



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Orta gerilim yeraltı güç kablolarında zırh topraklama yöntemlerinin analizi

Analysis of armor grounding methods in medium voltage underground power cables

Yazar(lar) (Author(s)): Serhat KARA¹, Bora ALBOYACI², Ahmet ÖZYEŞİL³

ORCID¹: 0000-0002-6761-9348

ORCID²: 0000-0002-1117-0326

ORCID³: 0000-0002-4798-0005

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Kara S., Alboyacı B. ve Özyeşil A., “Orta gerilim yeraltı güç kablolarında zırh topraklama yöntemlerinin analizi”, *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1587-1594, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.846235

Orta Gerilim Yeraltı Güç Kablolarında Zırh Topraklama Yöntemlerinin Analizi

Analysis of Armor Grounding Methods in Medium Voltage Underground Power Cables

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yeraltı güç kabloları (Underground power cables)
- ❖ Akım taşıma kapasitesi hesapları (Current carrying capacity)
- ❖ Kablo zırhı topraklama yöntemleri (Cable armor grounding methods)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Çapraz bağlantılı topraklama yönteminde kablolar iki uçtan topraklanır ve belirli aralıklarda kablo zırhları bölünerek farklı fazdaki kabloların zırhları ile çaprazlanır. (In the cross-linked grounding method, the cables are grounded at both ends and the cable armours are divided at certain intervals and crossed with the armours of the cables in different phases.)



Şekil. Çapraz bağlantılı topraklama yöntemi /Figure. Cross-linked grounding method

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, farklı zırh topraklama yöntemleri ile yeraltı güç kablolarının akım taşıma kapasiteleri arasındaki ilişkinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. (In this study, it is aimed to reveal the relationship between different methods of the armor grounding and the current carrying capacity of underground power cables.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

IEC 60287 standardında ve Neher-McGrath yönteminde tanımlanan tasarımlar ve yöntemler kullanılmıştır. (The designs and methods defined in the IEC 60287 standard and the Neher-McGrath method were used.)

Özgünlük (Originality)

Topraklama yöntemlerine göre akım taşıma kapasitesi denklemleri düzenlenmiş ve ilgili yöntemler için benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. (Current carrying capacity equations are revised according to grounding methods and simulation studies have been carried out for the related methods.)

Bulgular (Findings)

Farklı topraklama yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları ortaya konulmuştur. (The advantages and disadvantages of different grounding methods compared to each other have been revealed.)

Sonuç (Conclusion)

Çapraz bağlantılı topraklama yöntemi hem akım taşıma kapasitesi hem kablo yalıtımı hem de işletme güvenliği açısından diğer yöntemlere göre daha iyidir. (The cross-linked grounding method is better than other methods in terms of current carrying capacity, cable insulation and operational safety.)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Orta Gerilim Yeraltı Güç Kablolarında Zırh Topraklama Yöntemlerinin Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Serhat KARA¹, Bora ALBOYACI^{2*}, Ahmet ÖZYEŞİL³

¹TEİAŞ Genel Müdürlüğü, İşletme Dairesi Başkanlığı, Nasuh Akar Cad. T-Blok, 41100 Ankara/Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli/Türkiye

³Genetek Güç Enerji Ltd. KOÜ Teknopark Yeniköy Merkez Mah. Vatan Cad. No:83 C-13 41275 Kocaeli/Türkiye
(Geliş/Received : 24.12.2020 ; Kabul/Accepted : 18.06.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 26.07.2021)

ÖZ

Orta Gerilim şebekelerin büyümesi ile enerji kablolarının kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Kullanılan kablolar hem dış etkilere karşı mukavemeti arttırmak hem de topraklama amacıyla zırh ve ekran katmanlarına sahiptirler. Bu katmanların kablonun her iki ucunda topraklaması için literatürde farklı yöntemler bulunmaktadır. Kablo topraklaması için seçilen yöntemlere göre zırh ve ekran katmanlarında gerilim veya akım endüklenir. Endüklenen bu gerilim veya akım da kabloların hem güvenli işletilmesini hem de akım taşıma kapasitesini doğrudan etkilemektedir. Bu makalede konuyla ilgili teori incelenerek, güç kabloları analiz yazılımında gerçekleştirilen benzetim çalışmasıyla XLPE 240 mm² bakır iletken için oluşan değerler teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı güç kabloları, akım taşıma kapasitesi, zırh topraklaması.

Analysis of Armor Grounding Methods in Medium Voltage Underground Power Cables

ABSTRACT

The use of energy cables is getting widespread day by day. These cables have armor and screen layers for grounding purposes. There are different methods in the literature for earthing of these layers. Voltage or current is induced in the armor and screen layers according to the method used. This induced voltage or current directly affects both the safe operation and current carrying capacity of the cables. In this article, the theory on the subject has been examined and confirmed by the simulation study performed in power cables analysis software.

