

KUPLAJ BARASI ÜZERİNDEN PARALEL BAĞLANAN YÜKSEK GERİLİM YERALTI KABLOLARINDA İŞLETME PARAMETRELERİNİN AKIM DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Aytaç ÇINAR¹, Yunus Berat DEMİROL², Bora ALBOYACI³

¹Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Kocaeli, ORCID No : [0000-0002-1655-4281](https://orcid.org/0000-0002-1655-4281)

²GENETEK Güç&Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, ORCID No : [0000-0001-7168-2764](https://orcid.org/0000-0001-7168-2764)

³Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, ORCID No : [0000-0002-1117-0326](https://orcid.org/0000-0002-1117-0326)

Anahtar Kelimeler	Öz
Güç kablosu Paralel devre Dengesiz yüklenme Kablo akımı Kuplaj akımı	<i>Güç taşınmasında gerek arıza olasılıklarının azaltılması gerekse güvenlik gerekçeleri ile orta gerilim kabloları tercih edilmektedir. Bununla birlikte, enerji talebinin arttığı bölgelerde çok sayıda kablo sisteminin aynı kanal veya galeri içerisinde paralel şekilde tesis edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada bir transformatör merkezinin ana indirici çıkışından dağıtım merkezine kadar tesis edilmiş olan güç kablolarının kuplaj barası üzerinden bağlandığı bir uygulama incelenmiştir. Öncelikle kablo sistemi modellenerek analizi gerçekleştirilmiş ve saha ölçüm verileri ile model doğrulanmıştır. Ardından, çeşitli parametrelere bağlı olarak kuplaj barasından geçen akımlar ile kablolar üzerinde oluşan akım dağılımlarının değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm bu parametrelerin kablolarda taşınan akımlar ile kuplaj akımları üzerinde önemli oranda etkisi olduğunu göstermektedir. Bu durum, paralel devrelere sahip kablo sistemlerinde gerek enerji temininin sürekliliği gerekse sistem güvenilirliğini sağlayabilmek için kablo sistemlerinin tesis edilmesi esnasında işletme süresince karşı karşıya kalınabilecek işletme koşullarındaki değişimlerin göz önünde tutulması gerekliliğini ispatlamaktadır.</i>

EFFECT OF OPERATING PARAMETERS ON CORE CURRENTS IN HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES CONNECTED IN PARALLEL OVER COUPLING BUS

Keywords	Abstract
Power cable Parallel circuit Unbalanced loading Cable current Coupling current	<i>In power distribution, medium voltage cables are preferred for both reducing the probability of failure and for safety reasons. However, it becomes necessary to install many cable systems in parallel in the same gallery, especially in regions which the energy demand increase. In this study, a case study in which the power cables installed from the main step-down output of a transformer substation to the distribution center are connected via the coupling bus is examined. In this context, first of all, the cable system was modeled and analyzed, and the model was verified with the field measurement data. Then, depending on the various parameters, the currents passing through the coupling busbar and the variation of the current distributions on the cables were examined. The results show that all these parameters have significant effects on the currents in the cables and the coupling. This proves the necessity of considering the changes in the operating conditions that may be encountered during the installation of the cable systems in order to ensure the continuity of the energy supply and the system reliability in the cable systems with parallel circuits.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 12.08.2022

Kabul Tarihi

: 10.10.2023

Research Article

Submission Date

: 12.08.2022

Accepted Date

: 10.10.2023

* Sorumlu yazar: aytac@kocaeli.edu.tr

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1161302>

1. Giriş

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtım aşamalarında havai hatlar ile yüksek gerilim yeraltı kabloları kullanılabilir. Günümüzde özellikle şehir merkezlerinde havai hatların yerini oluşturdukları

risk ortamından, çevreye verdiği görüntü kirliliğinden ve kullandığı büyük ölçekli alandan dolayı yüksek gerilim yeraltı kabloları almaktadır (Alboyacı, Çınar, Demirel ve İnce, 2022). Enerji dağıtımında kullanılan yüksek gerilim kablolarının paralel devreler halinde tesis edilerek işletilmesi durumunda teknik açıdan



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

çeşitli olumsuzluklar ile karşı karşıya kalınabilmektedir. Bu olumsuzlukların başlıcası olarak paralel kablo iletkenleri arasında meydana gelen akım dağılımının dengeli olmaması ve buna bağlı olarak aynı baradaki kablolar arasında kuplaj bağlantısı mevcut ise kuplaj kapatıldığında bu bağlantıdan akım akması sayılabilir. Dengesizlik sebebiyle meydana gelen bu akımlar kesici elemanlarda hatalı açma eylemlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet verebilmektedir.

Paralel güç kablolarının dengesiz yüklenme sebeplerinden biri kablolar arasında oluşan karşıt endüktanstır. Karşıt endüktans değeri kabloların tesis edilme aşamasında gerçekleştirilen çeşitli uygulama biçimlerine göre değişiklik göstermektedir. Kablolar arasında oluşan karşıt endüktans değeri eşit olmadığından dolayı kablo sistemi için oluşturulan empedans matrisinde köşegen haricindeki elemanların değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu sebepten dolayı kablolar arasında meydana gelen akım dağılımları da dengesiz hale gelmektedir.

Dengesiz yüklenmenin şiddeti kabloların yerleşim düzenleri (trefoil, flat vb), faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumu, paralel iletken grupları arasındaki uzaklık, kabloların ekran ve zırhının mevcut olup olmaması, ekran ve zırhın mevcut olması durumunda bunların topraklama düzeni, ekran ve zırhın topraklama barasına bağlantı noktasındaki kontak direnci, kablonun harmonikli akımlar ile yüklenme derecesi ve yük dengesizliği gibi birçok parametreye bağlı olarak da değişmektedir.

Literatürde, çok sayıda paralel kablo içeren sistemlerde iletkenler üzerindeki akım dağılımlarının hesaplandığı (Wu, 1984; Fassarella vd., 2018), dengesizliği azaltmaya yönelik faz dizilimlerinin incelendiği (Zhang, Zhang, Li, Li ve Li, 2022) ve kablo ekranlarında oluşan gerilimlerin hesaplandığı (Kong, Wang, Zhang, Yin ve Deng, 2010) çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunun yanında paralel kablo sistemlerinde mevcut çalışma durumlarına göre kabloların ısınma düzeylerini, harmonikli akım içeren yüklenme durumlarında kablolarında oluşan akım dağılımlarını (Gouramanis, Demoulias, Labridis ve Dokopoulos, 2009), kabloların ekranlama tiplerine göre oluşan kayıpları ve akımları (Gouda vd., 2011; Dong vd., 2017; Khamlichi vd., 2017; Akbal, 2017) ekran akımlarının yapay sinir ağı tabanlı yöntemlerle hesaplanmasını (Koroğlu, Umurkan ve Kesler, 2015), ekranlama tipine göre kablonun elektriksel performansını (Mahdipour, Akbari, Khalilzadeh ve Werle, 2017) inceleyen, yüksek gerilim yeraltı kablolarının arasında bulunan mesafelerin parametrik olarak değişiminin incelendiği ve harmonikli yüklenme durumunda ekran akımlarının, gerilimlerinin ve kayıpların karşılaştırıldığı (Demirool ve Kalenderli, 2023) çalışmalara rastlanmaktadır.

