

**GAZ YALITIMLI SİSTEMLERDE ARA TUTUCULARIN ALAN DAĞILIMINA ETKİSİNİN
SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİNE BİR UYGULAMA**

Ö. Kalenderli, H. İsmailoğlu

İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi
Yüksek Gerilim Laboratuvarı, İstanbul

ÖZET

Basınçlı gaz yalıtımlı sistemlerde, yüksek gerilim iletkenlerini taşıyan yalıtkan ara tutucuların varlığının, sistemin elektriksel, mekanik ve ısı özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu çalışmada, ara tutucuların sistemin elektriksel alan dağılımına etkileri, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, geliştirilen bir bilgisayar programı tanıtılmakta, programın çalışması bir örnek üzerinde gösterilerek sonuçları verilmektedir.

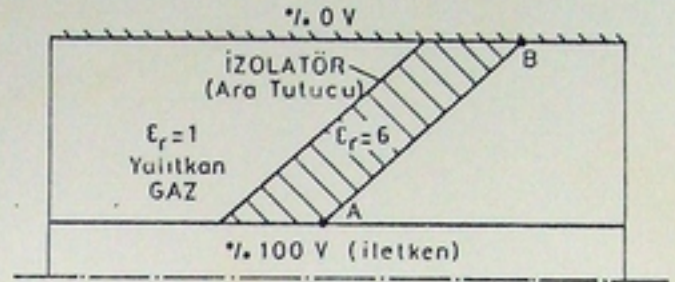
1. Giriş

Yerleşim sınırlamaları, kirlenme, çevre koşulları ve güvenlik gibi etkenler nedeniyle gaz yalıtımlı sistemlerin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Basınçlı gaz veya vakum yalıtımlı bu sistemlerde, metal mahfazaları ile yüksek gerilim iletkenleri arasındaki açıklığın sağlanması ve iletkenlerin mekanik olarak tutturulması amacıyla ara tutucu (spacer) adı verilen (yalıtkan) nesnet izolatorlarından yararlanılmaktadır. Ancak ara tutucuların kullanımı bu tür sistemlerin elektriksel, mekanik ve ısı özelliklerini dolayısıyla güvenilirliklerini etkiler. Ara tutucu/gaz ara yüzeyinde teğetsel alan şiddetinin değeri, ara tutucunun elektrot açıklığını köprülemesi nedeniyle basınçlı gaz yalıtımlı sistemin delinme dayanımına sınırlama getirir. Yalıtkan ara tutucuların biçimi, boyutları, yüzey durumu, yerleşimi, malzemesi, kirlenmesi ve iletken parçacıklar gaz yalıtımlı sistem içindeki elektriksel alan dağılımını değiştirir /1-3/.

Ara tutucuların gerek yüzeylerinde gerekse bulundukları bölge içinde elektrik alan dağılımındaki etkileri gözönünde bulundurulmalıdır. Bu amaçla deneysel ve kuramsal çalışmalar yapılmaktadır.

Kuramsal çalışmalarda bilgisayar destekli incelemeler ön planda yer alır. Bu çalışmada da, bilgisayarla sayısal alan incelemelerinde etkin ve yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (SEY) den yararlanılmıştır. Yöntemin adından da anlaşılacağı üzere, sisteme ilişkin elektrot modelinin alanı sonlu sayıda elemana bölünerek incelenir. Çözüm, her bir elemanda minimum enerji ilkesi uygulanarak, potansiyel fonksiyonu ile bulunur /4-7/.

Bu çalışmada, huni tipi ara tutuculu basit bir gaz yalıtımlı sistem (eş eksenli silindirik elektrot sistemi) gözönüne alınmıştır (Şekil-1).



Şekil-1.

Sisteminde, uygulamadaki gerçek sistemlere benzerlik sağlamak üzere, ara tutucu malzemesi epoksi reçine ($\epsilon_r \approx 6$) ve gaz ortamı, SF₆ gazı ($\epsilon_r \approx 1$) seçilmiştir. Ara tutucunun yan yüzeylerinin iç iletkenle ($V = 100$) 40° lik açı yaptığı varsayılmıştır. Problemin çözümü, sonlu elemanlar yöntemine dayanarak hazırlanan bir bilgisayar programı ile yapılmıştır.

