

EŞ MERKEZLİ KÜRESEL VE SİVRİ UÇ-YARIKÜRE ELEKTROT SİSTEMLERİNDE ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK BULUNMASI

Hasbi İSMAİLOĞLU

Özcan KALENDERLİ

İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fak., Yüksek Gerilim Lab.,

Gümüşsuyu-İSTANBUL

ÖZET

Çalışmada, eş merkezli küresel ve sivri uç-yarıküre elektrot sistemlerinde elektrostatik alan dağılımları elektrolitik banyo ve yarıiletken kagıt yöntemleri ile bulunmuştur. Sivri uç-yarıküre elektrot sistemi, önce, eş merkezli küresel elektrot sistemi gibi düşünülerek inceleme yapılmıştır. Eş merkezli küresel elektrot sisteminin deneysel olarak bulunan sonuçları, analitik olarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak ölçmenin ve modellenmenin doğruluğu gösterilmiştir. Daha sonra sivri uç-yarıküre elektrot sisteminin alan dağılımı bulunmuştur. Bulunan deneysel sonuçlar sonlu elemanlar yöntemiyle bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Bir yüksek gerilim aygıtının içindeki ve çevresindeki elektrik alan dağılımının bilinmesi, tasarımı, en uygun malzemelerin seçilmesi ve boyutlandırılması bakımından en önemli koşullardan biridir. Bir elektrot düzeninde elektrotların belirli bir simetrisi olduğunda, elektrotlar arasındaki potansiyel dağılımıyla alan dağılımı, kuramsal olarak daha kolaylıkla incelenebilir. Ancak belirli bir simetrisinin bulunmadığı, daha karmaşık durumlarda problemin kuramsal olarak incelenmesinde zorluklarla karşılaşılır. Bu gibi durumlarda sayısal (sonlu farklar, sonlu elemanlar ve yük benzeşimi gibi) yöntemler ile çizimsel (grafik) veya deneysel yöntemlerden yararlanılabilir.

Sayısal yöntemlerle elektrostatik alanın incelenmesinde, Laplace ve Poisson denklemlerinin bilgisayar yardımıyla çözülmesinden yararlanılır. Sayısal yöntemlerde incelenen duruma ilişkin büyüklüklerin ve varsayımların yeterliliği ve doğru tanımlanması önemlidir. Çizimsel yöntemler ise elektriksel alanın her noktasında birbirine dik olan eşpotansiyel ve alan çizgilerinin belirlenmesini esas alır. Bu yöntemler de belli bilgi ve deneyimi gerektiren yöntemlerdir.

Deneysel yöntemler, gerçek alana ilişkin fiziksel büyüklüklerden biri ya da birkaçının doğrudan ölçülmesine dayanır. Ancak bazı durumlarda alan büyüklüklerinin doğrudan ölçül-

mesi sorun olabilmektedir. Bu nedenle, özellikle çok büyük veya çok küçük boyutlardaki elektrot düzenlerinde gerçek düzen yerine, ölçekli bir modeli üzerinde çalışılır. Bu şekilde kolaylıkla, tehlikesizce ve alçak gerilimlerde, özel aygıtlar gerektirmeden ölçmeler yapılabilir. Bu amaçla iki ve üç boyutlu alan problemlerinin incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerden ikisi elektrolitik banyo yöntemi ve yarıiletken kagıt yöntemidir.

Bu çalışmada yukarıda sözü edilen deneysel yöntemlerle sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde potansiyel ve alan dağılımlarının bulunmasına çalışılmıştır. Çalışmamıza konu olan sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, yüksek gerilim tekniğinde, elektriksel kısmi boşalma ölçme devrelerinin kalibrasyonunda kullanılan korona boşalmalı standart bir ayar kaynağıdır. Düzen, sivri uçlu elektrodun eğrilik yarıçapına bağlı olarak belli bir gerilimde sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri üretir. Standartlarda (TS 2051, IEC 270) 25 mm yarıçaplı yarıküre karşısında ve merkezinde sivri uç eğrilik yarıçapı 0,05, 0,2 ve 0,5 mm olan sivri uçlu elektrotlar için boşalma başlangıç gerilimleri ve üretilen işaret genlikleri verilmektedir. Burada sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, önce, eş merkezli küresel elektrot düzeni gibi düşünülerek inceleme yapılmıştır. Eş merkezli küresel elektrot düzeni için deneysel olarak bulunan sonuçlar, analitik olarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak ölçmenin ve modellenmenin doğruluğu gösterilmiştir. Bilindiği gibi, eş merkezli, küresel elektrot düzeninde eşpotansiyel küre yüzeylerinin yarıçapları, küresel koordinat sisteminde Laplace denkleminin çözümünden bulunan ve 1'inci eşpotansiyel yüzeyin, r_1 yarıçapı bilindiğine göre,

