

YÜRÜYEN DALGALARIN KORONA ETKİSİ İLE ZAYIFLAMA VE BOZULMASININ İNCELENMESİ

A.Özdemir, Ö.Kalenderli

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

ÖZET

Yüksek gerilim hatlarında oluşan korona; enerji kaybına, aşırı gerilim darbelerinin zayıflama ve şekil bozulmasına, radyo girişimlerine vb. yol açar. Yalıtım ve koruma tekniği açısından önemli olan aşırı gerilim darbelerine karşı koronanın davranışı, yürüyen dalga denklemlerinin korona etkisini de içerecek şekilde düzenlenmesi ve çözülmesi ile belirlenir. Bu çalışmada korona parametreleri belirli bir enerji iletim hattında, yeni bir yöntemle yürüyen dalga denklemleri çözülerek korona etkisi incelenmiştir.

1. GİRİŞ

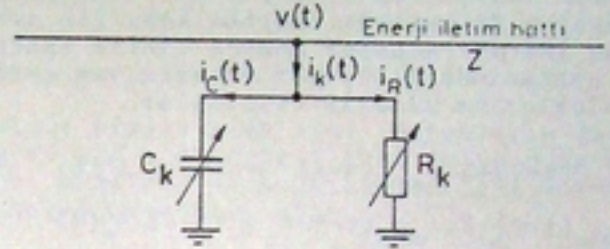
Enerji iletim hatlarında çeşitli nedenlerle oluşan aşırı gerilim dalgaları hat boyunca ilerlerken birtakım etkenler sonucu zayıflar ve şekil bozulmasına uğrarlar. Yüksek gerilimlerde bu etkenlerin en önemlilerinden biri hiç şüphesiz korona etkisidir. Aşırı gerilimlere karşı koruma ve yalıtım koordinasyonu açısından koronanın ve etkilerinin iyi bilinmesinde yarar vardır.

Bu konuda yapılan çalışmalar iki ana grupta toplanabilir. Bunlardan birincisini koronanın fiziksel mekanizmasına ve deneylere dayanan gerilim-yük eğrilerinin belirlenmesi ve bu eğrilerden hareketle korona etkilerinin incelenmesi oluşturur /1/-/5/. İkinci grup çalışmalarda ise koronanın gerilim darbelerine karşı bozucu davranışı lineer olmayan devre elemanlarından yararlanılarak incelenir /6/-/8/.

Bu çalışmada lineer olmayan devre elemanları ile modellenen koronanın, gerilim darbelerine karşı davranışı farklı bir yöntemle incelenmiştir.

2. KORONA MODELİ

Gerilim darbelerinin genliklerinde zayıflamaya (korona güç kaybına) ve cephelerinde bozulmaya (sistem kapasitesindeki artmaya) yol açan bir korona kolunun elektriksel eşdeğeri lineer olmayan bir direnc ve paralel bir kondansatörle temsil edilebilir (Şekil-1).



Şekil-1. Korona kolunun elektriksel eşdeğeri

Yapılan araştırmalar lineer olmayan devre elemanlarına ilişkin büyüklüklerin,

$$G_k = \frac{1}{R_k} = k_R \left[\frac{v(t) - V_0}{v(t)} \right]^2 \quad [\text{mho/m}] \quad (1)$$

$$C_k = 2 \cdot k_C [1 - V_0/v(t)] \quad [\text{F/m}] \quad (2)$$

esitlikleri ile verilebileceğini göstermiştir. Burada; k_R ve k_C , hat yarıçapı (r), hattın yerden yüksekliği (h) ve korona parametreleri (σ_a, σ_c) ye bağlı sabitleri, V_0 ise korona başlangıç gerilimini göstermektedir /6/.

3. YÜRÜYEN DALGA DENKLEMLERİ

Hat direncinin ve kaçak iletkenliğin ihmal edilmesi durumunda, korona kolunu da içeren hat denklemleri,

$$\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = -L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = (C + C_k) \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + G_k v(x,t) \quad (3b)$$

şeklinde olur. Burada L ve C birim uzunluk başına hat parametrelerini göstermektedir.

(3a) ve (3b) denklemlerinin çözümü için Sonlu Farklar ve Ayrıştırma-Birleştirme (Compensation) Yöntemleri kullanılmaktadır. Sonlu Farklar Yöntemi, hattın çok küçük parçalara (Δx) ayrılmasını gerektirdiği için pek tercih edilmemektedir.