Keywords: Underground power cables, current carrying capacity, armor grounding.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsanlığın elektrik enerjisine bağımlılığı her geçen gün artmaktadır. Bu bağımlılık, özellikle insanlığın temel ihtiyaçlarını elektrik enerjisiyle çalışan makineler vasıtasıyla üretmeye başlamasıyla ve sanayileşmenin her geçen gün yaygınlaşması ile daha da ciddi boyutlara ulaşmıştır. Buna karşın şebeke işletmecileri, tüketicilere ihtiyaç duydukları enerjiye güvenli bir şekilde ulaştırma konusunda sorumludurlar. Elektrik enerjisinin üretildiği tesis ile son tüketici arasındaki bağlantıyı sağlayan en önemli ekipmanlar ise başlıca havai hatlar ve kablolardır.

Günümüzde özellikle kentsel bölgelerde havai hatlar için ihtiyaç duyulan hava koridorlarının bulunmaması ve havai hatların gerek kuş çarpması veya dal düşmesi gibi sıklıkla yaşanabilecek arızalara açık olması şebeke işletmecilerini, yeraltı kablolu şebeke yapılarına yönlendirmektedir. Orta gerilim yer altı kablolarının kullanılması ile şebekedeki SAIDI ve SAIFI gibi kalite parametrelerinin iyileştiği bilinmektedir.

Orta gerilim seviyesinde yer altı kabloları toprağa direkt olarak gömülecekler ise metalik ekranlı ve / veya zırhlı

bir yapıda üretilir. Bu katmanların kullanım amacı kablonun dış etkilere karşı mukavemetini arttırmak ayrıca topraklama vasıtası ile güvenlik endişelerini gidermektir. Kablo üzerinde bulunan katmanların topraklanması için farklı uygulamalar söz konusudur. Katmanların uygulamaların akım taşıma kapasitesine etkileri farklıdır. [1]

Literatürde kablo zırhları üzerine birçok inceleme yapılmıştır. Roberto Candela ve arkadaşları [2] yaptıkları çalışmada iki uçtan topraklama, tek uçtan topraklama, akım sınırlamalı topraklama (rezistans, reaktans veya transformator üzerinden), çaprazlanmış topraklama yapılarını incelemişler ve bu topraklama yapılarının uygulanması halinde kablo zırhından gelecek akım ve indüklenmiş gerilim değerlerini analiz etmişler. Yong LIN ve Zheng XU [3] topraklama yöntemlerinin zırh kaybı üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında çaprazlanmış topraklama yapısında çaprazlama geçişlerinin reaktör üzerinden yapılmasını ve bu sayede zırh kayıplarının optimize edileceğini önermişler. Kablo topraklamasında dikkat edilmesi gereken bir değer olan zırh gerilimini düzenlemek için zırh gerilim

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : alboyaci@kocaeli.edu.tr

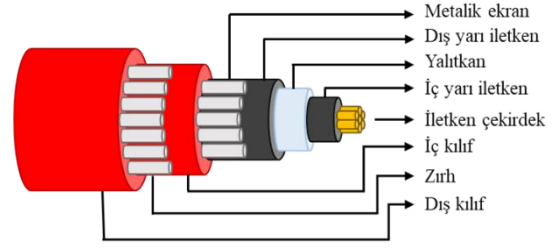
sınırlayıcıları (SVL) kullanılmaktadır. Dai Cao ve arkadaşları [4] kısa devre arızalarına ve yıldırımlara karşı SVL etkisini inceledikleri çalışmada topraklama yöntemi olarak tek uçtan topraklı ve çaprazlanmış topraklama yöntemlerini ele almışlar. Andreas I. Chrysochos ve arkadaşları [5] kablo topraklama yapılarının modellenmesine yönelik yaptıkları çalışmada farklı topraklama yapılarının zırh akımı ve zırh gerilimi üzerindeki etkilerini paylaşmışlar. Jong-kee Choi ve arkadaşları [6] yaptıkları çalışmada topraklama yöntemleri ile sıfır dizin empedansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymuşlar ve farklı topraklama yöntemleri kullanıldığında geleneksel sıfır dizin hesaplarının yetersiz kalabileceğini savunmuşlar. Lulu Li ve arkadaşları [7] ise yaygın olarak kullanılan topraklama yöntemlerine ek olarak farklı bir yöntem önerisinde bulunmuşlar. Önerdikleri sistemde üç faz kablosundan ikisinin zırhları tek noktadan topraklı iken üçüncü kablo iki uçtan topraklıdır. Bu yapının maliyet etkin bir çözüm olduğunu öne süren araştırmacılar önerdikleri yöntemin manyetik alan, empedans ve güç kaybı analizlerini paylaşmışlar.

Bu makalede iki uçtan topraklama, tek uçtan topraklama ve çapraz bağlı topraklama yöntemlerinin akım taşıma kapasitesine etkileri hakkında genel değerlendirmeler ve analizler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bilgilerin sonuçlarını göstermek için analiz yazılımında 240 mm² bakır iletkenli kablo modellenerek analiz çalışması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kullanıcılara tavsiyelerde bulunulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Kabloların metalik ekran ve zırh katmanları, kablolarla oluşacak faz toprak kısa devre arızalarına akım yolu oluşturmak amacıyla tasarlanır. Ancak arıza olmadığı durumlar için ise kablo çekirdeğinden geçen alternatif akımın çevresinde oluşturduğu manyetik alandan etkilenerek, topraklama yöntemine bağlı olarak açık uçta gerilim yükselmesi veya ekran üzerinde akım dolaşımı meydana gelmesine neden olur.

