

ÇUBUK-DÜZLEM ELEKTROT SİSTEMİNDE FAYDALANMA FAKTÖRÜNÜN YÜK BENZETİM YÖNTEMİYLE HESABI

Özcan KALENDERLİ¹ Emel ÖNAL² Hayri YILDIRIM

Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik-Elektronik Fakültesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

¹E-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

²E-posta: onal@elk.itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Elektrot Sistemi, Faydalanma Faktörü, Yük Benzetim Yöntemi

ABSTRACT

The hemispherically capped rod-plane gap has been extensively used for studies on corona and breakdown characteristics of gaseous dielectrics. The field distribution of a hemispherically capped rod-plane gap can be computed using various methods. In this study, utilization factor of the rod-plane electrode system for different electrode gap spacing was computed by Charge Simulation Method (CSM). Then the computed results were compared with values computed by formulas of other researchers. There is a good agreement between the values computed with CSM and other methods reported in literature. As a result, utilization factor computed by this method can be used to compute the corona inception voltages and breakdown voltages accurately without having recourse to approximations.

1. GİRİŞ

Gerilim uygulanmış iki iletken (elektrot) arasındaki elektrik alan dağılımı, uygulanan gerilime, aralarındaki ortamın elektriksel özelliklerine, elektrot açıklığına, elektrotların boyutlarına ve şekline (geometrisine) bağlıdır. Düzlemsel, eş merkezli küresel veya eş eksenli silindrsel gibi basit elektrot sistemlerinde maksimum, minimum veya ortalama elektrik alan hesabı, analitik olarak kolaylıkla yapılabilir. Ancak uygulamada kullanılan ve karşılaşılan elektrot sistemleri genelde alan hesaplarının zor ve karmaşık olduğu sistemlerdir. Genelde düzgün olmayan alana sahip bu sistemlerde maksimum alanı bulabilmek sistemin elektriksel olarak en çok zorlanan yerini ve sistemin buna yanıtını belirleyebilmek bakımından önemlidir.

Düzgün olmayan elektrik alanlı sistemlerde, örneğin küre-küre, küre-düzlem, silindir-silindir, silindir-düzlem, çubuk-çubuk veya çubuk-düzlem gibi elektrot sistemlerinde alan hesabı için çözümsel, örneksel ve sayısal yöntemler kullanılmakta ve geliştirilmektedir [1, 2]. Amaç, elektrik alan dağılımını ve maksimum

alan şiddetini doğru olarak belirleyerek yalıtımı, zorlanma, kısmi boşalma ve delinme bakımından değerlendirmek ve dolayısıyla güvenilirliğini belirlemektir.

Elektrik alanının dağılımını ve sistemin maksimum zorlanmasını belirtmede ve hesaplamada, eşdeğer açıklık, geometrik karakteristik, düzgünsüzlük faktörü ve faydalanma faktörü gibi büyüklükler kullanılmaktadır.

Yüksek gerilim ile ilgili araştırmalarda, düzgün olmayan alanda yalıtım davranışını incelemek ve belirlemek için yaygın olarak kullanılan temel elektrot sistemlerinden birisi çubuk-düzlem elektrot sistemidir. Bu elektrot sistemi ile yalıtımda korona başlangıcı, atlama, delinme deneyleri yapılır, boşalma olayları incelenir. Deneysel bulgulardan veya onlardan bağımsız olarak korona başlangıç gerilimi veya delinme gerilimi hesabını yapabilecek bağıntılar elde etmek çabası yaygındır. Çünkü deneysel çalışmalar, genelde, pahalı, zaman alıcı ve zordur, her zaman olanaklı da olmayabilirler. Bu nedenle deney sonuçlarından yararlanarak ampirik bağıntılar çıkarılır, kuramsal olarak kesin veya yaklaşık değerler verecek yöntemler ve bağıntılar elde etmek için uğraşılır. Bu uğraşın diğer yönü de deney sonuçlarını, doğruluğuna güvenilen hesap sonuçları ile karşılaştırarak deneyin ve sonuçlarının doğruluğunu ve güvenilirliğini göstermektir, yani sağlama yapmaktır. Bu sağlama işlemi, sonraki çalışmaların önünü açar.

