

KABLOLARDA ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ YÜK BENZETİM YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Hayri YILDIRIM Özcan KALENDERLİ

İ.T.Ü. Elektrik - Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
80191 Gümüşsuyu / İSTANBUL

ÖZET

Bu çalışmada, üç damarlı ortak siperli bir kabloda, elektrik alan incelemelerinde etkin bir sayısal yöntem olarak bilinen yük benzetim yöntemi ile yapılan elektrostatik alan hesapları açıklanmıştır. Yapılan çözümlemede damar iletkenlerinin benzetimi herbir damar iletkeni içine n_d adet, siperin benzetimi ise siper dışına n_s adet sonsuz çizgisel yük yerleştirilerek yapılmıştır. Toplam yük sayısı 60-80 arası olduğunda en doğru sonuçlara ulaşılmıştır. n_s/n_d oranı 1,5 ila 2,1 arasında iken en yüksek doğruluk elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu kabloda elektrostatik alanın, yer, zaman ve kablo parametreleri ile değişimi incelenmiştir.

1. GİRİŞ /1/-/6/

Elektrik enerji tüketiminin hızla artmasıyla birlikte enerji iletim ve dağıtımında yükselen gerilim ve akım seviyeleri, özellikle büyük şehirlerde hava hatları yerine yüksek gerilim yeraltı kablolarının kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Yüksek gerilim enerji kablolarında iletilen gücün büyüklüğü nedeniyle kullanıldıkları gerilimler ve akımlar yüksektir. Bu durum, kablo tasarımında kullanılacak yalıtkanın kalınlığını, türünü ve damar iletkeninin kesitini yani kablonun yapısını; kablonun elektriksel, ısı ve mekanik özelliklerini; kablonun güvenilirliğini ve maliyetini belirleyici rol oynamaktadır.

Elektrik alanının değerinin ve kablo içinde dağılımının doğru olarak belirlenmesi sayesinde belirli bir yalıtkan kalınlığı için kablonun anma gerilimine bir sınır konulabilir veya tersine belirli bir anma gerilim için üretilecek kablonun optimum yalıtkan kalınlığı belirlenebilir. Bu yüzden yüksek gerilim

kablolarında elektrik alan hesabı, kabloların uygun tasarımı ve güvenli çalışması bakımından tasarımcılar ve üreticiler için çok önemlidir.

Elektrik alan hesabı, kablonun sınır koşullarını sağlayan Laplace denkleminin çözümünü gerektirir. Alan çözümü analitik, deneysel veya sayısal yöntemlerle yapılabilir. Özellikle bir fazlı ve tek yalıtkanlı kablolarda analitik çözümler yeterli olmaktadır. Ancak kablo yapısı karmaşıktıkça sayısal ve deneysel yöntemlerin kullanımı kaçınılmazdır.

Bu çalışmada, yüksek gerilim tekniğinde elektrik alan hesabında geniş bir uygulama alanı bulan yük benzetim yöntemi kullanılarak üç-fazlı yüksek gerilim yeraltı kablolarında elektrik alan hesabı yapılmıştır. Herbir damarı ayrı ayrı ekranlanmış üç-fazlı kabloların alan hesabı bir fazlı kablolarınki ile aynı olduğundan ve bir ve iki fazlı kablolarda alan hesabı analitik olarak da yapılabildiğinden, burada üç-damarlı ortak siperli kablolarda alan hesabı üzerinde durulmuştur.

Kabloların silindrsel yapısı ve kablolarda elektriksel alan ve potansiyelin z-ekseni doğrultusunda değişmediği göz önüne alınarak benzetimde sonsuz çizgisel yükler kullanılmıştır. Bu uygulamanın kablonun uçlarından ve eklerden uzak bölümleri için doğru bir yaklaşım olduğu düşünülmüştür.

Çalışmada ayrıca üç fazlı kablolarda faz gerilimleri arasındaki faz farkları da dikkate alınmıştır. Böylece zamana bağlı olarak değişen alanlar göz önüne alınmıştır. Kablo içerisinde elektriksel olarak önemli bazı noktalarda elektriksel alan ve potansiyel hesabı kablo parametrelerine bağlı olarak yapılmıştır.