Ayrıştırma-Birleştirme Yöntemi, Bergeron yürüyen dalga denklemleri çözüm yöntemi ile lineerleştirilen korona koluna ilişkin eşitliklerin birlikte çözümüne dayanır /9/.

4. YURUYEN DALGA DENKLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Sekil-2'de verilen, korona kolu ile ayrılmış iki parçalı bir enerji iletim hattının m noktasında ilerleyen ve yansıyan gerilim dalgalarına ilişkin eşitlikler,

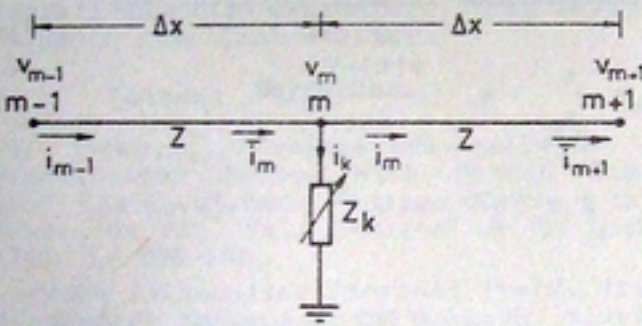
$$v_{m-1}(t-\tau) + Z \cdot i_{m-1}(t-\tau) = v_m(t) + Z \cdot i_m(t) \quad (4)$$

$$v_{m+1}(t-\tau) - Z \cdot i_{m+1}(t-\tau) = v_m(t) - Z \cdot i_m(t) \quad (5)$$

$$Z = \sqrt{L/C} \quad [\text{ohm}]$$

$$\tau = \Delta x/c = \Delta x \cdot \sqrt{LC} \quad [s]$$

şeklindedir.



Şekil-2. Δx uzunluklu iki hat parçası ve korona kolu

Bu eşitliklerde konumu belirten değişken alt indislerle verilmiştir. m noktasındaki,

$$i_k(t) = \bar{i}_m(t) - i_m(t) \quad (6)$$

Kirchoff akım denklemi de gözönüne alınarak (4) ve (5) eşitliklerinden,

$$v_m(t) + \frac{Z}{2} i_k(t) = \frac{1}{2} A(t-\tau) \quad (7)$$

$$A(t-\tau) = v_{m-1}(t-\tau) + v_{m+1}(t-\tau) + Z \cdot [i_{m-1}(t-\tau) - \bar{i}_{m+1}(t-\tau)] \quad (8)$$

elde edilir.

Bu şekilde m noktasındaki akım ve gerilim arasındaki bağıntı çıkarıldıktan sonra, korona kolu eşitlikleri çalışma noktası civarında lineerleştirilir.

Direnc kolu için, (1) eşitliğinden yararlanılarak,

$$i_R(t) = \Delta x \cdot k_R \cdot \left[1 - \frac{V_0}{v(t)}\right]^2 \cdot v(t) \quad (9)$$

akım ifadesi ve bu ifadeyi $v = v(t-\Delta t)$ civarında Taylor serisine açıp,

$$v_R(t) = v(t) = R_R \cdot i_R(t) + V_{R0} \quad (10)$$

$$R_R = \frac{1}{\Delta x \cdot k_R} \cdot \frac{v^2(t-\Delta t)}{v^2(t-\Delta t) - V_0^2} \quad (11)$$

$$V_{R0} = \frac{2 \cdot V_0 \cdot v(t-\Delta t)}{V_0 + v(t-\Delta t)} \quad (12)$$

elde edilir.

Kapasite kolu için; korona kapasitesinde biriken yükü (2) eşitliğinden de yararlanarak gerilim ve kapasite cinsinden ifade ederek,

$$q(t) = q[v(t-\Delta t)] + \frac{\partial q}{\partial v} \Big|_{v(t-\Delta t)} [v(t) - v(t-\Delta t)] \quad (13)$$

$$q(t) = q(t-\Delta t) + 2 \cdot \Delta x \cdot k_C \left[1 - \frac{V_0}{v(t-\Delta t)}\right] \cdot [v(t) - v(t-\Delta t)] \quad (14)$$

bulunur. Diğer taraftan akımdan giderek aynı yük,

$$q(t) = q(t-\Delta t) + \frac{i_C(t) + i_C(t-\Delta t)}{2} \cdot \Delta t \quad (15)$$

