

ENERJİ İLETİM HATLARINDA YILDIRIM NEDENİYLE ENDÜKLENEN GERİLİMLER

Asım KAYGUSUZ¹ M. Salih MAMİŞ² Erhan AKIN³

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi

İnönü Üniversitesi, 44069, Malatya

³Bilgisayar Bölümü, Mühendislik Fakültesi

Fırat Üniversitesi, 23119, Elazığ

¹ e-posta: akaygusuz@inonu.edu.tr ² e-posta: smamis@inonu.edu.tr

³ e-posta: eakin@firat.edu.tr

Anahtar sözcükler: İletim Hattı, Hızlı Ters Laplace Dönüşümü, Endüklenen Gerilim

ÖZET

Bu çalışmada enerji iletim hatlarında metal direklere düşen yıldırımlar nedeniyle faz iletkenlerinde endüklenen gerilimler analiz edilmiştir. s-domeninde sistem cevabı bulunmuş, frekans-zaman dönüşümü için hızlı ters Laplace dönüşümü (FILT) kullanılmıştır.

1. GİRİŞ

Elektrik tesislerinin yıldırım düşmelerine karşı korunması sistem aygıtlarının korunması enerji sürekliliği açısından önemlidir. Sistemde yeterli bir korunmanın sağlanması için yıldırım düşmesi, hatların enerjilenmesi vb gibi durumlarda meydana gelen geçici rejim durumundaki aşırı gerilimlerin bilinmesi gereklidir. Bu gerilimlerin hesaplanması için kullanılan nümerik tekniklerin zaman domeni ve frekans domeni olmak üzere iki temel gruba ayrılması mümkündür. Zaman domeni yöntemlerinde doğrusal olmayan elemanların analizi kolay yapılabilmekle birlikte [1], frekans bağımlı parametrelerin ifadesi frekans domeni yöntemlerindeki kadar kolay olmamaktadır [2].

Yapılan çalışmada frekans domeni kullanılarak elektrik direğine yıldırım düşmesi sonrasında faz iletkenlerinde endüklenen gerilimler hesaplanmıştır. Elektrik direğinin karakteristik empedansı, direğin tepe noktasından yere doğru değişken (nonuniform) olarak alınmıştır. İlk olarak koruma iletkeninin bağlı bulunduğu direk tepesindeki gerilimler hesaplanmış, bu gerilimin koruma iletkeninde meydana getirdiği akım dalgası bulunmuştur. Bu akım dalgası dikkate alınarak faz iletkenlerinde manyetik kuplaj nedeniyle oluşan gerilim değerleri hesaplanmıştır.

2. ENDÜKLEME YOLUYLA OLUŞAN GERİLİM

Bu çalışmada iletim hattının dağınık parametrelili modeli kullanılmış, toprak ve faz iletkenlerinin etkileri göz önüne alınmıştır. Faz iletkenleri üzerinde endüklenen gerilimleri bulmak için önce direğin

tepesindeki gerilimin bulunması gerekmektedir. Bunun için Şekil 1’de verilen iki iletkenli sistemde, iletim hattının 1 iletkeni yani toprak iletkeni için uç denklemi belirli bir s değeri için aşağıdaki biçimde yazılabilir

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ I_{S1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R1} \\ I_{R1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Uniform olmayan iletim hattı yapısında tanımlanan direk için ise belirli bir s değeri için uç denklemleri

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_T & b_T \\ c_T & d_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

olarak yazılır. Direğin topraklama direnci üzerindeki akım ifadesi $i_f = V_f / Z_f$, (2) denkleminde yerine yazılırsa direk admitansı aşağıdaki gibi bulunur

