

Kablo Eklerinde Elektrik Alan Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Investigation of Electric Field Distribution on Cable Joints by Finite Element Method

Suna Bolat¹, Özcan Kalenderli²

^{1,2}Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak, İstanbul

¹e-posta: bolats@elk.itu.edu.tr, ² e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

Özet

Kablo uçlarında ve ek yerlerinde, iletkenlerin kesintiye uğraması, süreksizliği 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. Yalıtımların ekonomik, etkin ve güvenli olabilmesi için yüzeydeki alan dağılımının mümkün olduğu kadar düzgün olması gerekmektedir. Aksi durumda, delinme atlama gibi olaylar meydana gelebilir. Bu yüzden kablolarda bu bölgelerdeki elektrik alanlarının kontrol edilmesi ve güvenli çalışma koşullarının yaratılması gerekir. Elektrik alan şiddetini sınırlamak için, fiziksel ve geometrik özelliklerin optimize edilmesi gerekir. Bu çalışmada kablo eklerinde bu alanların dağılımı Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile incelenmiş ve alan kontrol yöntemleri araştırılmıştır.

Abstract

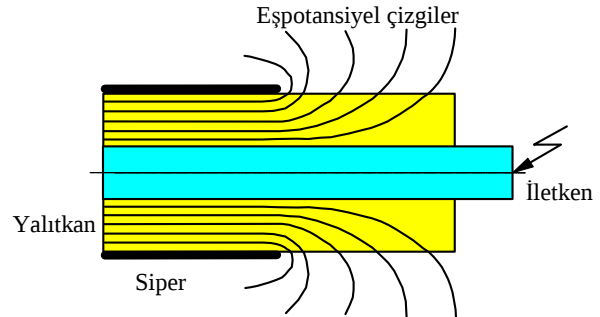
Electric field distributions on cable terminations and joints are not homogenous. For a better economy, it is necessary to have a uniformly distributed stress along the surface of insulator and electrode, and keeping the electric field as low as possible. To obtain uniform stress distribution in any insulation is important for the reliability and life of electrical system. Otherwise, electric field is non-uniform and breakdown or partial discharge a phenomenon early occurs in the insulation. In order to limit the maximum stress, physical or geometric properties should be optimized. In this study, electrical field distributions in cable joints are analyzed by Finite Element Method (FEM), and electric field control methods are investigated.

1. Giriş

Kabloların gerek sınırlı uzunlukta olmaları gerekse onarım ve dağıtım yapılması gereken yerlerde kablo eklerinin yapılma gereksinimi kablo muflarının kullanımını gerektirir [1-3]. Bu yerlerde hem elektriksel süreklilik sağlanmalıdır hem de yalıtım bütünlüğü korunmalı ve sürdürülmelidir. Kablo muflarında iletken bağlantıları ve yalıtım işlemleri nedeniyle, iletkenlerin kesintiye uğraması, süreksizliği gibi, elektrik alan dağılımının bozulduğu bölgeler ortaya çıkar. Bu durum, bu bölgelerde yüksek elektrik alanlarının oluşmasına neden olur.

Bu da kaçak akımlar, atlama, delinme gibi istenmeyen olayların oluşmasına, 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.

Genel olarak bir damarlı bir kablo veya damarları ayrı siperli çok damarlı bir kablo basit olarak eşeksenli bir silindrisel elektrot sistemi olarak ele alınır. Kablonun uç kısımları dışında kablo içindeki elektrik alan dağılımı, eşeksenli silindrisel 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).



Şekil 1: Kablo ucundaki alan dağılımı.

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 kabloların 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 ekleri, uygun boyut, biçim ve malzemelerden yapılmış kablo mufları ile yapılır [4-6].

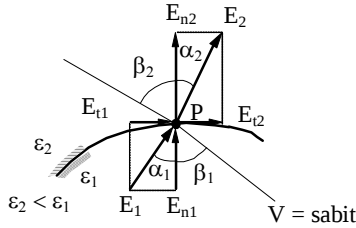
Bu çalışmada, 35 kV'luk 240 mm² kesitli yüksek gerilim kablolarının bağlantısını sağlayan bir ekteki elektrik alan

dağılımı, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile incelenmiştir. Çalışmalar COMSOL Multiphysics 3.4 paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2. Kablo Eklerinde Elektrik Alan Dağılımı

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 mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bunu sağlamak için, şekillendirmesi yalıtkanlar arasındaki arayüzeyde alanı kontrol etmek gerekir.

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



Şekil 2: Arayüzeyde elektrik alan ve eşpotansiyel çizgilerinin kırılması.

