

KISA DEVRE KOŞULLARINDA OLUŞAN ELEKTRO-MANYETİK KUVVETLERİN GÜÇ KABLOLARINA ETKİLERİNİN BELİRLENMESİ

Yunus BİÇEN¹

Faruk ARAS²

Ayşe Ergün Amaç³

^{1,2,3} Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi

41380 Umuttepe, KOCAELİ

¹e-posta: yunus.bicen@kou.edu.tr

²e-posta: arasfa@kou.edu.tr

³e-posta: ayseergun@kou.edu.tr

ABSTRACT

In this paper, the effects of electromagnetic forces, which occur under short circuit conditions, on insulated power cables are defined. These forces whose effects are negligible under normal operating conditions, they can display considerable effects under short circuit conditions. For this purpose, first the electromagnetic forces, that occur under short circuit conditions, are defined and then electromagnetic effects are examined for 10 kV and 154 kV XLPE power cables. The obtained results are assessed.

Anahtar sözcükler: Güç kablosu, kısa devre, elektromanyetik etki

1. GİRİŞ

Güç iletiminde yaygın olarak kullanılan yalıtımlı kablolar sistemin en önemli elemanı olarak çeşitli koşullarda tesis edilmektedir. Bu kablolar farklı işlevlere sahip çeşitli katmanlardan oluşmaktadır. Bu katmanlardan en önemlisi ana yalıtıktır. Kullanılan yalıtımın ve diğer katmanların maliyetinin yüksek olması nedeniyle tesis edilen kablonun beklenen işletim ömrünü tamamlaması son derece önemlidir. Bu nedenle kabloların döşenmesinde ve işletilmesinde kabloya ait standartlara uyulması gerekmektedir. Ortaya çıkabilecek olumsuz durumların kablo üzerinde ne gibi sonuçlar doğuracağı ve hangi önlemlerin alınması gerektiği önceden belirlenmelidir.

Yalıtımlı güç kablolarını en çok zorlayan sistemde ortaya çıkabilecek kısa devrelerdir. Kısa devre durumunda sistemden akan aşırı akım kablo için belirlenmiş sınır akım değerini aşacağından kablo yalıtım özelliklerini yitirebilir veya delinebilir. Sistemdeki kısa devre arızasında kablonun ömrünü azaltıcı yönde etkide bulunan iki önemli unsur vardır. Bunlardan ilki aşırı ısınma sonucu oluşan termo-mekanik etki, diğeri ise kablodan geçen

akımın oluşturduğu elektromanyetik etkidir. Kablolar tesis edilirken genellikle ilk unsur göz önüne alınmaktadır. Fakat elektromanyetik etki kabloların değişik tesis şekilleri için farklılıklar gösterir ve mutlaka göz önüne alınması gereklidir. Kısa devre durumunda, özellikle tavada üçlü olarak döşenmiş kablolarda, oluşan elektromanyetik etkinin kabloya verdiği zarar kabloları bir arada tutan metal elemanlar nedeniyle çok büyüktür[1,3]. Bu nedenle kablonun zarar görmemesi için kabloyu bir arada tutan sabitleyici ekipmanların (kelepçe, bant vb.) uygun mesafe aralıklarında bağlanması ve uygun özelliklerde seçilmesi önem arz etmektedir[3]. Çünkü sabitleyici elemanlar arasındaki mesafe kısa olursa, kablonun esneme yapması güçleşecek ve termo-mekanik etkiden kaynaklanan bu kuvvet kelepçeler vasıtasıyla kabloları olumsuz etkileyecektir. Sabitleyici eleman olarak sağlam olmaları nedeniyle 316 paslanmaz çelikten imal edilen metal kelepçeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu durumda elektrik alanından kaynaklanan eddy akımlarından oluşturduğu noktasal ısınmalar ortaya çıkmaktadır[3].

2. ELEKTROMANYETİK ETKİNİN BELİRLENMESİ

İki iletken arasında manyetik alandan kaynaklanan elektromanyetik kuvvet kabloların herhangi biri üzerinde bir F_s kuvveti oluşturmaktadır. Bu F_s kuvveti *birim* uzunluk için, iletkenlerden geçen I_1 ve I_2 akımıyla doğru kablo iletkenleri arasındaki mesafe (d) ile ters orantılı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir[1].

$$F_s = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \quad [\text{N/m}] \quad (1)$$

Burada kablonun tesis edildiği ortam (hava veya toprak) için manyetik geçirgenlik $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m olarak alınabilir[4,5]. F_s kuvveti ise kablolarda

oluşacak kısa devre çeşitleri ve döşeme biçimlerine göre farklılıklar göstermektedir.