şeklinde çıkarılabilir. (14) ve (15) eşitliklerinden,

$$v_C(t) = v(t) = R_C \cdot i_C(t) + V_{C0} \quad (16)$$

$$R_C = \frac{\Delta t \cdot v(t-\Delta t)/2}{2 \cdot \Delta x \cdot k_C \cdot [v(t-\Delta t) - V_0]} \quad (17)$$

$$V_{C0} = v(t-\Delta t) + R_C \cdot i_C(t-\Delta t) \quad (18)$$

elde edilir.

$$i_k(t) = i_R(t) + i_C(t) \quad (19)$$

esitliği de dikkate alınarak (10) ve (16) esitliklerinden, korona kolunun akım ve gerilimi arasında

$$v(t) = v_m(t) = R_m \cdot i_k(t) + V_{ko} \quad (20)$$

lineer bağıntısı çıkarılır. Burada

$$R_m = (R_R R_C) / (R_R + R_C) \quad (21)$$

$$V_{ko} = (R_C V_{Ro} + R_R V_{Co}) / (R_R + R_C) \quad (22)$$

dir.

Bergeron çözümüne ilişkin (7) esitliği ile korona koluna ilişkin (20) esitliği birleştirilerek, m noktasındaki gerilim ve akımlar

$$v_m(t) = R_m \frac{A(t-\tau) - 2 \cdot V_{ko}}{Z + 2 \cdot R_m} + V_{ko} \quad (23)$$

$$i_k(t) = \frac{A(t-\tau) - 2 \cdot V_{ko}}{Z + 2 \cdot R_m} \quad (24)$$

ve (4), (6), (9) ve (19) esitliklerinden hesaplanır.

5. SAYISAL ÖRNEKLER

4. Bölümde matematiksel bağıntıları verilen yöntem programlanarak, yarıçapı $r=1,265$ cm, yerden yüksekliği $h=22.2$ m olan 2400 m uzunluklu hat örneği için bazı deneyler yapılmıştır. Hattın dalga empedansı $Z=375$ ohm, hat üzerindeki yürüyen dalga hızı $c=300$ m/ μ s, korona başlangıç gerilimi $V_o=303$ kV ve korona parametreleri olarak $\sigma_c=30$ F/m, $\sigma_R=2 \cdot 10^7$ mho/m alınmıştır.

Simülasyonda hattın sonu kısadevre edilmiş ve hat başına

$$U(t) = 1600 \cdot (e^{-t/0.5} - e^{-t/0.4}), \quad t[\mu s] \quad (25)$$

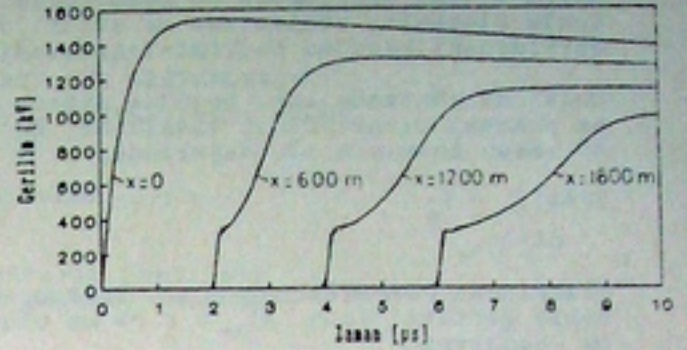
şeklinde 1,2/50 μ s'lik Standart Darbe Gerilimi uygulanmıştır. Tüm simülasyonlarda ve hat başından $x=600-1200-1800$ m uzaklıklardaki gerilimler Şekil-3'de verilmiştir. Görüldüğü gibi sonuçlar arasında belirgin bir farklılık yoktur.

Zaman adımı,

$$\Delta t = \tau/2 = \Delta x/2 \cdot c \quad (26)$$

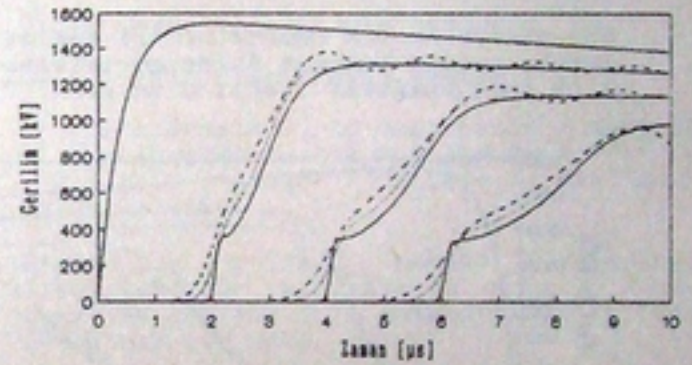
olarak seçilmiştir.