$$r_{i+1} = \frac{r_1}{1-k r_1} \quad (1)$$

bağıntısı yardımı ile bulunabilir. Burada, ΔV potansiyel farkı, r_1 ve r_2 , sırasıyla iç ve dış küre yarıçapları ve U uygulanan gerilim olmak üzere

$$k = \frac{\Delta V}{U} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 \cdot r_2} \quad (2)$$

dir.

2. DENEYSEL YÖNTEMLER

2.1. Elektrolitik Banyo Yöntemi

Elektrolitik banyo yönteminin ilkesi, statik elektrik alanı ile stasyoner akım alanı arasındaki benzerliktir. Statik alanın \vec{D} akı yoğunluğu ile \vec{E} elektriksel alanı arasında ve stasyoner alanın \vec{J} akım yoğunluğu ile \vec{E} elektriksel alanı arasında, sırasıyla ϵ ortamın dielektrik katsayısı ve X ortamın öziletkenliği olmak üzere

$$\frac{\vec{D}}{J} = \frac{\epsilon \cdot \vec{E}}{X \cdot \vec{E}} \quad (3)$$

bağıntıları vardır. Benzer şekilde, statik elektrik alanında

$$\oint \vec{D} \cdot d\vec{F} = Q, \quad C = Q/U \quad (4)$$

ve stasyoner alanda

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{F} = I, \quad R = U/I \quad (5)$$

bağıntıları yazılabilir. Ortamın izotrop olması durumunda X skaler bir büyüklük olacağından, \vec{J} ve \vec{E} vektörleri aynı yön ve doğrultuda olur ve akım çizgileri ile elektriksel alan çizgileri çakışır. Ancak stasyoner akım alanı ile statik elektrik alanı arasında, yukarıdaki bağıntılarla verilen benzerliklerin gerçekleştirilmesi için bu iki alanın sınır koşullarının eşit olması gerekir. Bu açıklamalar, bir elektrot düzeninin statik alan dağılımının, iletken ortamdaki stasyoner akım alanından gidilerek bulunabileceğini gösterir. İletken ortam olarak iletken bir sıvı (elektrolit) kullanılır. Alan dağılımı bulunacak elektrot düzeninin ölçekli bir modeli, elektrolit ortama yerleştirilir. Elektrot düzenine, orta frekanslı, alçak, bir alternatif gerilim uygulanır ve eşpotansiyel noktalar ölçme düzeni yardımıyla bulunur.

2.2. Yarıiletken Kağıt Yöntemi

Yarıiletken kağıt yöntemi, elektrolitik banyo yöntemi ile aynı ilkeye sahiptir. Bu yöntem daha çok iki boyutlu problemlerin incelenmesinde elverişlidir. Üç boyutlu problemler için modelleme zorlukları vardır. Banyo yönteminde farkı, yarıiletken ortam olarak, sıvı (elektrolit) yerine, küçük dirençli kağıt (yarıiletken kağıt, dirençli kağıt, karbon kağıdı) kullanılmasıdır. Ayrıca model ve sonuçların bir resim gibi saklanabilmesi, gerektiğinde yeniden ölçme ve değişikliğin kolaylıkla yapılabilmesi bu yöntemin iyi özelliklerindendir.

3. MODELLER VE DENEYLERİN YAPILIŞI

Deneylede $r_1=0,5$ mm ve $r_2=25$ mm yarıçaplı gerçek sistem, 5/1 ve 10/1 ölçekli elektrot düzenleri ile modellenmiştir.

Elektrolitik banyo deneylerinde modelleme iki şekilde yapılmıştır. Birincisinde, sistemin

üç boyutlu modeli (eş merkezli küre-yarıküre ve sivri uç-yarıküre modelleri) elektrolit içine yerleştirilmiş ve ölçmeler üç boyutlu olarak yapılmıştır. İkincisinde ise, gerçek sistem, eğik tabanlı olarak, dilim şeklinde modellenmiştir. Eğik tabanlar poliüretandan ve 30°lik açıyla hazırlanmıştır. Taban açısı küçük seçilerek elektrotların modellenmesinden gelebilecek hatalar azaltılmıştır. Deneylerde elektrolit olarak, iletkenliği 20°C de yaklaşık 325 μS olan musluk suyu kullanılmıştır. Eşpotansiyel noktalar, 0,1-0,4 mm yarıçapları arasında, emaye yalıtkanlı, elektrolitle noktasal teması olan, iletken sondalar yardımıyla bulunmuştur.