Bu ve benzeri çalışmalarda özellikle iletkenler üzerindeki akım dağılımlarının hesaplanmasında sonlu

elemanlar yönteminin kullanılmasının kolaylıklar sağladığı görülmektedir (Demirool vd., 2021; Li vd., 2016). Buna karşın kablolar arasındaki dengesiz yüklenme ile meydana gelen sirkülasyon akımının fazlar arası uzaklığa, topraklama barası kontak geçiş direncine ve kablo sisteminin etrafında bulunan diğer kablolardan geçen akıma göre karşılaştırıldığı çalışmaların sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu çalışmada çok sayıda paralel kablo içeren ve baralar arasında kuplaj bağlantısı bulunan bir sistemde kablo ekranları ile toprak barası arasındaki kontak direnci, tesis edilen kablolar arasındaki mesafe ve kablo gruplarının yüklenme durumunun değişimi gibi tasarım ve işletmeye bağlı parametrelere göre kablolar üzerinden ve kuplaj barasından geçen akımlarda meydana gelecek değişimlerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda ülkemizde faaliyet gösteren bir elektrik dağıtım şirketi tarafından sağlanan verilerden faydalanılarak detaylı modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve endüstrileşmeye bağlı olarak yük yoğunluğunun artması, özellikle büyük şehirlerde iki veya daha fazla sayıda güç transformatörünün aynı merkezde bulunması, kablo hatları için öngörülen güzergahların sınırlı kalması gibi sebeplerle ana transformatör merkezlerinden (TM) çıkan kablolar Şekil 1'de gösterildiği üzere çok sayıda paralel kablo demetleri halinde ve tüm kablolar aynı galeri içerisinde olacak şekilde tesis edilmektedir. Bu durumda çeşitli faktörlere bağlı olarak iletkenler üzerinde oluşan akım dağılımlarında önemli düzeyde dengesizlikler ile karşı karşıya kalınabilmektedir.

Orta gerilim yeraltı kabloları güç sisteminin temel ekipmanlarından biridir. Sistem boyutlandırması yapılırken kullanılacak olan kabloların nominal akımı taşıyabilecek, uygun gerilim düşümü değerini sağlayacak ve meydana gelebilecek kısa devre akımına dayanacak bir şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Bunun yanında kablolar üzerinden geçen akımlar faz sıralaması, kablolar arasındaki mesafe, toprak geçiş direnci gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

2.1. Teorik Metot

Paralel kablolar kullanılarak tesis edilen sistemlerde akım dağılımının hesaplanabilmesi için empedans matrisinin elde edilmesi gerekmektedir.

Kablo sisteminin empedans matrisi kabloların rezistif dirençleri ile öz ve karşıt endüktanslarından oluşmaktadır. Bu parametreler de kabloların arasında bulunan mesafeye, kablonun ekranlamasının mevcut olup olmamasına, mevcut ise ekranlamanın topraklanma durumuna, toprak geçiş direncine, faz

sıralamasına, deri ve yakınlık etkilerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1. Aynı galeri içerisinde bulunan çok sayıda orta gerilim yeraltı kablosu

Kabloların ekransız olduğu ve paralel kabloların tamamının aynı faza ait olduğu varsayıldığında empedans matrisini oluşturan elemanların değerleri Denklem (1)-(2) kullanılarak hesaplanmaktadır (Fassarella, Fortes ve Sotelo, 2018).

$$Z_{jj} = \left(R + j\omega \left(L + \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{r} - 1 \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$Z_{jk} = j\omega \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2s}{D_{jk}} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

Burada; R iletkenin alternatif akım direnci (Ω), L iletkenin öz endüktansı, μ_0 manyetik geçirgenliği, r iletken yarıçapı (m), s kablo uzunluğu (m), D_{jk} ise j ile k kabloları arasında bulunan mesafe (m) olarak tanımlanmaktadır. Bu kabloların alternatif akım dirençleri ise doğru akım dirençleri ile deri ve yakınlık etkisine bağlı olarak Denklem (3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + y_s + y_p) \quad (3)$$

Burada; R_{ac} , R_{dc} , y_s ve y_p sırası ile alternatif akım direncini (Ω), doğru akım direncini (Ω), deri etkisi katsayısını ve yakınlık etkisi katsayısını ifade etmektedir.

İletkenin doğru akım direnci Denklem (4)'e göre;

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{S} \quad (4)$$

olup, burada ρ , l ve S sırası ile iletkenin öz direncini ($\Omega \cdot m$), uzunluğunu (m) ve kesit alanını (mm^2) ifade etmektedir. Deri etkisi ve yakınlık etkisi katsayıları sırasıyla Denklem (5)-(6) kullanılarak elde edilmektedir.

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (5)$$

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left(\frac{D_i}{a} \right)^{2.9} \quad (6)$$

Burada,

$$X_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_s} \quad (7)$$

$$X_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_p} \quad (8)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde, f kablodan akan akımın frekansı (Hz), D_i iletken çapı (m), a iletken eksenleri arasındaki mesafe (m) olarak tanımlanmaktadır. k_s ve k_p katsayı değerleri ise uluslararası standartlarda açıklandığı şekilde elde edilebilmektedir (IEC 60287-1-1, 2006).

Empedans matrisinin elde edilmesinin ardından Denklem (9)'dan yola çıkarak paralel iletkenler arasındaki akım dağılımları bulunabilmektedir.

$$[\bar{I}] = [\bar{Z}]^{-1} [K] ([K]^T [\bar{Z}]^{-1} [K])^{-1} [\bar{I}_{abc}] \quad (9)$$

Burada Z empedans matrisini, K kabloların konumlarına göre oluşturulan katsayılar matrisini ifade etmektedir. $[K]$ matrisi (Fassarella, Fortes ve Sotelo, 2018)'den elde edilmektedir.

2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), güç sistemi ekipmanlarının elektriksel parametrelerin hesaplanmasında kullanılabilir. Özel tip transformatörler (Çürükova vd., 2022), yüksek gerilim izolatörleri (Alboyacı, Çınar, Demiroğlu ve Uzar, 2022), korona halkaları (Uzar, Demiroğlu, Çınar ve Alboyacı, 2023) ve baralı kanal birimi sistemleri (Alboyacı, Çınar ve Demiroğlu, 2023) FEM ile modellenilebilmekte, analiz ve optimizasyon çalışmaları yüksek doğruluk ile gerçekleştirilebilmektedir. FEM ile analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık geometrik yapılarda dahi çözüm yapılabilir.

Gerçekleştirilen analiz çalışmalarında iletkenler üzerindeki akım dağılımının hesaplanması için kısa zamanda ve yüksek doğrulukta işlem gerçekleştiren sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile model üzerinde sonlu sayıda üçgen eleman

oluşturulmakta ve bir ağ yapısı oluşturan bu elemanlara Denklem (10)-(13)'te verilen Maxwell denklemleri uygulanmaktadır (Szulborski, Lapczynski ve Kolimas, 2021).

