

## YÜKSEK GERİLİM HATLARINDA YÜRÜYEN DALGALARA KORONANIN ETKİLERİ

M.Özaltınok, O.Kalenderli, M.Özkaya

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

### ÖZET

Bu çalışmada, koronanın yürüyen dalgaların zayıflama ve bozulmasına etkileri, yük-gerilim karakteristiği parça parça lineer olarak gözönüne alınan, bir fazlı ikili demet iletkenli bir hat üzerinde, dalga denklemlerinin çözümü sonlu farklar yöntemi ile yapılarak incelenmiştir. Denklemler bilgisayar yardımıyla çözülüp dalga şekillerinin çizdirilmesiyle darbe gerilimi şeklindeki yürüyen dalganın korona etkisi ile ve uzaklıkla zayıflaması, cephesinin yatıklaşması ve şeklinin bozulması gösterilmiştir.

### 1. Giriş

Yüksek gerilim enerji iletim hatlarında, yıldırım gibi dış aşırı gerilimlerin etkisi sonucu meydana gelen yürüyen dalgalar, hat boyunca yayılmaları sırasında çeşitli noktalardaki yansıma ve kırılmaları yanında korona etkisiyle zayıflama ve bozulmaya da maruz kalırlar. Bir hatta uygulanan gerilim hattın korona başlangıç geriliminden yüksek olması durumunda hat üzerinde korona adı verilen elektriksel kısmi boşalmalar olur. Bu olay hattın esdeğer çapının büyümesine dolayısıyla hat kapasitesinin artmasına sebep olur. Korona aynı zamanda, yürüyen dalganın genliğine ve şekline bağlı olan enerjisinin azalmasına yani enerji kaybına yol açar. Koronanın bu etkilerinin bilinmesi ve hesabı, yüksek gerilim hatlarının ve sistemlerinin yalıtım koordinasyonu ve korunması bakımından önemli olur.

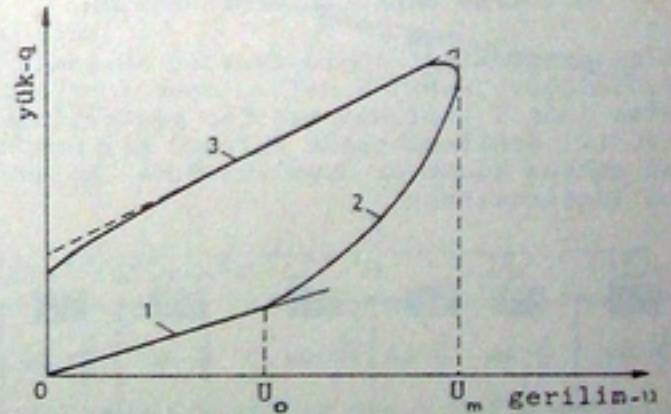
Koronanın yürüyen dalgalara etkileri, hem deneysel hem de kuramsal olarak incelenmektedir /1-8/. Kuramsal incelemelerde, gelişen bilgisayar teknolojisine paralel olarak, probleme ilişkin pek çok değişkenin gözönüne alınması ve değişik çözüm yöntemleri kullanılması olanağı bulunmaktadır. Çözüm yöntemlerinde, dalga denklemleri genelde iki şekilde gözönüne alınmaktadır:

- 1) Hattın yük-gerilim karakteristiklerinde  $\partial q / \partial u$  'ya bağlı olarak,
- 2) Yük-gerilim eğrisinin sınırladığı alanla tanımlanan korona kaybına bağlı olarak.

Bu çalışmada incelemeler (1) yöntemine göre yapılmış ve dalga denklemleri ile bunların çözümleri gösterilmiştir.

### 2. Yük-Gerilim Eğrisi ve Dalga Denklemleri

Şekil-1'de darbe gerilimi için, bir hat parçasının yük-gerilim (q-u) eğrisi gösterilmiştir. Hattaki gerilim, korona başlangıç gerilimi  $U_0$  'a yükselene kadar q ile u arasındaki ilişki doğru orantılıdır. Burada q-u eğrisinin eğimi, hattın geometrik kapasitesi C'ye eşittir.  $U_0$  'ın üstünde hatta korona başlar ve q yükündeki artış, gerilime oranla daha hızlı olur. Bu durum gerilimin tepe değerine kadar devam eder.