2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Şekil-1 de gösterilen huni tipi ara tutuculu gaz yalıtımlı sistemde potansiyel ve alan dağılımının incelenmesinde problem, bir elektrostatik alan problemi olarak gözönüne alınmıştır. Sistemin eksenel simetrisi nedeniyle çözüm, silindirik koordinat (r, θ, z) sisteminde yapılmıştır. İncelenen elektrot sisteminde potansiyelin θ 'dan bağımsız olması nedeniyle üçgen elemanlar r - z koordinat sisteminde tanımlanabilir ve potansiyelin gradyanı

$$\text{Grad } V = \frac{\partial V}{\partial r} \hat{r} + \frac{\partial V}{\partial z} \hat{z} \quad (1)$$

olarak alınabilir. Sistemin simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki çözüm bölgesinin yarısının simetri eksenini çevresinde 2 π kadar döndürülmesi ile oluşan hacim içerisinde depolanan potansiyel enerji

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

olarak bulunur. Üçgen elemanlar içinde potansiyelin lineer değiştiği varsayılırsa, potansiyel

$$V = p_1 + p_2 r + p_3 z \quad (3)$$

şeklinde bir bağıntı ile verilebilir. Bu bağıntı, üçgenin her düğümü için yazılırsa aşağıdaki denklem sistemi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bu denklem sisteminden, daha sonra kullanılacak olan p_2 ve p_3 katsayıları

$$p_2 = \frac{1}{2A_e} [(z_3 - z_2)V_1 + (z_1 - z_3)V_2 + (z_2 - z_1)V_3] \quad (5)$$

$$p_3 = \frac{1}{2A_e} [(r_3 - r_2)V_1 + (r_1 - r_3)V_2 + (r_2 - r_1)V_3]$$

olarak elde edilir. Bu bağıntılarda

$$2A_e = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix}$$

ve A_e bir üçgen elemanın alanıdır. (2) bağıntısındaki integral ifadesi için

$$\iint_{A_e} r \, dr \, dz = \frac{A_e}{3} (r_1 + r_2 + r_3) = A_e \cdot r_o \quad (6)$$

eşitliği yazılabilir. Böylece, eleman içinde depolanan enerji bağıntısı

$$W_e = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o \cdot \pi \cdot A_e \cdot (p_2^2 + p_3^2) \cdot r_o \quad (7)$$

biçimine dönüşür. Burada ϵ_{re} , eleman içindeki ortamın bağıl dielektrik sabitidir.

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), tüm bölge içindeki enerjinin minimize edilmesi ilkesine dayanır. Eleman içindeki enerji, düğüm potansiyellerine göre minimize edilir.

$$\frac{\partial W_e}{\partial V_i} = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o \cdot \pi \cdot A_e \cdot (2p_2 \frac{\partial p_2}{\partial V_i} + 2p_3 \frac{\partial p_3}{\partial V_i}) \cdot r_o \quad (8)$$

ve $i=1,2,3$, için

$$[S]_{3 \times 3} \cdot [V]_{3 \times 1} = 0 \quad (9)$$

3x3 boyutunda "Katılık matrisi" (Stiffness matrix) elde edilir. Katılık matrisi simetrik bir matris olup elemanları

$$s_{11} = \frac{\epsilon_{re} \cdot \pi}{2A_e} [(r_3 - r_2)^2 + (z_2 - z_3)^2] \cdot r_o$$

$$s_{12} = \frac{\epsilon_{re} \cdot \pi}{2A_e} [(r_3 - r_2)(r_3 - r_1) + (z_2 - z_3)(z_3 - z_1)] \cdot r_o \quad (10)$$

$$s_{13} = \frac{\epsilon_{re} \cdot \pi}{2A_e} [(r_3 - r_2)(r_1 - r_2) + (z_2 - z_3)(z_1 - z_2)] \cdot r_o$$

:

biçiminde, (9) bağıntısından cebirsel işlemler sonucunda bulunabilir /8/. Minimizeleme ilkesi, çözüm bölgesi içindeki tüm elemanlara aynı anda uygulanırsa, tanımlanan elemanların düğüm potansiyelleri arasındaki bağıntı aşağıda verilen lineer bir denklem sistemine dönüşür.

$$[S_{sist}] \cdot [V] = 0 \quad (11)$$

Burada $[V]$, sistemin düğüm noktalarının potansiyellerinden oluşan bir sütun matristir. $[S_{sist}]$ matrisi simetrik ve tekil olmayan, oldukça seyrek bir matristir (Sparse matrix). Elde edilen lineer denklem sistemindeki katsayılar matrisinin seyrek olması dolayısıyla, doğrudan çözüm yöntemlerinden yararlanmak hem gereksiz bilgisayar belleği kullanımına, hem de büyük boyutlu matrisler için bilgisayarın yuvarlatma hatasının büyümesine (artmasına) neden olur. Bilinmeyen sayısı birkaç yüz geçtiği zaman iteratif yöntemler önem kazanır. Bu çalışmada iteratif çözüm yöntemi olarak S.O.R. (Successive-Over-Relaxation) yöntemi kullanılmıştır.