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (12)$$

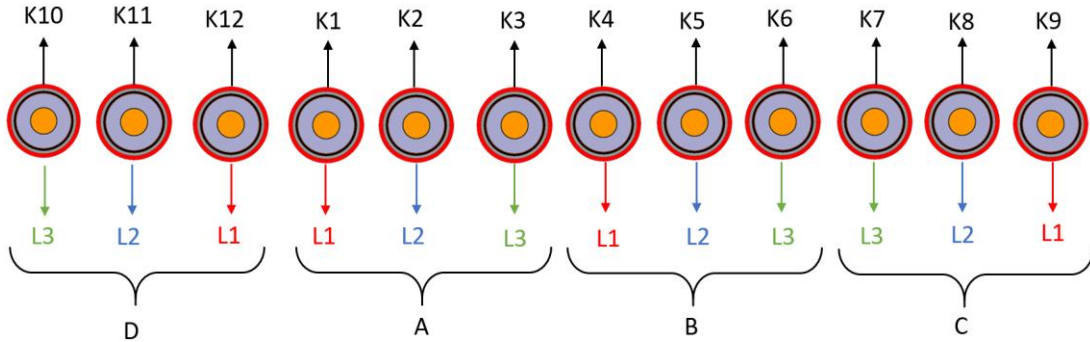
$$\nabla \cdot D = \rho \quad (13)$$

Burada, H manyetik alan şiddeti vektörü (A/m), J akım yoğunluğu vektörü (A/m^2), D elektrik akı yoğunluğu vektörü (C/m^2), t zaman (s), E elektrik alan şiddeti vektörü (V/m), B manyetik alan yoğunluğu vektörü, ρ yük yoğunluğu (C/m^2) olarak tanımlanmaktadır.

Buna göre sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalarda iletkenlerin geometrisi, ekran durumu, iletkenlerin faz sıralaması ve konumu, deri etkisi, yakınlık etkisi, fazların yüklenme durumu, harmonik bileşenlerin durumu, gözlem noktasının model etrafında bulunan konumu detaylı olarak değerlendirilmeye alınabilmektedir. Bu sayede, bu uygulama gibi detay gerektiren analizlerde zaman tasarrufu sağlamak ve yüksek doğrulukta çözümler vermektedir.

3. Kablo Sisteminin Modellenmesi

Bu çalışmada incelenen gerçek bir uygulamada, transformatör merkezi ile dağıtım merkezi arasında

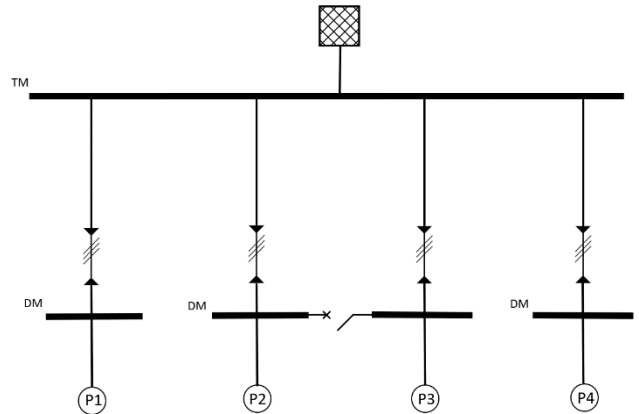


Şekil 3. Kablolar ve kablo gruplarının isimlendirilmesi ve faz sıralaması

Uygulamada kullanılan kabloların fiziksel boyut ve özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Kabloların dış kılıfları arasındaki mesafe 70 mm olacak şekilde tesis edilmiştir.

Her bir kablo grubundaki faz dizilimi incelenen uygulamadaki yerleşime uygun olarak tanımlanmıştır. Şekil 4'te, modellenen kablo grupları için oluşturulan uyarma devreleri ile ekran topraklama devresi gösterilmektedir. Burada K1...K12 olarak isimlendirilen endüktanslar güç kablolarını, R1...R12 olarak isimlendirilen dirençler ise her bir kabloya bağlı yükü temsil etmektedir. İncelenen uygulamada güç kabloları ekranlı ve zırhlı yapıda olup çift taraftan topraklı biçimde tesis edilmiş olduğundan uyarma devresinde de

dört kablo grubu halinde toplam on iki adet kablo tesis edilmiş durumdadır. Şekil 2'de incelenen sistemin tek hat şeması gösterilmektedir.



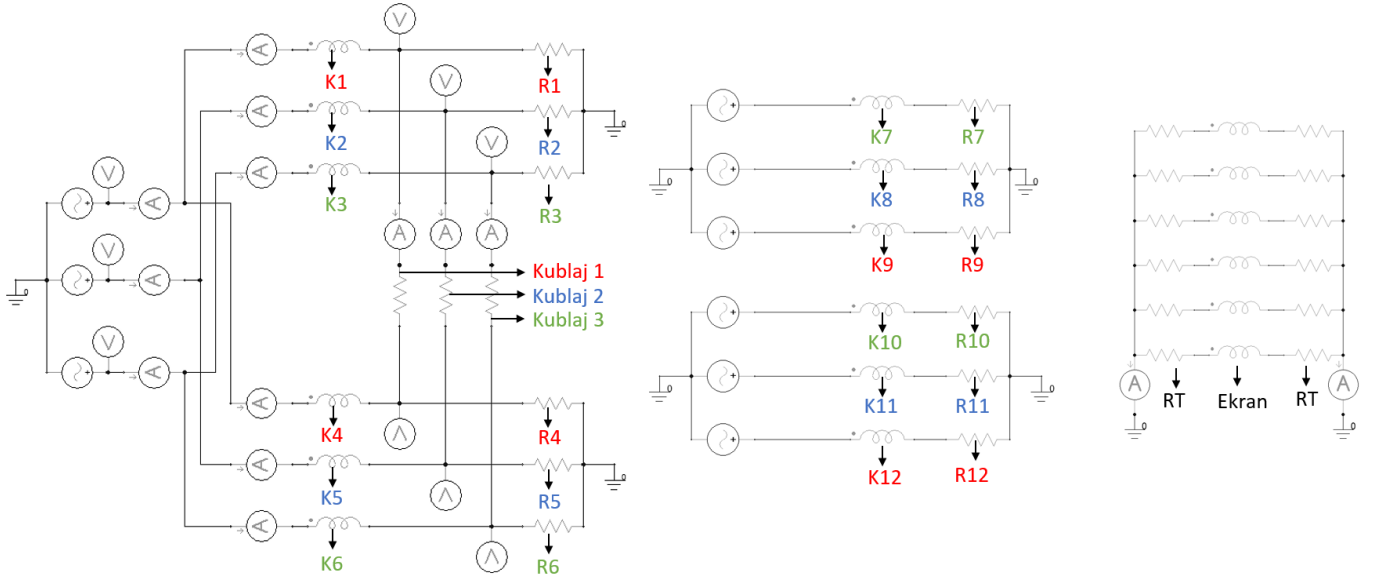
Şekil 2. Uygulamaya ait tek hat şeması

Uygulamadaki kablo sisteminin modellenmesi ve analizleri Ansys Electronics Suite yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te incelenen kablo sistemini oluşturan kablo gruplarının model içerisindeki isimlendirmesi ve her bir kablo grubundaki üç faza ait faz sıralaması verilmektedir. Buna göre, A ve B olarak adlandırılan kablo grupları kendi aralarında kuplaj bağlantısına sahip olup birbirinden bağımsız yükleri beslemektedir. C ve D olarak adlandırılan kablo grupları ise tamamen bağımsız sistemler olup diğer gruplar ile herhangi bir kuplaj bağlantısı bulunmamaktadır.

bu bağlantı biçimi oluşturulmuştur. Şekil 4(c)'de RT olarak isimlendirilen dirençler ise topraklama bağlantısının kontak direncini göstermektedir.

