

Yüksek Gerilim Kablo Başlık ve Eklerinde Elektrik Alan Kontrolü

Özcan Kalenderli

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469 Maslak/İstanbul
ozcan@elk.itu.edu.tr

Özet

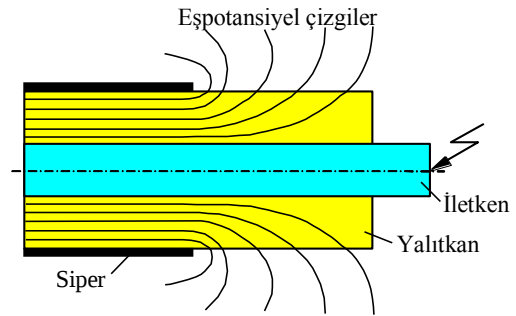
Yüksek gerilim kablo başlık ve ekleri, kablo aksesuarları olarak bilinir. Bunların kullanıldığı kablo uçlarında ve ek yerlerinde, iletkenlerin kesintiye uğraması nedeniyle elektrik alan dağılımı düzgün değildir. Bu durum, bu bölgelerde yüksek elektrik alanlarının oluşmasına neden olur. Bu da kaçak akımlar, atlama, delinme gibi istenmeyen olayların dolayısıyla kablo ve bağladığı sistemlerin güvenliği ve güvenilirliğine etki eder. Bu yüzden kablolarda bu bölgelerdeki elektrik alanlarının kontrol edilmesi ve güvenli çalışma koşullarının yaratılması gerekir. Bu çalışmada bu alanların kontrol yöntemleri tanıtılmış ve uygulaması yapılmıştır.

1. Giriş

Yüksek gerilim (YG) kablolarının bağlantı ve ekleri, uygulamada kablo garnitürü olarak adlandırılan kablo başlıkları ve mufları ile yapılır. Elektriksel bağlantı elemanı olan kabloların bağlanacakları yerlere her iki ucundaki kablo başlığı ve kablo pabucu aracılığı ile bağlanması gerek işletme gerekse kablo yalıtımının güvenliği açısından gereklidir. Kablo başlıkları, kablunun gerilim altındaki kısımları arasındaki yalıtımı koruduğu gibi, kablo uçlarında aşırı elektriksel zorlanmalara yol açmayacak ve elektriksel boşalmaları önleyecek yapı ve biçimde olmalıdır. Ayrıca kablo başlıkları, kablo uçlarının çevreye yalıtımını sağlayarak kabloyu nem, toz gibi etkilere de korur.

Genel olarak bir damarlı bir kablo veya damarları ayrı siperli çok damarlı bir kablo basit olarak eş eksenli bir silindirik elektrot sistemi olarak ele alınır. Kablonun uç kısımları dışında kablo içindeki elektrik alan dağılımı, eş eksenli silindirik elektrot sisteminin alan dağılımına uyar. Bu alan dağılımı kablo uçlarında, kablo uçlarının kenar etkisi nedeniyle bozulur ve kablo bakımından yüksek elektriksel zorlanmalar olduğu bölgeler oluşturur (Şekil 1). Bu da elektrik alan şiddetinin boşalmalara neden olabilecek değerlere çıkması durumunda boşalmaların oluşmasına yol açar. Boşalmalar kısmi boşalma, atlama veya delinme şeklinde olabilir. Tüm bu durumlar, işletme ve kablo güvenliğini ve sürekliliğini bozan durumlardır. Çünkü bu boşalmalar işletmenin kısa devreler nedeniyle kesilmesine ve kablunun tahribine yol açarlar. Kablo uçlarında boşalmaya neden olmayacak elektrik alan şiddeti değerlerinde bile kablo uçları bir kabloda her zaman için yüksek elektriksel zorlanmalar olduğu bölgeler olmaları nedeniyle kabloların bozulması ve delinmesi için birincil bölgelerdendir. Bu nedenlerle kablo

uçlarının sonlandırılması uygun boyut, biçim ve malzemelerden yapılmış kablo başlıkları ile yapılır.



Şekil 1: Kablo ucundaki alan dağılımı.

