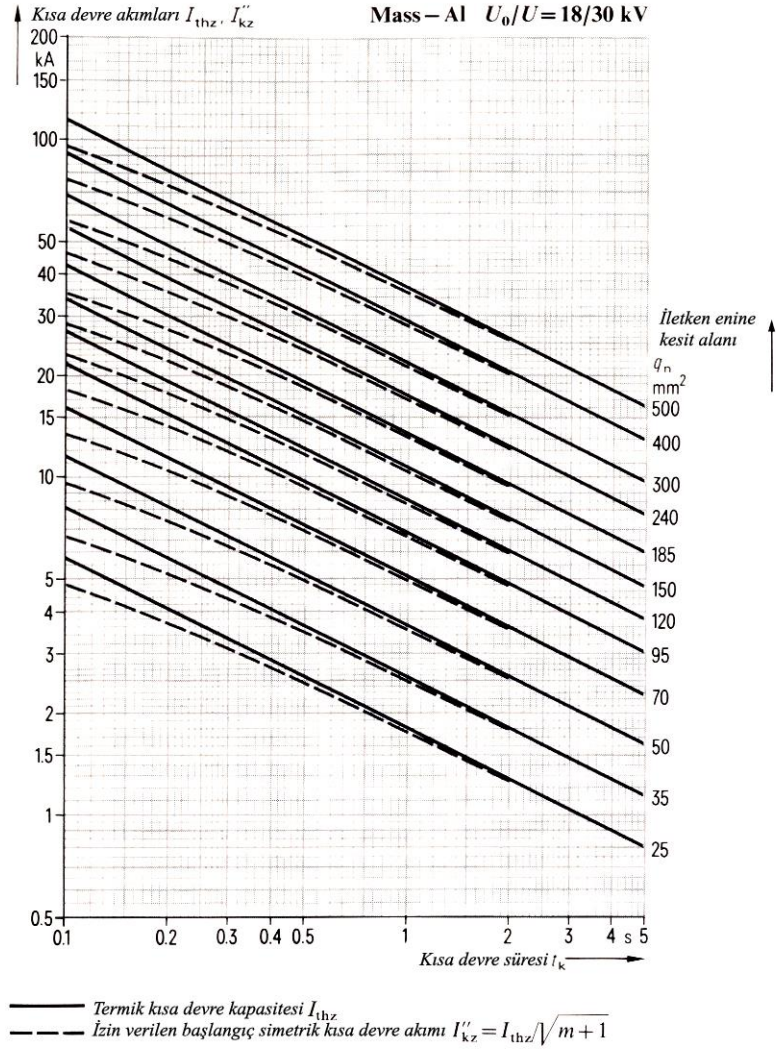
Şekil E.7 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 65^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 155^\circ\text{C}$ için 12/20 kV'lık bakır iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları



Şekil E.8 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 65^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 155^\circ\text{C}$ için 12/20 kV'lık alüminyum iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları

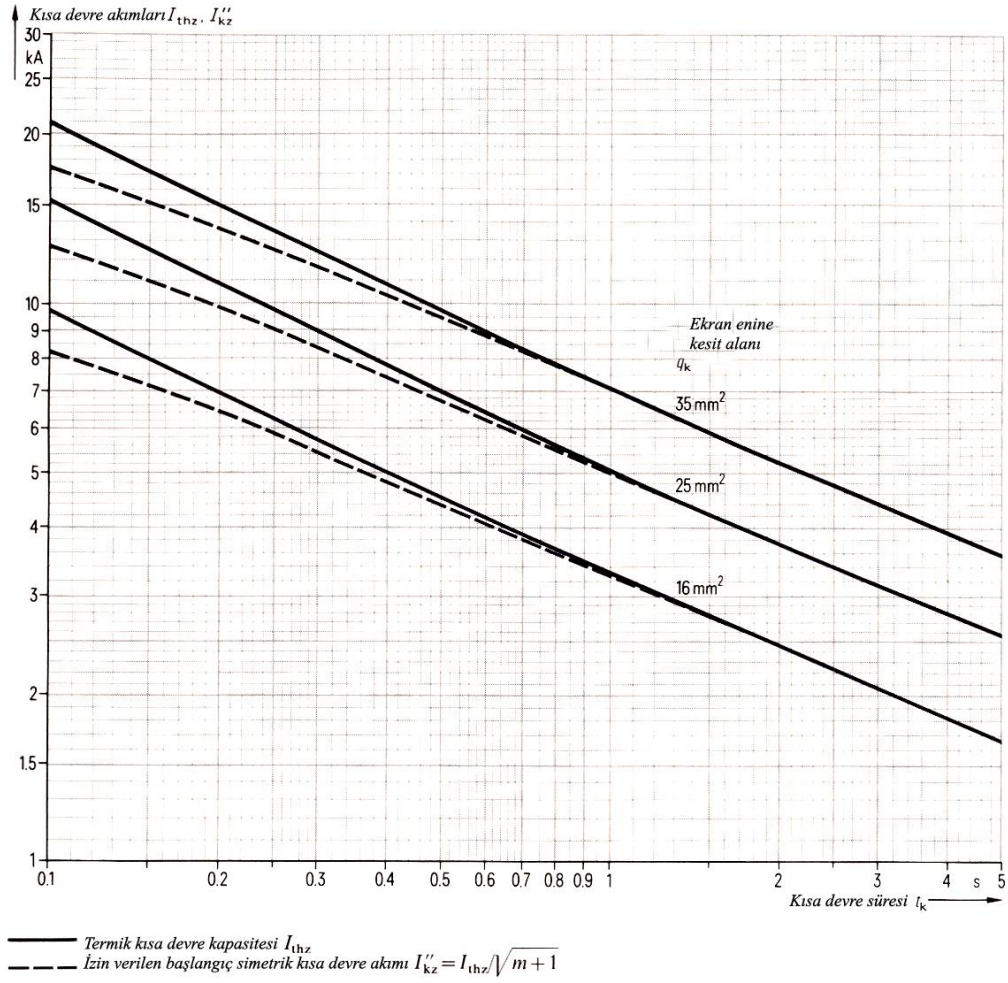


Şekil E.9 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 140^\circ\text{C}$ için 18/30 kV'lık bakır iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları



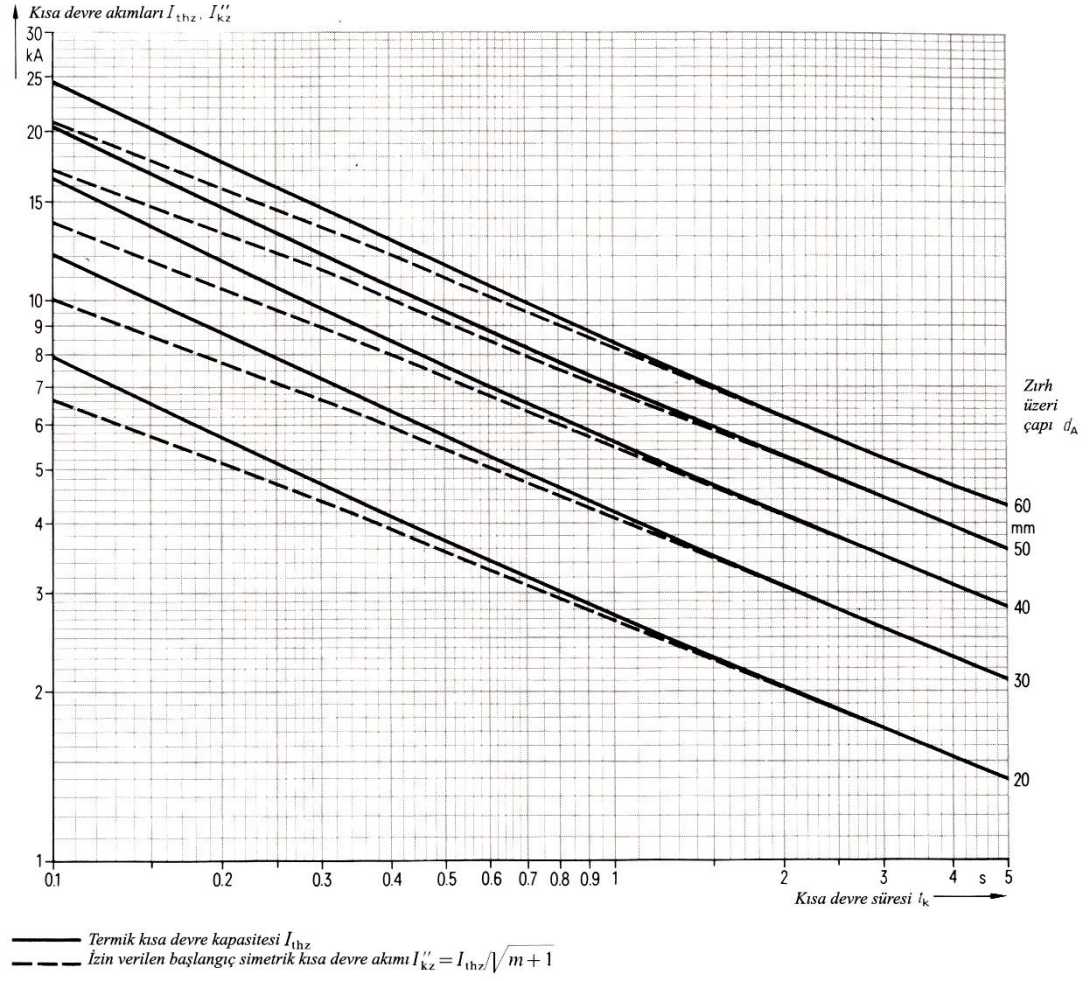
Şekil E.10 $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 140^\circ\text{C}$ için 18/30 kV'lık alüminyum iletkenli emprenye edilmiş kabloların kısa devre akımları