Sistem faz-faz, faz-toprak veya simetrik üç faz olmak üzere farklı şekilde kısa devre arızasına maruz kalabilir. Oluşan bu kısa devre durumlarında geçen yüksek akımlar, kısa devrenin biçimine bağlı olarak, farklı büyüklüklerde bir manyetik kuvvet meydana getirmektedir. Özellikle kısa devre başlangıcındaki pik akımlarının oluşturduğu bu kuvvet kablunun hem kendisini hem de yakınında bulunan başka kabloları da etkilemektedir. Kabloda oluşan elektromanyetik etki ısı etkiyle birlikte düşünüldüğünde kablunun daha fazla zorlanmaya (stress) maruz kalmasına neden olmaktadır [6].

2.1. FAZ - TOPRAK KISA DEVRESİ

Bu tip kısa devrelerde iletken ve ekran arasındaki etkin kuvveti bulmak için eşitlik (1) deki d (mesafe) yerine $0,5d_{Mm}$ (d_{Mm} ortalama ekran çapı) girilmelidir. Çünkü faz-toprak kısa devresinde, akım ekran üzerinden devresini tamamladığından formül aşağıdaki şekli almaktadır.

$$F_s = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_s^2}{0,5 \cdot d_{Mm}} \quad (\text{N/m}) \quad (2)$$

2.2. FAZ-FAZ KISA DEVRESİ

Bu arıza durumlarında daha az bir manyetik kuvvet oluşacağı söylenebilir. Bunun nedeni kısa devre olan kabloların arasındaki mesafenin d_{Mm} den çok daha fazla olmasıdır.

$$F_s = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_s^2}{d} \quad (\text{N/m}) \quad (3)$$

2.3. ÜÇ FAZ KISA DEVRESİ

Yan yana düz olarak tesis edilen üç fazlı kablolarda oluşacak kısa devre durumlarında oluşan manyetik alandan en çok ortada tesis edilen kablo etkilenmektedir. Ancak tek iletkenli kablolar üçgen biçiminde tesis edilmiş ise bu durumda kablolardan her biri aynı manyetik alanın etkisi altında kalacaktır ve manyetik kuvvetin büyüklüğü düz döşenmiş kablolarına göre daha büyük olacaktır.

Diğer yandan bir iletkenin diğer bir iletken üzerinde oluşturduğu radyal yöndeki net elektromanyetik kuvvet F_L

$$F_L = \alpha \cdot F_s \quad (\text{N/m}) \quad (4)$$

şeklinde F_s 'nin bir α oranı olarak hesaplanabilir.

Buna ek olarak, tek bir kablunun veya kablolar grubunun üzerini kaplayan bağlayıcı ekipmanların (kelepçe, kemer, vb.) üzerlerinde oluşan teğetsel kuvvet, F_B ise ,

$$F_B = \beta \cdot F_s \quad (\text{N/m}) \quad (5)$$

şeklinde F_s 'nin bir β oranı olarak hesaplanabilir. Radyal ve teğetsel kuvvetlerin bulunmasında kullanılan α ve β kabloların tesis biçimlerine göre değişkenlik gösteren katsayılar olup, Tablo 1 de verilmektedir.

Sistemdeki kısa devre durumlarında kablodan geçen kısa devre akımı ve süresi kablunun dayanma sınır işletme sıcaklık değerlerini aşmamalıdır [2]. Bu nedenle sistemde oluşan kısa devre akımı I_a önemlidir ve aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$I_a = \frac{K \cdot q}{\sqrt{t}} \quad (\text{A}) \quad (6)$$

Burada q iletken kesit alanı (mm^2), t ise kısa devre süresini (sn) belirtmektedir. K sabiti ise aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$K = K_s \cdot \sqrt{\ln\left(\frac{\theta_f + \beta_0}{\theta_i + \beta_0}\right)} \quad (7)$$

$$K_s = \sqrt{\frac{\sigma_c (\beta_0 + 20) \times 10^{-12}}{\rho_{20}}} \quad (8)$$