Kablo başlıklarında elektrik alan dağılımının analizi teorik ve deneysel yöntemlerle yapılabilir. Bu incelemelerde kablo başlığının kullanıldığı kablunun iletken, yalıtkan, siper ve zırh gibi kısımlarının boyutları ve malzemesinin önemi yanında, kablo başlığının boyutları, yapısı, kullanılan malzemeler ve çevresindeki ortam gibi pek çok büyüklüğün etkisi vardır. Bu nedenle kablolardaki diğer kısımlara göre kablo uçlarında dolayısıyla kablo başlıklarında elektrik alan dağılımı analizi karmaşıklık ve zorluk gösterir.

Buraya kadar belirtilenler, kadar kablo ekleri için kullanılan kablo mufları için de geçerlidir. Kabloların gerek sınırlı uzunlukta olmaları gerekse onarım ve dağıtım yapılması gereken yerlerde kablo eklerinin yapılma gereksinimi kablo muflarının kullanımını gerektirir. Bu yerlerde hem elektriksel süreklilik sağlanmalıdır hem de yalıtım bütünlüğü korunmalıdır. Kablo muflarında kablo başlıklarında olduğu gibi bir kenar etkisi problemi olmamakla birlikte yine de iletken bağlantıları ve yalıtım işlemleri nedeniyle elektrik alan dağılımının bozulduğu bölgeler ortaya çıkar. Bu da kablo ve işletme güvenliğini tehdit eder. Dolayısıyla gerek kablo başlıkları gerekse kablo mufları tasarımında, seçiminde ve uygulanmasında ayrı bir özen gerektiren parçalardır.

Bu çalışmada kablo garnitürleri olarak adlandırılan kablo başlıklarının ve muflarının bağlandıkları bölgelerdeki elektrik alan dağılımını kontrol etmek için kullanılan yöntemler uygulamalı olarak açıklanmıştır.

2. Kablo Uçlarında Elektrik Alan Kontrolü

Farklı dielektrik sabitli malzemelerden oluşan ve keskin elektrotların kaçınılmaz olduğu karmaşık yapılarda yüksek elektriksel zorlanmalar ortaya çıkar. Bu yapılarda elektrik alan her yerde olabildiğince eşit dağılmalıdır, fakat bunu sağlamak çok zordur.

Birden çok yalıtkanın bir araya gelmesi durumunda yalıtkanlar arasındaki arayüzeyler önem kazanır. Bu tür arayüzeyler uygulanan elektrik alanının doğrultusuna göre üç durumda olabilir: arayüzey alana diktir; arayüzey alana paraleldir veya arayüzey ile alan arasında açı vardır. Ayrıca eğer iki yalıtkanın yüzeyi bir önlem almaksızın birleştirilirse zayıf noktalar ortaya çıkabilir. Bu belirsiz durumda delinme dayanımı yüzeyler arasındaki havanınkinden, gazınkinden veya yağınkinden daha yüksektir. Bu tür durumlar önlenmelidir.

Kablo başlığı, YG iletkeni ile topraklı siper arasındaki alanı yavaş yavaş azaltır. Buna karşılık, başlık yalıtkanı ile kablo yalıtkanı arasında teğetsel alan bileşeni ortaya çıkar, bir zayıf nokta oluşabilir. Bu arayüzeyde hava kabarcıklarının oluşmasını önlemek için mekanik bir basınç uygulanır. Bu basınç, iç çapı kablo çapından daha küçük olan sıkı geçme kablo başlığı ile kolayca elde edilir.

Kablo aksesuarlarında alan dağılımını kontrol etmek için aşağıdaki yöntemler kullanılır:

2.1. Elektrot Düzenlemesi

En büyük alan şiddeti genellikle elektrotlardan birinde olur. Elektrotlara uygun şekil ve boyut verilerek alan kontrol edilebilir. Elektrot şekillendirmesi yalıtkanlar arasındaki arayüzeyde alanı kontrol etmek için de kullanılabilir. Kablo başlıkları ve eklerinde buna özen gösterilir.