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 eşit olduğunu, ikincisi ise alan şiddeti vektörlerinin dik bileşenlerinin ortamların dielektrik katsayıları ile ters orantılı olduğunu gösterir. Yukarıda verilen iki bağıntı 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 [7-10].

Kablo eki gibi bazı yalıtkan yapılarda arayüzeyler elektrik alanına bir açıdadır. Arayüzey boyunca alan şiddetini düşük tutmak için önlem alınmalıdır. Örneğin 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.

3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Bu çalışma kapsamındaki statik elektrik alan probleminin çözümü Laplace denklemi olarak bilinen

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

ikinci mertebeden bir homojen diferansiyel denklemin çözümünü gerektirir. Sonlu elemanlar yöntemi bu denklemi

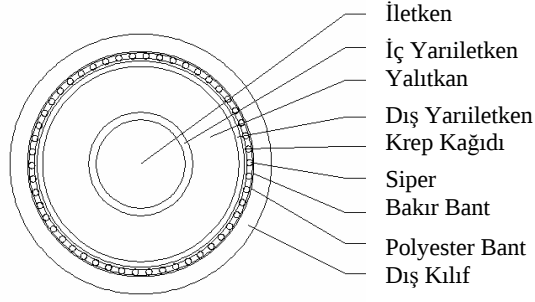
$$W = \epsilon \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r dr dz \quad (6)$$

elektriksel enerji denkleminin çözüm bölgesi içinde en küçük değere indirgenmesi (minimizasyon) ilkesi ile çözer. Çünkü bu yolla bulunan çözüm, Laplace denkleminin de aranan çözümüdür. Bu bağıntılarda $V = V(r, z)$ elektriksel potansiyeldir [11].

Kablolar eksenel simetrik geometriye sahiptir. Bu nedenle çözümde kablonun eksenel kesitinin bir yarısı alınabilir. Çünkü bu yarı kesit, simetri eksenini çevresinde 360° döndürüldüğünde kablonun kendisi elde edilir. Bu durum problemi r ve z koordinatlarına bağlı olarak iki boyutlu inceleme olanağı verir. Bunun için sözü edilen bölge sonlu elemanlara bölünür. Buna bölgenin ayrıştırılması denir. Bölmelemede yani problemi sonlu elemanlara ayırmada genellikle üçgen sonlu elemanlar kullanılır. Sonra sınır koşulları, bilinen potansiyeller ve malzeme özellikleri kullanılarak her bir eleman içinde geçerli olduğu kabul edilen birinci dereceden polinomsal yaklaşım işlevleri ile eleman denklemleri ve problemin birleşik (genel) denklemi elde edilir. Elde edilen denklem, matris olarak bol sıfırlı (seyrek), büyük boyutlu bir doğrusal denklem takımındır. Bu doğrusal denklem takımı yinelemeli bir sayısal çözüm yöntemi ile çözülerek üçgen elemanların köşe (düğüm) noktalarının potansiyelleri bulunur. Potansiyel değerlerine bağlı olarak eleman potansiyel yaklaşım işlevleri, herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektrik alan değerleri bulunabilir [11].

4. Uygulama

Kablo sonlarında oluşan elektrik alanın kontrolü ve çözümlenmesi, açık bir problemidir. Elektrik alan şiddetini etkileyen parametrelerden en önemlileri kullanılan malzemelerin elektriksel özellikleri, işletme gerilimi ve geometrik özellikleridir. Bu çalışmada, Şekil 3'te görülen, 240 mm^2 kesitinde, 35 kV'luk YE3SV tipi kablo göz önüne alınmıştır.



Şekil 3: YE3SV 1x240/25 35 kV kablunun enine kesiti

Güvenli ve uzun ömürlü bir işletme için, kablo sonlarında, en büyük alan şiddetinin olduğu, yarıiletken katmanının sonundaki elektriksel alan şiddetinin azaltılmalı ve yalıtkan ara yüzey boyunca alan dağılımının düzgün olması sağlanmalıdır. Bu amaçla, kablo mufunun dolgu malzemesi değiştirilerek, dielektrik sabiti yükseltilebilir, kablo sonlarında, eklenecek iki kablunun siperleri ile birleşik, boyutları ve dielektrik sabiti değişken olan bir kontrol borusu kullanılabilir veya kablo yalıtkanı ve kablo eki arayüzeyinin biçimi konikleştirilerek elektrik alan şiddeti sınırlandırılabilir.