$$Y_t(s) = \frac{Z_f c_T + d_T}{Z_f a_T + b_T} \quad (3)$$

Direğin üst noktasında oluşan V_{S1} gerilimi

$$V_{S1}(s) = \frac{I_S(s)}{Y(s)} \quad (4)$$

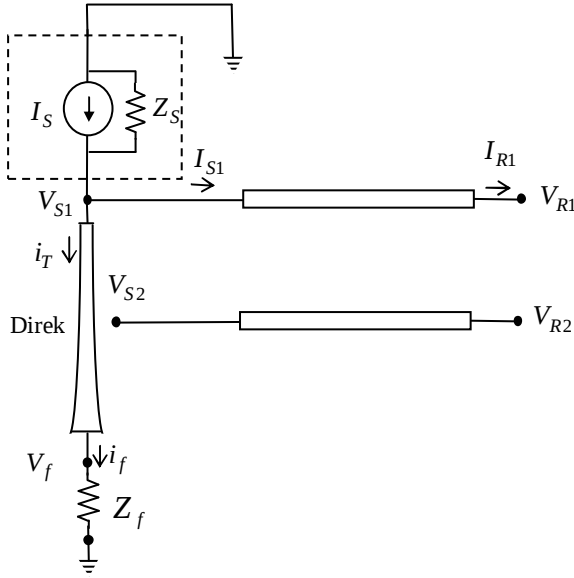
şeklinde yazılabilir. Bu denklemde yıldırımın direğe düşmesi durumunda toplam admitans ifadesi

$$Y(s) = \frac{1}{Z_s} + \frac{c_1}{a_1} + Y_t(s) \quad (5)$$

şeklinde bulunur. İletim hattından geçen I_{S1} akım ifadesi ise

$$I_{S1} = V_{S1} \frac{c_1}{a_1} \quad (6)$$

biçiminde yazılabilir.



Şekil 1. Yıldırım analizi için kullanılan iki iletkenli sistem.

Direğin tepesindeki gerilim ifadesi çıkarıldıktan sonra, toprak iletkeninden geçen akım nedeniyle faz iletkenleri üzerinde endüklenen gerilim ifadelerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için Deri tarafından önerilen ve frekans bağımlılık etkisini içeren formülü [3] kullanılarak sistemin Z seri empedans ve Y şönt admitans matrisleri çıkarılmıştır. Daha sonra T dönüşüm matrisi kullanılarak Z ve Y matrisleri köşegen hale getirilmiştir. İletim hattının üssel parametrelili denklemini yazarak iki iletkenli bir sistem için diğer fazda endüklenen gerilim ifadesi daha genel bir halde [4]'e benzer olarak belli bir frekanstaki T dönüşüm matrisinin elemanları da kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilir [9]

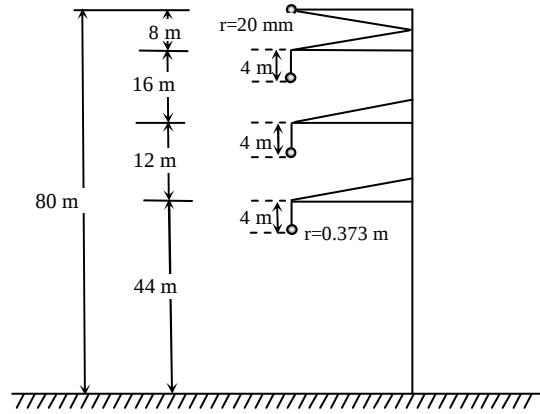
$$V_{S2} = \frac{t_{21}}{t_{11}} \left(1 - \frac{c_1}{a_1} \frac{\cosh \gamma_2 \ell \cdot Z_{02}}{\sinh \gamma_2 \ell} \right) \frac{1}{Y(s)} I_S(s) \quad (7)$$

Burada t_{21} , t_{22} dönüşüm matrisinin elemanları, c_1 , a_1 toprak iletkeninin parametreleri $\{ABCD\}$, γ_2 , Z_{02} sırasıyla 2. iletkenin yayılım sabiti ve karakteristik empedansıdır. Denklem (7) iki iletkenli bir sistemde endüklenen gerilim ifadesini vermektedir.