2.2. Epsilon Düzenlemesi

Dielektrik sabitleri ile alan kontrolünü açıklamak için önce arayüzeylerde alan ve eşpotansiyel çizgilerin davranışı hakkında bilgi verilecektir.

Dielektrik katsayıları farklı olan iki yalıtkan ortamı ayıran arayüzeyde elektrik alan ve eş potansiyel çizgileri kırılırlar. Kırılma olayı kırılma açıları ile dielektrik katsayıları arasında belirli bir bağıntıya göre olur.

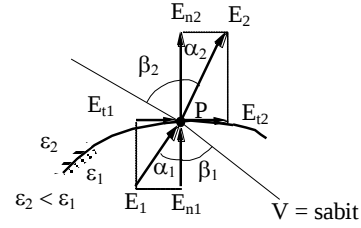
Şekil 2'deki gibi, dielektrik katsayıları ϵ_1 ve ϵ_2 ($\epsilon_1 > \epsilon_2$) olan iki yalıtkan ortamı ayıran bir arayüzeyde, herhangi bir P noktasında ortamlardaki E_1 ve E_2 elektrik alan vektörlerinin arayüzeyin normali ile yaptıkları açılar α_1 ve α_2 ile teğet ve normal yöndeki bileşenler t ve n indisleri ile gösterilirse P noktasında teğetsel bileşenler için

$$E_{t1} = E_{t2} \quad (1)$$

bağıntısı, normal bileşenler için

$$E_{n1}/E_{n2} = \epsilon_2/\epsilon_1 \quad (2)$$

bağıntısı yazılabilir. Bu bağıntılardan birincisi, arayüzeylerde alan şiddeti vektörlerinin teğetsel bileşenlerinin birbirine



Şekil 2: Arayüzeyde elektrik alan ve eşpotansiyel çizgilerinin kırılması.

eşit olduğunu, ikincisi ise alan şiddeti vektörlerinin dik bileşenlerinin ortamların dielektrik katsayıları ile ters orantılı olduğunu gösterir. (1) ve (2) bağıntıları yardımıyla, alan çizgilerinin kırılma açıları ile dielektrik katsayıları arasında

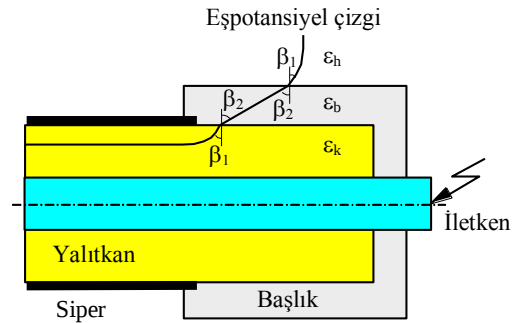
$$\tan \alpha_1 / \tan \alpha_2 = \epsilon_1 / \epsilon_2 \quad (3)$$

bağıntısı bulunur. Bu bağıntı iki dielektrik ortamı ayıran arayüzeyde elektrik alan çizgilerinin, bu koşulu gerçekleştirecek şekilde kırıldıklarını gösterir.

Alan ve eşpotansiyel çizgilerinin birbirleriyle dik kesiştikleri göz önüne alınırsa, arayüzeylerde $V = \text{sabit}$ eşpotansiyel yüzeylerin veya diğer bir deyimle eşpotansiyel çizgilerin kırılma koşulu

$$\tan \beta_1 / \tan \beta_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (4)$$

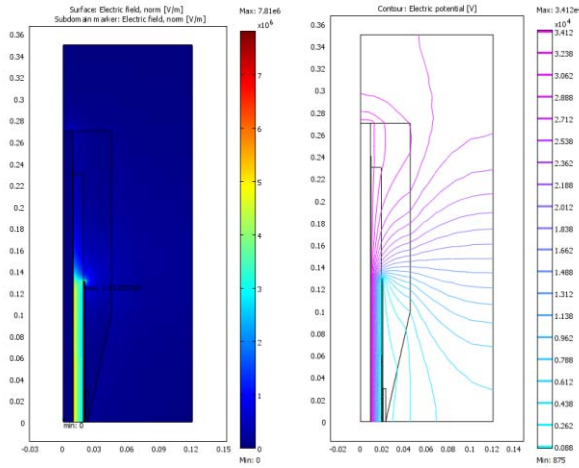
olur. Yukarıdaki bağıntılar, alan vektörünün, dielektrik katsayısı büyük olan ortamda, normal doğrultu ile daha büyük bir açı yapacak şekilde kırıldığını gösterir.



