

YATAY VE DİKEY İLETKENLERİN YILDIRIM DALGASI CEVABI

M. Salih MAMIŞ¹ Murat AKÇİN² Asım KAYGUSUZ³

^{1,3}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi
İnönü Üniversitesi, 44069, Malatya

²Türk Telekomünikasyon A. Ş. İşletme Dairesi Başkanlığı
Santraller Müdürlüğü, 06103, Ankara

¹ e-posta: smamis@inonu.edu.tr ² e-posta: murat.akcin@telekom.gov.tr
³ e-posta: akaygusuz@inonu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Nonuniform hat, Laplace Dönüşümü, Yıldırım Analizi

ÖZET

Bu çalışmada yatay ve dikey iletkenlere yıldırım düşmesi nedeniyle oluşan gerilimler ters Laplace dönüşümü kullanılarak analiz edilmiştir. Dikey iletkenler karakteristik empedansı nonuniform olarak değişen iletim hatları olarak modellenmiştir.

1. GİRİŞ

Enerji iletim sistemlerinde hatlara ve direklere düşen yıldırımlar normal şebeke geriliminin çok üzerinde aşırı gerilimler oluşturmaktadır. Bu gerilimler iletim hatlarında izolatör kırılması ve hat kopması gibi istenmeyen sonuçlara sebebiyet vermektedirler. Ayrıca, çevresinde bulunan diğer iletkenlerde elektromanyetik etkileşim nedeniyle gerilim endükleyebilmektedir. İletim hatlarında yıldırım düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilimlerin tespit edilmesi hatların korunması ve meydana gelecek zararların en aza indirilmesi için önemlidir. Enerji iletim hatlarının matematik modellerinin nümerik metotlarla bilgisayar programları kullanılarak çözümünden elde edilen sonuçlar meydana gelen gerilimler hakkında bilgi vermekte ve aşırı gerilimlere karşı koruma sağlanması için gerekli önlemlerin alınabilmesine imkan vermektedir.

Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen kısa devre olaylarının en önemli nedenlerinden biri iletim hatlarına, koruma iletkenlerine ve direklere düşen yıldırımlardır. Yıldırım dalgalarının etkisini ortadan kaldırmak için koruma iletkenleri ve parafudrlar kullanılmakla birlikte, uygulamada her iki durumun karşılaştığı sorunlar mevcuttur [1].

Bu çalışmada enerji iletim sistemlerine yıldırım düşmesi sonucu oluşan geçici rejimler analiz edilmiştir. İletim hatları matematiksel olarak s-domaininde modellenmiş ve Matlab programı yardımıyla hızlı ters Laplace dönüşümü kullanılarak, yıldırımın yatay ve dikey iletkenlere düşmesi durumları için bilgisayar simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yıldırım akımı iki ayrı biçimde; hızlı yükselme zamanına sahip rampa fonksiyonu ve ayrıca çift katlı üssel fonksiyonla ifade edilmiştir.

Yıldırımın dikey bir iletkene düşmesi durumunda yıldırım yolu empedansı (kaynak empedansı) ve iletken topraklama direncinin iletkenin tepe noktasında meydana gelen gerilimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Dikey iletkenler için nonuniform hat modeli kullanılmıştır.

2. NONUNIFORM HAT MODELİ

Yıldırım darbesi analizi için elektrik direkleri gibi dikey konumdaki iletkenler nonuniform hat olarak modellenir. Nonuniform iletim hatlarının modellenmesi ile ilgili değişik yöntemler önerilmiştir. Bazı modeller, EMTP adı verilen elektromanyetik geçici rejim analiz programlarında kullanılmak üzere hazırlanmıştır [2,3]. Diğer bazı simülasyon tekniklerinde ise Laplace dönüşümü kullanılarak nonuniform iletim hatlarının geçici rejimleri incelenmiştir [4-6].

Parametrelerin değişimi bazı sınırlı sayıdaki fonksiyonlar dışında olan nonuniform hatlar için analitik çözüm bulmak mümkün değildir. Bu nedenle nonuniform iletim hatlarının Şekil 1' de gösterildiği gibi eşit uzunluktaki uniform hatların ardışık bağlantısı şeklinde düşünülmesi mümkündür [5]. Bu modelleme tekniği ile hat kayıpları ve iletkenlerin frekans bağımlı durumlarını da dikkate almak mümkün olmaktadır. Uniform olmayan hattın uç denklemleri ve böyle bir hattı kapsayan sistemin cevabı kolaylıkla bulunabilir [5].