Orta gerilim seviyesinde kullanılan yeraltı güç kabloları genellikle bakır veya alüminyum iletkenimden imal edilmektedir. Özellikle kablo tesis çalışmalarını



Şekil 1. Kablo katmanları (Cable layers)

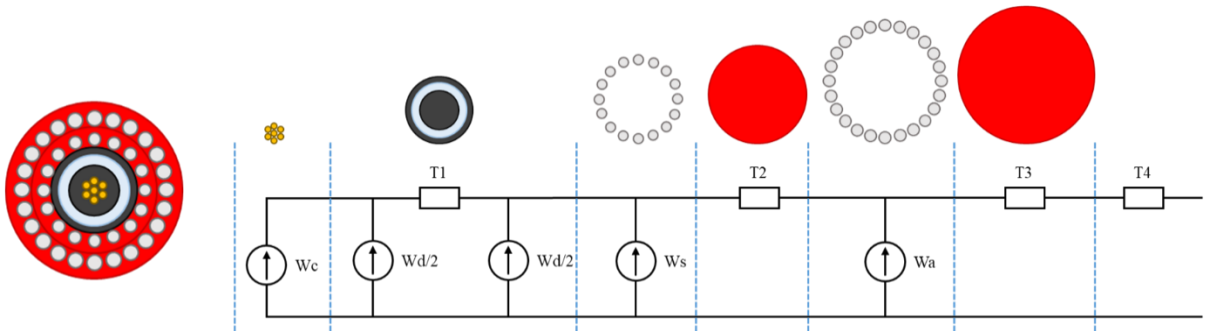
kolaylaştırmak için kullanılan kablo yapısı orta gerilim seviyesinde tek damarlı tercih edilmektedir. Kablolar, akım taşımalarını sağlayan çekirdek ve zırhı oluşturan topraklama sistemleri, iletken ve bu iletken kısımları toprağa ve birbirine karşı izole edebilmek için yalıtkan kısımlara sahiptir. Ek olarak elektrik alanını düzenlemek ve elektrostatik gerilmeleri en aza indirmek için yarı iletken geçiş tabakaları bulunur. Genel olarak bir orta gerilim güç kablosunun sahip olduğu katmanlar içten dışa sırasıyla Şekil 2-1'de verildiği şekilde gösterilmektedir:

- Çekirdek (Bakır veya Alüminyum)
- İç yarı iletken
- Yalıtkan (XLPE veya PVC)
- Dış yarı iletken
- Metalik Ekran (Bakır veya Alüminyum)
- İç kılıf (PVC veya PE)
- Zırh (Bakır veya Alüminyum)
- Dış kılıf (PVC veya PE)

Kablolar belirtilen bu yapı dışında zırh içermeyen, metalik ekranın üzeri dış kılıf ile örtülmüş şekilde de üretilebilmektedir. Güç kabloları açısından en yaygın kullanılanlar bu iki kablo yapısı şeklindedir.

Yalıtkan kısımda kullanılan malzemeler kablo çekirdeğinin ne kadar ısınabileceği belirler. XLPE malzeme kullanılan kabloda kablo çekirdeği için izin verilen işletme sıcaklığı 90 °C iken, PVC malzeme için 70 °C'dir. Kablonun ne kadar akım taşıyabileceği de izin verilen işletme sıcaklığıyla doğrudan ilişkilidir. [8]

Bir kablodan en fazla ne kadar akım taşınabileceğine belirten, akım taşıma kapasitesi; kablonun yerleşim düzeninden, toprağın termal direncinden, gömülme derinliğinden ve daha birçok parametreden



Şekil 2. Kablo katmanlarının elektriksel benzetimi (Electrical simulation of cable layers)

etkilenmektedir. Eğer bir kablodan akım taşıma kapasitesinin üzerinde bir akım akıtılacak olursa kablo katmanları oluşacak ısıya dayanamayıp zarar görecektir. Oluşan bu zarar çoğunlukla hemen baş göstermeyip zamanla kısmi deşarj oluşumu, kablo patlaması gibi arızalar yaşanmasına neden olabilecektir. Bu sebeple akım taşıma kapasitesinin doğru şekilde hesaplanması oldukça önemlidir.

Kararlı durumda kablolar için akım taşıma kapasitesi hesabı, Uluslararası Elektroteknik Komite Standardı IEC 60287 standardında göre veya Neher-McGrath yöntemine göre yapılmaktadır. Bu yöntem kablo katmanlarının elektriksel ekipmanlara benzetilerek oluşturulan elektrik devresinde gerilim düşümü hesabı yapmaya benzetilmektedir. Kablo katmanlarındaki iletken kısımlar (çekirdek, metalik ekran ve zırh) ısı ürettiklerinden elektriksel olarak akım kaynağına benzetilir. Yalıtkan katmanlar ise ısı yayılmasına karşı direnç göstermeleri sebebiyle elektriksel dirençler ile temsil edilir. Bu benzetim Şekil 2 üzerinde paylaşılmıştır. [9] [10] [11]

Kabloya ilişkin T direnç değerleri Denklem 1'deki gibi hesaplanır:

$$T = \frac{\rho}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (\text{Denklem 1})$$

