

ELEKTRİK DİREKLERİNDE OLUŞAN YILDIRIM AKIMLARININ LAPLACE DÖNÜŞÜMÜ İLE ANALİZİ

Asım Kaygusuz, M. Salih Mamiş, Erhan Akın

Özet - Yıldırım dalgalarının analizi, güç sistemlerinin ekonomik izolasyonu için önemlidir. Bu çalışmada, toprak iletkeni bağlı bir direğin yıldırım dalgası analizi için s -domeni formulasyonu kullanılmıştır. Direk, tek fazlı uniform olmayan iletim hattı olarak modellenmiş ve direk kollarındaki gerilim s -domeninde hesaplanmıştır. Çift üssel ve basamak fonksiyonu şeklindeki yıldırım akımının toprak iletkenli bir direğin tepesine ve koruma iletkeninin ortasına düşmesi durumu için hesaplama yapılmıştır. Frekans bölgesinden zaman bölgesine geçiş için hızlı ters Laplace dönüşümü (FILT) kullanılmıştır. Bu işlem için MATLAB kullanılarak program yapılmış ve sonuçlar önceki metotlar ve EMTP sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler -Yıldırım Analizi, Uniform Olmayan İletim Hattı, Hızlı Ters Laplace Dönüşümü

Abstract – Analysis of lightning surges is important for power system insulation. In this study, s -domain formulation is used to compute surge response of a transmission tower with a shield wire. Transmission tower is modeled by a single-phase, nonuniform transmission line and expressions for the voltages at tower crossarms are obtained in s -domain. Tower surge response is computed for a tower top stroke and a shield wire mid-span stroke, by considering a double-exponential and a step function lightning current. For frequency to time domain conversion fast inverse Laplace transform (FILT) is used. The solution procedure is programmed using MATLAB. The results obtained using the proposed method are compared with the results obtained using EMTP.

Key Words – Lightning Surge Analysis, Non-uniform Transmission Line, Fast Inverse Laplace Transform

A.Kaygusuz, M.S.Mamiş; İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Malatya, akaygusuz@inonu.edu.tr, smamis@inonu.edu.tr
E.AkınFirat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, eakin@firat.edu.tr

I. GİRİŞ

Güç sistemlerinde, elektrik direği, koruma iletkeni ve faz iletkenlerine yıldırım düştüğünde, izolator üzerinde gerilimin yükselmesinden dolayı bir atlama meydana gelebilmektedir. Bu da izolatorların kırılmasına ve transformatörlerin izolasyonlarının bozulmasına enerji kesintisine neden olmaktadır. Ayrıca çevreye yayılan elektromanyetik dalgalar elektronik cihazları etkileyebilmektedir. İletim hatlarına yıldırım düştüğünde, direğin faz iletkeninin bulunduğu koldaki gerilimi ile faz iletkeninde indüklenen gerilim arasındaki fark izolator dayanma geriliminden büyükse, izolator üzerinde atlama olabilmektedir. Bu gerilimler doğru olarak hesaplanabilirse uygun izolatorları tasarlamak ve seçmek mümkün olabilir.

İletim sistemlerinde yıldırım dalgası analizi için birçok çalışma yapılmıştır [1-18]. Yıldırım analizindeki ana problem, elektrik direğinin doğru olarak modellenmesidir. Uzun yükselme zamanına sahip bir yıldırım dalgası için direk, basit toplu indüktans ve direnç parametreleri kullanılarak modellenemez. Bununla birlikte, çok hızlı yükselme zamanına sahip yıldırım akımı için direğin, uniform olmayan iletim hattı olarak modellenmesi gerekir [1]. Yıldırımın gerçek sistem üzerindeki etkisini gerçek bir yıldırım dalgasını dikkate alarak tespit etmek zor ve pahalıdır. Bunun yerine sistem basit olarak laboratuvar ortamında modellenerek deneysel çalışma yapılabilir ancak bu durumda da sonuçlardaki doğruluk derecesi çeşitli kısıtlamalar nedeniyle azalmaktadır. Bu nedenlerle konuya ilişkin araştırmalar genellikle bilgisayar simülasyonları ile yapılmaktadır [2-9].

Yıldırım analizi için elektrik direği, uniform olmayan tek fazlı iletim hattı modeli kullanılarak modellenmiştir. İletim direği üzerindeki faz pozisyonlarının bulunduğu kolların gerilimi hesaplanırken, yıldırımın iletim direğinin tepesine ve koruma hattının ortasına düşmesi durumu göz önüne alınmıştır. Bu yayında kullanılan uniform olmayan hat modeli, bir iletim sistemindeki direğin tepe gerilimini hesaplamak için önceki çalışmalarda kullanılmış ve yıldırım analizi için çok etkili bir teknik olduğu görülmüştür [4-7]. Bu çalışmada

ise iletkenlerin direğe bağlı bulunduğu noktalardaki gerilimler hesaplanmıştır. Hat kayıpları, frekansa bağlı hat parametreleri ve yıldırım düşmesi esnasındaki elektrik direğinin uniform olmayan karakteristik empedansı hesaplamalarda göz önüne alınmıştır. Yapılan çalışmada, elektrik direğine toprak iletkeninin bağlı olduğu durumda yıldırım düşmesi sonrasında oluşan aşırı gerilimler s -domeni formülasyonu ve hızlı ters Laplace dönüşümü kullanılarak hesaplanmıştır. Basamak ve çift üssel kaynak akımları için hesaplamalar yapılmıştır.