İlk olarak $\Delta x=6$ m seçilerek, yürüyen dalga denklemleri Sonlu Farklar Yöntemiyle ve önerilen yöntemle çözülmüştür. Hat başında

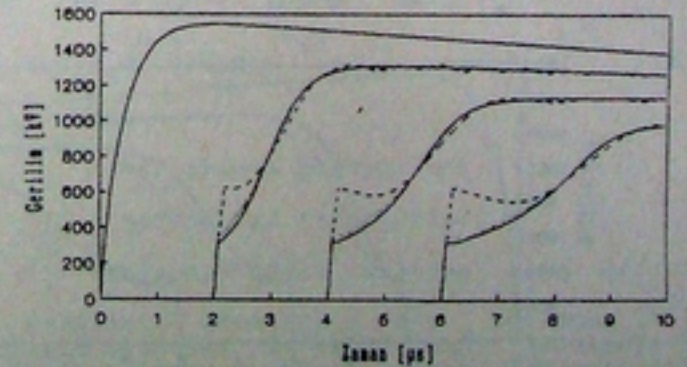


Şekil 3- $\Delta x=6$ m değeri için örnek hattın çeşitli noktalarındaki gerilimler
— Sonlu Farklar Yöntemi
— Önerilen Yöntem

ikinci olarak yine aynı yöntemlerle $\Delta x=12-30-60-120$ m değerleri için dalga denklemleri çözülmüş ve sonuçlar Şekil-4 ve Şekil-5'de verilmiştir.



Şekil-4. Farklı Δx değerleri için örnek hattın çeşitli noktalarındaki gerilimler (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
— $\Delta x=6$ m
--- $\Delta x=60$ m
... $\Delta x=120$ m



Şekil-5. Farklı Δx değerleri için örnek hattın çeşitli noktalarındaki gerilimler (Önerilen Yöntem)
— $\Delta x=6$ m
--- $\Delta x=60$ m
... $\Delta x=120$ m

Şekil-4'deki eğrilerden de görüleceği gibi sonlu elemanlar yönteminde Δx artırıldıkça eğrilerdeki bozulma belirginleşmektedir.

Önerilen yöntemde ise, bozulma sadece kopma noktası civarındadır (Şekil-5). Bu da Δt zaman adımının ilk değerinde,

$$U(\Delta t) \Big|_{\Delta t > \Delta t_{kr}} > V_0 \quad (27)$$

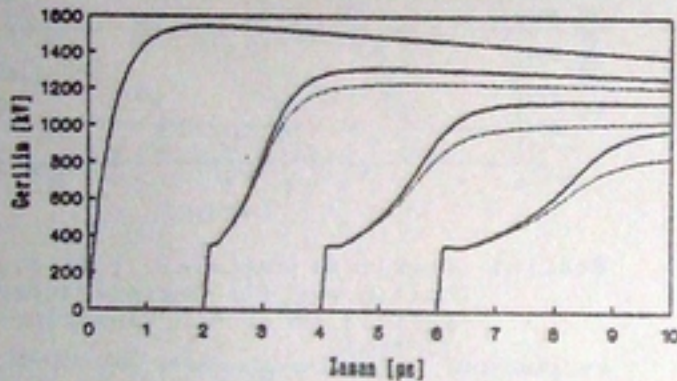
olmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu darbe gerilimi için $\Delta t_{kr} = 0.09 \mu s$ olup, Δx değerini,

$$\Delta x_{kr} = \tau_{kr} \cdot c = 2 \cdot \Delta t_{kr} \cdot c = 54 \text{ m} \quad (28)$$

değerinden küçük seçerek bu bozulmanın önlenmesi olasıdır.