Şekil 3: Epsilon düzenlemesi ile alan kontrolü.

Bu açıklamalara göre kablo ucu, kablo yalıtkanına göre daha yüksek dielektrik sabitine ($\epsilon_b > \epsilon_k$) sahip bir malzeme ile (başlık) ile kaplanırsa arayüzeyde eşpotansiyel çizgiler büyük açı ile kırılır ve başlık kalınlığına göre bu malzeme içinde devam ettikten sonra tekrar dar bir açı ile havaya ($\epsilon_b > \epsilon_h$) çıkar. Bu nedenle başlık malzemesinin dielektrik sabiti ve kalınlığı arttıkça alanı düzeltici etkisi artar (Şekil 3).

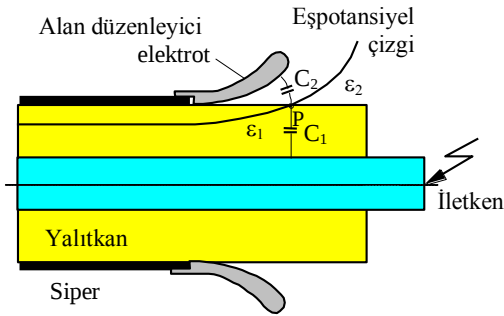
Şekil 4'te örnek olarak, XLPE yalıtkanlı ($\epsilon_k = 2,3$) bir kablunun, silikon kauçuk malzemeden ($\epsilon_b = 4$) kablo başlığı için, havada ($\epsilon_h = 1$) sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan elektrik alan ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir. Malzemelere bağlı olarak alan dağılımı kontrol edilebilir.



Şekil 4: Bir kablo başlığında, kablo eksenine göre bir yarısında elektrik alan (solda) ve potansiyel dağılımı (sağda).

2.3. Kapasitif Düzenleme

Kablo başlıklarında kapasitif düzenleme ile uygun alan dağılımı elde edilebilir. Bu amaçla alan düzenleyici elektrotlar kullanılır ve bu elektrotlar aşağıda temeli açıklanan şekilde biçimlendirilir (Şekil 5).



Şekil 5: Alan kontrol edici elektrot biçiminin hesabı.

Burada incelemeyi basitleştirmek için $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ alınmıştır. Şekil 5'te arayüzey üzerinde bir P noktası ile kablo iletkeni arasındaki kapasite C_1 ve alan düzenleyici elektrot ile bu nokta arasındaki kapasite de C_2 ile gösterilmiştir. Bu kapasiteler, r_1 iletken yarıçapı, r_2 yalıtkanın dış yarıçapı, l kablunun boyu olmak üzere

$$C_1 = 2\pi\epsilon l / \ln(r_2/r_1), C_2 = 2\pi\epsilon l / \ln(r/r_2) \quad (5)$$

dir. Sistemin eşdeğer kapasitesi ise

$$C = C_1 C_2 / (C_1 + C_2) \quad (6)$$

olur. $Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C U = \text{sabit}$ olduğundan arayüzey üzerinde herhangi bir P noktasındaki gerilim (toprağa göre potansiyel)

$$U_p = U_2 = C U / C_2 \quad (7)$$

$$U_p / U = C / C_2 = C_1 / (C_1 + C_2) \quad (8)$$

$$U_p / U = \ln(r/r_2) / \ln(r/r_1) \quad (9)$$

olur. Arayüzeyde teğetsel alan şiddetinin küçük ve sabit olması için alan düzenleyici elektrodun biçimi