3. METAL DİREK MODELİ

Yerden uzaklığının değişmesiyle karakteristik empedansı değişen ve yere dik olan direğin yıldırım cevabı hesaplamalarında uniform olmayan hat olarak modellenmesi gerekir. Bu durumda, direğin uç denklemleri iletim hattına benzer olarak yazılabilir. Burada direğin karakteristik empedansı frekansa bağımlı değildir ve $Z_{oi} = (Z_o(x_i) + Z_o(x_{i+1}))/2$ şeklinde yazılır. Direğin yayılım sabiti $\gamma_i = s/kc$ şeklindedir. Burada c ışık hızı ($300\text{m}/\mu\text{s}$) ve k ise bire yakın bir sabittir [5]. Örnek olarak ele alınan [6] elektrik direği 80 metre yüksekliğinde ve

konumlarının ise Şekil 2' de gösterildiği gibi olduğu varsayılmıştır.



Şekil 2. Elektrik direği ve faz iletkenlerinin konumları.

4. HIZLI TERS LAPLACE DÖNÜŞÜMÜ

s -domeninden zaman domenine dönüşüm için Hosono tarafından geliştirilen ve kısaca FILT (Fast Inverse Laplace Transforms) olarak isimlendirilen hızlı ters Laplace dönüşümü kullanılmıştır [7]. Bir $f(t)$ fonksiyonun Laplace dönüşümü $F(s)$ ve bu işlemin tersi olan ters Laplace dönüşümü aşağıdaki gibidir.

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt \quad (8)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} F(s) \exp(st) ds \quad (9)$$

İletim sistemlerinde yayılan dalgaların analiz problemlerinde ters Laplace dönüşümü nümerik olarak yapılır. FILT ile ters Laplace dönüşümünün hesaplanması için aşağıdaki denklem kullanılır:

$$f_{ec}^{kp}(t, a) = (e^a / t) \left[\sum_{n=1}^{k-1} F_n + (1/2^{p+1}) \sum_{n=0}^p A_{pn} E_{k+n} \right] \quad (10)$$

burada

$$F_n = (-1)^n \text{Im} F\{[a + j(n-0.5)\pi]/t\} \quad (11)$$

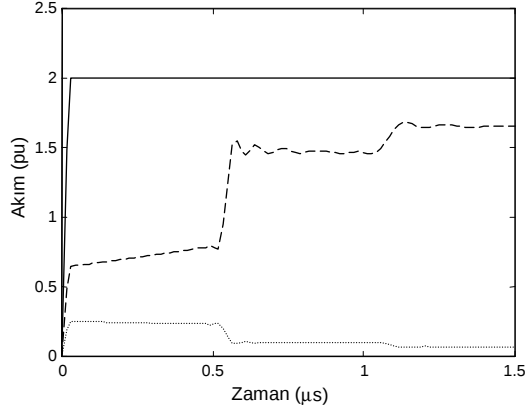
$$A_{pp} = 1, \quad A_{pn-1} = A_{pn} + \binom{p+1}{n} \quad (12)$$

şeklinde. $f(t)$ ' yi hesaplamak için denklem (10)' dan a , k ve p ' nin uygun olarak seçilmesi gerekmektedir [7,8]. Uygulamalarda yeterli doğrulukta sonuç veren değerler $a=5$, $k=15$ ve $p=10$ olarak belirlenmiştir [8].

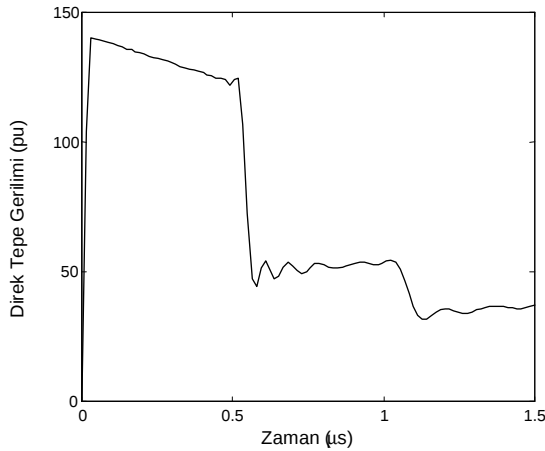
5. UYGULAMA

Burada yükselme zamanı 20 ns olan bir yıldırım akımının, elektrik direğine düşmesi durumunda oluşan aşırı gerilimler hesaplanmıştır. Hattın uzunluğu 300