Delinme gerilimine ilişkin ampirik bağıntılar, elektrot sisteminin faydalanma faktörünü ve korona başlangıç alan şiddetini içermektedir. Delinme gerilimi hesabına geçiş yapabilmek amacı ile, bu çalışmada da, bir çubuk-düzlem elektrot sisteminin faydalanma faktörü, Yük Benzetim Yöntemi (YBY) adı verilen bir sayısal yöntemle bulunmuş ve sonuçların doğruluğu literatürde verilen ve bu çalışmada kullanılan yöntemden farklı yollardan bulunmuş sonuçlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir.

2. FAYDALANMA FAKTÖRÜ

Düzgün olmayan alanlı bir elektrot sistemi ile aynı elektrot açıklığına ve aynı gerilime sahip düzgün alanlı bir elektrot sisteminin ortalama elektrik alan şiddetinin, düzgün olmayan alanlı elektrot sisteminin maksimum elektrik alan şiddetine oranına faydalanma faktörü denir [3]. Buna göre bir elektrot sisteminin faydalanma faktörü, η

$$\eta = E_{ort} / E_{max} \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Burada E_{ort} ortalama alan şiddetini, E_{max} da maksimum alan şiddetini göstermektedir. Faydalanma faktörü $1 \geq \eta > 0$ arasında değer alır. Düzgün alanlı elektrot sistemlerinde $\eta = 1$, geri kalan elektrot sistemlerinde ise birden küçüktür ($\eta < 1$). Elektrot açıklıkları ve uygulanan gerilimleri aynı olan iki sistemin karşılaştırılması anlamına gelen faydalanma faktörü, elektrot sisteminin geometrik boyutlarına bağlı bir büyüklüktür. Faydalanma faktörü birden küçük sistemlerde alan düzensizliği ve dolayısıyla E_{max} büyüktür.

η faydalanma faktörünün bulunmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, faydalanma faktörünün hesabı için "Yük Benzetim Yöntemi (YBY)" (Charge Simulation Method) olarak adlandırılan sayısal bir yöntem kullanılmıştır.

3. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ

YBY, günümüzde elektrik alan hesabında başarıyla ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [4-9]. İlkesi, bir elektrot sisteminin elektriksel yüklerinin yarattığı gerçek elektrik alanını, benzetim yükü denilen yüklerle benzetmeye dayanır. Gauss yasasına dayanan yük benzetim yöntemi, özellikle simetrik sınır koşullarının bulunduğu durumlarda uygulaması çok kolay olan bir yöntemdir. Yöntemin ilkesini oluşturan Gauss yasası

$$\text{div}(-\epsilon \text{grad} \phi) = \text{div} D = \rho \quad (2)$$

$$\int_V \text{div} D \cdot dV = \int_A D \cdot dA = \int_V \rho \cdot dV \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. Bu bağıntılarda D elektriksel deplasman vektörünü, ρ hacimsel yük yoğunluğunu, ϵ dielektrik sabitini, ϕ de elektriksel potansiyeli belirtmektedir. Yük yoğunluğunun hacimsel integrali, A yüzey alanı içindeki toplam elektriksel yükü verir.

Yük Benzetim Yöntemi'ne göre süperpozisyon ilkesi uygulanarak, bir noktadaki potansiyel, her bir yükün bu noktada meydana getirdiği potansiyellerin toplamından bulunur. n -adet benzetim yükünden birinin yükü q_j , boşlukta herhangi bir noktadaki potansiyel de ϕ_i ile gösterilirse, süperpozisyon ilkesine göre

$$\phi_i = \sum_{j=1}^n p_{ij} q_j \quad (4)$$

yazılabilir. Burada p_{ij} , pek çok tip yük için bilinen potansiyel katsayısıdır.

Benzetim yükleri alanı hesaplanacak bölgenin içine yerleştirilir ve bu yüklerin değeri, bu yükleri çevreleyen elektrot potansiyelinden hesaplanır. n tane q_j yükü göz önüne alırsa, bu yüklerin değerlerini (4) denkleminde hesaplayabilmek için en az n tane bilinen potansiyele ihtiyaç vardır. Bunun için, elektrot yüzeyinde n adet ϕ_i potansiyelli sınır noktası adı verilen nokta tanımlanır. Bu noktaların potansiyeli $\phi_i = \phi_c$ olacağından

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} q_j = \phi_c \quad (5)$$

yazılabilir. Bu yazılım bilinmeyen yükler için

$$[p][q] = [\phi] \quad (6)$$

şeklinde bir denklem sistemi verir.