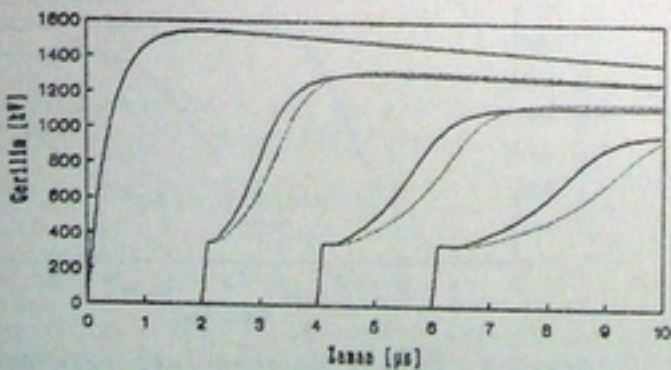
Üçüncü olarak Lee'nin önerdiği lineerleştirme /6/ ve burada önerilen lineerleştirme çeşitli Δx değerleri durumunda karşılaştırılmış ve sonuçlarda belirgin bir farklılık görülmemiştir.

Son olarak korona parametreleri değiştirilerek, korona kolunun darbe gerilimine etkisi incelenmiştir (Şekil 6 ve Şekil 7)



Şekil-6. Farklı σ_k değerleri için gerilim darbesinin zayıflaması.

— $\sigma_k = 2 \cdot 10^7$ mho/m $\sigma_k = 3 \cdot 10^7$ mho/m



Şekil-7. Farklı σ_c değerleri için gerilim darbesinin şekil değiştirmesi.

— $\sigma_c = 30$ F/m $\sigma_c = 45$ F/m

Sonlu elemanlar yönteminde, Δx ve Δt sınırlı olduğu için bu yöntem ancak kısa hat örnekleri için kullanılabilir. Ayırıştırma-Birleştirme yönteminde Δx çok daha uzun seçilebilir. Δt süresi ise gerilim şekline bağlıdır. Ayrıca belirli bir t anındaki gerilim ve akım değerleri $(t-\tau)$ ve $(t-\Delta t)$ anlarındaki değerlere bağlı olduğu için, $\tau/\Delta t$ oranının da büyük önemi vardır. Örneğin bu oranın 5 seçilmesi durumunda her nokta için $(t-\Delta t) \dots (t-5\Delta t)$ anlarındaki 5 ayrı değer bellekte saklanması gerekir.

Korona parametrelerinden σ_k darbe gerilimi genliğindeki zayıflamayı ve σ_c darbe cep-sindeki bozulmayı belirler. Çıkan sonuçların güvenilirliği herseyden önce bu değerlerin sıhhatli bir şekilde deneysel olarak belirlenebilmesine bağlıdır.

7. KAYNAKLAR

- /1/ Gary, C., et al, Attenuation of Travelling Waves Caused by Corona, CIGRE, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, SC No.33, Report 13, Vol. II, 1978, pp. 1-38.
- /2/ Harrington, R.J., Afghani, M., Implementation of a Computer Model to Include the Effects of Corona in Transient Overvoltage Calculations, IEEE Trans.on PAS, Vol.PAS-102, No.4, April 1983, pp.902-910.
- /3/ Inoue, A., Propagation Analysis of Overvoltage Surges With Corona Based Upon Charge Versus Voltage Curve, IEEE Trans.on PAS, Vol.PAS-104, No.3, March 1985, pp.655-660.
- /4/ Semlyen, A., Gang, H.W., Corona Modelling for the Calculation of Transients on Transmission Lines, IEEE Trans.on PWRD, Vol.PWRD-1, No.3, July 1986, pp.228-239.
- /5/ Li, X, Malik, O.P., Zhao, Z., A Practical Mathematical Model of Corona for Calculation of Transients on Transmission Lines, IEEE Trans.on PWRD, Vol.-PWRD-4, No.2, April 1989, pp.1145-1152.
- /6/ Lee, K.C., Non-Linear Corona Models in an Electromagnetic Transients Program (EMTP), IEEE Trans.on PAS, Vol.PAS-102 No.9, September 1983, pp.2936-2942.
- /7/ Al-Tai, M.A. et al., The Simulation of Surge Corona on Transmission Lines, IEEE Trans.on PWRD, Vol.PWRD 4, No.2, April 1989, pp.1360-1368.
- /8/ Maruvada, P.S., et al, Studies on Modeling Corona Attenuation of Dynamic Overvoltages, IEEE Trans.on PWRD, Vol. PWRD-4, No.2, April 1989, pp.1441-1449.
- /9/ Dommel, H.W., Computation of Electromagnetic Transients, Proc.of IEEE, Vol.42, No.7, July 1974, pp.983-993.