2. YÜK BENZETİM YÖNTEMİ

Yük benzetim yönteminde, iletken yüzeyindeki gerçek yüklerin yarattığı alan yerine, iletken içine yerleştirilen ve benzetim yükü denilen noktasal, çizgisel veya başka tip yüklerin oluşturduğu alan hesaplanır. Doğruluk yeterli ise bu iki alan benzerdir. Benzetim yüklerinin tipi, sayısı ve yeri yük benzetim yönteminin doğruluğunu ve uygulamasını etkilemektedir. Genelde problemin geometrisine uygun yüklerle çalışmak uygundur. Yüklerin değerleri, iletken yüzeyinde alınan belirli sayıda sınır noktasındaki potansiyelin iletkenin bilinen potansiyeline eşit olması koşulundan gidilerek bulunur. Buna göre yükler

$$[p]_{n \times n} [q]_{n \times 1} = [V]_{n \times 1} \quad (1)$$

lineer denklem sisteminden hesaplanır. Burada $[p]$ = potansiyel katsayıları matrisi, $[q]$ = bilinmeyen yükler, $[V]$ = sınır potansiyelleri, n = yük sayısıdır. Yüklerin değeri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel ve elektriksel alan kolayca hesaplanabilir. Sonsuz çizgisel yükün, herhangi bir $A(x_A, y_A)$ noktasındaki potansiyeli,

$$V_A = \frac{q}{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r} \ln \frac{r_0}{r_A} \quad (2)$$

dir. Burada r_0 yükün, potansiyeli sıfır olan en yakın noktaya (sipere) uzaklığı; r_A yükün, potansiyeli hesaplanacak noktaya uzaklığıdır.

Potansiyel (1) denklemini ile hesaplanır. A noktasındaki elektrik alanının x ve y bileşenleri

$$E_x = \sum_{i=1}^{n_t} q_i (x_A - x_i) / r_A^2 \quad (3a)$$

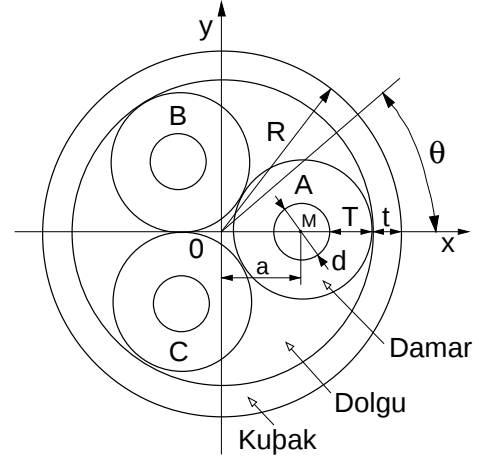
$$E_y = \sum_{i=1}^{n_t} q_i (y_A - y_i) / r_A^2 \quad (3b)$$

denklemleriyle bulunur.

3. ÜÇ DAMARLI ORTAK SİPERLİ KABLODA ELEKTRİK ALAN HESABI

Şekil 1'de üç-damarlı ortak siperli kablo kesiti ve parametreler gösterilmiştir. Burada damar

iletkenlerinin çapı d , damar yalıtkanı kalınlığı T , üç damarı çevreleyen ortak yalıtkanın kalınlığı t , damar eksenini ile kablo eksenindeki uzaklık $a = (2T + d)/\sqrt{3}$ ve siperin iç yarıçapı $R = a + (d/2) + T + t$ ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Ortak siperli üç damarlı kablo

Her bir damarın benzetimi, iletken içinde eksenini iletken eksenine ile çakışan $r_d < d/2$ yarıçaplı bir daire çevresine simetrik olarak yerleştirilmiş n_d adet sonsuz çizgisel yüklerle yapılmıştır. Siperin benzetimi ise, siperin dışında eksenini kablo eksenine ile aynı olan $r_s > R$ yarıçaplı bir daire çevresine simetrik olarak yerleştirilmiş n_s adet sonsuz çizgisel yüklerle yapılmıştır. Böylece elde edilen $n_t = 3n_d + n_s$ adet yük için aynı sayıda sınır noktası damar iletkenleri ve siper üzerinde belirlenmiştir. Yüklerin sayısı, potansiyel hatasının %1'den küçük olması koşulu ile belirlenmiştir.

r_d ve r_s 'nin değeri iki yük arasındaki uzaklık, bir yük ve onunla ilgili sınır noktası arasındaki uzaklığa eşit olacak şekilde seçilmiştir. Buna göre r_d ve r_s , kablo parametreleri ve yük sayısına bağlı olarak

$$r_d = \frac{n_d \cdot d}{2n_d + 4\pi} \quad (4)$$

$$r_s = \frac{n_s \cdot R}{n_s - 2\pi} \quad (5)$$

şeklinde elde edilir. Burada R siperin iç yarıçapıdır. Böylece damar iletkenleri içindeki yüklerin koordinatları $i = 1, \dots, n_d$ olmak üzere