EK F

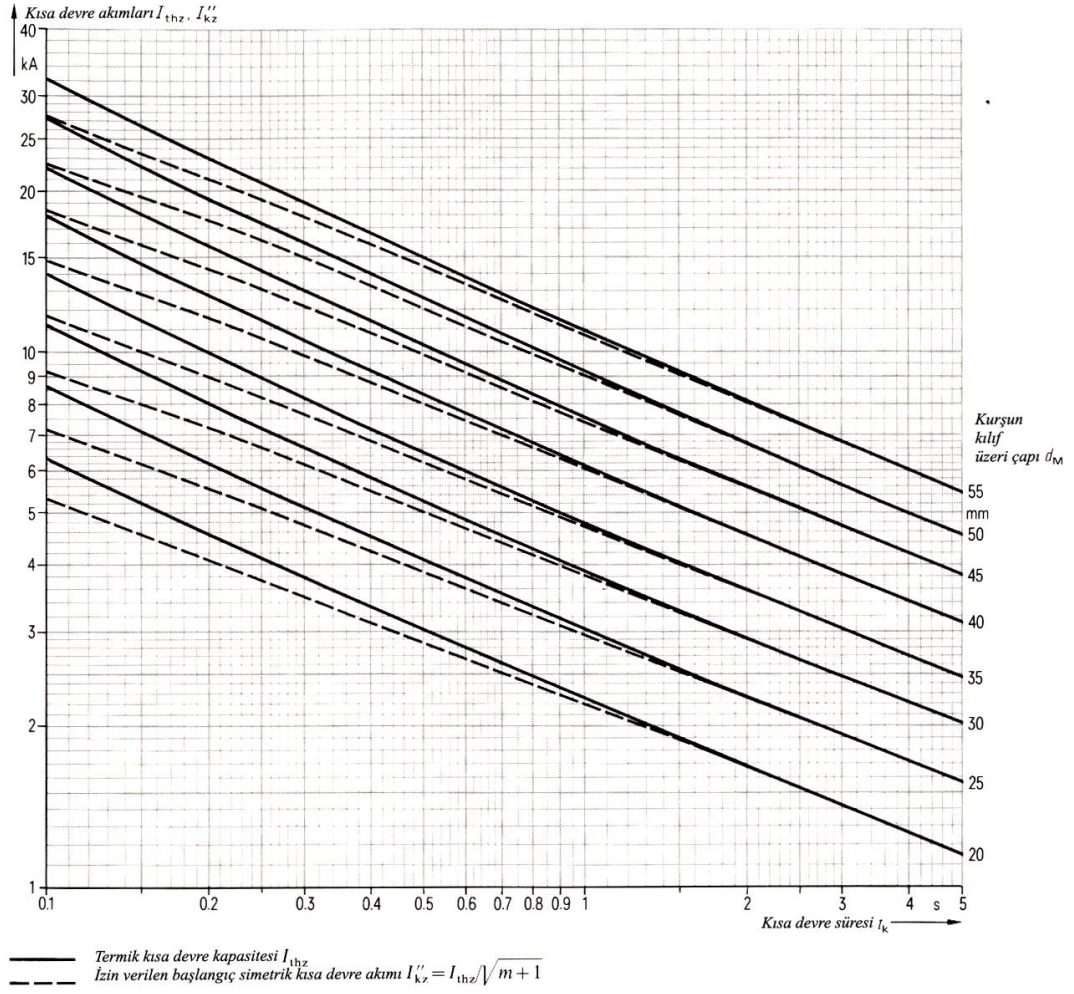


Şekil F.1 Polimer yalıtkanlı, bakır tel ekranlı kabloların kısa devre kapasitesi $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 650^\circ\text{C}$, $b = 0,12 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{s}$ için ve ekran teli çapı $d_D = 0,7; 0,8; 0,9 \text{ mm}$ ve sırasıyla ekranların anma enine kesit alanı ile; ekranın anma enine kesit alanı q_k parametre olarak alınmıştır.

Grafikler aynı zamanda yaklaşık olarak bakır band ekranlar için de uygulanır.

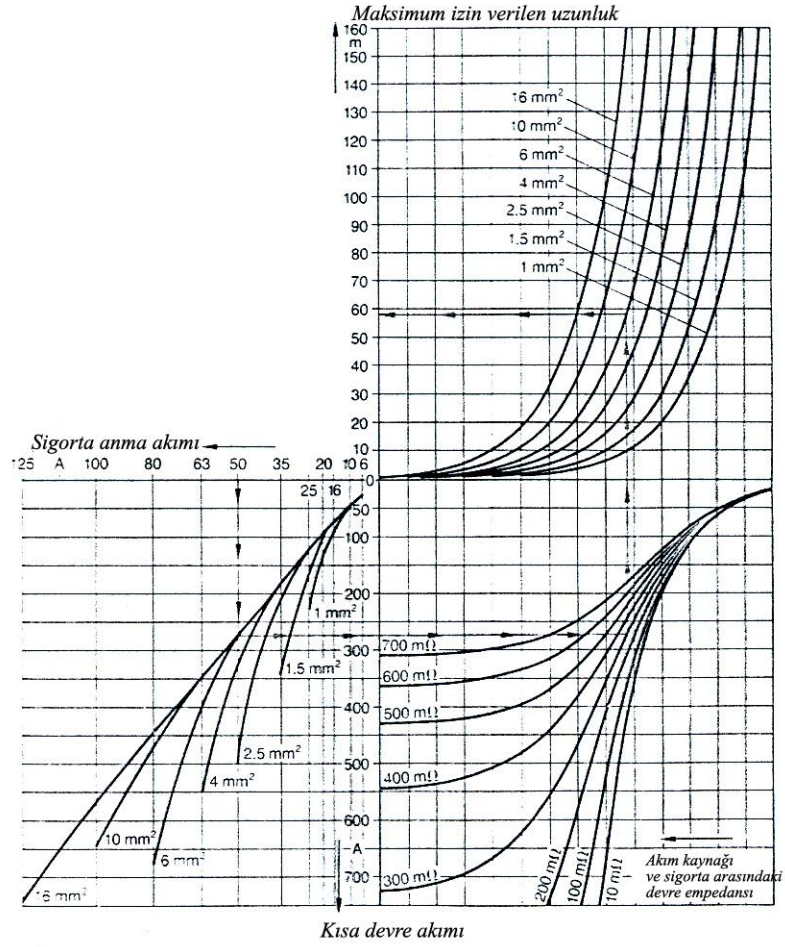


Şekil F.2 Polimer yalıtkanlı, düz çelik tel zırlı kabloların $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 200^\circ\text{C}$, $b = 0,17 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{s}$ ve düz çelik tellerin kalınlığı $\delta_A = 0,8 \text{ mm}$ için kısa devre kapasitesi. Düz çelik tel zırh üzeri çapı d_A parametrek olarak alınmıştır.