Bu çalışmada, alanı incelenecek kablo ve mufun fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Kablo ve mufun fiziksel özellikleri

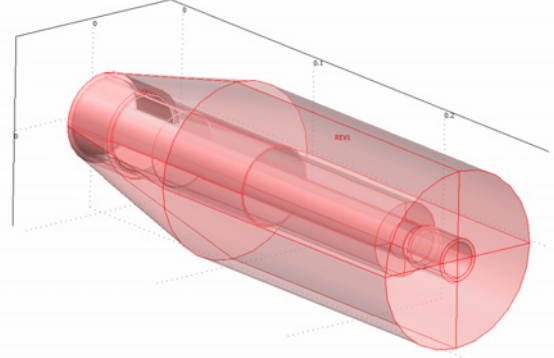
Bölge	Malzeme	Bağlı Dielektrik sabiti	Çap [mm]
Damar	Bakır	1	18,1
İç Yarıiletken	XLPE	5	19,2
Yalıtkan	XLPE	2,3	37,5
Dış Yarıiletken	XLPE	5	38,2
Krep Kağıdı		4	38,8
Siper	Bakır	1	40,4
Bakır Bant	Bakır	1	40,5
Polyester Bant		3	40,6
Dış Kılıf	PVC	7	45,6
Muf Dolgusu	Silikon	3	90

Alan incelemeleri için kullanılan geometriler, COMSOL Multiphysics 3.4 paket programında, çözümlemeye kolaylık sağlaması için, iki boyutlu eksenel simetrik olarak çizilmiştir. Kablo ve kablo mufunun eksenel yarı-kesiti Şekil 4'te görülmektedir.



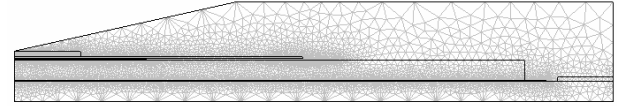
Şekil 4: Kablo mufunun eksenel kesiti

Şekil 4'teki problemin üç boyutlu görüntüsü Şekil 5'te gösterilmiştir.



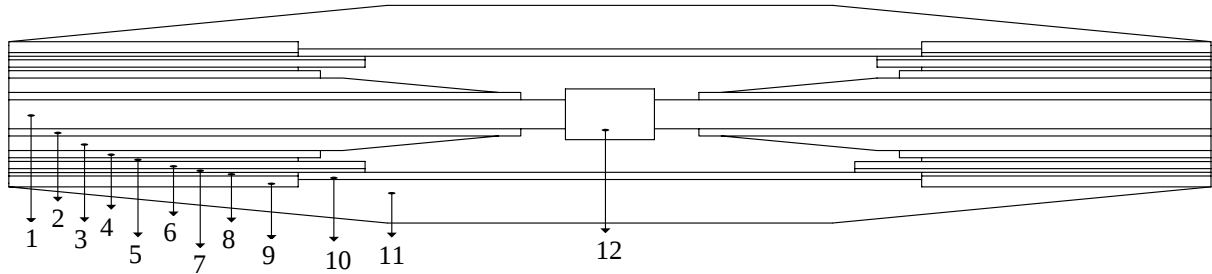
Şekil 5: Kablo mufunun üç boyutlu görüntüsü

Problem geometrisi (Şekil 6) çizildikten sonra, kablunun her katmanı, ve kablo mufu için elektriksel özellikler programa girilmiştir. Sınır koşulları, damar, konnektör ve iç yarıiletken 35 kV, dış yarıiletken 0 V olarak belirlendikten sonra, sonlu elemanlar ağı oluşturulur (Şekil 7). Ağ, 25579 sonlu eleman içermektedir.