Şekil-1. Yük-gerilim (q-u) eğrisi

Şekil-1'de basitleştirilmiş olarak verilen q-u eğrisinde,

- 1 bölgesi:  $0 \leq u < U_0$  ve  $\partial u / \partial t > 0$ , eğrinin eğimi=C
- 2 bölgesi:  $U_0 \leq u \leq U_m$  ve  $\partial u / \partial t > 0$ , eğrinin eğimi=C(u)
- 3 bölgesi:  $0 \leq u \leq U_m$  ve  $\partial u / \partial t \leq 0$ , eğrinin eğimi=C

kabul edilmiştir. Bu bağıntılarda,  $U_0$  hattın korona başlangıç gerilimi,  $U_m$  'de gerilim darbesinin tepe değeridir. q-u eğrisi, gerilimin maksimum değerinde karmaşık bir değişim gösterir. Bu durum, koronanın oluşum mekanizmasına bağlı olarak gerilim darbesinin şeklini etkiler. Gerilimin tepe



değerinden sonra eğrinin eğimi, kabaca, daha önce belirtilen C değerine eşit olur.

Tek fazlı bir hat için dalga denklemleri şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \frac{\partial q}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

Bu bağıntılarda, u ve i hat başından x uzaklığındaki gerilim ve akım; q hattın birim uzunluğuna düşen yük ve L hattın birim uzunluğunun endüktansdır.

(1) denklemlerinde belli bir zamanda ve hattın belli bir yerindeki gerilim ve akım değerini belirlemek için başlangıç koşulları,

$$u(x,0)=0 \quad (2)$$

$$i(x,0)=0$$

ve sınır koşulları,

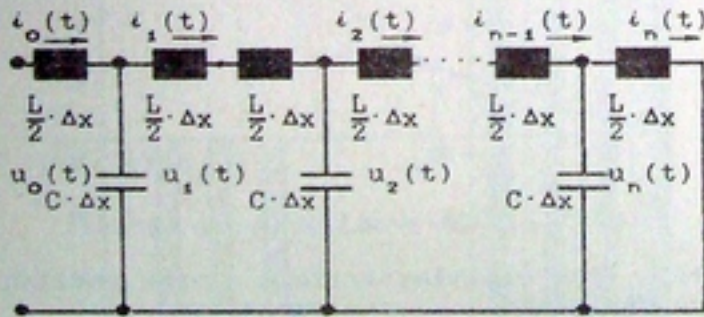
$$u(0,t)=U(t) \quad (3)$$

$$u(l,t)=0 \quad (4)$$

alınmıştır. U(t) hatta hat başından uygulanan gerilim, l de hattın uzunluğudur.

### 3. Dalga Denklemlerinin Çözümü

Dalga denklemleri sonlu farklar yöntemiyle çözülmüştür. Şekil-2 de bir enerji iletim hattı için T tipi bir eşdeğer gösterilmiştir. (1) denklemlerinde  $\partial q / \partial u = C$  alınmış ve hat sonsuz küçük  $\Delta x$  uzunluklarına bölünecek incelenmiştir.



Şekil-2.

Şekil-2'den yararlanarak gerilim cinsinden (1) denklemleri sonlu farklar denklemi olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$u_k(t+\Delta t) = u_k(t) + (\Delta t / \Delta x) \frac{[i_{k-1}(t) - i_k(t-\Delta t)]}{C_k(u_k(t))} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

Burada

$$\begin{aligned} C_k(u_k(t)) &= \frac{[q_k(t) - q_k(t-\Delta t)]}{[u_k(t) - u_k(t-\Delta t)]} \\ C_k(u_k(t)) &= \frac{[q_k(u_k(t)) - q_k(u_k(t-\Delta t))]}{[u_k(t) - u_k(t-\Delta t)]} \quad (k=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (6)$$

dir.  $C_k(u_k(t))$ , Şekil-1'deki q-u eğrisinin herhangi bir noktasındaki birinci dereceden diferansiyel katsayıdır. k indisi, hattın her bir noktasındaki farklı q-u eğrisini gösterebilmek için kullanılmıştır. Bu denklemler çözümleri kolaylaştırır. Çözümde problemin incelendiği bölge için tek bir (ortalama) q-u eğrisi kabul edilmiştir. Bu yüzden (5) ve (6) bağıntılarındaki  $C_k(u_k(t))$  yerine  $C(u_k(t))$  yazılabilir.