iterasyonda önce, elektrotlar üzerinde kalanlar dışındaki tüm düğümlerin potansiyellerine başlangıç olarak

$$V_{ort} = \frac{1}{2} (V_{max} - V_{min}) \quad (12)$$

ortalama değeri verilir, sonra bu düğümler sırasıyla iterasyona sokulurlar. Buna göre k. düğümün V_k potansiyelinin değeri

$$V^{(n+1)} = V^{(n)} + \omega (V_k - V^{(n)}) \quad (13)$$

iteratif bağıntısı ile hesaplanır. Burada ω hızlandırma katsayısı olup $1 < \omega < 2$ arasında alacağı bir ω_o değeri için iterasyonun en hızlı yakınsamasını sağlar. Bu değer deneme-yanılma ile bulunabilir.

Elektrotlar üzerindeki düğümler iterasyona sokulmayıp, işlem süresince sabit bırakılırlar.

Her iterasyon tamamlandıktan sonra düğüm potansiyellerinin bir önceki iterasyona göre bağıl değişimlerinin maksimum değeri belirli bir H hata sınırı altında kaldığında, yani

$$\max \left| \frac{V^{(n+1)} - V^{(n)}}{V^{(n)}} \right| \leq H \quad (14)$$

olduğunda iterasyon durdurulur.

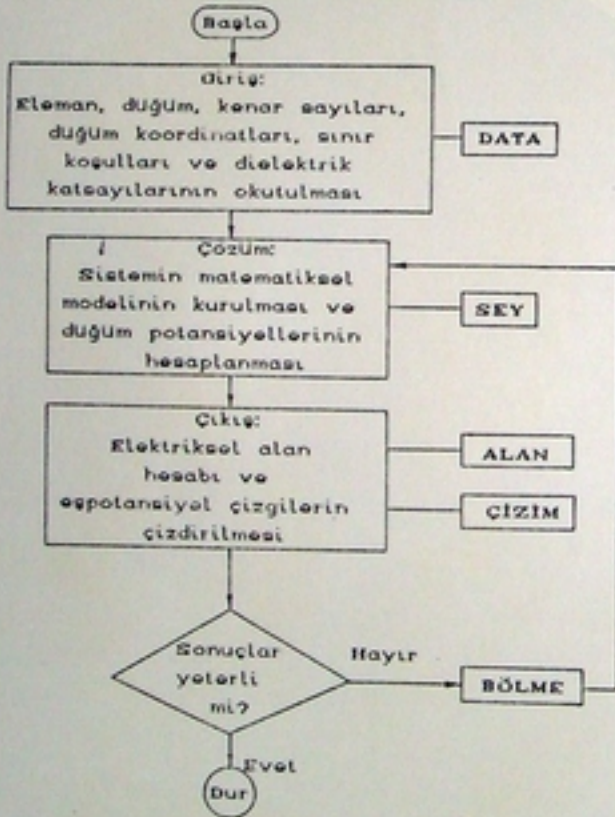
Elektriksel alan şiddeti, potansiyelin bir üçgen eleman içinde lineer olarak değişmesi nedeniyle sabit bir değer alır ve

$$E = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} = \sqrt{P_z^2 + P_s^2} \quad (15)$$

bağıntısı ile bulunur.

3. Problemin Çözümü

Problemin çözümünde, 2.Bölüm de verilen bağıntılar kullanılarak Şekil-2 de gösterilen akış çizeneğine göre hazırlanan bilgisayar programından yararlanılmıştır.

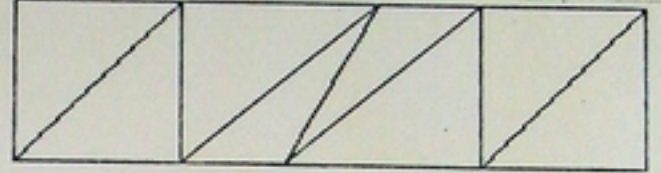


Şekil-2. Akış çizeneği

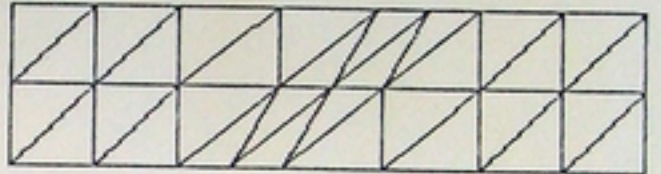
Sistemin geometrisi, eleman, düğüm, kenar sayıları, düğüm koordinatları, ortamın dielektrik katsayıları ve sınır koşulları gibi bilgileri içeren ana programa giriş dosyası, DATA adı verilen bir altprogramla hazırlanmıştır. Hazırlanan bu dosya ile ana program SEY koşturularak, bu başlangıç durumuna ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı elde edilmiştir. Giriş dosyası ve SEY den elde edilen