Tablo 1. Kablo boyut ve özellikleri

Parametre	Özellik
Kablo tipi	(N)2XSYR(A)Y
Kablo gerilimi	20.3/35 (42) kV
Kablo kesiti	1x240RM/25 mm ²
İletken çapı (Bakır)	17.48 mm
İzolasyon çapı (XLPE)	37 mm
Ekran çapı (Bakır)	37.7 mm
İç kılıf çapı (PVC)	40.5 mm
Zırh çapı (Alüminyum)	44.32 mm
Dış kılıf çapı (PVC)	49.72 mm



Şekil 4. Kablo sistemi için oluşturulan uyarma devresi

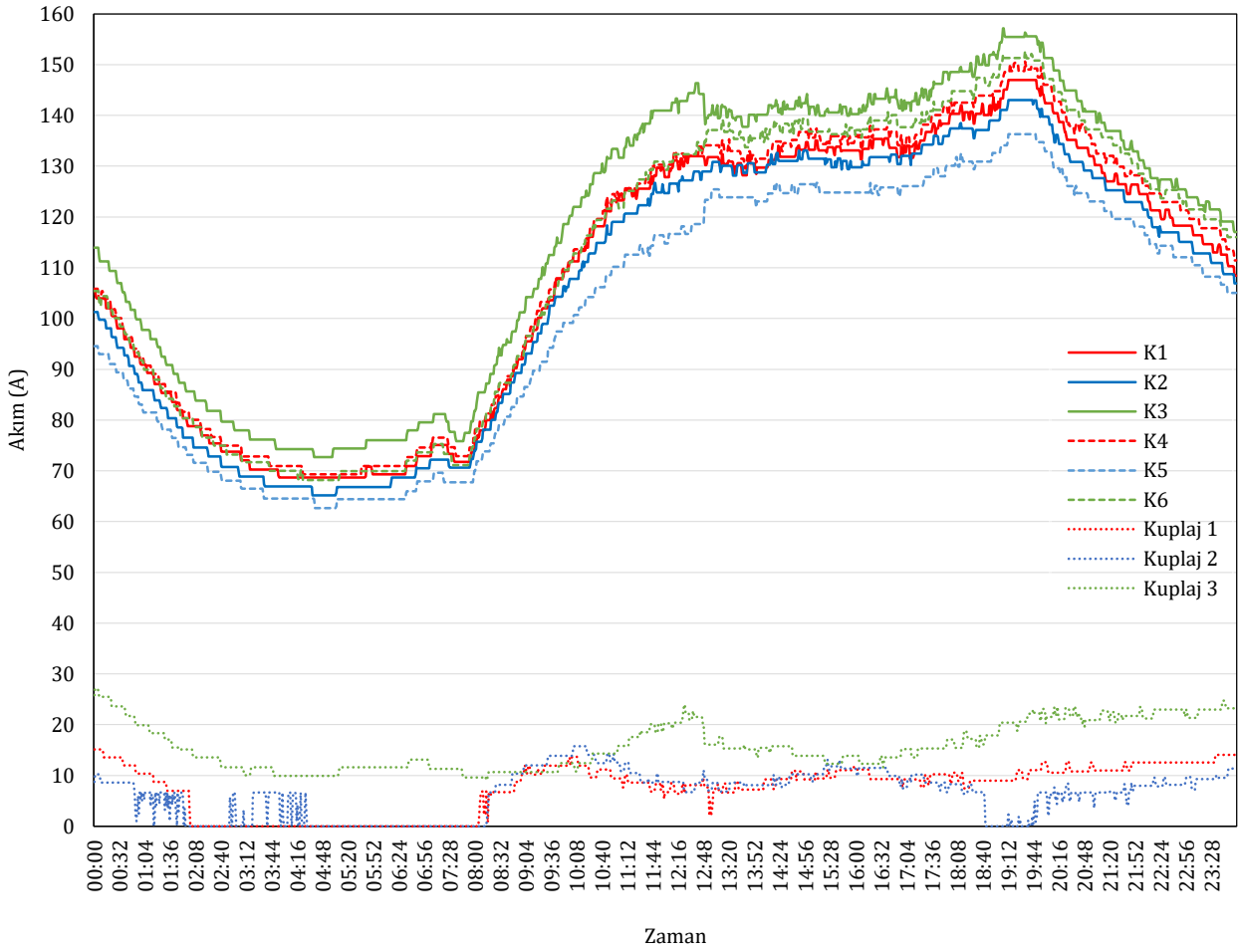
4. Analiz Çalışmaları

Bu çalışmada incelenen kablo sistemi paralel devreler halinde işletilmekte olup paralel devreler üzerinde karşıt endüktans değerlerinin eşit olmaması nedeni ile oluşan ve kuplaj barasından geçen dengesizlik akımları kesicilerde hatalı açmalara neden olmaktadır. Bu dengesizliğin boyutu iletken içerisinde geçen akımın değerine bağlıdır.

Bu çalışmada, öncelikle yaşanan bu olay detaylı olarak analiz edilerek incelenmektedir. Kablo sistemi için oluşturulan modelin bu şekilde doğrulanmasının ardından ise kablolar arasındaki dengesiz yük akımlarının ve kuplaj barası üzerinden geçen akımların incelenen parametrelere göre etkilenme düzeyinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Oluşturulan modelin doğrulanması amacıyla sahadan elde edilen ve Şekil 5'te verilen 24 saatlik ölçüm verisi incelenmiş ve bu zaman içerisinde belirlenen bir

yüklenme durumu için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde üç fazlı sisteme uygulanan gerilim dalga şekli saf sinüs biçiminde ve faz-nötr arası 19.2 kV değerinde olup aralarında 120° faz farkı bulunmaktadır. Kabloların ekran ve zırh ile topraklama barası arasında bulunan kontak geçiş direnci değeri 0.001Ω olarak kabul edilmiştir. Kuplajın kapalı olduğu durumda kuplaj direnç değeri $1\mu\Omega$ olarak tanımlanmıştır. Analiz esnasında kablo iletkenlerinin sıcaklık değeri sabit 90°C olarak kabul edilmiş ve akıma bağlı değişimler ihmal edilmiştir. Yüksek gerilim yeraltı kablo sistemlerinde yüklenmeye ve toprağa gömülme derinliğine bağlı olarak kabloların sıcaklık değerleri değişecektir. Bu çalışmada modellenen sistemlerin gerçek hayatta uygulanabilirliğinin doğrulanması için termal analiz çalışmalarının da gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında termal hesaplamalar incelenmemiştir.