Isı kaynaklarını temsil eden kayıpların hesabı için ilk olarak çekirdeğin kaybı hesaplanmalıdır.

$$W_c = RI^2 \quad (\text{Denklem 2})$$

$$W_s = \lambda_1 W_c \quad (\text{Denklem 3})$$

$$W_a = \lambda_2 W_c \quad (\text{Denklem 4})$$

$$W_d = 2\pi f U_0^2 \tan(\delta) \quad (\text{Denklem 5})$$

İlgili direnç değerleri ve ısı oluşumuna neden olan akım kaynaklarının değerleri hesaplandıktan sonra akım taşıma kapasitesi denklem 6'da verilen formülasyon ile hesaplanabilir:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t - W_d \left(\frac{1}{2} T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \right)}{R_{ac} [T_1 + (1 + \lambda_1) T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) (T_3 + T_4)]}} \quad (\text{Denklem 6})$$

Buradaki Δt değeri gömülme sıcaklığı ile izin verilen maksimum işletme sıcaklığı arasındaki farktır.

$$\Delta t = t_i - t_t \quad (\text{Denklem 7})$$

Denklem 6'da paylaşılan akım taşıma kapasitesi ekran ve zırh katmanlarının iki uçtan topraklandığı durumlarda geçerlidir. Topraklama yöntemine göre akım taşıma kapasitesi değişmektedir. Kabloların topraklanması üzerine farklı yapılar vardır. Bunlardan en çok kullanılan yapılar aşağıda verilmektedir. [2] [7] [12]

- İki Uçtan Topraklama
- Tek Uçtan Topraklama
- Çapraz Bağlantılı Topraklama

2.1 İki Uçtan Topraklama (Both End Grounding)

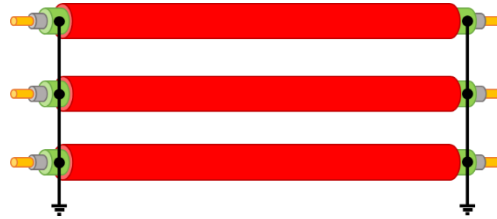
Bu yöntemde üç fazlı sistemlerde faz kablolarının her birinin ekranları aynı yerden birleştirilerek

topraklanmaktadır. Bu topraklama durumu Şekil2-3'de gösterilmektedir. Bu topraklama işlemi kablunun her iki ucu için de gerçekleştirilir. Kablo iki uçtan topraklandığı zaman kablo etrafında, içerisinden geçen akıma bağlı olarak oluşan manyetik alandan dolayı metalik ekranda akım endüklenmektedir. Oluşan akım değerinin oluşturacağı termal etki kablunun soğumasına engel olacağından akım taşıma kapasitesi bir miktar azalmaktadır. İki uçtan topraklı yöntem için zırh ve ekran kayıpları söz konusudur. Oluşan kayıp değerlerini dahil ederek oluşturulan akım taşıma kapasitesi için Denklem 6 kullanılabilir. Zırh ve metalik ekranda endüklenen akımlar ise denklem 8 ve denklem 9'daki gibi hesaplanabilir [13]:

$$I_s = \sqrt{\frac{I^2 R}{R_s}} \lambda_1 \quad (\text{Denklem 8})$$

$$I_a = \sqrt{\frac{I^2 R}{R_a}} \lambda_2 \quad (\text{Denklem 9})$$

İki uçtan topraklı sistemlerde kablo zırhından akan akımlar, kablo çekirdeğinden akan akımla doğru orantılıdır. Bu akımların ekran ve zırhın taşıyabilecekleri değerlerin üzerine çıkması kablo arızalarına sebep olmaktadır. Unutulmamalıdır ki, kablo ekranları üzerinden, kablo içerisinden kısa devre akımı geçmesi durumunda daha fazla akım akacaktır. Bu durum hem kablo seçiminde hem de koruma koordinasyon analizinde dikkate alınmalıdır.



Şekil 3. İki uçtan topraklanmış kablo modeli (Both end grounded cable model)

2.2 Tek Uçtan Topraklama (Single End Grounding)

Bu yöntemde üç faz kablosu için de zırhlar aynı noktadan birleştirilir ve birlikte topraklanırlar. Bu durum Şekil 4'te gösterilmektedir. İki uçtan topraklı yöntemden farklı olarak bu işlem yalnızca kablunun bir ucunda gerçekleştirilir. Zırh ve metalik ekran tek uçtan topraklandığında akım yolu kapanmayacağından kablo zırhı üzerinde akım endüklenemez. Ekran ve zırhtan akım akmayacağı için kablo yalnızca çekirdek akımından dolayı ısınacaktır. Bu sebeple iki uçtan topraklı yöntemde tek uçtan topraklı yöntemde akım taşıma kapasitesi daha yüksek olmaktadır. Sirkülasyon akımları oluşmadığından zırh ve ekran kayıp faktörleri (λ_1 ve λ_2) sıfır olarak kabul edilir. Akım taşıma kapasitesi formülü denklem 6 buna göre düzenlenecek olursa denklem 10'daki formül elde edilir.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t - W_d \left(\frac{1}{2} T_1 + T_2 + T_3 + T_4 \right)}{R_{ac} [T_1 + T_2 + T_3 + T_4]}} \quad (\text{Denklem 10})$$