potansiyel dosyası, ALAN alt programına girilerek, her bir elemandaki alan şiddeti birim değer (p.u.) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bölmelemelerin ve eşpotansiyel çizgilerin çizimi, ÇİZİM altprogramı ile yapılmıştır.

Çözümün doğruluğunu arttırmak üzere, BÖLME altprogramı kullanılarak, her bir eleman dört alt elemana bölünerek bölgedeki eleman sayısı arttırılmıştır. Her aşamada elde edilen dosyalar, altprogramlarda yukarıda verilen sıra ile koşturularak bulunan bölmelemeler, sırasıyla Şekil-3 de verilmiştir.



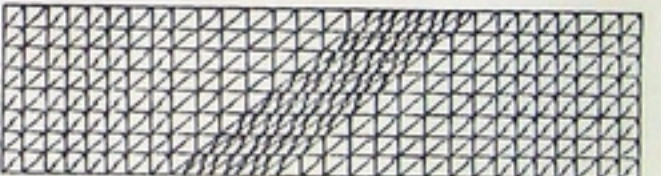
(a)



(b)



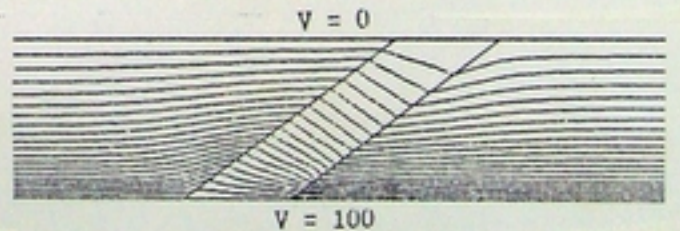
(c)



(d)

Şekil-3. Bölmeleme aşamaları

Şekil-4 de, Şekil-3d de verilen bölmeleme ile elde edilen potansiyel dağılımı gösterilmiştir.