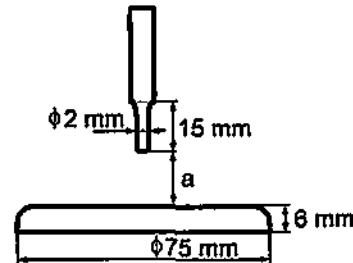
Uygun bir yük sistemi kabul edildikten sonra, potansiyel ve alan hesabı yapılabilir. Örneğin, kartezyen koordinat sisteminde, n adet yük ile yapılan benzetimde, bir noktadaki alanın E_x bileşeni

$$E_x = \sum_j \frac{\partial p_{ij}}{\partial x} q_j = \sum_j (f_{ij})_x q_j \quad (7)$$

dir. Burada f_{ij} , x yönündeki alan katsayılarıdır.

4. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ İLE FAYDALANMA FAKTÖRÜNÜN HESABI

Yukarıda ilkesi açıklanan yük benzetim yöntemi ile Şekil 1'de gösterilen çubuk-düzlem ve çubuk pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinin faydalanma faktörleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. Hesaplarda göz önüne alınan çubuk-düzlem elektrot sistemi

Hesaplama, çubuk elektrodun 1 mm yarıçaplı yarı küresel ucu için uç eğrilik merkezine 1 adet noktasal yük, çubuğun ince silindirik kısmının eksenine 16 adet sonlu çizgisel yük, çubuğun boğum kısmının eksenine 3 adet sonlu çizgisel yük ve çubuğun kalın kısmının eksenine de 16 adet sonlu çizgisel yük olmak üzere toplam 36 adet benzetim yükü ile çubuk-düzlem elektrot sisteminin yük benzetim modeli kurulmuştur. Modelde düzlem elektrot, potansiyeli sıfır olan sonsuz geniş bir elektrot olarak alınmış ve çubuk elektrot için kullanılan yüklerin bu düzleme göre görüntü yükleri de göz önüne alınarak ayrıca düzlem elektrot için benzetim yükü kullanılmamıştır. Problemin çözümü için gerekli sınır noktaları noktasal yük için çubuk elektrodun ucunda, diğer yükler için elektrot üzerinde sonlu çizgisel yükün ortasına denk gelen noktalarda alınmıştır.

Hesaplar, alan dağılımına ve faydalanma faktörüne elektrot yüzey pürüzlerinin etkisini irdeleyebilmek amacıyla çubuk-pürüzlü düzlem elektrot sistemi için de yapılmıştır. Bu amaçla düzlem elektrodun ortasında, çubuk elektrot eğrilik yarıçapına eşit yarıçaplı (1 mm) yarı küre şeklinde iletken pürüz bulunduğu varsayılmıştır. Bu çözümlemede, çubuk elektrot yine çubuk-düzlem elektrot sistemindeki gibi modellenirken, yarı küre şeklindeki pürüzlü modellemek için pürüz içine yerleştirilmiş 3 adet noktasal benzetim yükü kullanılmıştır. Pürüze ilişkin yükler için, pürüz yüzeyinde eşit aralıkla alınmış 3 adet sınır noktası alınmıştır.

Yukarıda açıklanan yük benzetim modelleri, silindirik koordinatlarda yazılmış formüllerle QBasic dilinde yazılmış bir yük benzetim yöntemi algoritması yardımıyla çözülmüştür. Elektrot sistemine uygulanan gerilim $U = 10$ kV kabul edilerek yapılan işlemlerin sonucunda, incelenen elektrot sistemlerinin 0,5 - 1,0 - 1,5 - 2,0 - 2,5 cm elektrot açıklıklarında maksimum elektrik alan şiddetleri ve $E_{ort} = U/a$ eşitliğinden ortalama elektrik alan şiddetleri hesaplanmış ve bulunan sonuçlar Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Yük benzetim yöntemi ile farklı elektrot açıklıklarında çubuk-düzlem ve çubuk-pürüzlü düzlem elektrot sistemleri için bulunan maksimum ve ortalama alan şiddeti değerleri.