Nonuniform hattın i . bölümünün {ABCD} parametrelili denklemi

$$\begin{bmatrix} V_{Si} \\ I_{Si} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Cosh} \gamma_i l_i & Z_0 \text{Sinh} \gamma_i l_i \\ Z_0^{-1} \text{Sinh} \gamma_i l_i & \text{Cosh} \gamma_i l_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ri} \\ I_{Ri} \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $Z_{0i} = \sqrt{Z_i / Y_i}$ i . bölümün karakteristik empedansı, $\gamma_{0i} = \sqrt{Z_i Y_i}$ i . bölümün yayılım katsayısı ve l_i ise $x = x_i$ 'den başlayıp $x = x_{i-1}$ 'de biten bölümün uzunluğudur. $Z_i = r_i + sl_i$

i . bölüm seri empedansı ve $Y_i = g_i + sc_i$ aynı bölümün şönt admittansdır.

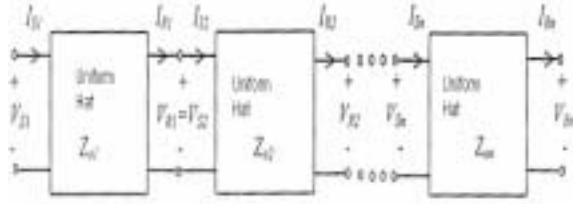
Hattın uniform olmayan yapısı için $\{A,B,C,D\}$ matris sabitleri, hattın bölünen her bir uniform modelin uç denklemlerindeki katsayı matrislerinin çarpımı ile aşağıdaki biçimde hesaplanır:

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

Böylece, parametreleri nonuniform değişimli bir iletim hattının uç denklemleri

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

olarak bulunur. s -domenindeki sistem cevabı ters Laplace dönüşümü ile zaman domenine dönüştürülebilir [7].



Şekil 1. Uniform hatların seri bağlantısı ile elde edilen nonuniform iletim hattı modeli.

3. UYGULAMA

Örnek 1:

Bu uygulamada yıldırımın dikey bir iletkenine düşmesi halinde, iletkenin uniform ve nonuniform olarak modellenmesinin ve yıldırım yolu empedansı ile iletken topraklama direncinin iletkende meydana gelen gerilimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yıldırım akımı olarak, 20 ns yükselme zamanına sahip bir rampa fonksiyonu alınmıştır. İletkenin uzunluğu 15 m, yarıçapı 25.5 mm'dir. Yıldırım dalgasının yayılım hızı ışık hızına eşit alınmıştır (3×10^8 m/s). Şekil 2'de yıldırımın iletkenin tepe noktasına düşmesi halinde meydana gelen gerilimlerde, uniform hat modeli ve uniform olmayan hat modeli kullanılması etkisi görülmektedir. Nonuniform hat modelinin etkisinin dalga biçimi ve tepe değeri üzerindeki etkisinin büyük olduğu görülmektedir.

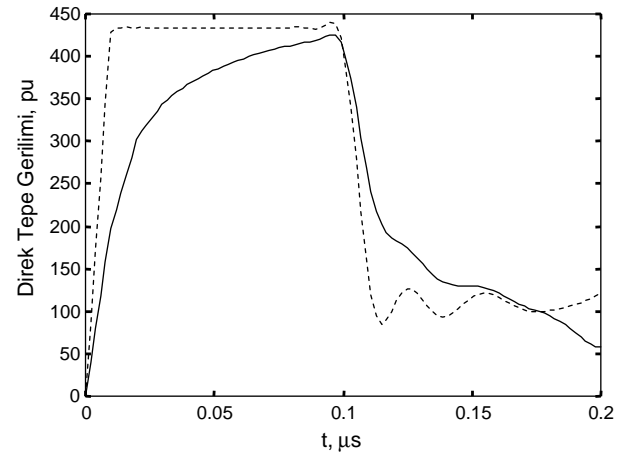
Şekil 3'de yıldırımın iletkenin tepesine düşmesi durumunda meydana gelen gerilimin değişimi verilmiştir. İletken, karakteristik empedansları farklı olan 10 uniform hattın seri bağlantısı olarak düşünülmüştür. Bu şekildeki eğrilerde yıldırım yolu empedansı $Z_S = 450 \Omega$ de sabit tutularak iletkenin topraklama direncinin etkisi incelenmiştir. Bu inceleme sırasında iletken topraklama direnci sırasıyla 0, 20, 70 ve 100Ω olarak alınmıştır. Meydana gelen gerilimin değişimi incelendiğinde, iletken topraklama direnci Z_f 'in değeri azaldıkça topraktan yansıyan yıldırım dalgasının meydana getirdiği gerilim de bununla orantılı olarak azaldığı görülmektedir. İletken topraklama direncinin etkisi 100 ns'den sonra ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeni yıldırım dalgasının iletkenin en alt noktasına ulaşarak geri yansıması ve