II. UNIFORM OLMAYAN TEK-FAZ İLETİM HATTI MODELİ

Uniform olmayan kayıplı tek fazlı bir iletim hattının ABCD parametrelerinden oluşan zincir matris denklemi [5, 6]'da verilmiştir. Bu denklemler, eşit uzunluklara bölünmüş uniform olmayan hatların kaskat bağlanmasıyla uniform hatta benzetilmesi ile elde edilmiştir. Böyle bir hattın zincir matris şeklindeki ABCD parametrelili denklemi aşağıdaki gibidir [5, 6]:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Hattın uniform olmayan yapısı için $\{A, B, C, D\}$ matris sabitleri hattın bölünen her bir parçası için ayrı ayrı yazılarak:

$$H = H_1 H_2 \dots H_n \quad (2)$$

şeklinde hesaplanır. Burada:

$$H_i = \begin{bmatrix} \cosh \gamma_i \ell_i & Z_{oi} \sinh \gamma_i \ell_i \\ Z_{oi}^{-1} \sinh \gamma_i \ell_i & \cosh \gamma_i \ell_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

γ_i uniform hat bölümünün uç denklemdir. ℓ_i , iki bölüm arasındaki uzunluk ve n ise uniform olmayan hattı simüle etmek için kullanılan uniform hat parçalarının sayısıdır. i bölümün karakteristik empedansı Z_{oi} , bu bölümün başı ve sonundaki karakteristik empedansların aritmetik ortalamasıdır ve aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$Z_{oi}(s) = (Z_o(s, x_i) + Z_o(s, x_{i+1}))/2 \quad (4)$$

Yayılm sabiti $\gamma_i(s)$ de benzer şekilde hesaplanabilir. x bağımlı karakteristik empedans ve yayılım sabiti, seri empedans $Z(s, x)$ ve şönt admitans $Y(s, x)$ cinsinden s -domeninde aşağıdaki gibi yazılır [5, 6]:

$$Z_o(s, x) = \sqrt{Z(s, x)/Y(s, x)} \quad (5a)$$

$$\gamma(s, x) = \sqrt{Z(s, x)Y(s, x)} \quad (5b)$$

III. s -DOMENİNDE ELEKTRİK DİREĞİNİN ANALİZİ

Yerden uzaklığının değişmesiyle karakteristik empedansı değişen ve yere dik olan direğin yıldırım analizi hesaplamalarında uniform olmayan hat gibi 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. Elektrik direğinin yayılım sabiti $\gamma_i = s/kc$ şeklindedir. Burada c ışık hızı ($300\text{m}/\mu\text{s}$) ve k ise $0.7-0.88$ aralığında bir sabittir [1]. Örnek olarak ele alınan [13] direğin 68.2 metre yüksekliğinde ve konumlarının ise Şekil 1' de gösterildiği gibi olduğu varsayılmıştır. Bir önceki bölümde anlatılan uniform olmayan iletim hattı modeli, iletim sistemindeki direğin modellenmesi ve s -domeninde analizi için çok kullanışlıdır. Belli bir frekansta uniform olmayan iletim hattı modelindeki zincir matrisi şeklindeki denklemi direk için aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

burada V_1, I_1 direğin tepesindeki ve V_2, I_2 ise direğin temelindeki uç gerilim ve akımlarıdır. Toprak iletkenli bir elektrik direğinin tepesine yıldırım düştüğünde, direğin tepesindeki gerilim ifadesi s -domeninde aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$V_s = \frac{I(s)}{Y(s)} \quad (7)$$

burada $I(s)$ yıldırım akımı ve $Y(s)$ yıldırım akımının düştüğü noktada görülen toplam admitanstır. Yıldırım analizi için kullanılan iletim sistemi ve sistemin eşdeğer modeli Şekil 1' de verilmiştir. Bu şekle göre direk akımı I_D ve direğin herhangi bir x noktasındaki gerilimi V_x ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I_D = \frac{CZ_f + D}{AZ_f + B} V_s \quad (8)$$

$$V_x = dV_s - bI_D \quad (9)$$

burada Z_f direk topraklama direnci, $\{A, B, C, D\}$ uniform olmayan iletim modelindeki direğin sabit matris elemanları ve $\{a, b, c, d\}$ ise direğin tepesinden x noktasına olan bölümün sabit matris elemanıdır.

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

şeklindedir. $f(t)$ ' yi hesaplamak için denklem (12)' de k ve p ' nin uygun olarak seçilmesi gerekmektedir [4-7]. Uygulamalarda yeterli doğrulukta sonuç veren değerler $k=5$, $k=15$ ve $p=10$ olarak belirlenmiştir [4-7].