$$E_t = U_p / z \quad (10)$$

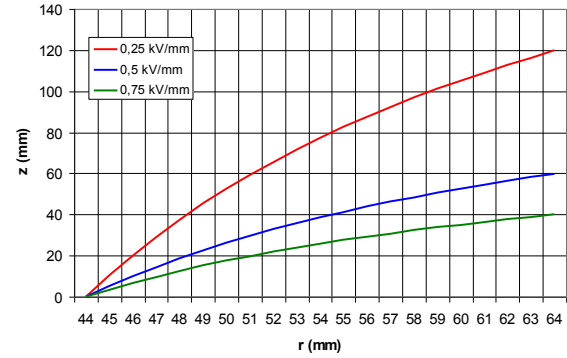
$$z = \frac{U}{E_t} \cdot \frac{\ln(r/r_2)}{\ln(r/r_1)} \quad (11)$$

$$z = \frac{U}{E_t} \left(1 - \frac{\ln(r_2/r_1)}{\ln(r/r_1)}\right) = f(r) \quad (12)$$

bağıntısına uygun olmalıdır. Bu durumda, anma geriliminde, teğetsel alan şiddetinin örneğin

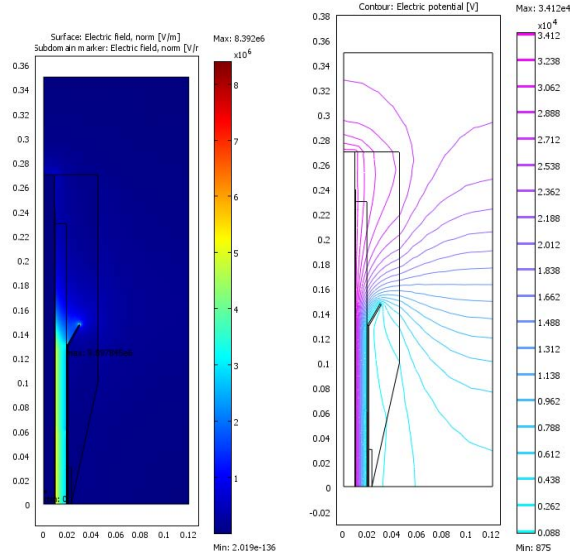
$$E_t = 0,5 \text{ kV/mm} = \text{sabit}$$

alınması önerilmektedir [10]. Şekil 6'da (12) bağıntısına göre 154 kV'luk bir kablo başlığının üç farklı E_t değeri için elde edilen başlık profilleri gösterilmiştir.



Şekil 6: 154 kV ($U = 89 \text{ kV}$), $r_1 = 21 \text{ mm}$, $r_2 = 44 \text{ mm}$, $E_t = 0,25; 0,5$ ve $0,75 \text{ kV/mm}$, $44 \text{ mm} < r < 64 \text{ mm}$ için başlık profilleri.

Şekil 7'de örnek olarak, XLPE yalıtkanlı ($\epsilon_k = 2,3$) bir kablunun, silikon kauçuk malzemeden ($\epsilon_b = 3$) kablo başlığı için, havada ($\epsilon_h = 1$), 30°lik kapasitif alan düzenleyici kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan elektrik alan ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir.

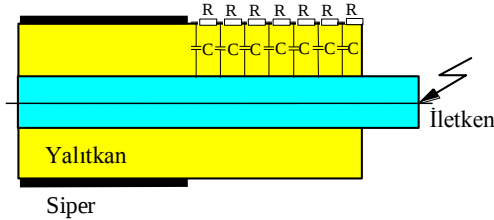


Şekil 7: Bir kablo başlığında, kapasitif alan düzenleyici kullanıldığı durumda, kablo eksenine göre bir yarısında elektrik alan (solda) ve potansiyel dağılımı (sağda).

2.4. Ohmik (Rezistif) Düzenleme

Özellikle doğru gerilimde etkin olan bir yoldur. Kablo yalıtkanı üzerine direnci gerilimle değişen bir malzeme kaplayarak alanın düzenli dağılması sağlanabilir.