Tek uçtan topraklama yönteminin için topraklanmamış olan açık uça, gerilim yükselmesi söz konusudur. Bu değer kablo cinsi, kesiti, uzunluğuna ve kablodan akan akıma bağlı olarak da değişmektedir. Kablodaki yalıtkan katmanların dayanma gerilimlerini aştığı zaman arızalara ve/veya can kayıplarına neden olmaktadır. Gerilim yükselmesi denklem 11 ve denklem 12'deki gibi hesaplanır [14]:

$$U_s = I \times X_s \times l \quad (\text{Denklem 11})$$

$$U_a = I \times X_a \times l \quad (\text{Denklem 12})$$

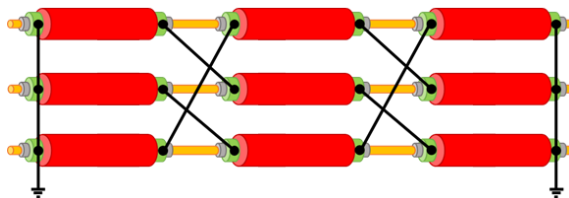
Yaygın uygulamalarda zırh gerilimi için sınır değer 200 V olarak belirlenmektedir. Ancak, kablonun kullanıldığı sistemin gerilim seviyesi de önemlidir. Türkiye'de 154 kV sistemlerde zırh geriliminin sınır değeri 150 V, 380 kV sistemlerde ise 200 olarak belirlenmiştir. [12] Bu değerlerin mutlaka kullanılan kablo cinsi, kesiti, uzunluğu gibi bilgiler dikkate alınarak hesaplanması ve ilgili yönetmeliklere göre kontrolü sağlanmalıdır.



Şekil 4. Tek uçtan topraklanmış kablo modeli (Single end grounded cable model)

2.3 Çapraz Bağlantılı Topraklama (Cross Linked Grounding)

Bu yöntemde kablo güzergahı boyunca eşit bölümlere ayrılmaktadır. Bu bölümlerin sadece zırhları ve ekranları birbirlerine çapraz şekilde bağlanır. Kablo zırhları ve ekranları en uç noktalardan birleştirilerek topraklanır. Bu sayede kabloda topraklanmamış açık uç kalmadığından gerilim yükselmesi meydana gelmez. Benzer şekilde, çaprazlamadan kaynaklı sirkülasyon akımlarının bileşkeleri azalır. Eğer kablo eşit uzunlukta ve üç veya üçten fazla sayıda bölümlere ayrılırsa sirkülasyon akımlarının bileşkesi sıfırlanabilecektir. Böyle bir uygulama için gerilim yükselmesi ve sirkülasyon akımı sıfır kabul edilebilir. Yeni durum için akım taşıma kapasitesi denklem 10'daki formüle göre hesaplanır. [14] [12]



Şekil 5. Çapraz bağlantılı topraklanmış kablo modeli (Cross-linked grounded cable model)

Bu çalışmada incelenen topraklama yöntemleri için akım taşıma kapasiteleri CYMCAP analiz yazılımıyla hesaplanmıştır.

3. ANALİZLER (ANALYSIS)

Kablolarında akım taşıma kapasitesi için sınır değer kablo çekirdeğindeki sıcaklık olarak belirlenmiştir. XLPE yalıtkanlı kablolar için bu sıcaklık 90 °C'dir. İlgili kablo modeli ve topraklama yöntemleri CYMCAP güç kabloları analiz yazılımında modellenmiş, akım taşıma kapasiteleri, sirkülasyon akımları ve zırh ve ekran gerilimleri detaylı olarak incelenmiştir.

Kablo analizler esnasında yapılan kabuller aşağı verilmiştir.

- Gerilim seviyesi 36 kV,
- Frekans 50 Hz,
- Gömülme derinliği 1 metre,
- Toprak termal direnci 1 °C.m/W,
- Toprak sıcaklığı 20 °C,
- Yan yana döşem için fazlar arası mesafe 7 cm,
- Paralel sistem sayısı 1,
- Transpozisyon uygulanmamıştır.

Kabullerde verilen parametrelerin değişmesi durumunda akım taşıma kapasitesinin de değişeceği göz ardı edilmemelidir.

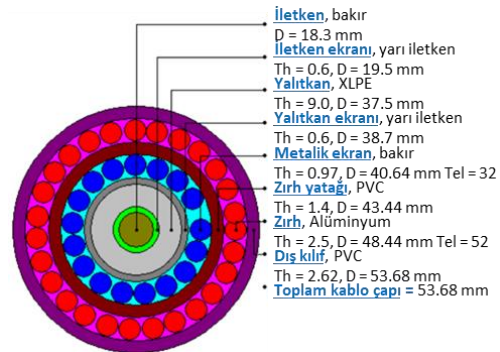
3.1 Kablo Verileri (CABLE DATA)

Makale çalışması kapsamında yapılan analizlerde 240 mm² bakır kablo kullanılmıştır. Bu kablo modeli için katman malzemeleri ve ölçüleriyle ilgili değerler üzerinde paylaşılmıştır.