yaklaşık 100 ns'de tekrar hat başına ulaşmış olmasındandır. Elde edilen sonuçlardan, dikey bir iletkenin tepe noktasına yıldırım düştüğünde iletken topraklama direnci ne kadar az olursa, meydana gelen akımın daha hızlı bir şekilde toprağa aktığı ve yıldırım dalgasının etkisinin de o oranda azalacağı görülmektedir.

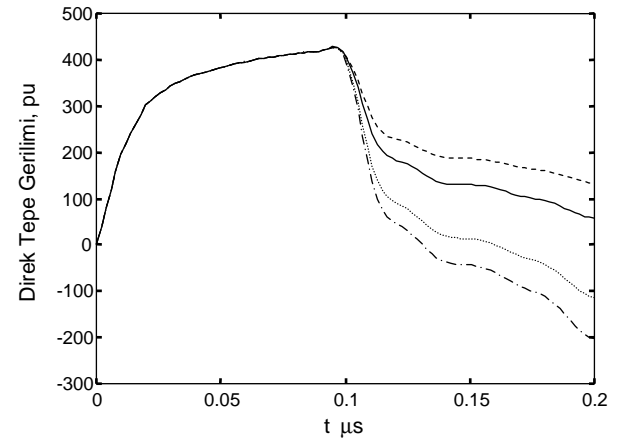
Şekil 4'te iletkenin tepe noktasına yıldırım düştüğünde kaynak empedansının meydana gelen gerilim üzerindeki etkileri incelenmiştir. İletken topraklama direnci $Z_f = 70 \Omega$ alınarak yıldırım yolunun empedansı yani kaynak empedansı Z_S sırasıyla 600, 450 ve 200Ω alınmıştır.

Şekil 5 ve Şekil 6'da yıldırımın iletkenin tepesine düşmesi durumunda meydana gelen gerilim ve iletken tepe akımının, dikey iletkenin Wagner-Hileman [8] modeli ile elde edilen sonuçları görülmektedir.

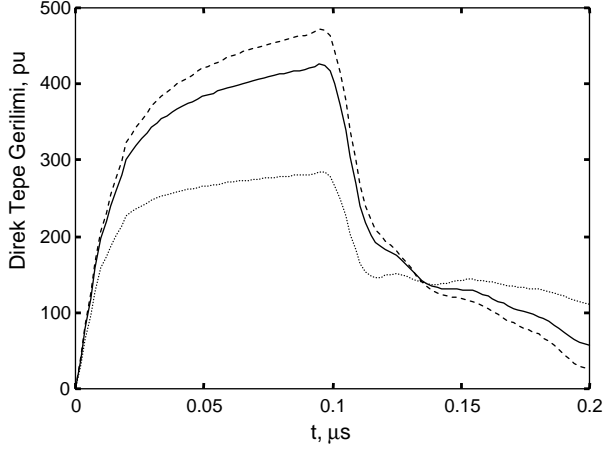
Şekil 7'de ise $Z_f = 70 \Omega$, $Z_S = 450 \Omega$ alınarak, yıldırımın değişik uzunluktaki iletkenlere düşmesi durumu için iletkenin tepesinde oluşan gerilimler verilmiştir.



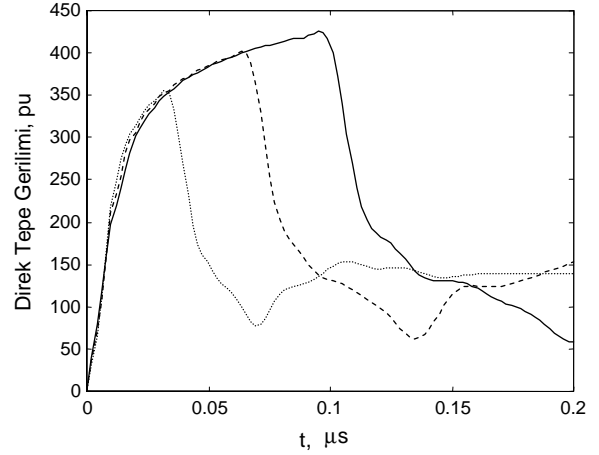
Şekil 2. Uniform ve nonuniform hat modelinden elde edilen sonuçlar. (---) Uniform hat modeli, (—) Nonuniform hat modeli.