V. UYGULAMA

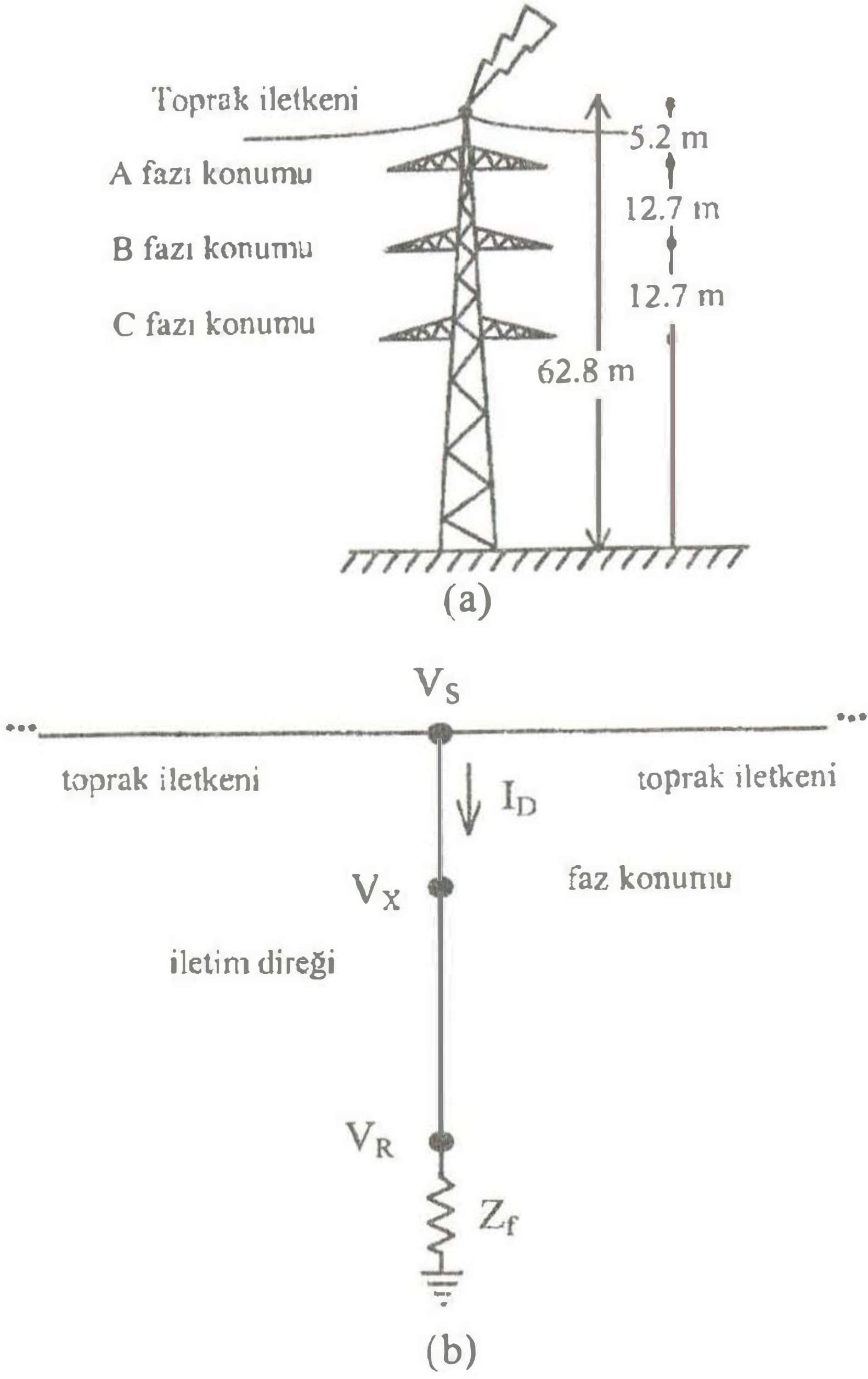
V.1. Örnek 1: Çift üssel şeklindeki yıldırım akımının uygulanması:

Burada çift üssel $i(t) = 1,0177(e^{-1.5 \times 10^4 t} - e^{-6 \times 10^4 t})$ biçiminde bir değişimle ifade edilen yıldırım akımının elektrik direğine düşmesi durumunda oluşan gerilimler hesaplanmıştır. Kaynak empedansı 400 ohm, direğin topraklama direnci 17Ω ve toprak iletken yarıçapı 1.429 cm dir. Uniform olmayan direğin karakteristik empedansı yükseklik x 'e bağlı değişir.

$Z_0(x) = 150e^{0,0046x}$ fonksiyonu olarak alınmıştır. Yıldırım yayılım hızı ışık hızı olarak alınmıştır [11, 14]. Direğin ucundan diğer ucuna 20 eşit parçaya bölünmüş karakteristik empedansı 150 ohm ile 200 ohm arasında değişmektedir. Direğin tepesine yıldırım düşmesi durumunda Şekil 1' deki direğin A, B ve C faz iletken kollarında gerilimler sırasıyla 73.7, 67.4 ve 57.7 p.u. olarak elde edilmiştir ve Şekil 2 (a)' da gösterilmiştir. Toprak iletkeninin ortasına yıldırım düşmesi durumunda ise sırasıyla bu gerilimler 55.5, 50.7 ve 43.1 p.u. olarak Şekil 2 (b)' de gösterilmiştir.

V.2. Örnek 2: Basamak şeklindeki yıldırım akımının uygulanması:

Bu uygulamada basamak şeklindeki akımın yüksekliği zamanını $10 \mu s$ olarak alınmıştır. Direk ve toprak iletkeni parametreleri Örnek 1' de verildiği gibidir. Direğin faz pozisyonlarının bulunduğu konumlarında gerilim değerleri, yıldırımın direğin tepesine düşmesi durumu için Şekil 3 (a)' da ve toprak iletkeninin ortasına düşme durumu için ise Şekil 3 (b)' de verilmiştir. Direğin tepesine yıldırım düşmesi durumunda direğin B ve C faz iletkeni kollarında gerilimler sırasıyla 89.8 ve 84.7 p.u., olarak elde edilmiştir ve toprak iletkeninin ortasına yıldırım düşmesi durumunda ise sırasıyla bu gerilimler 76.3, 74.2 ve 72.6 p.u. olarak değerlerin, Örnek 1' de verilen çift üssel yıldırım akım dalgası şeklinde elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu sonuçlar Şekil 4' de elde edilen değerlerle uyumaktadır. Akım kaynağının yarı değerinin alınmasından dolayı buradaki maksimum değerler [11] referansının yarısıdır. A faz konumundaki gerilimin EMTTP ve s-domenine karşılaştırması basamak akım için Şekil 4' te verilmiştir. Örnek 1 ve 2' de verilen akım dalga şekilleri ve gerilim akımların uygulanmasıyla elde edilen elektrik direk gerilimleri Şekil 5' te verilmiştir.



Şekil 1. a) Yıldırım analizi için kullanılan sistem, b) Sistemin eşdeğer modeli.

