

Yüksek Gerilim Kablo Başlık ve Eklerinde Elektrik Alanı Kontrolü

Bu yazı, 13-15 Kasım 2008 tarihlerinde İTÜ-İstanbul'da yapılan TOK'08 Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı bildiriler kitabından alınmıştır.

Özcan Kalenderli

Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi - İSTANBUL

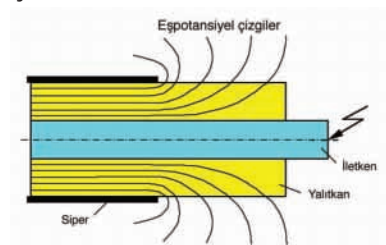
Yüksek gerilim kablo başlık ve eklerinin kullanıldığı kablo uçları ve ek yerlerinde, iletkenlerin kesintiye uğraması nedeniyle elektrik alan dağılımı düzgün değildir. Dolayısıyla bu bölgelerde oluşan yüksek elektrik alanları, kaçak akımlar, atlama, delinme gibi istenmeyen olaylara yol açabilir. Bu çalışmada bu alanların kontrol yöntemleri tanıtılmış ve uygulaması yapılmıştır.

Yüksek gerilim 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, kablonun 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 etkilerden de korur.

Genel olarak tek 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 zorlanmaların ol-

duğu bölgeler oluşturur (Şekil 1). Bu da elektrik alan şiddetinin yüksek değerlere çıkması durumunda boşalmalara 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 kablonun tahribine yol açar. Kablo uçlarında boşalmaya neden olmayacak elektrik alan şiddeti değerlerinde bile, kablo uçları, bir kabloda her zaman için yüksek elektriksel zorlanmaların olduğu bölgeler olarak kabloların bozulması ve delinmesi için birincil bölgelerdendir. Bu nedenlerle kablo uçlarının sonlandırılması uygun boyut, biçim ve malzemelerden yapılmış kablo başlıkları ile gerçekleştirilir.

Şekil 1. Kablo ucundaki alan dağılımı



Kablo başlıklarında elektrik alan dağılımının analizi teorik ve deneysel yöntemlerle yapılabilir. Bu incelemelerde kablo başlığının kullanıldığı kablonun iletken, yalıtkan, siper ve zırh gibi kısımlarının boyutları ve malzemesinin öneminin yanı sıra, kablo başlığının boyutları, yapısı, kullanılan malzemeler ve çevresindeki ortam gibi pek çok büyüklüğün etkisi vardır. Bu nedenle kablolardaki diğer kısımlara göre kablo uçlarında, ve dolayısıyla da kablo başlıklarında elektrik alan dağılımı analizi karmaşık ve zordur.

Buraya kadar belirtilenler, kablo ekleri için kullanılan kablo mufları için de geçerlidir. Kabloların sınırlı uzunlukta olmaları ve onarım ve dağıtım yapılacak yerlerdeki kablo eki gereksinimi, kablo muflarının kullanılmasını gerekli kılar. Bu yerlerde hem elektriksel süreklilik sağlanmalı, 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, tasarım, seçim ve uygulamada ayrı bir özen gerektiren parçalardır. Bu çalışmada kablo garnitürleri olarak adlandırılan kablo başlıkları ve muflarının bağlandıkları bölgelerdeki elektrik alan dağılımını kontrol etmek için kullanılan yöntemler uygulamalı olarak açıklanmıştır.

Kablo Uçlarında Elektrik Alan Kontrolü

Farklı dielektrik sabitli malzemelerden oluşan ve keskin elektrotların kaçınılmaz olduğu karma-

şık yapılarda yüksek elektriksel zorlanmalar ortaya çıkar. Bu yapılarda elektrik alanı her yerde olabildiğince eşit dağılmalıdır, fakat bunu sağlamak çok zordur. Birden fazla yalıtkanın bir araya gelmesi durumunda, yalıtkanlar arasındaki ara yüzeyler önem kazanır. Bu tür ara yüzeyler, uygulanan elektrik alanının doğrultusuna göre üç farklı durumda olabilir:

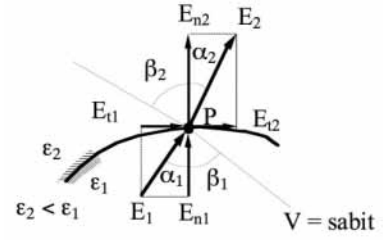
- ♦ ara yüzey alana diktir
- ♦ ara yüzey alana paraleldir
- ♦ ara yüzeyle alan arasında açı vardır

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, yüksek gerilim 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 ara yüzeyde 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:

❖ Elektrot Düzenlemesi

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



Şekil 2. Arayüzeyde elektrik alan ve eşpotansiyel çizgilerinin kırılması

❖ Epsilon Düzenlemesi

Dielektrik sabitleri ile alan kontrolünü açıklamak için önce ara yüzeylerde alan ve eş-potansiyel çizgilerinin davranışı hakkında bilgi verilecektir.

Dielektrik katsayıları farklı olan iki yalıtkan ortamı ayıran ara yüzeyde elektrik alanı 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 ara yüzeyde, herhangi bir P noktasında ortamlardaki E_1 ve E_2 elektrik alan vektörlerinin ara yüzeyin 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 ara yüzeylerde alan şiddeti vektörlerinin teğetsel bileşenlerinin birbirine 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

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

► teori ve uygulamalar ►

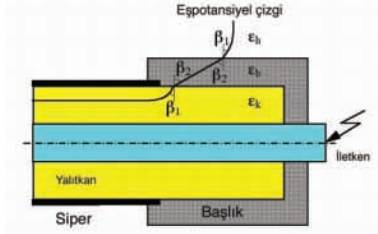
bağıntısı bulunur. Bu bağıntı iki dielektrik ortamı ayıran ara yüzeyde elektrik alan çizgilerinin, bu koşulu gerçekleştirecek şekilde kırıldıklarını gösterir.

Alan ve eş-potansiyel çizgilerinin birbirleriyle dik kesiştikleri göz önüne alınırsa, ara yüzeylerde V'nin sabit olduğu eş-potansiyel yüzeylerinin veya diğer bir deyimle eş-potansiyel çizgilerinin kırılma koşulu

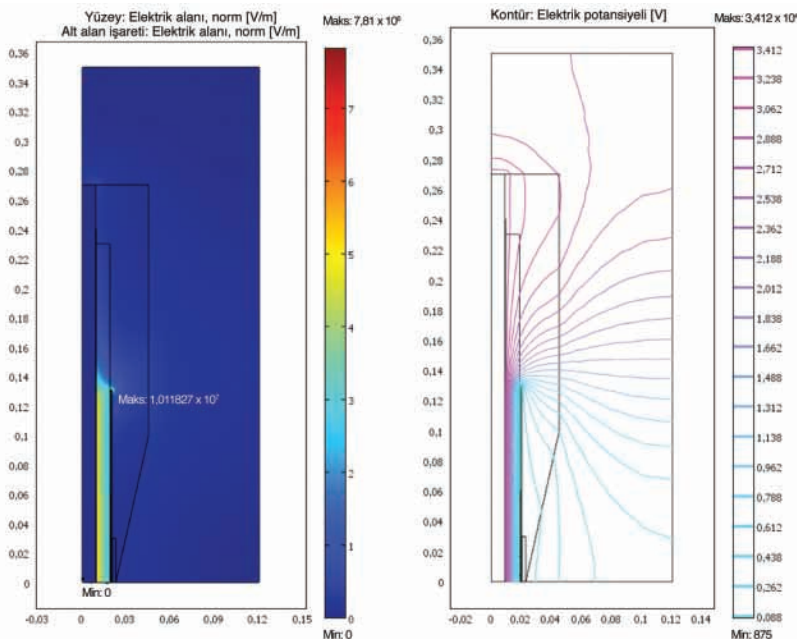
$$\tan \beta_1 / \tan \beta_2 = \epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (4)$$