Çizelge 1. Kablo verileri (Cable data)

Kablo Katmanı	Malzeme	Çap (mm)
Çekirdek	Bakır	18,3
İç Yarı İletken	Yarı İletken	19,5
Yalıtkan	XLPE	37,5
Dış Yarı İletken	Yarı İletken	38,7
Metallik Ekran	Bakır	40,64
İç kılıf	PVC	43,44
Zırh	Alüminyum	48,44
Dış kılıf	PVC	53,68

Yukarıdaki verilere bağlı olarak analiz yazılımında kablo Şekil 6'da verildiği gibi modellenmiştir.



Şekil 6. 240 mm² bakır kablo modeli (240 mm² copper cable model)

3.2 İki Uçtan Topraklama Yöntemi için Analiz Sonuçları (Analysis Results for Both End Grounding Method)

Kablonun iki uçtan topraklandığı durum için gerçekleştirilen analiz sonucu Şekil 7 üzerinde gösterilmiştir.

Bu durum için yapılan analizlere göre akım taşıma kapasitesi 478 amper bulunmuştur. Kablo uygulanmasında zırh her iki uçtan da topraklandığı için gerilim endüklenmemiş ancak kapalı devre oluşmasından dolayı ekran üzerinde akım oluşmuştur.

Analiz sonucunda elde edilen endüklenen akım ve gerilim sonuçları Çizelge 2 üzerinde paylaşılmıştır.

Çizelge 2. İki uçtan topraklama için endüklenen akım ve gerilim değerleri (Induced current and voltage values for both end grounding)

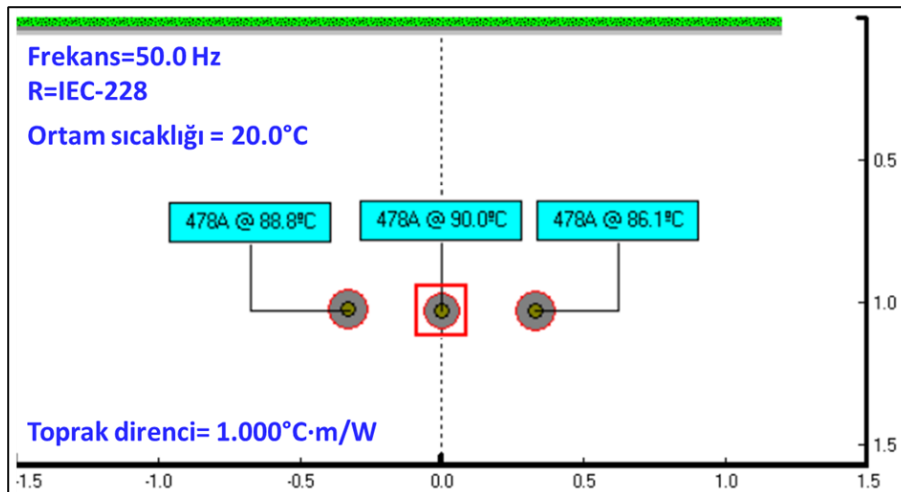
Fazlar	Zırh Akımı [A]	Zırh Gerilimi [V/km]
L1	51,3	0
L2	39,2	0
L3	43,1	0

3.3 Tek Uçtan Topraklama Yöntemi için Analiz Sonuçları (Analysis Results for Single End Grounding Method)

Kablonun tek uçtan topraklandığı durum için gerçekleştirilen analiz sonucu Şekil 8 üzerinde gösterilmektedir.

Bu durum için yapılan analizlere göre akım taşıma kapasitesi 580 amper bulunmuştur. Kablonun bir ucu topraklanmadığı için gerilim endüklenmiştir ancak kapalı devre oluşmamasından dolayı sirkülasyon akımları oluşmamıştır.

Analiz sonucunda elde edilen endüklenen akım ve gerilim sonuçları Çizelge 3 üzerinde paylaşılmıştır.



Şekil 7. İki uçtan topraklama için akım taşıma kapasitesi sonucu (Current carrying capacity result for both end grounding)

Çizelge 3. Tek uçtan topraklama için endüklenen akım ve gerilim değerleri (Induced current and voltage values for single end grounding)

Fazlar	Zırh Akımı	Zırh Gerilimi
--------	------------	---------------

	[A]	[V/km]
L1	0	79,08
L2	0	63,38
L3	0	79,08

3.4 Çapraz Bağlantılı Topraklama Yöntemi için Analiz Sonuçları (Analysis Results for Cross Linked Grounding Method)

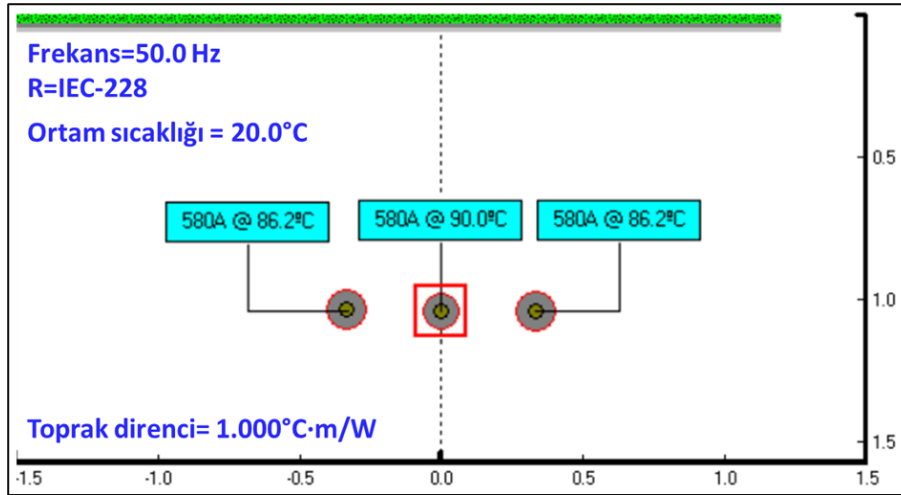
Kablo ekran ve zırhlarının eşit uzunlukta ve 3 veya 3'ün katı bölümler için çapraz bağlanıp iki uçtan topraklandığı durum için gerçekleştirilen analiz sonucu Şeki 9 üzerinde paylaşılmıştır.