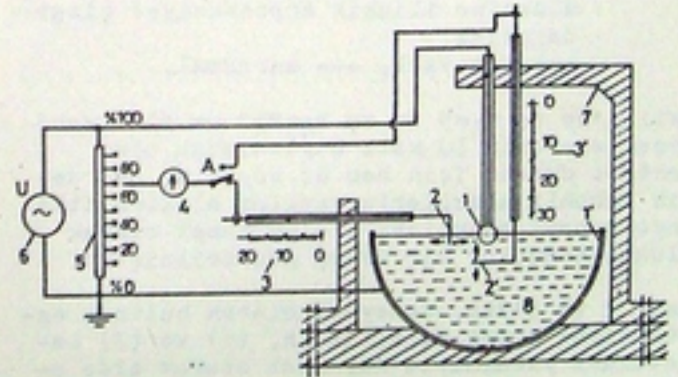
Yarıiletken kağıt yöntemi ise eş merkezli küresel elektrot düzeni için kullanılmıştır. Düzen, bu yöntemle eğik tabanlı olarak modellenmiştir. Bu amaçla, düzenin dönele simetrisinden yararlanılarak çeyrek eş merkezli küre basamak şeklinde, üst üste dizilmiş yarıiletken kağıt tabakaları ile oluşturulmuştur. Elektrotlar, şekline uygun olarak, alüminyum folyeden hazırlanıp, toplu iğnelerle tabana tutturulmuştur. Ölçmeler sırasında bulunan her bir eşpotansiyel noktaya bir toplu iğne batırılarak o noktanın tesbiti yapılmıştır.

Gerek elektrolitik banyo, gerekse yarıiletken kağıt yönteminde ölçmeler, 10 V, 50 Hz'lik gerilimle, hazır bir ölçme köprüsünden $\Delta V=10U$ basamaklarla yapılmış ve sıfır aleti olarak, köprü üzerindeki mikroampermetreden yararlanılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Eş Merkezli Küresel Elektrot Düzeni

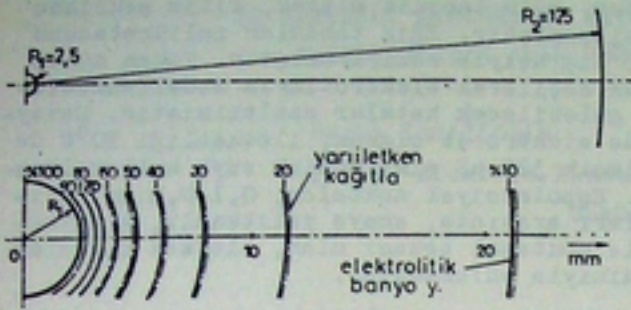
Eş merkezli küresel elektrot düzeninde elektrot yarıçapları, sivri uç-yarıküre elektrot düzenindeki sivri ucun eğrilik yarıçapına ve



Şekil 1. Elektrolitik banyo deney düzeni.

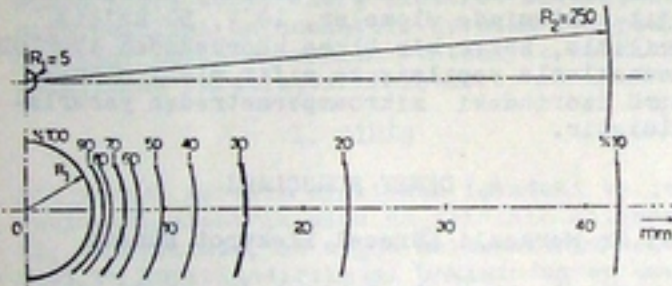
- 1,1': Elektrotlar,
- 2,2': Yatay ve dikey hareketli sondalar,
- 3,3': Koordinat cetvelleri,
- 4 : Sıfır aleti,
- 5 : Gerilim bölücü,
- 6 : Alternatif gerilim kaynağı,
- 7 : Kaide
- 8 : Elektrolit
- A : Konum seçici anahtar.

yarıkürenin yarıçapına uygun olarak seçilmiştir. Şekil 1'de elektrolitik banyo yöntemiyle ilişkin üç boyutlu eş merkezli küre-yarıküre modeli için deney düzeni gösterilmiştir.