IV. FREKANS/ZAMAN DOMENİ DÖNÜŞÜMÜ (HIZLI TERS LAPLACE DÖNÜŞÜMÜ)

s -domeninden zaman domenine dönüşüm için Hosono tarafından geliştirilen ve kısaca FILT olarak isimlendirilen hızlı ters Laplace dönüşümü kullanılmıştır [10]. Bir $f(t)$ fonksiyonun Laplace dönüşümü $F(s)$ ve bu işlemin tersi olan ters Laplace dönüşümü aşağıdaki gibidir:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt \quad (10)$$

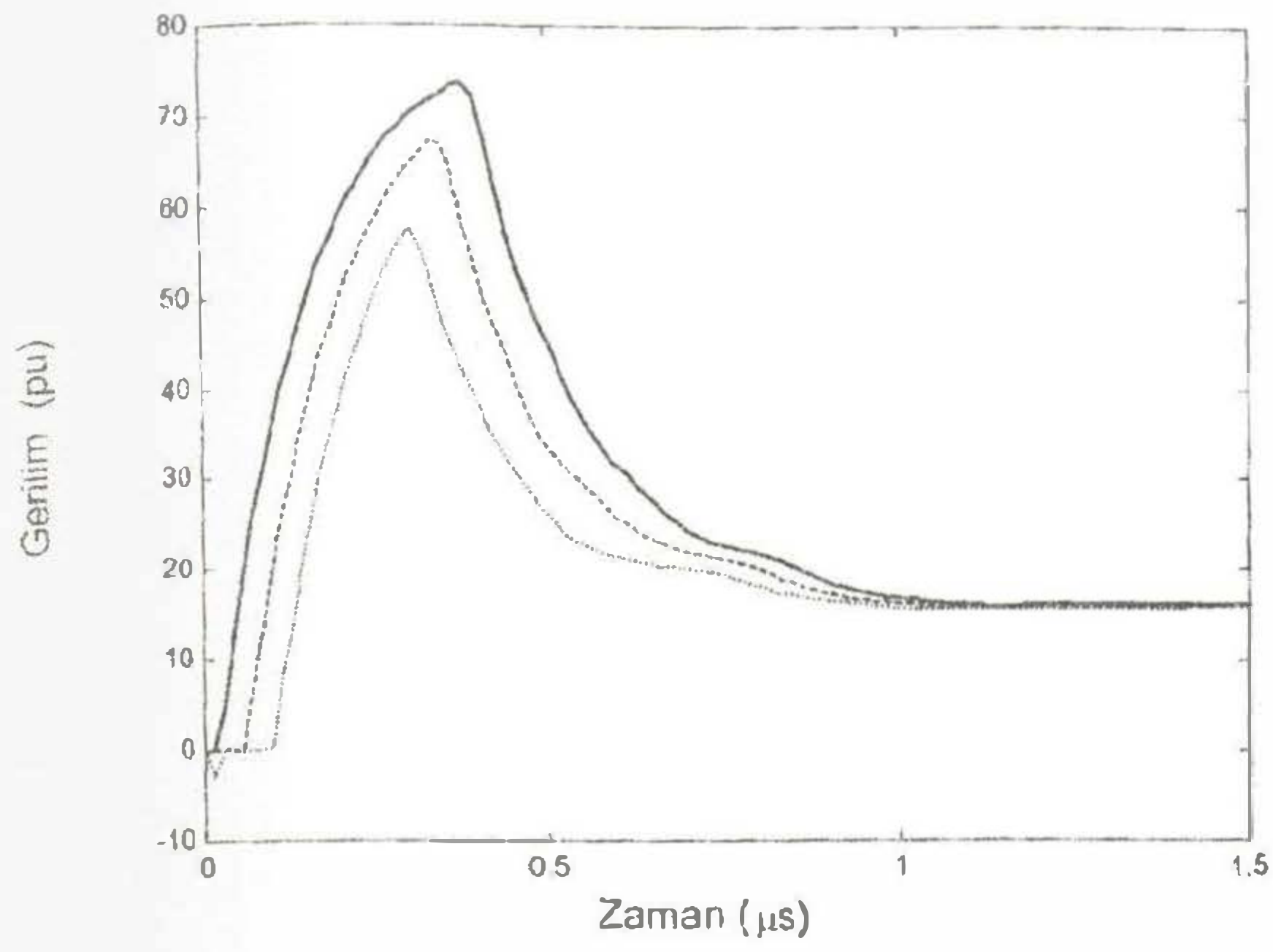
$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma-j\infty}^{\gamma+j\infty} F(s) \exp(st) ds \quad (11)$$