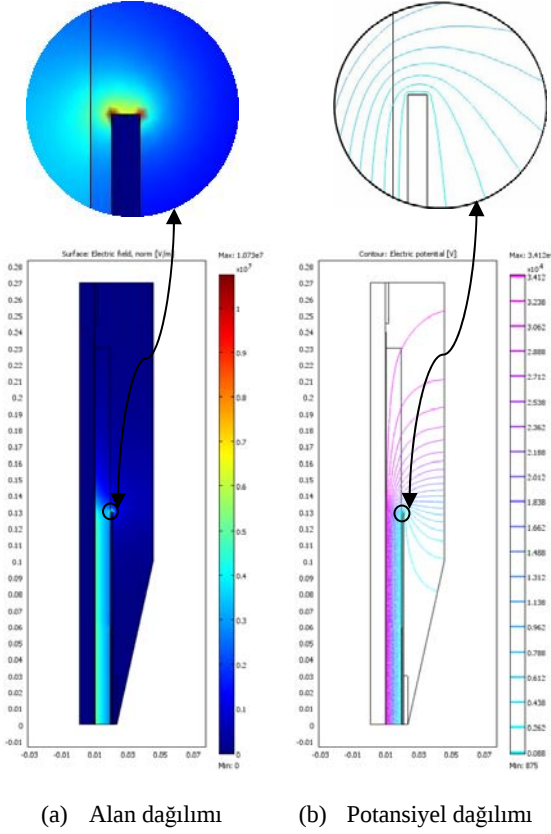
Şekil 7: Sonlu elemanlar ağı

Problem çözüldükten sonra, kontrol borusu olmayan silikon dolgu kablo mufu için alan dağılımı ve potansiyel dağılımı Şekil 8'deki gibi belirlenmiştir.



1 – İletken; 2 – İç Yarıiletken; 3 – Yalıtkan; 4 – Dış Yarıiletken; 5 – Krep Kağıdı; 6 – Siper; 7 – Bakır Bant; 8 – Polyester Bant; 9 – Dış Kılıf; 10 – Kontrol Borusu; 11 – Muf Dolgusu; 12 – Ek Borusu (Konnektör)

Şekil 6: 35 kV mufun (ekin) yapısı



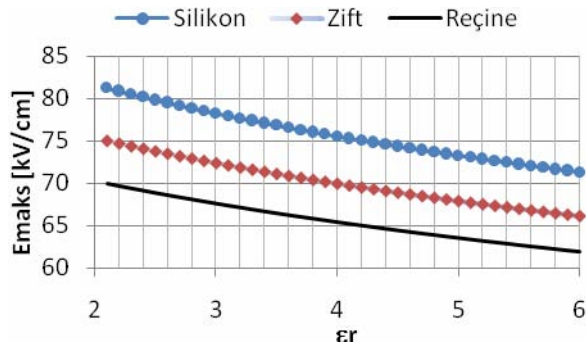
Şekil 8: Kontrol borusu olmayan kablo mufu için alan dağılımı ve potansiyel dağılımı

En büyük alan şiddeti, dış yarıletkenin sonunda görülmektedir (Şekil 8). Bu alan şiddetinin değeri, muf dolgu maddesi olarak dielektrik sabiti daha büyük bir malzeme kullanılarak veya kontrol borusu kullanılarak sınırlandırılabilir [12-16]. Kullanılan dolgu malzemelerinin bağül dielektrik sabitleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2 Muf dolgu maddelerinin bağül dielektrik sabitleri

Malzeme	Silikon	Zift	Reçine
Bağül dielektrik sabiti	3	3,5	4

Muf dolgu maddesi olarak silikon, reçine ve zift kullanılması durumunda, en büyük alan şiddeti değerinin, kontrol borusunun bağül dielektrik sabiti ile değişimi Şekil 9’da görülmektedir.



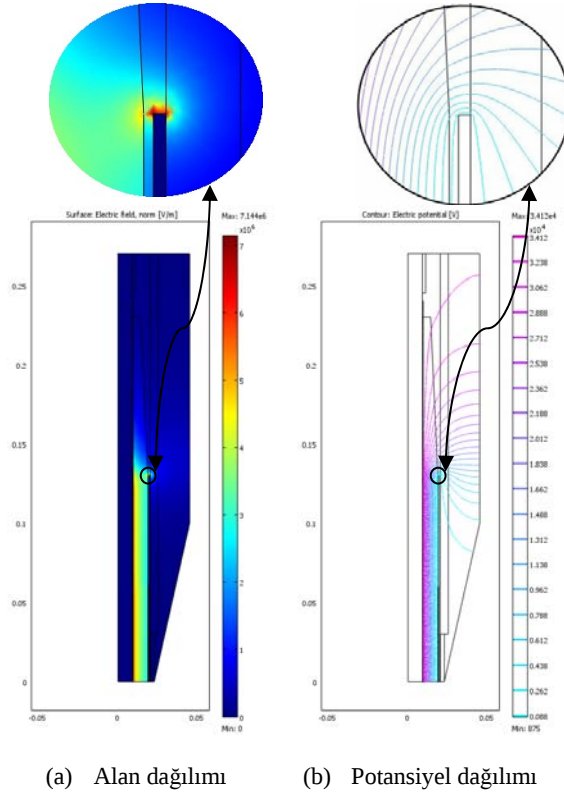
Şekil 9: En büyük alan şiddetinin, kontrol borusu dielektrik sabiti ile değişimi