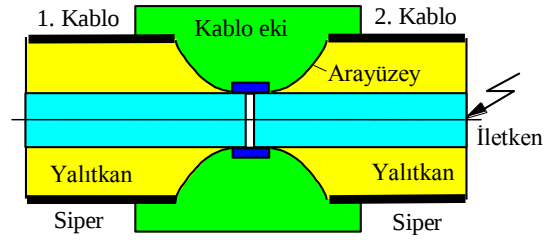
Örneğin yalıtkan üzerine kaplanacak bir yarı iletken malzeme kablounun topraklı siperini devam ettirir ve alanı yavaş yavaş düşürür. Yarı iletken geriye doğru kıvrılır ve topraklı siper bu şekilde sonlandırılır (Şekil 8).



Şekil 8: Ohmik düzenleme ile alan kontrolü.

3. Kablo Eklerinde Elektrik Alan Kontrolü

Kablo eki gibi bazı yapılarda yalıtkan arayüzeyler elektrik alanı ile bir açı yapar. Arayüzey boyunca alan şiddetini düşük tutmak için önlem alınmalıdır. Örneğin kağıt yalıtımlı kabloda yalıtım yavaş yavaş azaltılır. Kablo uçları arasındaki açıklık birbirini kademeli olarak örten kağıt bantlarla sarılarak doldurulur. Bazen de ek yalıtkan kullanılarak yalıtım takviye edilir. Sonuçta kablo ekinde arayüzey, bir boşalmaya ve aşırı zorlanmaya yol açmamak için, arayüzey boyunca teğetsel alan şiddeti sabit veya yeterince düşük kalacak şekilde tasarlanır (Şekil 9).



Şekil 9: Kablo eki (muf).

Bu tasarımda şu hesap yolu izlenir: Yalıtandaki E_r alan şiddeti E_t teğetsel alan bileşenine sahiptir. Arayüzeyde küçük açı ile kırılan alan çizgileri için

$$E_t dz = E_r dr \quad (13)$$

yazılabilir. Burada E_r alan şiddeti kablo için

$$E_r = U / (r \ln(r_2/r_1)) \quad (14)$$

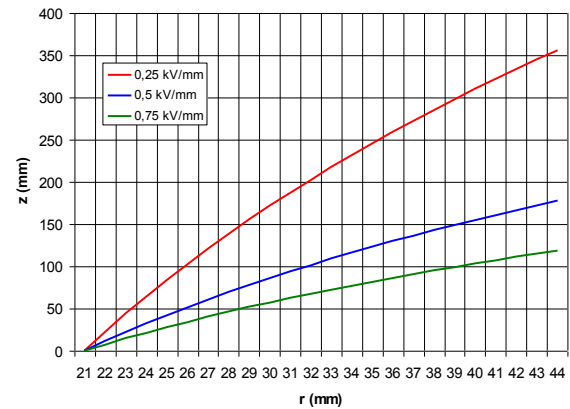
olduğundan, yukarıda yerine konursa

$$dz = \frac{U/E_t}{\ln(r_2/r_1)} \frac{dr}{r} \quad (15)$$

olur. E_t teğetsel alan şiddeti sabit olarak alınabilir ve integrasyon ile kablo ekinde ideal arayüzey biçimini veren bağıntı

$$z = \frac{U}{E_t} \cdot \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} = f(r) \quad (16)$$

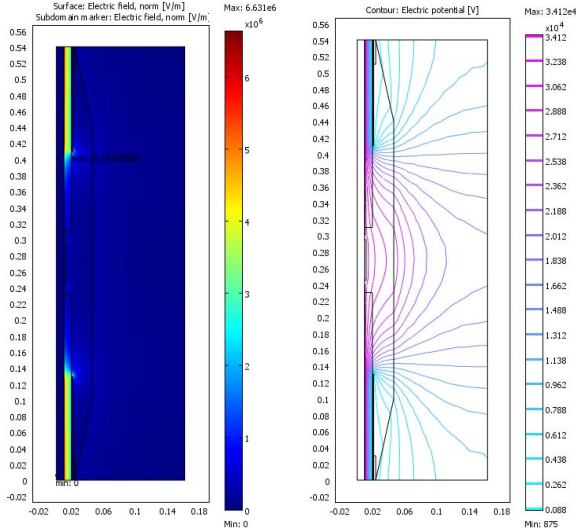
şeklinde bulunur. Bu bağıntıda, teğetsel alan şiddeti E_t için anma geriliminde 0,25 kV/mm mertebesinde sabit bir değer almak uygundur [10]. Şekil 10'da (16) bağıntısına göre 154 kV'luk bir kablo mufunun üç farklı E_t değeri için elde edilen muf profilleri gösterilmiştir.