Şekil 5. Kablo sisteminin 24 saatlik gerçek yüklenme eğrisi

Analiz çalışması sonucunda Şekil 4'te verilen uyarma devresinde de gösterilen kablo akımları ve kuplaj barası akımları ile saha ölçümlerinde elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 3'te bu durumda için yük dirençleri gösterilmiştir. Faz akımları ile kuplaj akımlarının 20ms'lik bir tam periyottaki akım dalga şekilleri Şekil 6-7'de verilmektedir.

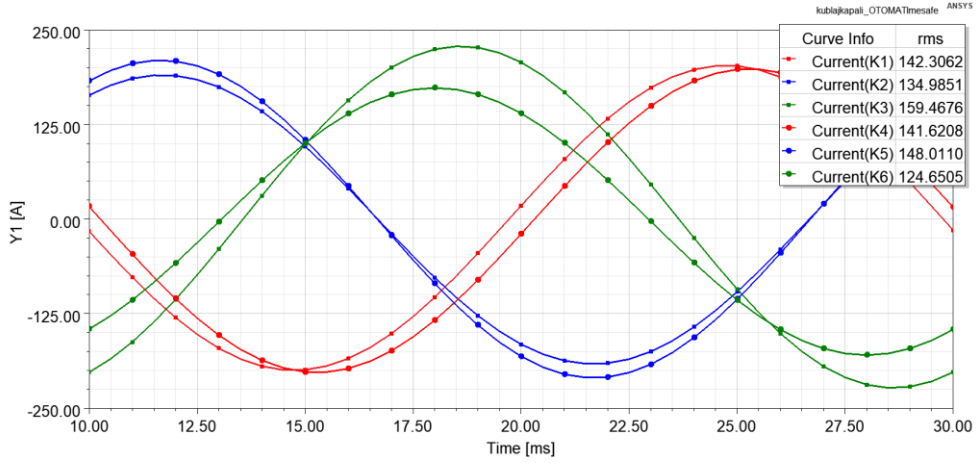
Analizler sonucunda elde edilen akım değerlerinin saha ölçümü ile elde edilen akım değerleri ile büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu sayede, oluşturulan modelin ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin doğrulanması sağlanmıştır. Buna dayanarak, kablo akımları ile kuplaj akımlarını etkileyen diğer parametrelerin etki düzeylerinin incelenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. A ve B grubu kablo ve kuplaj akımlarına ait ölçüm ve analiz değerlerinin karşılaştırması

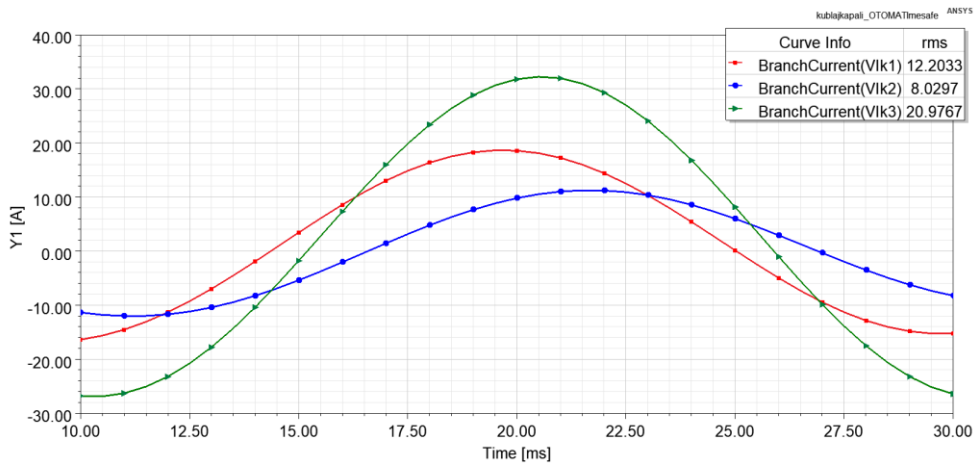
Kablo	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Kuplaj-1	Kuplaj-2	Kuplaj-3
Ölçüm	142.42	139.72	151.33	146.04	147.18	132.89	12.63	6.62	21.54
Analiz	142.30	134.98	159.46	141.62	148.01	124.65	12.20	8.02	20.97

Tablo 3. Saha ölçümü ile doğrulanan model için yük dirençleri

Grup	D	A	B	C
R	10,11,12	1,2,3	4,5,6	7,8,9
Ohm	109.88	138.88	141.84	44.64



Şekil 6. Kablo akım dalga şekilleri



Şekil 7. Kuplaj bara akım dalga şekilleri

Tablo 2'de verilen analiz sonuçları kabloların dengesiz biçimde yüklendiğini ve kuplaj baralarından geçen akımları göstermektedir. Bu akımın büyüklüğü kablolar arasındaki uzaklığa, kontak direncine, kabloların yüklenme düzeyine ve faz dizilimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, doğrulanmış model yardımıyla kablolar ve kuplaj barasındaki akım değerlerinin topraklama barası kontak direncinin değerine, kablolar arasındaki mesafeye ve bağımsız kablo gruplarının yüklenme düzeylerine bağlı olarak değişiminin değerlendirilmesine yönelik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

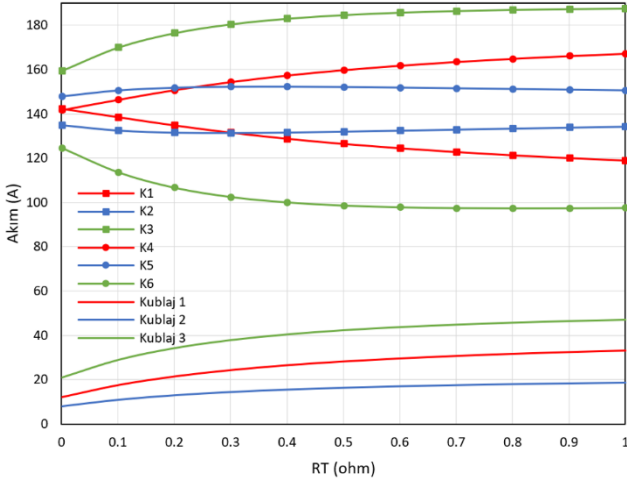
4.1. Ekran topraklaması kontak direncinin etkisi

Enerji dağıtımında kullanılan yüksek gerilim yeraltı kabloları gerek elektriksel izolasyon gerekse mekanik koruma amacıyla ekran ve zırh yapılarına sahiptir. Bu bileşenlerin topraklanması tek veya çift taraftan yapılabilmektedir (Öztürk, Karacasu ve Hocaoğlu, 2010). Bu çalışmada modellenen güç kabloları da ekran ve zırh bileşenlerine sahip olup çift taraftan topraklı bir sistemdir. Topraklama tipine göre kablolarda meydana

gelen akım dağılımı, indüklenen gerilimler ve kabloların akım taşıma kapasiteleri gibi parametreler değişiklik göstermektedir (IEC 60502-4, 2010).