Akım cinsinden de aşağıdaki denklemler verilebilir:

$$\begin{aligned} i_0(t+\Delta t) &= i_0(t) + 2/L(\Delta t/\Delta x) \cdot [u_0(t+\Delta t) - u_1(t+\Delta t)] \\ i_k(t+\Delta t) &= i_k(t) + 1/L(\Delta t/\Delta x) \cdot [u_k(t+\Delta t) - u_{k+1}(t+\Delta t)] \\ &\vdots \\ i_n(t+\Delta t) &= i_n(t) + 2/L(\Delta t/\Delta x) u_n(t+\Delta t) \quad (k=1,2,\dots,n) \end{aligned} \quad (7)$$

Başlangıç koşulları,

$$i_k(t)=0 \quad (8)$$

$$u_k(t)=0$$

$$\text{ve sınır koşulu,} \quad (9)$$

$$u_0(t+\Delta t)=U(t+\Delta t)$$

dir.

Denklemler (5) ve (6)'dan, her q-u eğrisi için aşırı gerilim dalgasının şekilleri hesaplanabilir. Bunun için q-u eğrisinin bilinmesi veya tahmin edilmesi gerekir. Şekil-1'deki eğrinin (2) bölümü, çok kaba bir yaklaşıklıkla aşağıdaki gibi iki fonksiyonla gösterilebilir.

$$(1) \quad U_0 \leq u < U_x \text{ ve } \partial u / \partial t > 0 \quad C(u) = C + m_1 k_1 (u - U_0)^{m_1 - 1} / u \quad (10)$$

$$(2) \quad U_x \leq u < U_m \text{ ve } \partial u / \partial t > 0 \quad C(u) = C + m_2 k_2 (u - U_0)^{m_2 - 1} / u \quad (11)$$



Durada.

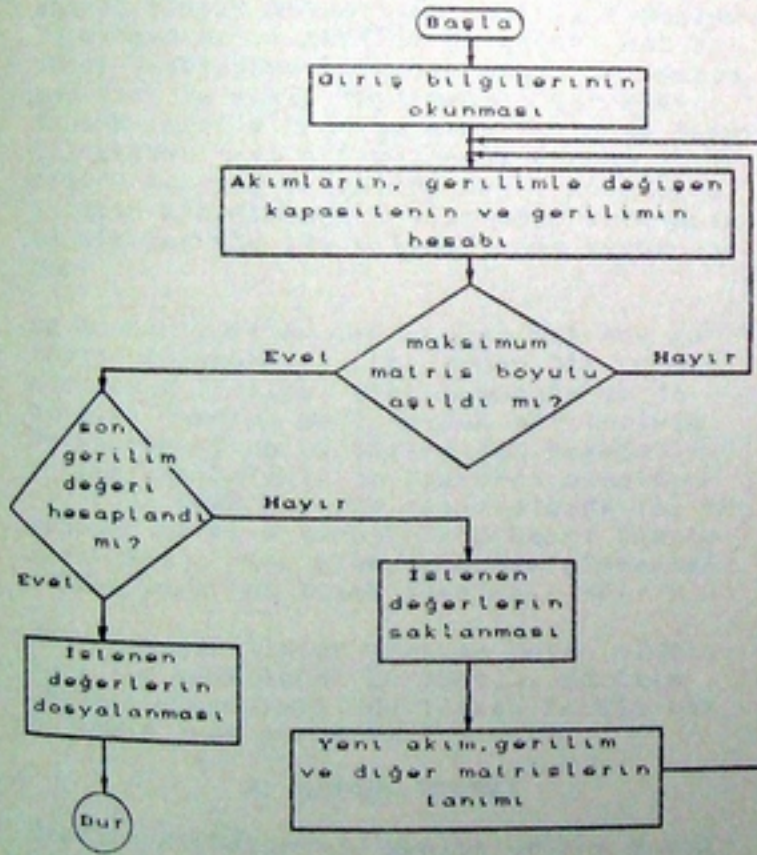
$$k_1 = s_{c1} \sqrt{r/2h} 10^{-11} \text{ [F/m]} \quad (\alpha=1/2) \quad (12)$$

dir. Bu bağıntının hesabı Kaynak/1/’de verilmektedir.