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

Şekil 3. Epsilon düzenlemesi ile alan kontrolü



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

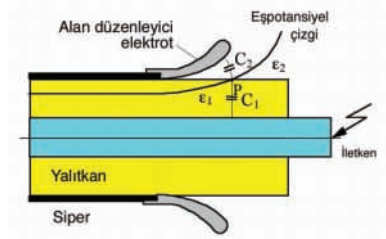


Bu açıklamalara göre kablo ucu, kablo yalıtkanına göre daha yüksek dielektrik sabitine ($\epsilon_b > \epsilon_k$) sahip bir malzeme ile (başlık) ile kaplanırsa, ara yüzeyde eş-potansiyel çizgileri büyük açı ile kırılır ve başlık kalınlığına göre bu malzeme içinde devam ettikten sonra tekrar dar bir açı ile havaya ($\epsilon_b > \epsilon_h$) çıkar. Bu nedenle, başlık malzemesinin dielektrik sabiti ve kalınlığı arttıkça, alanı düzeltici etkisi de 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.

❖ Kapasitif Düzenleme

Kablo başlıklarında kapasitif düzenleme yöntemi ile uygun alan dağılımı elde edilebilir. Bu amaçla yönelik olarak alan düzenleyici elektrotlar kullanılır ve bu elektrotlar aşağıda temeli açıkla-



Şekil 5. Alan kontrol edici elektrot biçiminin hesabı

nan şekilde biçimlendirilir (Şekil 5).

Burada incelemeyi basitleştirmek için $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ alınmıştır. Şekil 5'te ara yüzey 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 (5)'teki gibidir:

$$C_1 = 2\pi\epsilon l / \ln(r_2 / r_1)$$

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

Sistemin eşdeğer kapasitesi ise (6)'daki gibi bulunur:

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

$Q = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C U = \text{sabit}$ olduğundan, ara yüzey üzerinde herhangi bir P noktasındaki gerilim (toprağa göre potansiyel), (7), (8) ve (9)'daki şekilde olur.

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

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

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

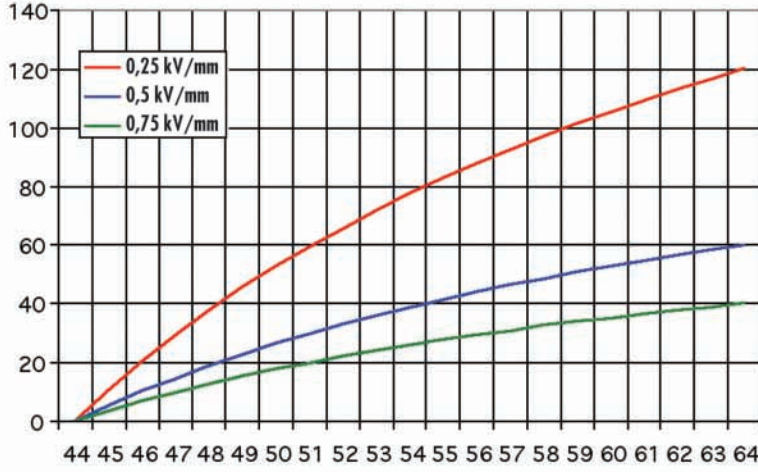
Ara yüzeyde teğetsel alan şiddetinin küçük ve sabit olması için, alan düzenleyici elektrodun biçimi (10)'da verilen bağıntıya uygun olmalıdır.