a (cm)	E_{max} (kV/cm)		E_{ort} (kV/cm)
	Çubuk-düzlem Elektrot sistemi	Çubuk-pürüzlü düzlem elektrot sistemi	
0,5	113,93	106,09	20
1,0	97,12	93,90	10
1,5	90,02	88,17	6,67
2,0	85,83	84,59	5
2,5	82,99	82,09	4

Söz konusu elektrot sistemleri için Çizelge 1'deki değerlerle bulunan η faydalanma faktörleri, Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Çizelge 1'deki değerlerle bulunan faydalanma faktörleri.

a (cm)	Faydalanma faktörü, η	
	Çubuk-düzlem Elektrot sistemi	Çubuk-pürüzlü düzlem elektrot sistemi
0,5	0,1755	0,1885
1,0	0,1029	0,1065
1,5	0,0741	0,0756
2,0	0,0582	0,0591
2,5	0,0482	0,0487

5. FAYDALANMA FAKTÖRÜ HESAP SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Bu kısımda, yukarıda yük benzetim yönteminden yararlanarak bulunan faydalanma faktörleri ile literatürde aynı geometriye sahip elektrot sistemi için verilen bazı bağıntılardan yararlanarak bulunan faydalanma faktörleri karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, önce faydalanma faktörünü bulmak için kullanılan bazı bağıntılar, sonra da hesaplama sonuçları karşılaştırmaları sunulmuştur. Böylelikle hem farklı bir yöntemle bulunan faydalanma faktörü değerlerinin doğruluğu irdelenmiş hem de yük benzetim yönteminden bu amaçla yararlanılabileceği gösterilmiştir.

Steinbigler, 1969 yılında yayınladığı bir yazıda çeşitli elektrot sistemleri için yaptığı faydalanma faktörü hesap sonuçlarını tablolar halinde vermiştir [10]. Bu yazıda, çubuk-düzlem elektrot sisteminin faydalanma faktörü, çubuk elektrodun yarıçapına, uzunluğuna ve elektrot açıklığına bağlı olarak verilmiştir.

1986 yılında Y. Qiu, eğri uydurma yönteminden yararlanarak çubuk-düzlem elektrot sistemi için a/r oranına bağlı olarak η bağıntılarını vermiştir [11]. Qiu'nun kullandığı bağıntılardan biri

$$\eta = \frac{1}{0,45 \frac{a}{r} \ln(6a/r) \ln(a/r)} \quad (8)$$

dir. Bu bağıntı, $3 < a/r < 500$ aralığında geçerlidir.

1973 yılında Azer ve arkadaşları da yine $0,8 \leq a/r \leq 40$ arasında geçerli olan (9) bağıntısını kullanmışlardır [12].

$$\eta = \frac{1}{0,6162 \left(\frac{a}{r}\right)^{0,9716} + 1,1377} \quad (9)$$

Şekil 1'deki çubuk-düzlem elektrot sistemi için, Qiu, Azer ve Steinbigler tarafından kullanılan formüllerle ve bu çalışmada YBY ile hesaplanan η değerleri Çizelge 3'te verilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü gibi bulunan sonuçlar birbiri ile uyumludur.

Çizelge 3. Farklı yollardan hesaplanan faydalama faktörlerinin η_{YBY} ile karşılaştırılması.

a (cm)	η_{Qui}	η_{Azer}	$\eta_{Steinbigler}$	η_{YBY}
0,5	0,2103	0,2450	0,210	0,175
1,0	0,1249	0,1447	0,120	0,103
1,5	0,0891	0,1031	0,085	0,074
2,0	0,0696	0,0802	0,066	0,058
2,5	0,0570	0,0658	0,054	0,048