Şekil 2. $r_1=2,5$ mm ve $r_2=125$ mm olan elektrot düzenine ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.
— deneyel, --- kuramsal.

Şekil 2'de $r_1=2,5$ mm ve $r_2=125$ mm olan elektrot düzeni için üç boyutlu elektrolitik banyo yöntemiyle ve yarıiletken kağıt yöntemiyle deneyel olarak bulunanlar ile kuramsal olarak hesaplanan eşpotansiyel çizgi (yüzey) dağılımları (% 10 aralıklarla) bir arada çizilmiştir.



Şekil 3. $r_1=5$ mm ve $r_2=250$ mm olan elektrot düzenine ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.
— deneyel, --- kuramsal.

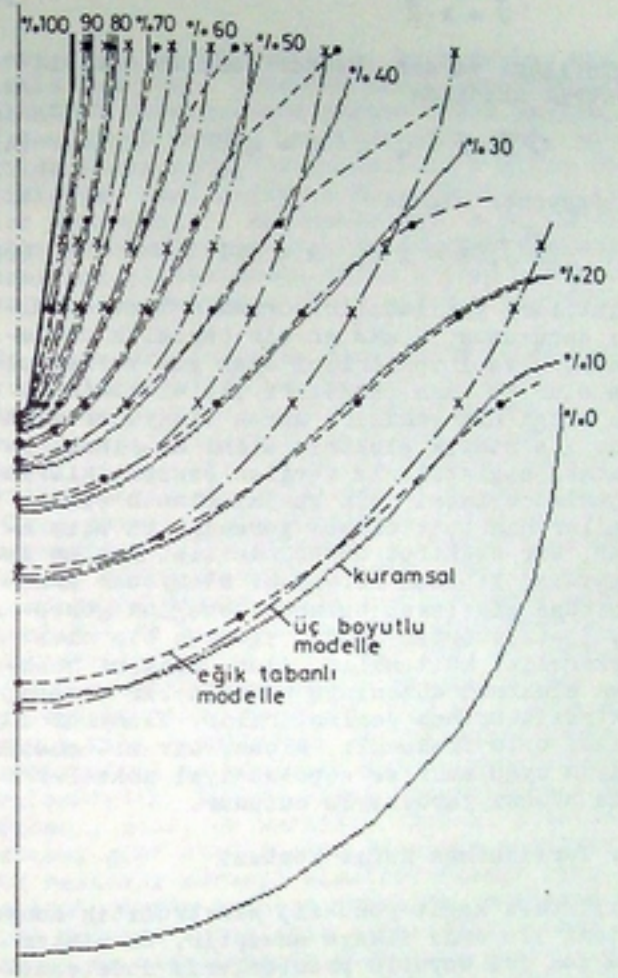
Şekil 3'de de $r_1=5$ mm ve $r_2=250$ mm olan yani gerçek sistemin 10 katı büyütülmüş olan elektrot düzeni için hem üç boyutlu, hem de eğik tabanlı modellerle yapılan elektrolitik banyo deneyi sonuçları ile kuramsal olarak bulunan sonuçlar bir arada gösterilmiştir.

Şekil 2 ve 3'den, deneyel olarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımının, (1) ve (2) bağlantıları yardımıyla kuramsal olarak elde edilenlere ± 1 hata ile uyduğu saptanmıştır. Bu sonuç deneyel yöntemlerin hata sınırı içinde kabul edilebilir. Şekillere dikkat edilecek olursa eşpotansiyel çizgilerin küçük yarıçaplı elektrot yakınında dar bir bölgeye sıkıştığı, bunda ölçme zorluğu getirdiği anlaşılmaktadır. Bu zorluğu yenmek amacıyla modeller mümkün olduğunca büyütülmüş, kullanılan sondalar da ince seçilmiştir. Eş merkezli küresel elektrot düzeni için yapılan deneylerden ölçmelerin ve modellenmenin doğru ol-

duğuna ve sivri uç-yarıküre düzeni içinde benzer uygulamanın yapılabileceğine karar verilmiştir.

4.2. Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Düzeni

Şekil 4'de sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için elektrolitik banyo yöntemiyle üç boyutlu ve eğik tabanlı modeller üzerinde deneyel olarak bulunan eşpotansiyel çizgiler ile referans [3] de sonlu elemanlar yöntemini kullanarak bilgisayar yardımıyla bulunan eşpotansiyel çizgiler bir arada gösterilmiştir.