Bir q-u eğrisini tanımlayan beş büyüklük  $m_1, s_{c1}$  (veya  $k_1$ ),  $m_2, s_{c2}$  (veya  $k_2$ ) ve  $U_x$  dir. Bu büyüklükler, hesaplanan dalga şekli deneysel olarak ölçülenlere benzeyene kadar değiştirilerek istenen sonuca ulaşılabılır.

#### 4. Sayısal Uygulamalar

Bağıntıları 3. Bölümde verilen yönteme uygun olarak hazırlanan ve akış diyagramı Şekil-3’de gösterilen bir bilgisayar programında, ikili demet iletkenli bir hat için, eşdeğer hat yarıçapı  $r=1,265$  cm, hat yüksekliği  $h=14$  m, hattın koronasız durumdaki karakteristik empedansı  $Z=315$  ohm, hattaki yürüyen dalga hızı  $c=300$  m/ $\mu$ s ve korona başlangıç gerilimi  $U_0=421$  kV alınmıştır. q-u eğrisi için  $s_{c1}=25$ ,  $m_1=2$ ,  $s_{c2}=15$ ,  $m_2=2.1$  ve  $U_x=850$  kV değerleri kullanılmıştır.



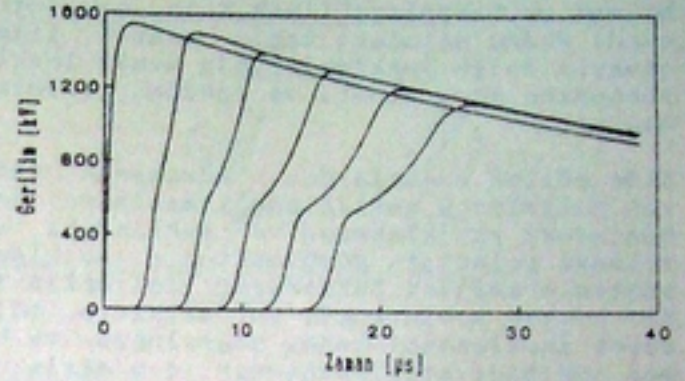
Şekil-3. Akış diyagramı

İncelemede hattın başından

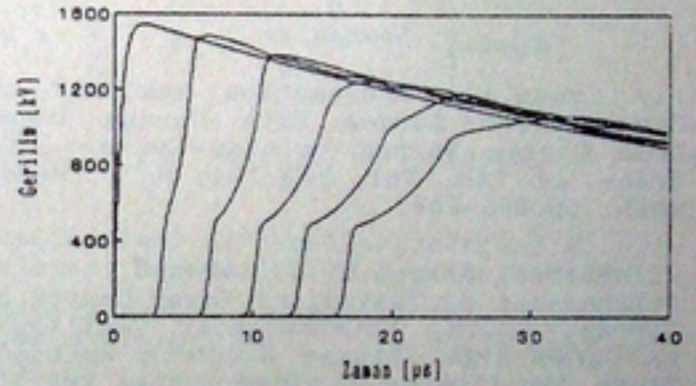
$$U(t)=1600 \cdot 10^3 (e^{-t/0.5 \cdot 10^{-6}} - e^{-t/0.4 \cdot 10^{-6}}) \text{ [Volt]} \quad (13)$$

şeklinde bir standart darbe gerilimi uygulandığı ve hattın sonunun kısıtlı olduğu kabul edilmiştir.

Bu verilerle, uygulama olarak 8 km uzunluğunda ikili demet iletkenli bir hat örneğinde  $\Delta x=35,25$  m ve  $\Delta t=0,05$   $\mu$ s olarak Şekil-4’te verilen değişimler ve  $\Delta x=141$  m ve  $\Delta t=0,2$   $\mu$ s olarak Şekil-5’de verilen değişimler elde edilmiştir. Şekil-4 ve Şekil-5’deki dalga şekilleri, yürüyen dalganın hat boyunca birer kilometrelik aralıklarla değişimlerini göstermektedir.