Burada, θ_i başlangıç sıcaklık değeri θ_f son sıcaklık değerini ($^{\circ}\text{C}$), β_0 0°C deki direncin karşılıklı sıcaklık katsayısı (K), σ_c 20°C iletken malzemeye ait hacimsel özgül ısı ($\text{J/K} \cdot \text{m}^3$), ρ_{20} 20°C deki iletkenin elektriksel özgül direnci ($\Omega \cdot \text{m}$)

Bu çalışmada kullanılan XLPE kablolarına ait müsadde edilen işletme sıcaklıkları, kısa devre sıcaklıkları ve 1 saniye süresince mm^2 başına kısa devre akım sınır değerleri Tablo 2'de gösterilmektedir. Kabloya ait bu değerler IEC 840 Test standartlarına göre verilmiştir[2].

Tablo 2 XLPE Kablo sıcaklık ve akım değerleri

KABLO (XLPE)	İzin verilen						
	işletme sıcaklığı °C	kısa devre Sıcaklığı °C					
	90	250					
Kısa devre başladığında iletken sıcaklığı ve 1 sn. için mm² başına akım değerleri (A)							
90	80	70	60	50	40	30	20
143	149	154	159	165	170	176	181

Kısa devrede sırasında sisteme en çok zararı veren kısa devrenin hemen başlangıcında oluşan pik akımdır. Bu akım (I_s) zamanla etkisini yitirmekte olup aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_s = \sqrt{2} \times X \times I_a \quad (A) \quad (9)$$

Buradaki X kısa devrenin yerine bağlı olan ve pik faktörü olarak adlandırılan bir sabittir ve kısa devrenin nerede olduğu bilinmiyor ise $X = 1,8$ alınmaktadır[1].

Tablo 1 Kablo döşenme biçimlerine göre radyal ve teğetsel elektromanyetik kuvvetlerin değişimi

Sistem	Kısa Devre	İletkene uygulanan radyal yöndeki kuvvet [N/m]	α Faktörü	Kabloya uygulanan teğetsel kuvvet [N/m]	β Faktörü
Tek faz (ac) Üç faz	Faz - Toprak		$\frac{1}{2}$		$\frac{1}{4\pi}$
Tek faz	Faz - Faz		1		$\frac{1}{2}$
Üç faz	Dengeli üç faz		$\frac{\sqrt{3}}{2}$		0,404
			0,808		
			$\frac{\sqrt{3}}{2}$		$\frac{1}{2}$
			$\frac{1}{\sqrt{2}}$		$\frac{1}{2}$

→ Kabloya etki eden etkin kuvvet N/m ● Baskı altındaki kablo ya da iletken
 ⊗ Korumalı iletken

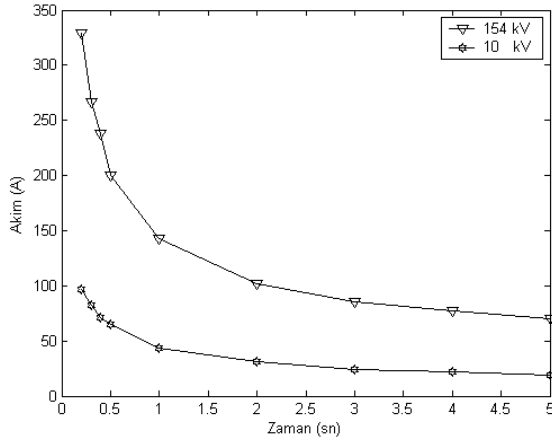
3. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Tablo 3'de verilen örnek kablolar üzerinde yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilenler aşağıda değerlendirilmektedir.