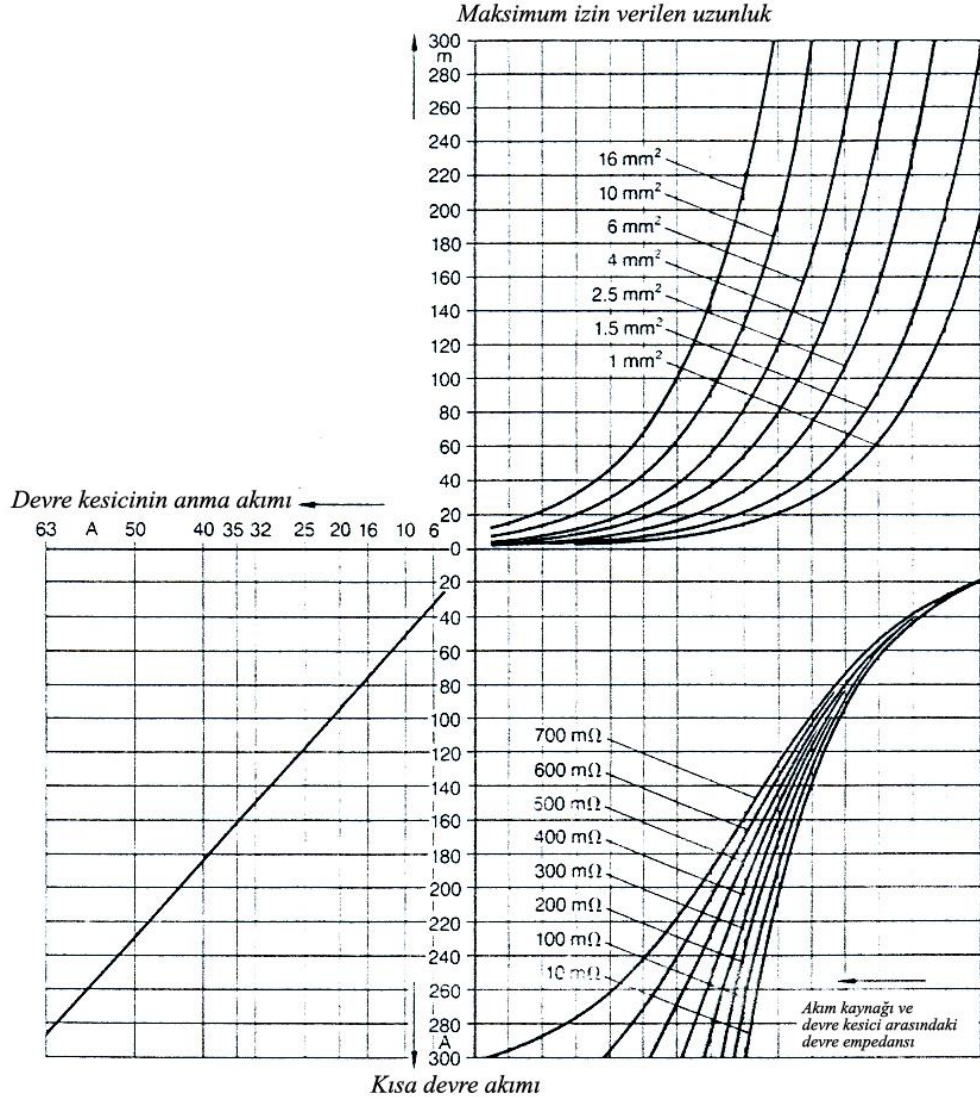


Şekil F.3 Kurşun kılıflı emprenye edilmiş yalıtkanlı kablonun $\kappa = 1.8$, $\theta_a = 60^\circ\text{C}$ ve $\theta_e = 200^\circ\text{C}$, $b = 0,38 \times 10^{-3} \text{ m} / \sqrt{s}$ için kısa devre kapasitesi. Kurşun kılıf üzeri çapı d_M parametre olarak alınmıştır.

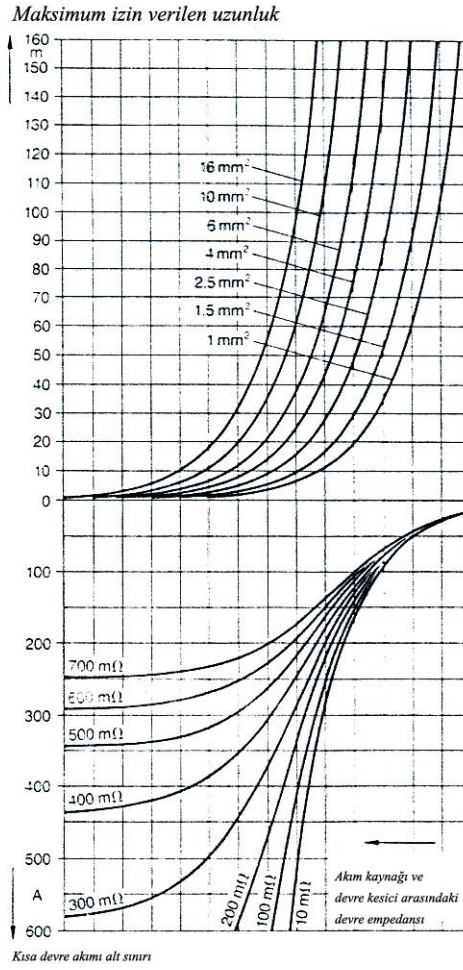
EK G



Şekil G.1 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'ya göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm²'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunluklarını belirlemek için grafik



Şekil G.2 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0641'e göre faz-koruma devre kesicileri ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm²'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunluklarını belirlemek için grafik.