Bu durum için yapılan analizlere göre akım taşıma kapasitesi 580 amper bulunmuştur. Kabloda açık uç bulunmadığı için gerilim endüklenmemiş ve sirkülasyon akımları da zırhın çaprazlanmasından dolayı yok edilmiştir.

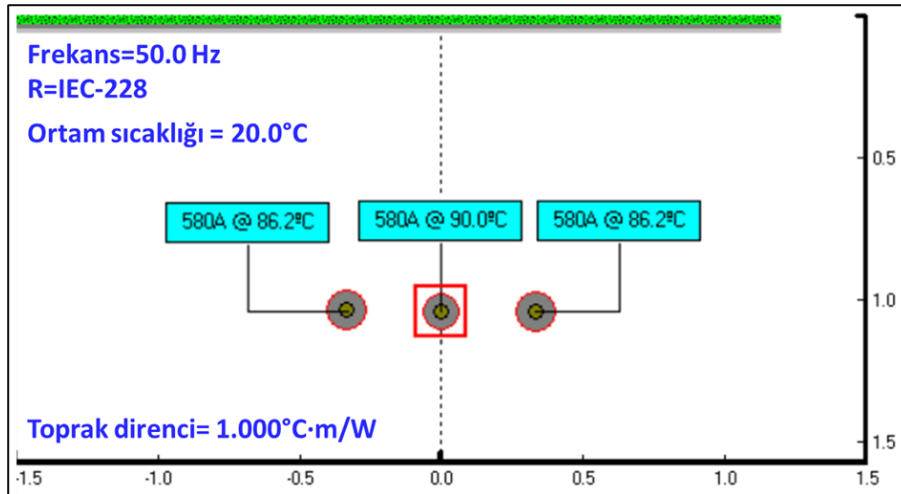
Analiz sonucunda elde edilen endüklenen akım ve gerilim sonuçları Çizelge 4 üzerinde paylaşılmıştır.

Çizelge 4. Çapraz bağlantılı topraklama için endüklenen akım ve gerilim değerleri (Induced current and voltage values for cross linked grounding)

Fazlar	Zırh Akımı [A]	Zırh Gerilimi [V/km]
L1	0	0
L2	0	0
L3	0	0



Şekil 8. Tek uçtan topraklama için akım taşıma kapasitesi sonucu (Current carrying capacity result for single end grounding)



Şekil 9. Çapraz bağlantılı topraklama için akım taşıma kapasitesi sonucu (Current carrying capacity result for cross linked grounding)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede orta gerilim kablolarının topraklama yöntemlerinin akım taşıma kapasitesine etkisi, topraklama yöntemine bağlı olarak kablo uçlarındaki gerilim ve kablo zırhlarındaki akım etkisi incelenmiştir. Kablo analiz yazılımında tek damarlı XLPE 1x240 mm² bakır iletkenli kablo modellenip iki uçtan topraklama, tek uçtan topraklama ve çapraz bağlantılı topraklama yöntemleri için akım taşıma kapasitesi analizi gerçekleştirilmiştir.

Kabloların iki uçtan topraklandığı durum için oluşan sirkülasyon akımlarının kabloların akım taşıma kapasitesini düşürdüğü görülmüştür. Bu yöntem için yapılacak uygulamalarda sirkülasyon akımlarının hesaplanması zırhın bu akımları taşıyıp taşıyamayacağını kontrol edebilmek açısından önemlidir ve sirkülasyon akımı çekirdekte geçen akımla doğru orantılı olduğundan kablodan geçecek kısa devre arızaları gibi büyük akımlar için de zırhta oluşacak etkiler kontrol edilmelidir.

Tek uçtan topraklama durumunda sirkülasyon akımlarının akabileceği bir kapalı devre oluşmamasından

dolayı sirkülasyon akımları da oluşmaz. Bu sebeple tek uçtan topraklama yöntemi için kabloların akım taşıma kapasitesi iki uçtan topraklama yöntemine göre daha yüksektir. Ancak bu yöntemde de topraklanmamış uçta gerilim yükselmesi oluşur ve bu gerilimin değeri akım ve kablo uzunluğuyla doğru orantılıdır. Yine kısa devre arıza akımları gibi büyük akımların geçmesi durumunda gerilim çok artacak ve kablo yalıtımının dayanma sınırı geçilirse kablo zarar görecektir. Bunun için bu tür uygulamalarda açık uçlara Parafudr uygulaması can ve mal güvenliği için gözden geçirilmelidir.