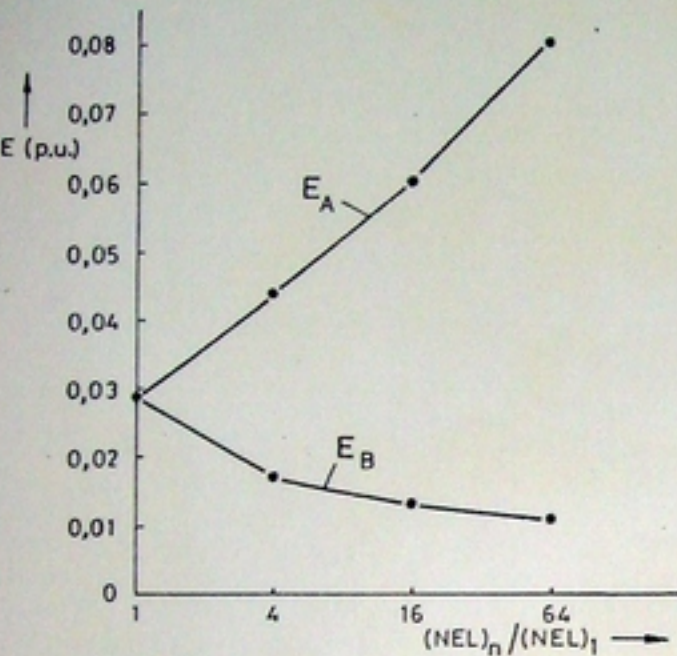


Şekil-4. Potansiyel dağılımı

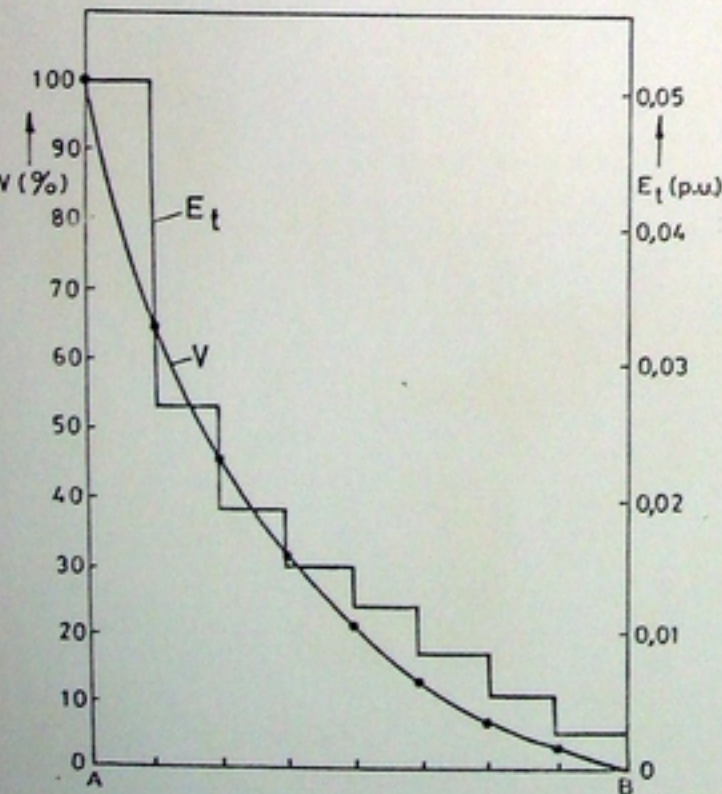
Şekil-1 deki A ve B noktalarındaki alan şiddetlerinin değerleri, her adımda ALAN altprogramından yararlanılarak hesaplanmış ve bölmelemedeki eleman sayıları (NEL) deki değişime göre Şekil-5 te çizilmiştir. Bu şekilden A noktasındaki alan şiddetinin belirli bir değere yakınsamadığı görülmektedir. Bu durum, A noktasındaki potansiyel çizgi-

lerinin sıkışmasından kaynaklanmakta olup, kaynak /6/ ve /9/ da bu değerin sonsuz olacağı belirtilmektedir.

Şekil-6 da ise A ve B noktaları arasındaki teğetsel alan şiddeti ve potansiyelin değişimi gösterilmiştir.



Şekil-5. Alan şiddetinin eleman sayısı ile değişimi



Şekil-6. Teğetsel alan şiddeti ve potansiyel değişimi

5. Sonuçlar

Basit şekli ile basınçlı gaz yalıtımlı bir sistem örneği üzerinde, bir ara tutucunun sistemin alan dağılımına etkisi sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmeye çalışılmıştır. İncelemeler, kullanılan sayısal yöntemin doğruluğunu etkileyen etkenlerin ve kullanımındaki zorlukların görülmesini sağlamıştır. Problemin çözümünden, ara tutucunun potansiyel dağılımına dolayısıyla alan dağılımına etkisinin, özellikle de alan şiddetinin teğetsel bileşeninin ortaya çıkması nedeniyle, sistemin yalıtım düzeyini sınırlandırabileceği görülmüştür.

6. Kaynaklar

- /1/ KIND, D., KARNER, H., High-Voltage Insulation Technology, Friedr. Vieweg and Sohn, Braunschweig, 1985.
- /2/ ITAKA, K., IKEDA, G., Dielectric Characteristics of Compressed Gas Insulated Cables, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-89, No.8, Nov./Dec.1970 pp.1986-1994.
- /3/ BEKTAŞ, S.I., FARISH, O., HIZAL, M., Computation of The Electric Field At A Solid/Gas Interface In The Presence of Surface And Volume Charge, IEE Proc., Vol.133, Pt.A, No.9, Dec 1986, pp.577-586.
- /4/ SILVESTER, P.P., FERRARI, R.L., Finite Elements For Electrical Engineers, Cambridge Univ. Press, 1983.
- /5/ SADIKU, M.N.O., A Simple Introduction To Finite Element Analysis of Electromagnetic Problems, IEEE Trans. on Education, Vol.32, No.2, May 1989, pp.85-93.
- /6/ KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- /7/ RYAN, H.U., MATTINGLEY, J.M., SCOTT, M.F., Computation of Electric Field Distributions in High Voltage Equipment, IEEE Trans. on Elec. Insul., Vol.EI-6, 1971, pp.148-154.
- /8/ OVACIK, L., KALENDERLİ, Ö., Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Sisteminde Elektrostatik Alan Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Bulunması, ODTU EEMB 30. Yıl Sempozyumu, Ankara, 1989, s.166-169.
- /9/ OKUBO, H., HONDA, M., MENJU, S., Calculation Error And The Field Discretisation of Finite Element Method, 3rd ISH, Paper 11.05, Milan, 1979.