Ekran ve zırh topraklaması yapılırken ekran ve zırh iletkenleri kablo başlığından çıkartılmakta ve topraklama barasına bağlanmaktadır. Bu bağlantı yapılırken bağlantı noktasında bir kontak direnci meydana gelmektedir. Bu kontak direnci işletme sürecinde baranın korozyona uğramasına, bağlantı civatalarının gevşekliğine, bara malzemesine ve bara ile kablo arasında bulunan mesafeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bölümde bu direnç değerinin kablo akımları ve kuplaj barası akımlarına etkileri incelenmektedir.

Bu amaçla, model doğrulama sürecinde 0.001Ω olarak tanımlanan kontak direnci değeri yukarıda sıralanan faktörleri temsilen 1Ω değerine kadar artırılmıştır. Her bir analiz için elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmektedir.



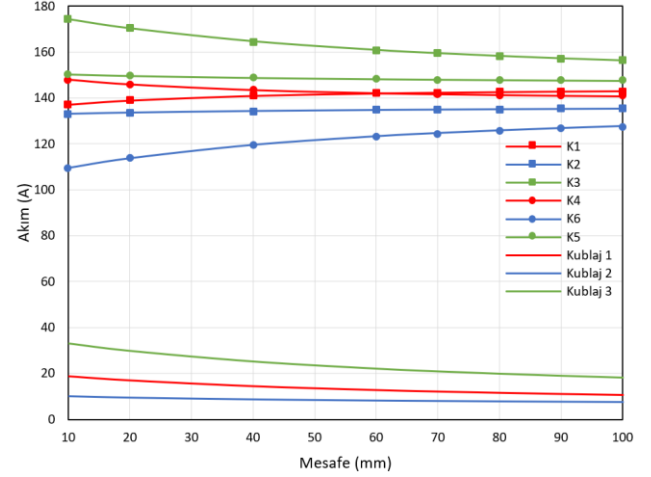
Şekil 8. Topraklama kontak direncine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

Elde edilen sonuçlar topraklama kontak direncinin değerine bağlı olarak kablo akımları ile kuplaj barası akımlarının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Bu bağlamda kontak direnci değerinin artmasıyla birlikte aralarında kuplaj bağlantısı bulunan A ve B grubu kablolar arasında meydana gelen dengesizliğin büyük oranda arttığı gözlenmektedir. Benzer şekilde, bu dengesizliğin artışına paralel olarak kuplaj barasından akan akım değerlerinde de %100'e yaklaşan oranda artış görülmektedir.

Kontak direnci değişiminin akım dağılımlarına etkisi sistemin empedans matrisinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Kabloların ekranları arasında bulunan direnç değeri yükseldikçe, ekran ve zırhlardan geçen akım miktarı azalmaktadır. Çekirdek ve ekrandan geçen akım arasında bulunan fark arttıkça, kabloların birbirleri arasında bulunan karşıt indüktans değerleri yükselmektedir, bu sebepten dolayı kabloların kendi aralarında bulunan indüktans etkisi artmakta, bu durum da akım dağılımı dengesizliğinin yükselmesine sebep olmaktadır.

4.2. Kablolar arasındaki mesafenin etkisi

Yüksek gerilim yeraltı kabloları flat veya trefoil düzende tesis edilmekte olup kablolar arasındaki mesafeye bağlı olarak karşıt endüktans değeri değişmektedir. Bu mesafenin kablolardan akan akıma ve kuplaj barası akımlarına etkisinin belirlenmesi için doğrulan modelde 70 mm olarak tanımlanan mesafe 10 mm ile 100 mm arasında 10 mm'lik adımlarla değiştirilerek analiz çalışmaları tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kablo ve kuplaj bara akımı değerler Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Kablolar arası uzaklığa bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

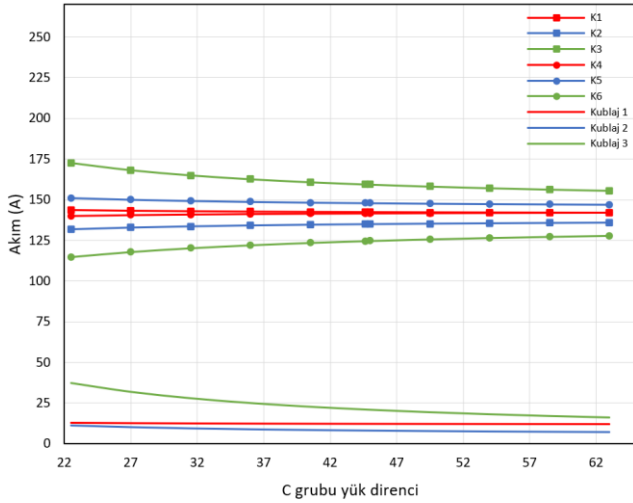
Buna göre, kablolar arasındaki uzaklığın artmasıyla birlikte karşıt endüktans etkisinde önemli ölçüde azalma gözlenmektedir, bu durum da akım dağılımlarının daha dengeli olmasına neden olmaktadır. Orijinal modelde 70 mm olarak düzenlenen kablolar arası uzaklığın azalması gerek kablo akımları arasındaki dengesizliğin gerekse kuplaj barası üzerinden akan akım değerlerinin artışıyla sonuçlanmaktadır.

4.3. Sistemdeki bağımsız kablo gruplarının yüklenme oranına etkisi

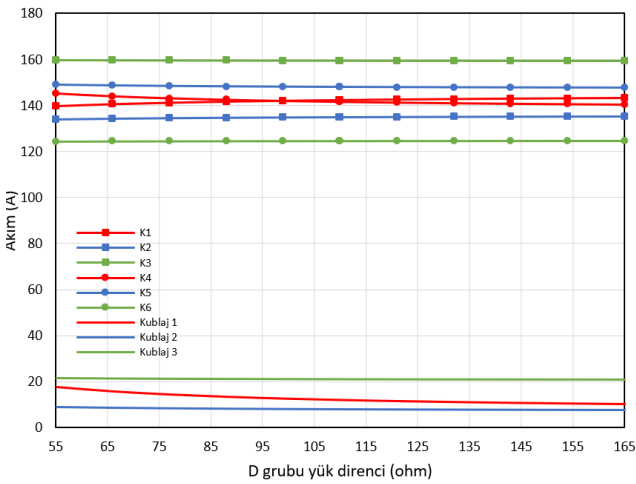
Dört kablo grubu halinde toplam on iki adet yüksek gerilim kablosundan oluşan ve Şekil 3'te gösterilen kablo yapısında sadece A-B grubu kablolar elektriksel olarak kuplaj bağlantısına sahip olup, C ve D gruplarındaki kablolar ile bir elektriksel bağlantı bulunmamaktadır. Bununla birlikte, kablo grupları arasındaki karşıt endüktans etkisinden dolayı C ve D gruplarında bulunan kabloların yüklenme değerine bağlı olarak taşıdıkları akımın A ve B gruplarındaki kablolar ile kuplaj barasından geçen akım üzerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. C ve D grubunda bulunan kabloların yüklenme oranı, A ve B grubu kabloların üzerinde bir manyetik alan etkisi yapacağından ve kabloların kendi aralarında karşıt indüktans etkisi olduğundan dolayı akım dağılımlarına etki etmektedir. C ve D grubu kabloların yüklenme oranı arttıkça, karşıt indüktans matrisindeki etkisi de artacağı için kuplaj barasından geçen dengesizlik akımlarının artması beklenmektedir.