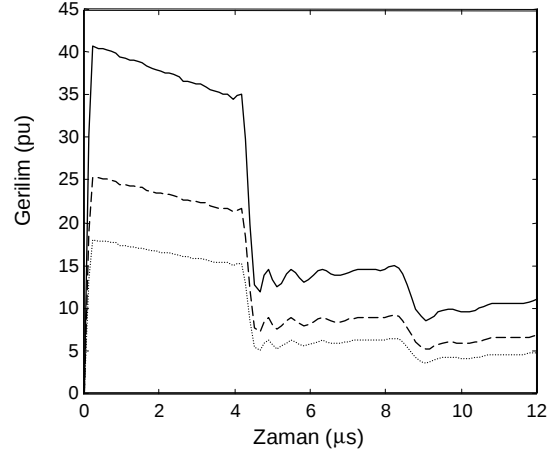
m, kaynak empedansı 400Ω ve direk empedansı yüksekliğe (x) bağlı bir fonksiyonu olarak $Z_0(x) = 150e^{0.0048x}$ biçiminde alınmıştır [4]. Direk bir ucundan diğer ucuna 20 eşit parçaya bölünmüş ve karakteristik empedansı uniform olmayan iletim hattı yapısına benzer olarak direğin alt bölümünde 150 ohm ve tepesinde 220 ohm arasında değişken olarak alınmıştır. Direğin yayılım sabitinin ışık hızında olduğu varsayılmıştır. Direk topraklama direnci 17Ω dur. Toprak iletkeninin yarıçapı 20 mm, faz iletkenlerinin eşdeğer yarıçapı 37.3 cm dir. Direk ve faz iletkenlerinin konumu Şekil 2’de verildiği gibidir. Uygulanan yıldırım akımı ile birlikte direkteki ve toprak iletkenindeki akım değişimi Şekil 3’te verilmiştir. Faz iletkenlerinde endüklenen gerilimler ise Şekil 5’de verilmiştir. Frekans bağımlılığın etkisini görmek için faz iletkeninin 3 km ötesindeki bir alıcı uçtaki gerilim ifadesi frekans bağımlı ve bağımsız durum için Şekil 6’ de verilmiştir. Yansıyan dalgaları engellemek için hat sonuna hattın karakteristik empedansına yakın 350Ω direnç bağlanmıştır.



Şekil 3. Akımların değişimi.
— uygulanan akım, --- direk akımı, koruma iletkeni akımı

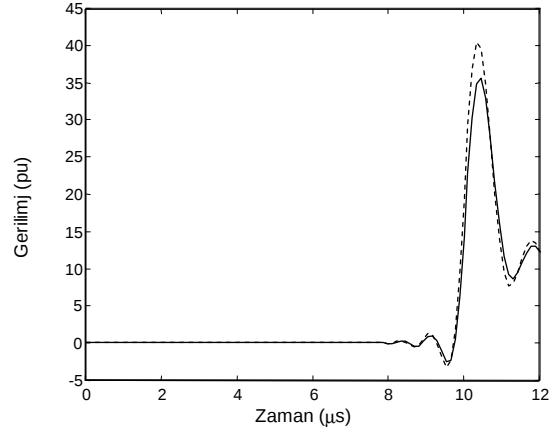


Şekil 4. Direk tepe gerilimi.



Şekil 5. Faz iletkenlerinde endüklenen gerilimler.