Şekil G.3 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0660'a göre devre kesiciler ile faz-toprak kısa devre koruması için 16 mm²'ye kadar PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunluklarını belirlemek için grafik.

Tablo G.1 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'a göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 25'den 150 mm²'e kadar olan PVC yalıtkanlı bakır kabloların maksimum izin verilen uzunlukları

Enine kesit alanı mm ²	Anma sigorta akımı A	Kısa devre akımı A	Kesilecek devre empedansı ile izin verilen maksimum uzunluk				
			10 mΩ m	50 mΩ m	100 mΩ m	200 mΩ m	300 mΩ m
25	80	450	222	205	183	138	92
	100	560	178	161	139	93	46
	125	740	134	116	94	48	-
	160	960	102	85	62	14	-
35	100	560	24	224	193	129	63
	125	740	16	178	131	66	-
	160	960	142	162	86	20	-
	200	1310	103	78	46	-	-
50	125	740	264	29	15	92	-
	160	960	202	167	121	28	-
	200	1310	146	110	64	-	-
	250	1580	119	84	37	-	-
70	160	960	279	230	167	38	-
	200	1310	201	152	88	-	-
	250	1580	165	115	51	-	-
	315	2070	123	73	8	-	-
95	200	1310	268	201	116	-	-
	250	1580	219	152	67	-	-
	315	2070	163	96	10	-	-
	400	2650	124	56	-	-	-
120	200	1310	331	247	142	-	-
	250	1580	271	187	82	-	-
	315	2070	202	118	13	-	-
	400	2650	153	69	-	-	-
150	250	1580	327	226	99	-	-
	315	2070	244	142	15	-	-
	400	2650	185	83	-	-	-
	500	3550	131	30	-	-	-

Tablo G.2 220/380 V'luk sistemlerde, VDE 0636'a göre sigortalar ile faz-toprak kısa devre koruması için 25'den 150 mm²'e kadar olan PVC yalıtkanlı alüminyum kabloların maksimum izin verilen uzunlukları

Enine kesit alanı mm ²	Anma sigorta akımı A	Kısa devre akımı A	Kesilecek devre empedansı ile izin verilen maksimum uzunluk				
			10 mΩ m	50 mΩ m	100 mΩ m	200 mΩ m	300 mΩ m
25	63	350	169	159	146	120	94
	80	500	118	108	95	68	41
	100	740	79	69	56	28	-
	125	1170	49	39	25	-	-
35	80	450	183	169	151	114	76
	100	570	144	130	112	75	35
	125	890	91	77	58	19	-
	160	1310	61	46	27	-	-
50	100	570	205	14	159	105	49
	125	740	157	136	110	56	-
	160	1000	115	94	67	11	-
	200	1580	71	50	22	-	-
70	125	740	218	19	153	77	-
	160	960	167	138	101	23	-
	200	1300	121	92	54	-	-
	315	1650	94	65	26	-	-
95	160	960	25	185	135	31	-
	200	1300	163	124	73	-	-
	250	1580	133	93	41	-	-
	315	2070	99	59	6	-	-
120	160	960	21	231	168	38	-
	200	1300	204	154	90	-	-
	250	1580	166	116	51	-	-
	315	2070	124	73	8	-	-
150	200	1300	252	190	111	-	-
	250	1580	205	142	63	-	-
	315	2070	152	90	10	-	-
	400	2650	116	53	-	-	-

ÖZGEÇMİŞ

Burcu TORUN 1978’de İstanbul’da doğmuştur. İlköğrenimini İstanbul’da tamamlamıştır. 1996 yılında İSTEK Vakfı Özel Atanur Oğuz Lisesi’nden mezun olmuş, aynı yıl Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başlamıştır. 2000 yılında lisans öğrenimini tamamlayarak, aynı yıl içinde İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.

Burcu TORUN halen İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.