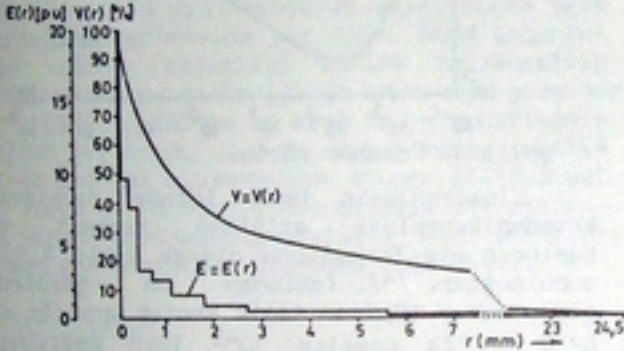
Şekil 4. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde eşpotansiyel çizgi dağılımı.

Şekilden eğik tabanlı model üzerinde bulunan deneyel sonuçların, bilgisayarla bulunan sonuçlara yakınlığı görülmektedir. Aradaki farklar, sonlu elemanlar yönteminin kapalı bölgeler için uygulanması nedeniyle sivri uç ile yarıküre arasındaki bölgenin kapatılması sırasında varsayım ile problemin çözümü için kullanılan ağın seçiminden kaynaklandığı, deneyel yöntem bakımından ise modellenmenin yarıküre yarıçapıyla sınırlı bulunmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca deneyel yöntemin uygulanması sırasında gelen hatalar da sonuçlara etkimiştir. Üç boyutlu modelle deneyel olarak bulunan eşpotansiyel çizgilerin

diğer yollarla bulunan çizgilerden farklılığı ise bu deney sırasında sivri uç-yarıküre elektrot modelinin topraklı bir silindir içi- ne yerleştirilmiş olmasından kaynaklandığı ne yerleştirilmiş olmasından kaynaklandığı ne yerleştirilmiş olmasından kaynaklandığı çizgilerin değişiminden anlaşılmaktadır.

Deneyssel yöntemlerde ölçme köprüsünün duyar- lığının, sonda inceliğinin, doğru modelleme- nin, model ve elektrotların düzgün- lüğünün ay- rıca elektrolitik banyo yönteminde meniaküs etkisinin, elektrolitin ve elektrolit düzeyi- nin, koordinat okumanın; yarıiletken kağıt yönteminde kullanılan kağıdın nemsiz, temiz, kırışık olmasının, kağıt tabakalarının ve elektrotların birbiri ile sıkı temas etmesi- nin önemi vardır.

Yapılan ölçmelerin amacı potansiyel dağılımı- nı bulmak yanında elektrik alan dağılımını bulmak ve sistemin en çok zorlanan noktaları- nı belirlemektir. Alan çizgileri potansiyel çizgilerine her noktada dik olması koşulu ile alan çizgileri çizilebilir. Herhangi iki eş- potansiyel çizgi arasındaki potansiyel farkı- nın, söz konusu eşpotansiyel çizgi arasındaki uzaklığa bölümü de o aralıktaki elektrik alan şiddetini verir. Bu prensibe dayanarak sivri uç-yarıküre arasında sivri uçtan uzaklıkla deneysel olarak bulunan potansiyel ve elek- trik alan dağılımları Şekil 5'de gösterilmiş- tir.



Şekil 5. Sivri uç-yarıküre elektrot sisteminde potansiyel ve elektrik alan dağılımının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

Yapılan bu çalışma ile yüksek gerilim tekni- ğinde düzgün olmayan alanlı elektrot sistem- lerinde potansiyel ve alan dağılımlarının in- celenmesinde deneyssel yöntemlerin yararlı ve uygulanabilir olduğu görülmüştür.

5. KAYNAKLAR

- /1/ Vitkovitch, D., "Field Analysis, Experimental and Computational Methods", D. Van Nostrand Co., London, 1966.
- /2/ Krauss, H., "Determination of the Electric Field of Solids of Revolution by the Resistance Paper Method, Bulletin de Association Suisse des Electriciens, Vol.64, No.11, 1973, pp.721-725.
- /3/ Ovacak, L., Kalenderli, Ö., "Sivri uç- Yarıküre Elektrot Sisteminde Elektrosta-

tik Alan Dağılımının Sonlu Elemanlar Yön- temi ile Bulunması", ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü (EEMB) 30. Yıl Sempozyumu, 8-10 Şubat 1989, Anka- ra, s.166-169.

- /4/ Kreuger, F.H., "Letters to the Editor", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.4, No.1, Jan./Feb. 1988, s.33-34.
- /5/ Kuffel, E., Zaengl, W.S., "High Voltage Engineering", Pergamon Press, 1984.