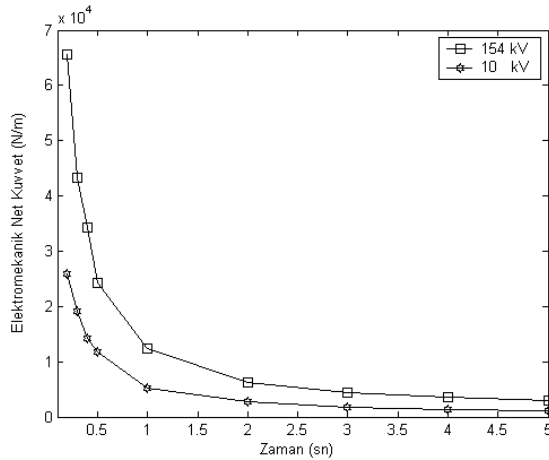
Tablo 3 Örnek kablo özellikleri

XLPE Kablo özellikleri	Değerler (10 kV)	Değerler (154 kV)	XLPE Kablo özellikleri	Değerler (10 kV)	Değerler (154 kV)
İşletim gerilimi faz-faz (V)	10 000	154 000	Ana yalıtkanın ısı direnci (K.m/W)	3,5	3,5
İşletim frekansı (Hz)	50	50	Dielektrik kaybı (Wd) (Watt)	--	3,57
İletken kesiti (q) (mm ²)	300	1000	Yalıtkan kalınlığı (t_1) (mm)	4,8	22
Kılıf dış çapı (Ds) (mm)	31,4	98,7	Kılıf kalınlığı (t_s) (mm)	0,7	4
Kablo dış çapı (De) (mm)	35,8	106,7	Kılıf kayıp faktörü (λ_1)	0,090	0,035
İletken çapı (dc) (mm)	20,5	37,7	Ceket kalınlığı (t_j) (mm)	2,2	4
İletkenin cinsi	Bakır	Bakır	Kablolar arası uzaklık (d) (mm)	72	330
İletkenin ac direnci (Rac) (Ω/m)	0,0000781	0,0000252	A (Amper)	629	1285

Şekil 1 de kısa devre akımının 0,2 – 5 sn arasındaki değişimi görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere kısa devre başlangıcında kablodan geçen çok büyük bir kısa devre akımının 2 - 3 sn kadar aşırı seyrettiği görülmektedir. Yüksek kısa devre akımı, Şekil 2’de görüldüğü gibi çok büyük değerlerde elektromanyetik kuvvet oluşturacağı için özellikle kabloların kesiştiği ve birbirine bağlandığı (kemer,kelepçe vb.) noktalarda kablunun yalıtkan, ekran ve dış kılıfına zarar verebilmektedir.

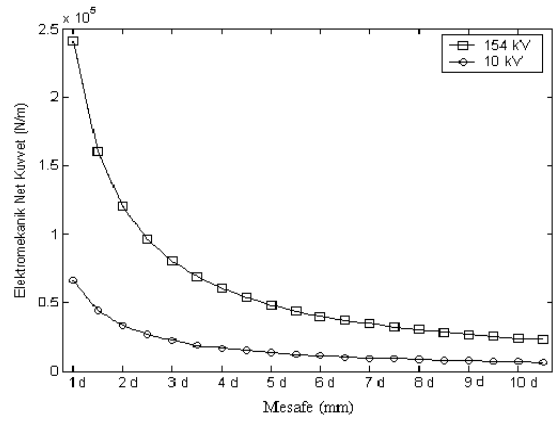


Şekil 1. Akımın zamana göre değişimi



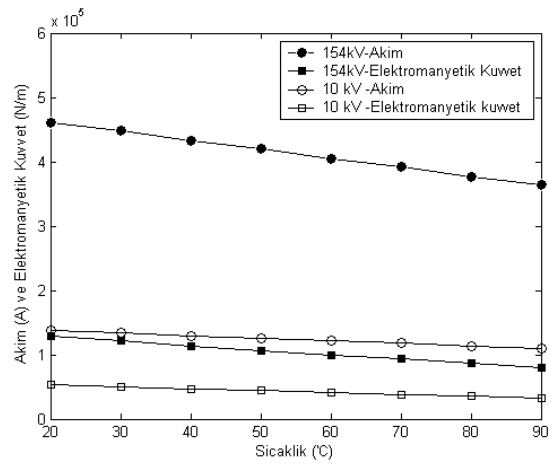
Şekil 2. Elk-manyetik kuvvetin zamana göre değişimi

Kablolar arası mesafenin elektromanyetik kuvvete olan etkisi incelendiğinde, 154 kV'luk kablondan ürettiği elektromanyetik kuvvetin, 10 kV'luk kabloya nazaran mesafeye daha fazla değişkenlik gösterdiği Şekil 3'den görülmektedir. Burada yatay ekseninde gösterilen d kablo çapına karşılık gelmektedir. Yaklaşık olarak 3d uzaklığına kadar kuvvette çok hızlı bir düşüş olduğu ve sonrası için ise azalarak devam ettiği görülmektedir. Bu eğri 1 sn için mm² başına kablodan geçen 143 A kısa devre akımı temel alınarak çizdirilmiştir.