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

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

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

Bu durumda, anma geriliminde teğetsel alan şiddetinin sabit

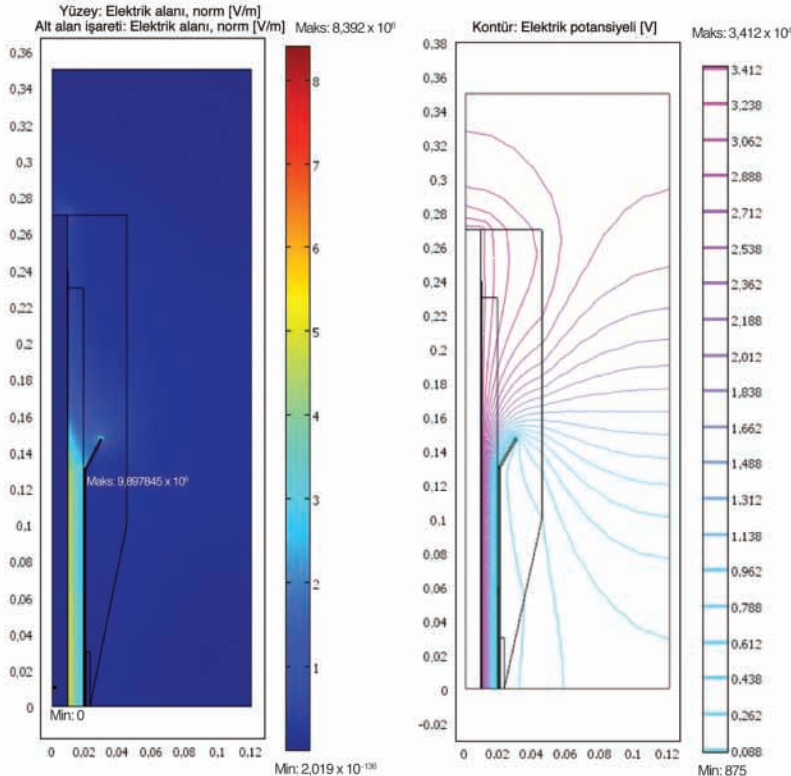


Şekil 6. 154 kV ($U = 89$ kV), $r_1 = 21$ mm, $r_2 = 44$ mm, $E_t = 0,25; 0,5$ ve $0,75$ kV/mm, 44 mm $< r < 64$ mm için başlık profilleri

olarak, örneğin $E_t = 0,5$ kV/mm 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 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 kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi

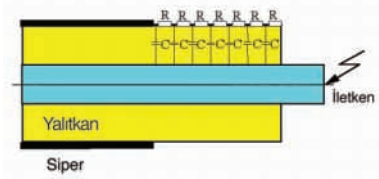
Şekil 7. Bir kablo başlığında, kapasitif alan düzenleyici kullanıldığı durumda, kablo eksenine göre bir yarısında elektrik alan (solda) ve potansiyel dağılımı (sağda)



ile bulunan elektrik alanı ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir.

❖ Ohmik (Rezistif) Düzenleme

Ohmik düzenleme, özellikle doğru gerilimde etkin olan bir yoldur. Kablo yalıtkanı üzerine direnci gerilimle değişen bir malzeme kaplayarak alanın düzenli dağılımı sağlanabilir. Örneğin; yalıtkan üzerine kaplanacak bir yarı-iletken malzeme kablunun topraklı siperini devam ettirir ve alanı yavaş yavaş düşürür. Yarı-iletken geriye doğru kıvrılır ve topraklı siper bu şekilde sonlandırılır (Şekil 8).

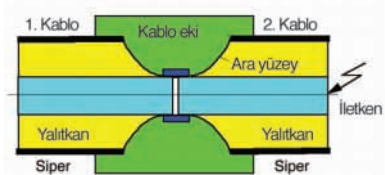


Şekil 8. Ohmik düzenleme ile alan kontrolü

Kablo Eklerinde Elektrik Alan Kontrolü

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

Şekil 9. Kablo eki (muf)



Bu tasarımda şöyle bir hesap yolu izlenir:

Yalıtıktaki E_r alan şiddeti E_t teğetsel alan bileşenine sahiptir. Ara yüzeyde küçük açı ile kırılan alan çizgileri için

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

yazılabilir. Burada E_r alan şiddeti kablo için

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

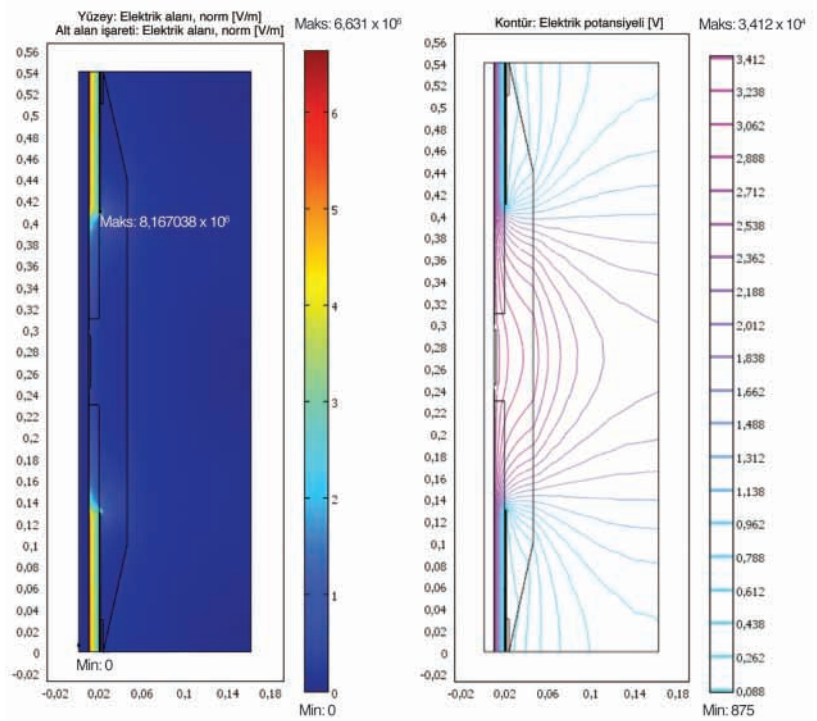
olduğundan, yukarıda yerine konursa (15) elde edilir.