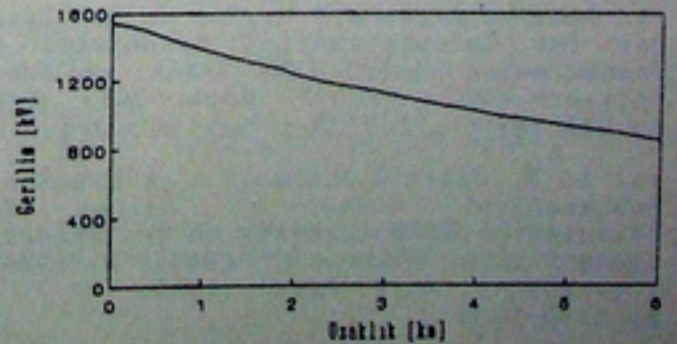


Şekil-4



Şekil-5

Şekil-6’da da 8 km’lik örnek hatta Şekil-4’teki dalgaların tepe değerlerinin hat boyunca değişimi verilmiştir. Şekil-6 dan yürüyen dalganın hat boyunca genişliğindeki azalma belirgin olarak görülmektedir.



Şekil-6



Elde edilen dalga şekillerinin gerçek dalga şekillerine benzerliği literatürde verilen deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak görülebilir. Ancak hesaplardaki uyum, lineerleştirme için alınan fonksiyon sayısı ile arttırılabilir. q-u eğrisini tanımlayan büyüklükler yanında, hesapları etkileyen diğer büyüklükler de seçilen hat parçası uzunluğu ( $\Delta x$ ) ve  $\Delta t/\Delta x$  oranıdır. Şekil-4 ve 5 te bu durum gözlenmektedir.

#### 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, yüksek gerilim hatlarında koronanın yürüyen dalgalara etkisini görebilmek ve hesaplayabilmek için, q-u eğrisinde  $dq/du$  eğimine bağlı olarak lineer olmayan dalga denklemlerinin sonlu farklar yöntemine göre hesabı ve çözümü açıklanmıştır.

Elde edilen sonuçlardan, koronanın, yürüyen dalgaların genliğindeki azalmaya, cephesindeki yatıklaşmaya ve şeklindeki bozulmaya yol açtığı görülmektedir. Açıklanan yöntemle yapılan bilgisayar çalışmalarında, hattın sonlu küçük parçacıklara bölünerek incelenmesi hesap doğruluğunu ve hesap süresini etkilemektedir. q-u eğrisinin lineerleştirilmesinde kullanılan fonksiyon sayısı, dalganın cephesini;  $\Delta t/\Delta x$  oranı da dalganın genliğini etkiler.

#### Kaynaklar

/1/ Inoue, A., Propagation analysis of Overvoltages Surges With Corona Based Upon Charge Versus Voltage Curve, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No.3, March 1985, pp.655-660.

/2/ Gary, C., Dragan, G., Critescu, D., Attenuation of Travelling Waves Caused By Corona, CIGRE, International Conference on Large High Voltage Electric Systems, Study Committee no.33, Report 13, Vol.II, 1978, pp.1-38.

/3/ 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.

/4/ Semlyen, A., Gang, H.W., Corona Modelling for the Calculation of Transients on Transmission Lines, IEEE Trans. on Power Delivery, 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 Power Delivery, Vol. PWRD-4, No.2, April 1989, pp.1145-1152.

/6/ Skilling, H.H., Dykes, P.de K., Distortion of Travelling Waves by Corona, Trans. of AIEE, Vol.56, July 1937, pp.850-857.

/7/ Lee, K.C., Nonlinear Corona Models in An Electromagnetic Transients Program (EMTP), IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-102, No.4, Sept. 1983, pp.2936-2941.

/8/ Ovick, N.L., Kusic, G.L., Including Corona Effects for Travelling Waves on Transmission Lines, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No.12, Dec.1984, pp.3643-3650.