Şekil 9’da görüldüğü gibi, muf dolgu maddesinin dielektrik sabitinin artmasıyla, yarıletken siperdeki alan değeri azalmaktadır. Kontrol borusu kullanılması da en büyük alan şiddeti değerini sınırlamaktadır. Benzer amaçlı çalışmalar, damar yalıtkanın biçiminin konikleştirilmesiyle de gerçekleştirilebilir. Damar yalıtkanı, siperin sonlandığı noktadan yalıtkanın sonunun ortasına doğru konikleştirilir. Bu durumda siper sonunda oluşan, en büyük alan şiddetinin değeri azalır. Silikon dolgulu kablo mufu için, aynı bağül dielektrik sabitli malzemeler kullanılarak, kontrol borusunun en büyük alan şiddetine etkisi Tablo 3’te görülmektedir.

Tablo 3: Kontrol borusunun en büyük alan şiddetine etkisi

	Yalıtkan biçimi	Kontrol Borusuz	Kontrol Borulu
Maksimum Alan [kV/cm]	Silindirsel	107,3	76,87
	Konik	71,85	71,44

Yapılan çalışmalar, benzer şekilde konikleştirilmiş yalıtkanlı sistem için de tekrarlanabilir. Şekil 10’da kontrol borusu olan, damar yalıtkanı konikleştirilmiş kablo mufu için alan dağılımı ve potansiyel dağılımı görülmektedir.



Şekil 10: Kontrol borusu olan, konik yalıtkanlı kablo mufu için alan dağılımı ve potansiyel dağılımı

5. Sonuçlar ve Tartışma

Sonuç olarak kablo muflarında elektrik alan dağılımının, muf geometrisi, boyutları, kullanılan malzeme ve kablo yapısı ile olan ilişkileri ortaya konulmuş, alan dağılımı sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmalar, farklı kesitte kablolarla, farklı muflarla sürdürülebilir.

Alan dağılımını etkileyen bütün etmenler, kablo mufu biçimlendirilmesinde kullanılabilir. Bu amaçlarla, algoritmik yöntemlerden yararlanılarak, elde edilen alan verileri ile alan dağılımı düzgün ve küçük şiddette olacak şekilde optimizasyon yapılabilir, muf geometrisi, boyutları, ara yüzey biçimi ve kullanılması gereken malzemeler, tasarım amaçlı olarak belirlenebilir.

Kaynaklar

- [1] Heinhold, L., *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] Lupo, G., Miano, G., Tucci, V., Vitelli, M., "Field Distribution in Cable Terminations from a Quasi-static Approximation of the Maxwell Equations", *IEEE Trans. DEI*, Cilt 3, s. 399-409, 1996.
- [5] Mackevich, J. P., Hoffmann, J. W., "Insulation Enhancement with Heat-Shrinkable Components - Part III - Shield Power Cables", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, No. 4, s. 31-40, 1991.
- [6] Nikolajevic, S. V., Pekaric-Nadj, N. M., Dimitrijevic, R. M., Djurovic, M., "Modelling of Cable Terminations with Embedded Electrodes", *IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Canada, s. 703-706, Haziran 16-19, 1996.
- [7] Fournier, D., "Effect of the Surface Roughness on Interfacial Breakdown between Two Dielectric Surfaces", *IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Montreal, Quebec, Canada, s. 699-702, Haziran 16-19, 1996.
- [8] Fournier, D., Dand, C., Paquin, L., "Interfacial Breakdown in Cable Joint", *Proceeding of the IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation*, Pittsburgh, PA, s. 450-452, Haziran 1994.
- [9] Kreuger, F. H., *Industrial High Voltage*, Cilt 1, Delft University Press, Delft, 1991.
- [10] Özkaya, M., *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [11] Hoole, S. R. H., *Finite elements, electromagnetics and design*, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [12] Pham, T. H., Hoole, S. R. H., "Unconstrained Optimization of Coupled Magneto-Thermal Problems", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, no. 3, May 1995
- [13] Gitosusastro, S., Coulomb, J.L., Sabonnadiere, J.C. "Performance derivative calculations and optimization process", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 25, no. 4, July, 1989
- [14] Rivenc, J., Lebey, T., "An overview of electrical properties for stress grading optimization", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 6 No.3, June 1999.
- [15] Bastos, J. P. A., Sadowski, N., Carlson, R., "A modeling approach of a couple problem between electrical current and its thermal effects", *IEEE Transactions on Magnetics* Vol. 26, No. 2, Marc 1990
- [16] 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, Paper No. 7869, 1995.