Saha ortamından elde edilen akım ölçümleri ile doğrulan modelde yükü simgeleyen direnç değerleri C grubu kablolar için 44.64Ω, D grubu kablolar için ise 109.88Ω olarak hesaplanmıştır. Bu kablo gruplarındaki yüklenme oranı değişimini temsil etmesi amacıyla bu direnç değerleri C grubu kablolar için 44.64Ω değerinin, D grubu kablolar için ise 109.88Ω değerinin %50'si ve %150'si aralığında %10'luk adımlar ile değiştirilip analizler tekrarlanmıştır.

Bu analizler sırasıyla sadece C grubu kabloların yüklenme değişimi, sadece D grubu kabloların yüklenme değişimi ve her iki gruptaki kabloların yüklenme oranlarının birlikte değişimi olmak üzere üç adımda gerçekleştirilmiştir. Her bir adımda on farklı yüklenme değeri için kablo ve kuplaj barası akımları hesaplanmıştır. Analiz çalışmaları sonunda elde edilen kablo akımları ve kuplaj barası akımlarının değişimleri Şekil 10-12'de verilmektedir.

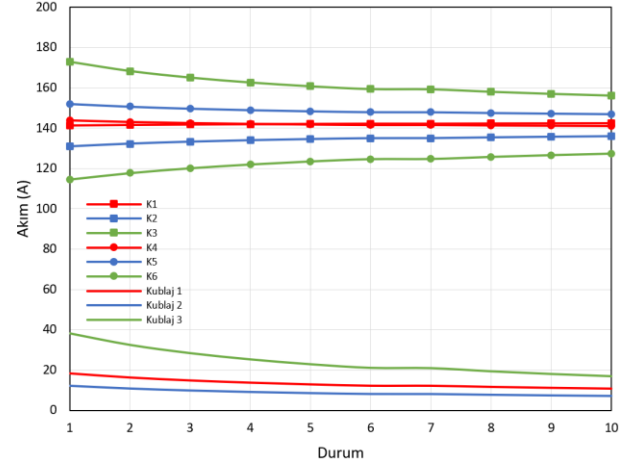


Şekil 10. Sadece C grubu kabloların yüklenme değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları



Şekil 11. Sadece D grubu kabloların yüklenme değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

Buna göre, C ve D grubu olarak adlandırılan kablo grupları tarafından taşınan akımın birbirlerinden bağımsız olarak değişiminin Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterildiği üzere gerek A ve B grubu kablo akımlarında gerekse kuplaj akımlarında değişime yol açtığı görülmektedir. A ve B grubu kablo akımlarında meydana gelen bu değişimin büyüklüğünün, C ve D grubu kablo akımlarının değişimiyle doğru orantılı olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 12. C ve D grubu kabloların yüklenme oranlarının birlikte değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

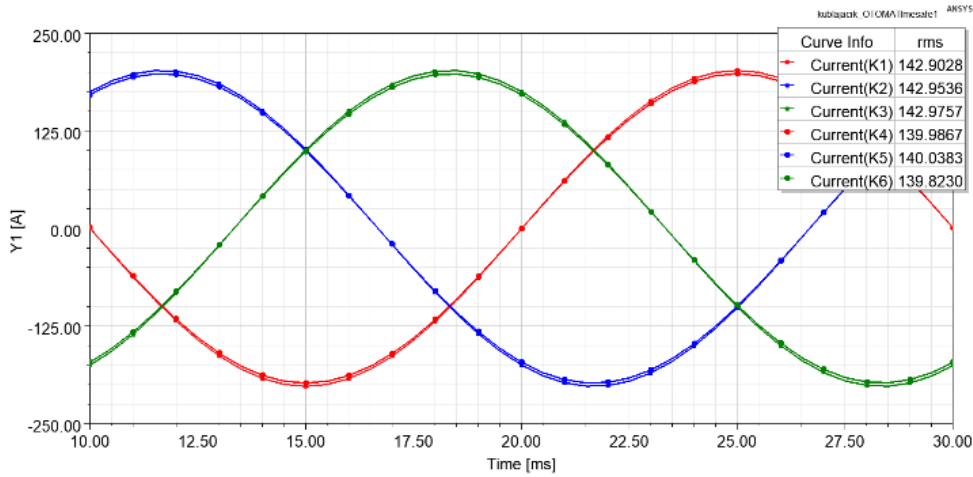
Buna göre, C grubu kablodaki yükü simgeleyen 44.64Ω 'luk direnç değerinin %50'si olan 22.32Ω değeri yük akımının önemli ölçüde artışı ifade etmekte ve bu durumda akım dengesizliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Benzer durum sadece D grubu kabloların yüklenme düzeyinde meydana gelen değişim için de geçerli olmaktadır. Bununla birlikte, bu kablo grubu için kablodaki yükü simgeleyen 109.88Ω 'luk direnç değerinin bu çalışmada yük değişim aralığının alt sınırı olarak kabul edilen %50'sine karşılık gelen 54.94Ω değerine düşmesi yük akımında büyük miktarda artışa neden olmamaktadır. Bu sebeple Şekil 10'da 22.32Ω değeri için kablo ve kuplaj akımlarındaki dengesizlik artışı Şekil 11'de 54.94Ω değeri için gözlenebilir düzeyde olmamaktadır.

C ve D grubu kablo yük akımlarının aynı anda değişimi de beklendiği gibi özellikle yüksek yük akımları için A ve B grubu kablolar ve bu kablo grupları arasındaki kuplaj akımlarında artışa ve dengesizliğe sebebiyet verdiği gözlenmektedir.

4.4. Kuplajın açık işletilmesi durumu

Oluşturulan modelde A ve B grubu kablolar arasında mevcut olan kuplaj bağlantısının açık olması durumu değerlendirilmiştir. Kuplajın açık olarak işletilmesi durumu Tablo-2'de gösterilmiş olan saha ölçümü ile analiz çalışmasının doğrulandığı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla uyarma devresinde kuplaj bağlantısını temsil eden direnç değeri açık devre durumunun benzetimi için $1G\Omega$ olarak tanımlanmıştır. Bu durumda kuplaj barası üzerinden herhangi bir sirkülasyon akımının akması mümkün olmayıp bu durum için elde edilen kablo akımlarının değeri 20 ms'lik bir periyotta Şekil 13'teki biçimde hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Kuplaj barasının açık olarak işletilmesi durumunda kablo akımları

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir uygulama örneğinden yola çıkılarak topraklama barası kontak direnci değeri, kablolar arasındaki mesafe ve bağımsız kablo gruplarının yüklenme düzeylerine bağlı olarak sistemdeki kablo akımları ile kuplaj akımlarının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, bir transformatör merkezi ile dağıtım merkezi arasında tesis edilmiş olan ve çok sayıda paralel kablo içeren bir kablo sistemi göz önünde tutulmuştur.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tüm bu parametrelerin hem kablo akımları hem de kuplaj akımları üzerinde etkisi olduğu gözlenmektedir. Uygulamada topraklama barasının korozyona uğraması, bağlantı terminallerinin gevşemesi gibi nedenlerle değiştiği gözlenen kontak direnci değerinin kablo akımları ve kuplaj akımlarını %100'e varan ölçüde etkilediği görülmektedir. Kablolar arasındaki mesafenin artması ise özellikle iletkenler arasındaki karşıt endüktans etkisinin azalması sebebiyle akım dengesizliğinin azaldığı gözlenmiştir.