$$x_i = a \cos(0) + r_d \cos(2\pi i / n_d) \quad (6)$$

$$y_i = a \sin(0) + r_d \sin(2\pi i / n_d) \quad (7)$$

$$x_{n_d+i} = a \cos(2\pi / 3) + r_d \cos(2\pi i / n_d) \quad (8)$$

$$y_{n_d+i} = a \sin(2\pi / 3) + r_d \sin(2\pi i / n_d) \quad (9)$$

$$x_{2n_d+i} = a \cos(4\pi / 3) + r_d \cos(2\pi i / n_d) \quad (10)$$

$$y_{2n_d+i} = a \sin(4\pi / 3) + r_d \sin(2\pi i / n_d) \quad (11)$$

denklemlerinden elde edilmiştir. Siperin dışındaki n_s adet yükün koordinatları ise $i = 1, \dots, n_s$ olmak üzere

$$x_{3n_d+i} = r_s \cos(2\pi i / n_s) \quad (12)$$

$$y_{3n_d+i} = r_s \sin(2\pi i / n_s) \quad (13)$$

denklemleri ile bulunmuştur. Toplam n_t adet yük için belirlenen n_t adet sınır noktasının koordinatları da benzer şekilde hesaplanmıştır. Sınır noktalarının bilinen potansiyelleri damar iletkenleri için $i = 1, \dots, n_d$ olmak üzere

$$\phi_j = U_m \sin \omega t \quad (14)$$

$$\phi_{n_d+j} = U_m \sin(\omega t + 2\pi / 3) \quad (15)$$

$$\phi_{2n_d+j} = U_m \sin(\omega t + 4\pi / 3) \quad (16)$$

şeklinde ve siper için $i = 1, \dots, n_s$ olmak üzere

$$\phi_{3n_d+j} = 0 \quad (17)$$

şeklinde verilmiştir. Hesaplarda $U_m = \sqrt{2}$ olarak alınmıştır.

4. UYGULAMA

Hesaplar $d = 1$ (m), $n_s = 3n_d$ için ve $n_s, \omega t$ ve T/d 'nin değişik değerleri için yapılmıştır. Yeterli doğruluk elde etmek için çok sayıda yük kullanmak gerektiği görülmüştür. Çizelge 1'de potansiyel hatasının yük sayısı ile değişimi verilmiştir. Bu hesaplar $T/d=1,0$ ve $\omega t = \pi/2$ için yapılmıştır. Çizelge 1'den görüldüğü gibi iyi bir doğruluk için toplam yük sayısı 70'in üzerinde olmalıdır. Damar iletkenleri üzerindeki ile siper üzerindeki potansiyel hatası karşılaştırıldığında siper üzerindeki hatanın iletkenkinden en az iki kat küçük olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 1. Potansiyel hatasının yük sayısı ile değişimi ($n_s/n_d=3$).

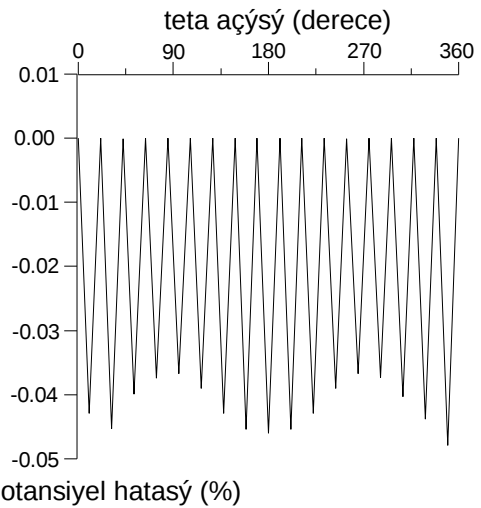
n_d	n_s	n_t	Potansiyel hatası (%)	
			Maksimum	Ortalama
3	9	18	3,1661	1,2516
6	18	36	1,3478	0,3865
12	36	72	0,3694	0,2109

Çizelge 2. Damar iletkeni ve siperdeki maksimum potansiyel hatasının farklı siper yük sayısı için karşılaştırılması ($\omega t = \pi/2, T/d = 1,0$).

n_d	n_s	n_t	Max. pot. hatası (%)	
			Damar	Siper
11	45	78	0,1882	0,3764
13	39	78	0,1207	0,3713
15	33	78	0,0887	0,3688
17	27	78	0,0688	0,3728
19	21	78	0,0554	0,3971
21	15	78	0,0458	0,4183