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

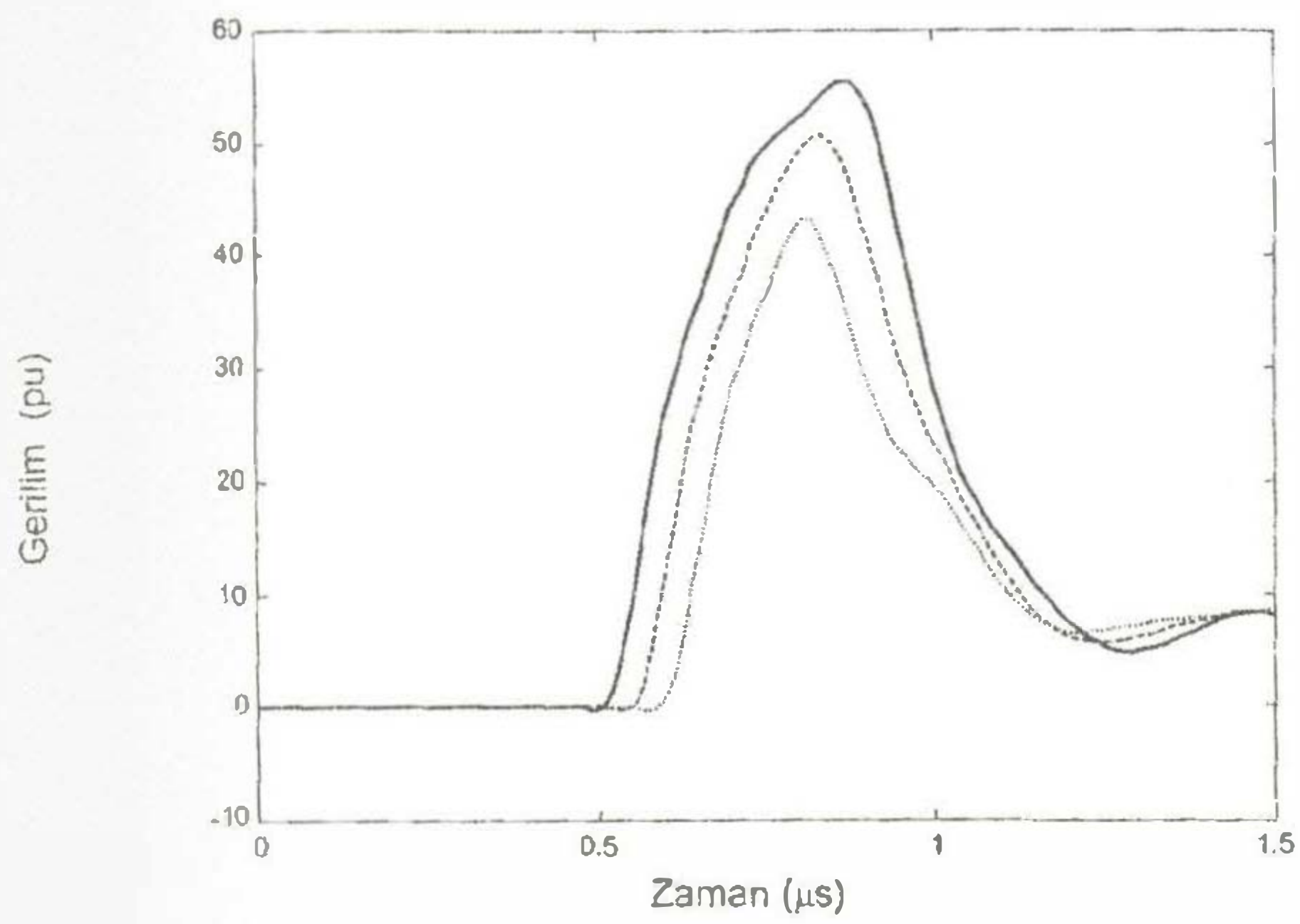
$$f_{cc}^{kp}(t, a) = (e^a / t) \left[\sum_{n=1}^{k-1} F_n + (1/2^{p+1}) \sum_{n=0}^p A_{pn} E_{k+n} \right] \quad (12)$$

burada:

$$F_n = (-1)^n \text{Im} F \{ [a + j(n - 0.5)\pi] / t \} \quad (13)$$

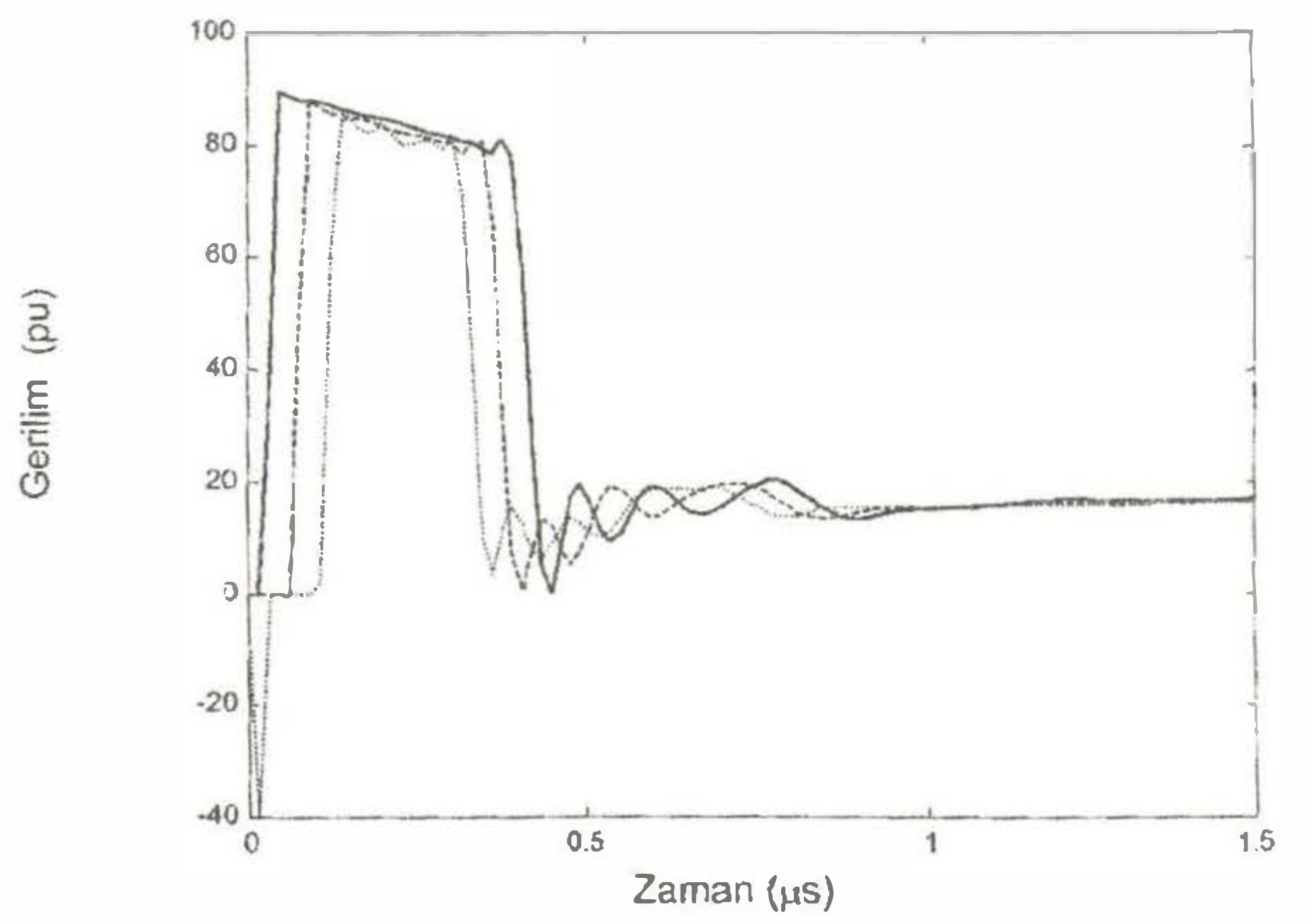


(a)