Şekil 3. Elk-manyetik kuvvetin mesafeye göre değişimi

Kısa devre anında kablo iletkeninde oluşan ($I^2.Rac$) joule kaybının neden olduğu sıcaklık değeri, kısa devre akımının büyüklüğünü belirleyen en önemli unsurdur. XLPE yalıtkanlı kablo için kısa devre durumunda sıcaklık sınır değeri 250 °C'dir. Şekil 4 de kısa devrenin başlama anındaki iletken sıcaklık değerine bağlı olarak değişen kısa devre akım değişimi görülmektedir. Kablo iletkeninin 90°C işletme sıcaklığında kısa devreye maruz kaldığında oluşan elektro-manyetik kuvvetin, 20 °C'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Buradan, tesis edilen kablo sistemine ilk kez enerji verildiği anda oluşabilecek kısa devrenin ortaya çıkaracağı elektro-manyetik kuvvetin, nominal çalışmada meydana gelebilecek kısa devrenin oluşturacağı elektro-manyetik kuvvete göre sistemi daha fazla zorlayacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Akım, Elektromanyetik kuvvet, Sıcaklık değişimleri

4. SONUÇ

Elektrik sistemlerinde özellikle kısa devrenin hemen başında oluşan pik akımların oluşturduğu elektromanyetik kuvvet tehlike derecesi büyüktür. Oluşan bu elektro manyetik kuvvetin kabloya ve ekipmanlarına zarar vermemesi için kabloların düz

olarak yan yana ve uygun aralıklarla döşenmesi gerekmektedir.

Üçlü (üçgen) olarak döşenecek kabloların uygun özellikteki kelepçe ile ve uygun aralıklarla birbirine sabitleştirilmesi oldukça önemlidir. Kapladığı alanın büyük olması nedeniyle kabloların yan yana tesis şeklini dezavantajlı hale getirmektedir. Bu tesis şekli daha çok büyük çaplı ve yüksek gerilim taşıyan kablolar için tercih edilmelidir. Kablolar eğer yan yana düz olarak tesis edilecekse kablolar arasındaki uzaklık artırıldığında kısa devre anındaki elektromanyetik kuvvet azalacağından sabitleyici elemanların maliyetinin de düşeceği söylenebilir. Genellikle standart olarak 2d mesafede tesis edilen kabloların Şekil 3'e bakılarak yer probleminin olmadığı durumlarda kablolar arası uzaklığın 3d ile 5d arasında bir mesafeyle tesis edilmesinin daha uygun olacağı görülmektedir. Eğer kabloların tavada tesis edilme zorunluluğu yoksa yeraltına döşenmesi önerilmektedir. Bu durumda toprak doğal bir sabitleyici eleman olacak ve elektromanyetik kuvvetin zarar verici etkileri önlenecektir. Böylece tavada zorunlu olarak kullanılan sabitleyici elemanların ek maliyeti ve noktasal ısınmalar ortadan kalkacaktır.

5. KAYNAKLAR

1.W. Rüger, "Mechanical Short Circuit Effects of Single Core Cables",Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgung University Erlangen-Nürnberg, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.4, No:1, 1989 pp:68 – 74.

2. The Institution of Electrical Engineers. "Design Of Medium Voltage Polymeric Cables - Basic Principles Of Current Rating Calculations " Printed and published by the IEE, Savoy Place, London WCPR OBL. UK , 1994, pp. 8/1– 8/9.

3. Charles A Damell, PE, Maurice L Bacon, Richard A Shaw, "Cable Cleats - A Global Technique To Protect Three-Phase Single Conductor Cables During Short-Circuits" Copyright Material IEEE Paper No. PCIC- 2004 -16 / pp. 143-150

4. Michael H. Powers, Gary R. Olhoeft, "Computer Modeling To Transfer Gpruxo Detectability Knowledge Between Sites ", Proc. UXO Forum 1996 Conference Proceedings, Williamsburg, VA, March 26-29, 1996, VA, p. 347-356.

5. I.O. Habiballah 1, A.S. Farag , M.M. Dawoud, A. Firoz, "Underground cable magnetic field simulation and management using new design configurations " , I.O. Habiballah et al. : Electric Power Systems Research 45, 1998, pp. 141–148

6. IEEE Std 1142 "IEEE Guide for the Design, Testing, and Application of Moisture-Impervious, Solid Dielectric, 5–35 kV Power Cable Using Metal-Plastic Laminates", Insulated Conductors Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1995.