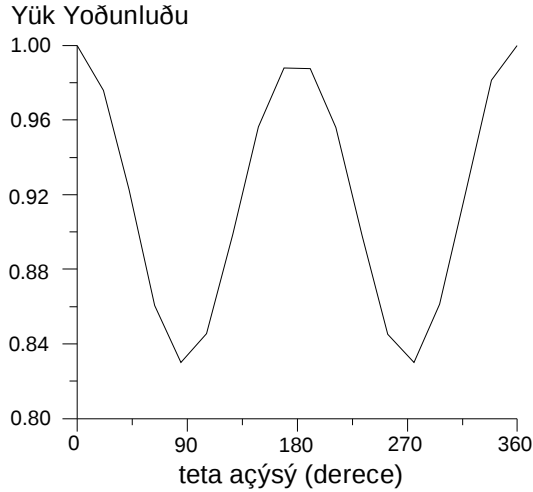
Bu da bizi $n_s = 3n_d$ 'nin uygun bir oran olmadığı sonucuna götürür. Toplam yük sayısı 78 iken n_d artırılıp n_s azaltılarak doğruluk artırılmaya çalışılmıştır. Çizelge 2'de bu hesap sonuçları verilmiştir. Bu çizelgeden, iyi bir doğruluk için n_s/n_d oranının 1,5 ila 2,1 arasında alınması gerektiği görülebilir. Buna göre en uygun yük sayısı damar için 17 ve siper için 27'dir. Bu durumda doğruluk oldukça yüksektir.

Potansiyel hatasının damar iletkeni üzerinde değişimi Şekil 2'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi potansiyel hatasındaki sıçrama



Şekil 2. Bir damar iletkeni üzerinde potansiyel hatasının değişimi.

sayısı damar iletkeni içindeki yük sayısına eşittir. Yük sayısı artırıldığında sıçrama sayısı artarken genlikleri düşmektedir. Ayrıca damar iletkeni üzerinde yük yoğunluğunun normale indirgenmiş (herbiri en büyük değere bölünmüş) değişimi Şekil 3'te gösterilmiştir. Şekil-den görüldüğü gibi iletken yüzeyinde yük yoğunluğu düzgün dağılımlı değildir. Ayrıca bu dağılım ω 'ye bağlıdır.



Şekil 3. A damarı iletkeni üzerinde yük yoğunluğunun değişimi ($\omega = \pi/2$, $T/d = 1,0$).

İletkenlerin potansiyelleri sinüsoidal olarak değiştiğinden doğruluk ω 'ye de bağlıdır. Hesaplar ayrıca farklı ω ve T/d 'nin 0,3 ile 1,5 arasındaki değerleri için yapılmıştır. T/d 'nin değeri arttıkça genellikle doğruluğun arttığı gözlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda maksimum potansiyel hatası $T/d=0,3$ için en büyük (%3,770) değerine ulaşmışken $T/d=1$ durumunda %0,372 değerine düşmüştür.

5. KAYNAKLAR

- /1/ NOSSEIR, A., ZAKY, A.A., Application of The Method of Charge Simulation of the Study of Electrical Stresses in Three-Core Cables, IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol. 12, No. 4, Aug. 1977, pp. 262-266.
- /2/ NOSSEIR, A., ZAKY, A.A., Representation of Three-Core Cables Using Line-Charge Simulation, IEEE Trans. on EI, Vol. 14, No. 4, Aug. 1979, pp. 207-210.

- /3/ SALAMA, M.M.A., NOSSEIR, A., et al., Methods of Calculations of Field Stresses in a Three-Core Power Cable, IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. 103, No. 12, Dec. 1984, pp. 3434-3441.
- /4/ MALIK, N.H., AL-ARAINY, A.A., Charge Simulation Modeling of Three-Core Belted Cables, IEEE Trans. on Electr. Insulation, Vol. 20, No. 20, 1985, pp. 499-503.
- /5/ MALIK, N.H., AL-ARAINY, A.A., Electrical Stress Distribution in Three-Core Belted Power Cables, IEEE Trans. on PWRD, Vol. 2, 1987, pp. 589-595.
- /6/ CHAKRAVORTI, S., MUKHERJEE, P.K., Efficient Field Calculation in Three-Core Belted Cable by Charge Simulation Using Complex Charges, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol.27, No. 6, Dec.1992, pp.1208-1212.



Hayri YILDIRIM, 1965 yılında İskenderun'da doğdu. 1988'de İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi (EEF) Elektrik Mühendisliği Bölümü (EMB)'den mühendis, 1992'de İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (FBE)'den Yük. Müh. olarak mezun oldu. YILDIRIM, 1992 den beri İTÜ FBE Elektrik Mühendisliği programında doktora çalışmalarını sürdürmekte ve 1989'dan beri İTÜ EEF EMB Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



Özcan KALENDERLİ, 1956 yılında İstanbul'da doğdu. İTÜ EEF'den 1978 de Müh., 1980'de Yük. Müh. olarak mezun oldu. 1990 da İTÜ FBE'de doktora çalışmalarını tamamladı. İTÜ EEF EMB'de 1979-1991 yılları arasında mühendis olarak çalışan KALENDERLİ, 1991'den beri de yardımcı doçent olarak görev yapmaktadır.