Çapraz bağlantılı topraklama yönteminde kablo zırhı iki uçtan topraklandığı için gerilim yükselmesi oluşmamaktadır. Aynı zamanda kablo zırhı eşit uzunlukta üç veya üçün katı olacak şekilde bölümlere ayrılıp bu bölümlerde kablo zırhları çaprazlandığı için sirkülasyon akımları yok olmaktadır. Böylelikle akım taşıma kapasitesi tek uçtan topraklı yöntemdekiyle aynı gelmektedir.

Çizelge 5. Akım taşıma kapasiteleri (Current carrying capacities)

Akım Taşıma Kapasitesi [A]		
İki Uçtan Topraklama	Tek Uçtan Topraklama	Çapraz Bağlantılı Topraklama
478	580	580

Hem işletme güvenliği hem kablonun uzun ömürlü ve verimli kullanılması açısından hem de akım taşıma kapasitesi açısından çapraz bağlantılı topraklama yöntemi oldukça faydalı sonuçlar vermektedir.

KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

T_1 : Yalıtkanın direnci
T_2 : İç kılıfın direnci
T_3 : Dış kılıfın direnci
T_4 : Toprağın direnci
W_c : İletkenin kaybı
W_d : Dielektrik kaybı
W_s : Metalik ekranın kaybı
W_a : Zırhın kaybı
ρ : Katmanın ısı iletkenliği
r_1 : Katmanın iç yarıçapı
r_2 : Katmanın dış yarıçapı
R : Çekirdeğin AC direnci
I : Kabloya uygulanan akım
λ_1 : Metalik ekranın kayıp faktörü
λ_2 : Zırhın kayıp faktörü
f : Frekans
U_0 : Faz toprak gerilimi
$\tan(\delta)$: Yalıtkan kayıp faktörü
t_i : Kablo için izin verilen işletme sıcaklığı
t_c : Kablonun gömüldüğü toprağın sıcaklığı
Δt : Sıcaklık farkı
I_s : Metalik ekranda endüklenen akım
I_a : Zırhta endüklenen akım
R_s : Metalik ekranın direnci
R_a : Zırhın direnci
U_s : Metalik ekran için gerilim yükselmesi
U_a : Zırh için gerilim yükselmesi
l : Kablo uzunluğu
X_s : Metalik ekranın endüktansı
X_a : Zırhın endüktansı

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Serhat KARA: Kablo uygulamalarını araştırmış, makalenin yazılmasına katkı vermiştir.

Bora ALBOYACI: Analiz sonuçlarını değerlendirmiş ve makalenin yazımına katkı sağlamıştır.

Ahmet ÖZYEŞİL: Kablo modeli üzerinde analizleri gerçekleştirmiş ve makalenin yazımına katkı sağlamıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akbal, B. "The optimized bonding method for long high voltage cable lines under the unbalanced cases", *Neural Computing and Applications*, 32, 11263–11276, (2020).
- [2] Candela R., Gattuso A., Mitolo M., Sanseverino E. R. and Zizzo G., "A Comparison of Special Bonding Techniques for Transmission and Distribution Cables", *IEEEIC / I&CPS Europe*, 1-6, (2020).
- [3] Lin Y. and Xu Z., "Cable Sheath Loss Reduction Strategy Research Based on the Coupled Line Model", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (5): 2303-2311, (2015).
- [4] Cao D., Liu X. and Deng X., "The Suitability Analyses of Sheath Voltage Limiters for HV Power Cable Transmission Lines", *2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment*, 404-408, (2019).
- [5] Papadopoulos T. A., Chrysochos A. I., Lazos C. F., Gonos I. F., Pavlou K. and Georgallis G., "Modelling Aspects of Sheath Bonding in Medium- Voltage Cable Systems: Operational Condition", *UPEC*, 1-6, (2020).
- [6] Choi J., Kwak J., Lee W., Jung C., Kim J. and Oh S., "Analysis of sequence impedance of 345 kV cable systems with special bondings using ATP", *Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*: 1-4., (2009).
- [7] Li L., Yong J. and Xu W., "Single-Sheath Bonding—A New Method to Bond/Ground Cable Sheaths", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35 (2): 1065-1068, (2020).
- [8] Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – Section 1: General. *IEC Std 287-1-1* (1994).
- [9] Sobral A., Moura A., Carvalho M., "Technical Implementation Of Cross Bonding On Underground High Voltage Cable", *21st International Conference on Electricity Distribution*, (2011).
- [10] Leon F., "Calculation of Underground Cable Ampacity", *CYME International T&D*, (2005).

- [11] Aras F., Biçen Y. ve Keleş K., "Boru İçinde Tesis Edilen Yeraltı Güç Kabloları için Azaltma Faktörünün Belirlenmesi", *Politeknik Dergisi*, 9(2): 87-92, (2006).
- [12] IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV", in *IEEE Std 575*, (2014)
- [13] Barrett J. S. and Anders G. J., "Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cables-mathematical models and comparison with IEC Standard 287", in *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, 14., (1997).
- [14] Working Group B1.18, "Special Bonding Of High Voltage Power Cables", *CIGRE 283*, (2005).