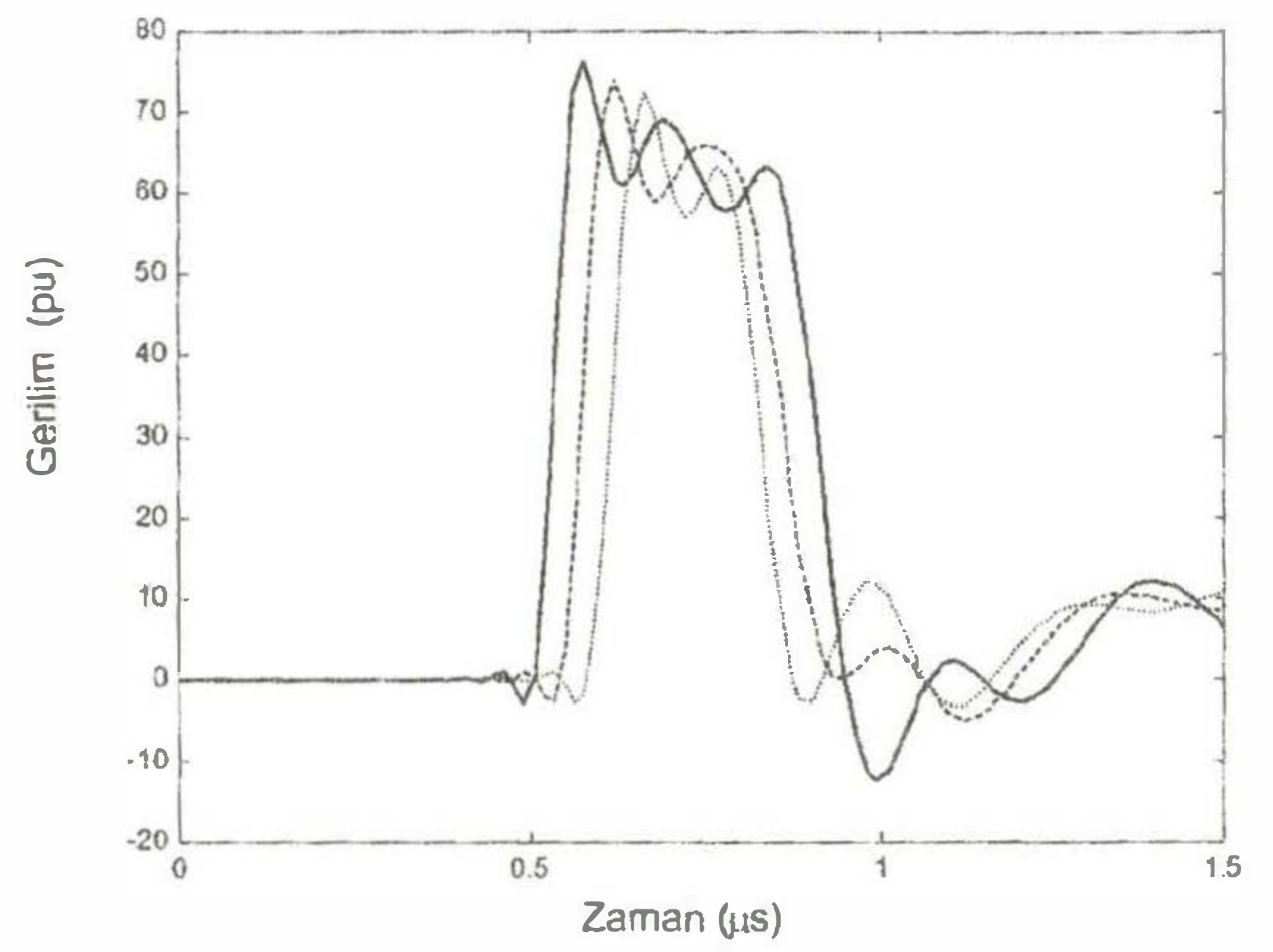


(b)

Şekil 2. Çift üssel yıldırım akımı için, direğin faz iletken konumlarındaki gerilimler
a) Yıldırımın direğin tepesine düşmesi,
b) Yıldırımın toprak iletkenini ortasına düşmesi.
— A fazı konumu, --- B fazı konumu, - - - C fazı konumu