Şekil 10: 154 kV ($U = 89$ kV), $r_1 = 21$ mm, $r_2 = 44$ mm, $E_t = 0,25$; 0,5 ve 0,75 kV/mm, $21 \text{ mm} < r < 44 \text{ mm}$ için muf profilleri.

Şekil 11'de örnek olarak, XLPE yalıtkanlı ($\epsilon_k = 2,3$) bir kablounun, kauçuk malzemeden ($\epsilon_b = 4$) kablo mufu için,

havada ($\epsilon_h = 1$) sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan elektrik alan ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir.



Şekil 11: Bir kablo ekinde (mufunda), kablo eksenine göre bir yarısında elektrik alan (solda) ve potansiyel dağılımı (sağda).

4. Sonuç

Sonuç olarak kablo aksesuarlarında elektrik alan dağılımının, aksesuar geometrisi, boyutları, kullanılan malzeme ve kablo yapısı ile olan ilişkileri ortaya konulmuş, alan kontrolü için kullanılan yöntemler tanıtılarak, örneklenmiştir. Bu bilgi, mevcut kablo başlık ve muflarının kullanıldıkları yer için uygunluklarını değerlendirmek bakımından da önemlidir. Ayrıca kirlenme, nemlenme gibi çevresel etkenleri de göz önüne alındığında alan kontrolünün önemi daha fazla artar. Sunulan yöntemler, kabloların laboratuvar koşullarında denenmesinde kullanılacak pratik ve uygun kablo başlığı seçiminde ve kullanımında göz önünde bulundurulması gereken temel kontrol yöntemleridir.

5. Kaynakça

- [1] L. Heinhold, *Power Cables and Their Application, Part 1: Materials, Construction, Criteria for Selection, Project Planning, Laying and Installation, Accessories, Measuring and Testing*, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1990.
- [2] L. Heinhold, *Power Cables and Their Application, Part 2: Tables Including, Project Planning Data for Cables and Accessories, Details for the Determination of the Cross-Sectional Area*, Siemens Aktiengesellschaft, Berlin, 1993.
- [3] DIN VDE 0278/6.80, *Starkstromkabel Garnituren mit Nennspannungen U bis 30 kV*.
- [4] G. Lupo, G. Miano, V. Tucci, M. Vitelli, "Field Distribution in Cable Terminations from a Quasi-static Approximation of the Maxwell Equations", *IEEE Trans. DEI*, Cilt: 3, s. 399-409, 1996.
- [5] G. Lupo, V. Tucci, M. Vitelli, "Stress Control Tubes for HV Cable Terminations with Linear and Non Linear Characteristics: Theoretical and Experimental Approaches", 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Graz, Bildiri No: 7869, 1995.
- [6] J. P. Mackevich, J. W. Hoffmann, "Insulation Enhancement with Heat-Shrinkable Components - Part III - Shield Power Cables", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, No. 4, s. 31-40, 1991.
- [7] S. V. Nikolajevic, N. M. Pekaric-Nadj, R. M. Dimitrijevic, M. Djurovic, "Modelling of Cable Terminations with Embedded Electrodes", *IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Canada, s. 703-706, Haziran 16-19, 1996.
- [8] D. Fournier, "Effect of the Surface Roughness on Interfacial Breakdown between Two Dielectric Surfaces", *IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Kanada, s. 699-702, Haziran 16-19, 1996.
- [9] D. Fournier, C. Dand, L. Paquin, "Interfacial Breakdown in Cable Joint", *Proceeding of the IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Pittsburgh, PA, s. 450-452, Haziran 1994.
- [10] F. H. Kreuger, *Industrial High Voltage*, Cilt 1, Delft University Press, Delft, 1991.
- [11] M. Özkaya, *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 1, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2005.