Paralel olarak tesis edilen bağımsız kablo gruplarının yüklenme değerlerine bağlı olarak yapılan incelemede ise, yüklenme akımına bağlı olarak taşıdığı akımlar değerlendirilen kablo grupları ve aralarındaki kuplaj bağlantısı akımlarının değişen düzeylerde etkilendiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında kablo seçimi için gerekli olan diğer parametrelerden sürekli yük akımı, toprak termal direnci, yüklenebilirlik katsayısı, kablo ekranlarının topraklama tipi ve yan yana tesis edilen sistem sayısı gibi faktörler göz önünde tutulmamıştır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar sistem tasarımı yapılırken paralel tesis edilen kabloların gerek tesis edilme gerekse işletme koşullarında karşı karşıya kalabileceği durumların değerlendirilmesi ve buna göre karar alınmasının sistem güvenilirliği ve enerji temininde sürdürülebilirlik açısından önemli olduğunu göstermektedir.

Araştırmacıların Katkısı

Çalışmada Yazar-1 analizlerin gerçekleştirilmesi ve derlenmesi, Yazar-2 analizlerin gerçekleştirilmesi ve yazım denetimi, Yazar-3 ise fikrin oluşması ve sonuçların yorumlanması aşamalarında katkı sunmuşlardır.

Çıkar Çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Kaynaklar

- Akbal B. (2017). Yüksek gerilim kablolarında oluşan kılıf akımının yapay sinir ağı tabanlı melez yöntemlerle tahmin uygulamaları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 119-125. doi: [10.5505/pajes.2016.84669](https://doi.org/10.5505/pajes.2016.84669)
- Alboyacı B., Çınar M.A., Demiroğlu Y.B. ve İnce A. (2022). Evaluation of the Effect of Structural Defects in the Heat-Shrink Cable Terminal on Electric Field Distribution. *Engineering Failure Analysis*, 132, 105920. doi: [10.1016/j.engfailanal.2021.105920](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105920)
- Alboyacı B., Çınar M.A., Demiroğlu Y.B. ve Uzar M. (2022). Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106678. Doi: [10.1016/j.engfailanal.2022.106678](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106678)
- Alboyacı B., Çınar M.A. ve Demiroğlu Y.B. (2023). Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents. *Electric Power Systems Research*, 214, 108815. Doi: [10.1016/j.epr.2022.108815](https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108815)
- Çürükova S., Demiroğlu Y.B., Sönmez O., Çınar M.A. ve Alboyacı B. (2022). Cer Transformatörlerinde

- Elektriksel Parametrelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Demiryolu Mühendisliği*, c. 0, sayı. 16, ss. 66-78, doi:10.47072/demiryolu.1110515
- Demirel Y.B., Çınar M.A. ve Albayacı B. (2021). Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions. In: *2023 IEEE Belgrade PowerTech, Belgrade, Serbia*. doi: [10.3906/elk-2103-108](https://doi.org/10.3906/elk-2103-108)
- Demirel Y.B. ve Kalenderli Ö. (2023). Effect of Laying Parameters and Non-sinusoidal Loading Condition of High-Voltage Underground Cables on Electrical Performance by Finite Element Method. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29(1), 3119-3132. doi: [10.1109/PowerTech55446.2023.10202686](https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202686)
- Dong X., Yang Y., Zhou C. ve Hepburn D.M. (2017). Online Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 2281-2290. doi: [10.1109/TPWRD.2017.2665818](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2665818)
- Fassarella J.E.V., Fortes M.Z. ve Sotelo G.G. (2018). Measurement, evaluation and proposed solution for power distribution arrangements with electrical cables in parallel. *Measurement*, 119(1), 196-204. doi: [10.1016/j.measurement.2018.01.056](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.056)
- Gouda O.E. ve Farag A.A. (2011). Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2(1), 7-16. doi: [10.1.1.1029.8180](https://doi.org/10.1.1.1029.8180)
- Gouramanis K., Demoulias C., Labridis D.P. ve Dokopoulos, P. (2009). Distribution of non-sinusoidal currents in parallel conductors used in three-phase four-wire networks. *Electric Power Systems Research*, 79(1), 766-780. doi: [10.1016/j.epsr.2008.10.012](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.10.012)
- IEC 60287-1-1 Electric cables — Calculation of the current rating- Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses — General, 2006.
- IEC. 60502-4 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) – Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV, 2010.
- Kong X., Wang Y., Zhang Z., Yin X. ve Deng X. (2010). Calculation of Induced Voltage in Metal Shield of Single-core Cable Operated in Parallel, In: *International Conference on Power System Technology*, 1-8, Zhejiang, China.
- Koroğlu S., Umrkan N. ve Kesler S. (2015). Yeraltı kablolarında silindirik ekranlamanın performans analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 41-46. doi: [10.5505/pajes.2015.64872](https://doi.org/10.5505/pajes.2015.64872)
- Li Z., Zhong X., Xia J. ve Bian R. (2016). Simulation of current distribution in parallel single-core cables based on finite element method. *5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control*, 411-414, Qinhuanhdao, China.
- Mahdipour M., Akbari A., Khalilzadeh M. ve Werle P (2017). Impact of different bonding methods on high voltage cable shield induced voltage and current in normal and fault conditions. *25th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1308-1312, Iran.
- Öztürk O., Karacasu Ö. ve Hocaoglu M.H. (2010). Effects of parallel power cables on current distribution. Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 133-136, Bursa.
- Szulborski M., Łapczyński S. ve Kolimas Ł. (2021). Thermal Analysis of Heat Distribution in Busbars during Rated Current Flow in Low-Voltage Industrial Switchgear. *Energies*, 14(1), 1-23. doi: [10.3390/en14092427](https://doi.org/10.3390/en14092427)
- Uzar M., Demirel Y.B., Çınar M.A. ve Albayacı A. (2023), Investigation on the Effect of Corona Ring Design Parameters on Electric Field Distribution by Finite Element Method. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 3: 20-27. doi: 10.5152/tepes.2023.22031
- Wu A.Y. (1984). Single-Conductor Cables in Parallel. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 20(1), 377-395. doi: [10.1109/TIA.1984.4504423](https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504423)
- Zhang P., Zhang A., Li W., Li B. ve Li L. (2022). Study on optimization of laying mode of two parallel high voltage cables in the same phase of two circuits. *Energy Reports*, 8(1), 1839-1846. doi: [10.1016/j.egyr.2021.12.076](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.076)