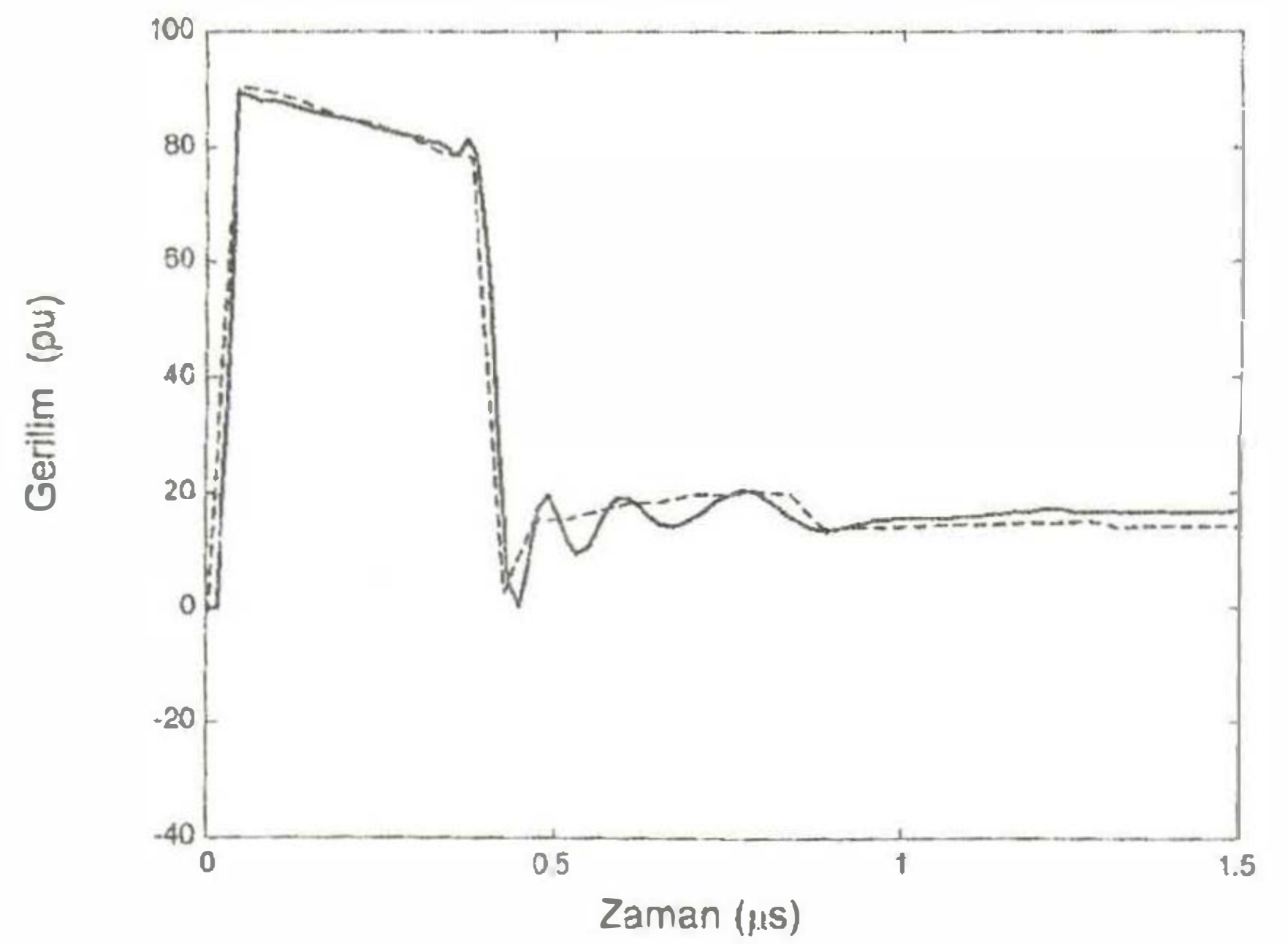


(a)

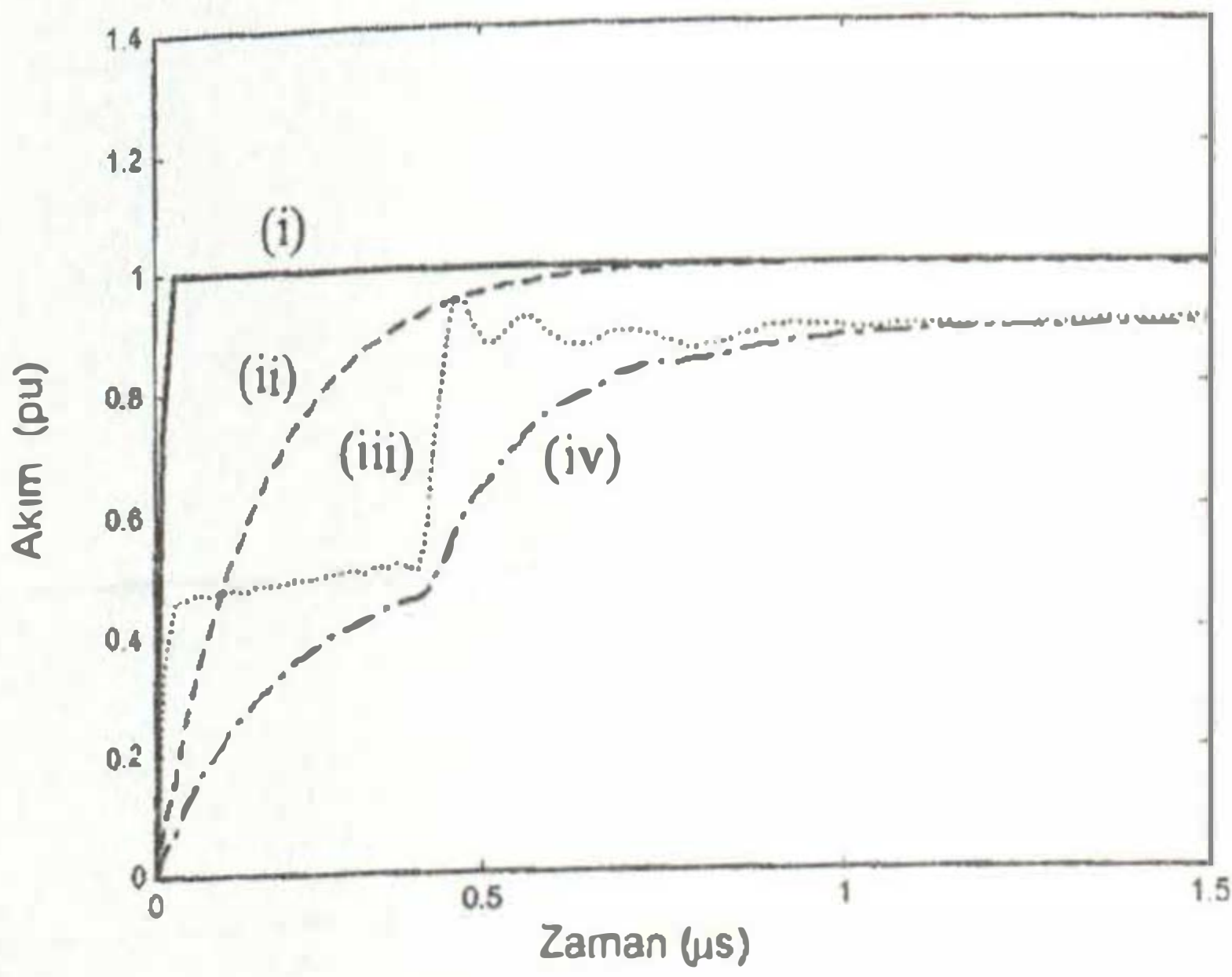


(b)