6. SONUÇ

Bu çalışmada, bir çubuk-düzlem elektrot sisteminin faydalama faktörü, farklı elektrot açıklıkları için Yük Benzetim Yöntemi (YBY) ile bulunmuş ve sonuçlar literatürde verilen bağıntılardan hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hesapta göz önüne alınan en küçük elektrot açıklığı için $\eta = 0,1755 < 1$ bulunmuştur. Bu değer, $\eta = 1$ değeri düzgün alana karşı düştüğüne göre elektrot sisteminin alan düzgünlüğüne göre büyüklüğünü göstermektedir. Elektrot açıklığı arttıkça faydalama faktörünün hızla azaldığı ve 2,5 cm elektrot açıklığı için $\eta = 0,0482$ değerini aldığı görülmektedir. Bu, artan elektrot açıklığı ile alan düzgünlüğünün çok büyüdüğü ve çubuk elektrodun boşalma olaylarındaki etkinliğini arttırdığını göstermektedir. Benzeri durum çubuk-pürüzlü düzlem elektrot sistemi için de elde edilmiştir. Ancak pürüzsüz ve pürüzlü elektrot durumları arasında belirgin bir fark görülmemekte, en küçük açıklıkta %7 iken en büyük açıklıkta %1'e düşmektedir. Bu, göz önüne alınan pürüz yarıçapının, incelenen elektrot açıklığı için büyük olmasına, küresel geometrisine, çubuk elektrot yarıçapına eşit olmasına bağlanabilir. Büyük açıklıklarda pürüzün etkisi, çubuk elektrodun maksimum alanı ve alan dağılımını belirleyici rolünün artması nedeniyle ihmal edilecek kadar azalmaktadır. Bu nedenle, bu problemde pürüzün boşalma olaylarına etkisi ihmal edilebilir.

Faydalama faktörü için literatürden elde edilen bağıntılarla bulunan değerler, bu çalışmada yük benzetim yöntemi ile bulunan değerlerle uyumludur. Buradan çıkartılacak bir sonuç ta kullanılan yöntemin en azından $0,8 < a/r < 500$ aralığında geçerli olduğudur. Çizelge 3'te, sonuçların uyumu yanında, genelde YBY ile bulunan değerlerin diğerlerinden çok az küçük olduğu görülmektedir. Bu fark, elektrot sisteminin modellenmesinden, kullanılan benzetim yükü türü ve sayısı gibi etkenlerden ve alan hesabındaki doğruluğun yüksekliğinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bu durum, amprik

bağıntıların oluşturulmasındaki isabetin yanında, YBY'nin bu iş için kullanılabilirliğini açıkça göstermektedir. Faydalama faktörünün bu şekilde hesabı, korona başlangıç gerilimi ve delinme gerilimi gibi faydalama faktörüne bağlı olarak verilen amprik veya amprik olmayan formüllerin hesabını kolaylaştıracak, doğruluğunu arttıracaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Abou Seada M. S., Nasser E., Digital Computer Calculation of the Electric Potential and Field of a Rod Gap, IEEE Proceedings, Vol. 56, pp. 813-820, 1968.
- [2] Ryan H. M., Electric Field of a Rod-Plane Spark Gap, IEEE Proceedings, Vol. 117, pp. 283-284, 1970.
- [3] Gönenç İ., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrot Sistemleri, İTÜ Yayını Sayı 1085, İstanbul, 1977.
- [4] Khaled, M., New Method for Computing the the Inception Voltage of a Positive Rod-Plane Gap in Atmospheric Air, ETZ-A, Bd. 95, pp. 369-373, 1974.
- [5] Singer, H., Steinbigler, H., Weiss, P., A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields, IEEE Trans. on Power App. Systems. PAS, Vol. 93, pp. 1600-1668, 1974.
- [6] Malik, N. H., A Review of the Charge Simulation Method and its Applications, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 24, No. 1, pp. 3-20, Feb. 1989.
- [7] Okuba, H., Amemiya, T., Honda, M., Borda's Profile and Electrical Field Optimization by Using Charge Simulation Method, Third Int. Symp. on High Voltage Engineering, Paper 32.03, Milan, 1979.
- [8] Beasley, M. D. R., Comparative Study of Three Methods for Computing Electric Fields, Proceedings IEE, 126, pp. 126-134, 1979.
- [9] Yıldırım, H., Elektrostatik Alanların Yük Benzetim Yöntemiyle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 1992.
- [10] Steinbigler, H., Anfangsfeldstärken und Ausnutzungsfaktoren Rotationssymmetrischer Elektrodenanordnungen in Luft, Technische Hochschule, Dissertation, München, 1969.
- [11] Qiu, Y., Simple Expression of Field Nonuniformity Factor for Hemispherically Capped Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No. 4, pp. 673-675, August 1986.
- [12] Azer, A. A., Comsa, R. P., Influence of Field Nonuniformity on the Breakdown Characteristics of Sulfur Hexafluoride, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-8, No. 4, pp. 136-142, 1973.