— üst faz
--- orta faz
..... alt faz



Şekil 6. Üst fazın 3 km uzaklıktaki gerilimi.
— frekans bağımlı, --- frekans bağımsız

Tablo 1’ de p.u. olarak endüklenen en yüksek gerilim değerleri ve direk tepe gerilimi verilmiştir. Fazlarda endüklenen en yüksek gerilim üst fazda meydana gelmiş olup 40.6 p.u. değerindedir. 30 kA tepe değerine sahip bir yıldırım dalgası bu durumda $30 \times 40.6 = 1218$ kV değerinde bir gerilim oluşturur. Tablo 2’ de ise frekans bağımlı ve bağımsız durumda 3 km uzaklıktaki hat sonunda fazlardaki gerilimlerin en yüksek değerleri verilmiştir. Tabloda Frekans bağımsız duruma göre frekans bağımlı durumda en az %12 daha düşük bir gerilim elde edilmiştir.

Tablo-1. Direk tepe gerilimi ve fazlarda endüklenen gerilimler.

	Endüklenen en yüksek gerilim değeri (p.u.)
Direk tepe gerilimi	140.3
Üst faz	40.6
Orta faz	25.3
Alt faz	17.9

Tablo-2. Frekans bağımlı ve bağımsız durumdaki alıcı uçtaki fazlarda gerilimlerin en yüksek değerleri.

	Frekans bağımlı	Frekans Bağımsız
Üst faz ger. (p.u.)	35.6	40.4
Orta faz ger. (p.u.)	20.2	24.0
Alt faz ger. (p.u.)	13.5	16.9

6. SONUÇ

Bu çalışmada enerji iletim hatlarında, toprak iletkenli bir elektrik direğine düşen yıldırımlardan dolayı faz iletkenlerinde endüklenen gerilimler s-domaini formülasyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Frekans domeninden zaman domenine dönüşüm için hızlı ters Laplace dönüşümü (FILT) kullanılmıştır. Elektrik direğini modellemek için uniform olmayan iletim hattı modeli kullanılmıştır. Yıldırım akımının uygulanmasıyla direk üzerindeki ve toprak iletkenindeki akımlar da hesaplanmıştır. s-domaini gösteriminin kullanılmasıyla iletim hatlarında doğal olarak bulunan frekans bağımlılık ifade edilmiştir. Bunu görmek için hat üzerinde yıldırımın düştüğü noktadan 3 km uzaklıktaki bir noktadaki gerilim hesaplanmıştır. Frekans bağımlı durumda, frekans bağımsız duruma göre daha düşük gerilim elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Mamiş M. S., Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components, IEE PROC.-GENER. TRANSM. DISTRIB., Vol. 150 (2), pp. 200-204, 2003.
- [2] Kaygusuz A., Mamiş M. S. , Akın E., s-domain analysis of lightning surge response of a transmission tower with phase conductors, INT. CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS IPST'03, Hong Kong, 2003.
- [3] Deri ve diğ., The complex Ground Return Plane, A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return, IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, vol. PAS-100, No. 8, pp. 3686-3693, 1981.
- [4] Kaygusuz A., Mamiş M. S., ve Akın E., İletim hatlarında oluşan yıldırım aşırı gerilimlerinin s-domeninde analizi, TOK'2002, Ankara, 2002.
- [5] Kawai M., Studies of the surge response on a transmission line tower", IEEE TRANS., PAS-83, pp. 30-34, 1964.
- [6] Mozumi T. ve diğ., Numerical electromagnetic field analysis of archorn voltages during a back-flashover on a 500-kV twin-circuit line, IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, vol. 18, no.1, pp. 207-213, 2003.
- [7] Hosono T., 'Numerical inversion of Laplace-transform and some applications to wave optics', RADIO SCI., pp. 1015-1019, 1982.
- [8] Mamiş M. S., Köksal. M., Lightning surge analysis using nonuniform, single-phase line model, IEE PROC.-GENER. TRANSM. DISTRIB., Vol. 148, No. 1, 2001.
- [9] Kaygusuz A., Mamiş M. S., Akın E., s-Domain analysis of lightning surges in three-phase systems using nonuniform single-phase line model, Electric Power Systems Research, 2003 (gönderildi).