Şekil 3. Basamak yıldırım akımı için, direğin faz iletken konumlarındaki gerilimler, a) Yıldırımın direğin tepesine düşmesi, b) Yıldırımın toprak iletkenini ortasına düşmesi.
— A fazı konumu, --- B fazı konumu, - - - C fazı konumu



Şekil 4. A faz konumundaki gerilimin EMTP ve s-domeni karşılaştırması, — s-domeni, --- EMTP



Şekil 5. Örnek 1 ve 2 için uygulanan yıldırım akım kaynağı ve hesaplanan direk akımları.

- (i) basamak akım kaynağı,
(ii) çift üssel akım kaynağı,
(iii) basamak akım kaynağı için direk akımı,
(iv) çift üssel akım kaynağı için direk akımı.

VI. SONUÇ

Direğin yıldırım dalgasına cevabı, hem elektrik direği hem de toprak iletkeni için uniform olmayan hat modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Sınır koşullarının kullanılmasıyla s-domenindeki toplam sistem cevabı bulunmuştur. Frekans domeninden zaman domenine geçiş için Hızlı Ters Laplace Dönüşümü (Fast Inverse Laplace Transform) kullanılmıştır. Rampa ve çift üssel yıldırım akım şekillerinin uygulanmasıyla direk üzerinde fazlara karşılık gelen noktadaki gerilimler hesaplanmıştır. s-domeni ve EMTP sonuçları birbirine benzer olup, önceden yapılan deneysel ve teorik çalışmalarla da uyumaktadır. Fazlar üzerinde indüklenen gerilimler de hesaplanırsa, izolatörlere düşen gerilim doğru olarak hesaplanabilir ve bu gerilime uygun izolatörleri seçmek mümkün olur. Yöntem, faz iletkenlerinin etkisini göz önüne alacak şekilde geliştirilecektir.

KAYNAKLAR

- [1]Kawai, M., Studies of the surge response on a transmission tower, IEEE Trans., PAS-83, (1), pp. 30-34, (1964).
[2]Nguyen, H.V., Dommel, H.W. ve Marti, J.R., Modelling of single-phase nonuniform transmission lines in electromagnetic transient simulations, IEEE Trans., PWRD-12, (2), pp. 916-921, (1997).
[3]Alfuhaid, A.S., Oufi, E.A. ve Saied, M. M., Application of nonuniform-line theory to the simulation of electromagnetic transients in power systems, Electrical Power & Energy Systems, 20, (3) pp. 225-233, (1998).
[4]Mamiş, M.S. ve Köksal, M. Transient analysis of nonuniform lossy transmission lines with frequency

dependent parameters, Electric Power System Research, 52, (3), pp. 223-238, (1998).

[5]Mamiş, M.S. ve Köksal, M., Computation lightning overvoltages using nonuniform, single-phase line model, 3rd Int. Conference on Power System Transients IPST'99, Haziran 20-24, Budapeşte Macaristan, pp. 405-409, (1999).

[6]Mamiş M. S., ve Köksal. M., Lightning surge analysis using nonuniform, single-phase line model, IEE Proc Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 1, Ocak, (2001).

[7]Kaygusuz A., Mamiş M. S., ve Akın E., s-domain analysis of lightning surges on transmission towers, First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering(TPE), 23-25 Nisan Bakü, Azerbaycan, (2002).

[8]Saied, M.M., Alfuhaid, A.S. ve Elshandwily, M.E., s-Domain analysis of electromagnetic transients on nonuniform lines, IEEE Trans., PWRD-5, (4), pp. 2072-2083, (1990).

[9]Oufi, E.A., Alfuhaid, A.S. ve Saied, M.M. Transient analysis of lossless single-phase nonuniform transmission lines, IEEE Trans., PWRD-9, (3), pp. 1694-1701, (1994).

[10]Hosono, T., Numerical inversion of Laplace-transform and some applications to wave optics, Radio Sci., 16, pp. 1015-1019, (1982).

[11]Almeida, M.E. ve Correia De Barros, M.T.: 'Tower modelling for lightning surge analysis using Electro-Magnetic Transients Program', IEE Proc. C., 141, (6), pp.637-639 (1994).

[12]Guile, A.E. ve Paterson W., Electrical Power Systems, Volume I, Pergamon Press, Oxford, İngiltere, 2. baskı (1982).

[13]Menemenlis, C. ve Chun, Z.T. Wave propagation on nonuniform lines, IEEE Trans., PAS-10, 1 (4), pp. 833-839, (1982).

[14]Ishii, M ve diğ., Multistory transmission tower model for lightning surge analysis, IEEE Trans. On Power Del., vol. 6, no. 3, pp. 1327-1335, Temmuz (1991).

[15]Ishii, M., ve Baba, Y., Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response, IEEE Trans. On Power Del., vol. 12, no. 1, pp. 483-488, Ocak, (1997).

[16]Baba, Y., ve Ishii, M., Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 15, no.3, pp. 1010-1015, Temmuz, (2000).

[17]Baba, Y., ve Ishii, M., Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14, no.2, pp. 630-635, Nisan (1999).

[18]Sargent, M. A. ve Darveniza, M., Tower surge impedance", IEEE Trans., PAS-88, (5), pp. 680-687, (1969).