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

E_t teğetsel alan şiddeti sabit olarak alınabilir ve integrasyon ile kablo ekinde ideal ara yüzey biçimini veren bağıntı, (16)'daki gibi bulunur.

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

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



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

muf profilleri görülmektedir.

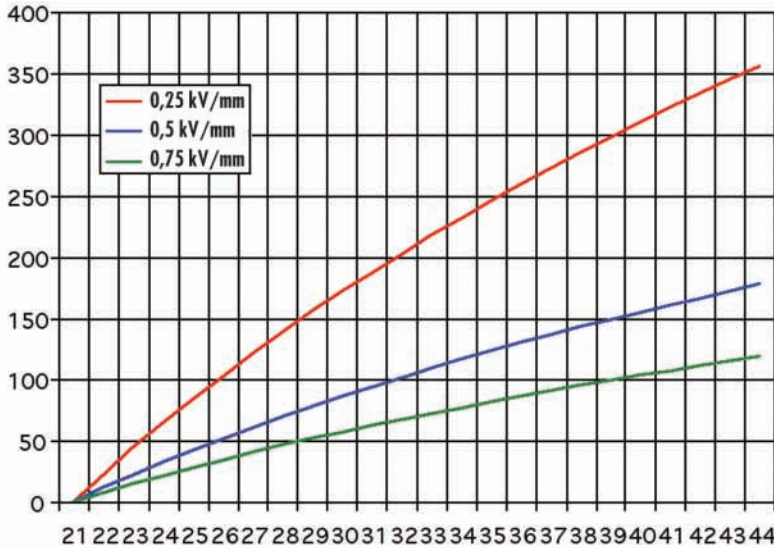
Şekil 11'de örnek olarak, XLPE yalıtkanlı ($\epsilon_k = 2,3$) bir kablonun, kauçuk malzemeden ($\epsilon_b = 4$) kablo mufu için, havada ($\epsilon_h = 1$) sonlu elemanlar yöntemi ile bulunan

elektrik alan ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir.

Sonuç

Sonuç olarak kablo aksesuarlarında elektrik alanı dağılımının, aksesuar geometrisi, boyutları, kullanılan malzeme ve kablo yapısı ile olan ilişkileri ortaya konulmuş, alan kontrolü için kullanılan yöntemler tanımlanarak örneklendirilmiştir. Bu bilgi, mevcut kablo başlık ve mufalarının, kullanılacakları yer için uygun olup olmadıklarını değerlendirmek bakımından da önemlidir. Ayrıca kirlenme, nemlenme gibi çevresel etkenler de göz önüne alındığında, alan kontrolünün önemi daha fazla artar. Sunulan yöntemler, kabloların laboratuvar koşullarında denenmesi için kullanılacak pratik ve uygun kablo başlığı seçiminde ve kullanımında göz önünde bulundurulması gereken temel kontrol yöntemleridir. **ula**

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



Kaynaklar

- [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, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.

yaratıcı araştırmalar
yeni fikirlerle şekillenirse
markaya hayat verir.



Reklam doğruları
farklı şekillerde
söyleme sanatıdır



etkili strateji yaratıcı fikir doğru tasarım doğru medya etkili sonuç

Tel: 0212 292 01 90

Eksen ajans