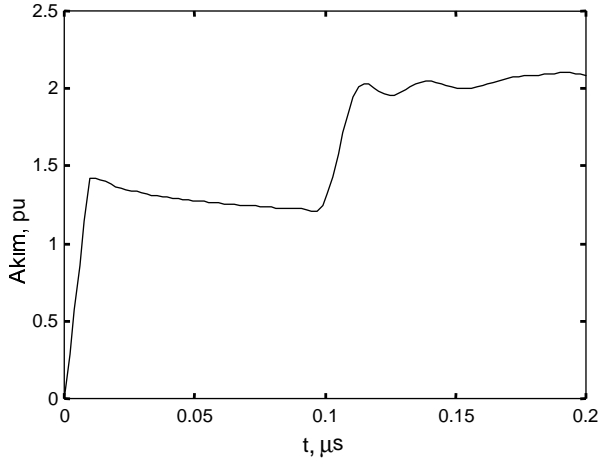
Şekil 3. Direk topraklama direncinin etkisi, $Z_S = 400 \Omega$
 (---) $Z_f = 100 \Omega$, (—) $Z_f = 70 \Omega$,
 (.....) $Z_f = 20 \Omega$, (-.-) $Z_f = 0 \Omega$.



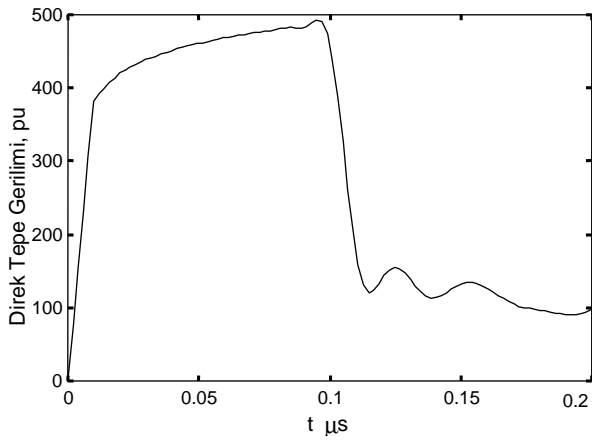
Şekil 4. Kaynak empedansının etkisi, $Z_f = 70 \Omega$,
(---) $Z_S = 600 \Omega$, (—) $Z_S = 450 \Omega$, (.....) $Z_S = 200 \Omega$.



Şekil 7. $Z_f = 70 \Omega$, $Z_S = 450 \Omega$ olması durumunda,
direk tepe geriliminin uzunluğa bağlı değişimi.
(—) $h = 15 \text{ m}$, (---) $h = 10 \text{ m}$, (.....) $h = 5 \text{ m}$.



Şekil 5. İletkenin Wagner-Hileman modeli ile elde edilen akımı.



Şekil 6. İletkenin Wagner-Hileman modeli ile bulunan gerilimi.

Örnek 2:

Bu örnekte tek fazlı bir iletim hattının ortasına yıldırım düşmesi durumunda oluşan aşırı gerilimler incelenmiştir. İletim hattı 10 km uzunluğunda olup hat parametreleri $R=0.07 \Omega/\text{km}$, $L=1.59 \text{ mH}/\text{km}$ ve $C=7 \text{ nF}/\text{km}$ dir. İletkenin yarıçapı $r_c=1.41 \text{ cm}$, iletkenin yerden yüksekliği $h=20 \text{ m}$ olarak alınmıştır. Yıldırım akımı çift katlı üssel fonksiyonla $(i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}))$ ifade edilmiştir. Burada $\alpha = 1.4659 \times 10^4$ ve $\beta = 2.4689 \times 10^6$ değerindedir. Yıldırımın hat ortasına düştüğü varsayılmış kaynak empedansı $Z_S = 200 \Omega$ alınmıştır.

Hat ortasındaki gerilimin s-domenindeki ifadesi;

$$V_S = \frac{a}{b} I \quad (4)$$

şeklinde olup $a = \frac{Z_0}{\text{Sinh} \gamma l}$, $b = \frac{1}{\text{Cosh} \gamma l} + \frac{Z_0}{2Z_S \text{Sinh} \gamma l}$ olarak elde edilmiştir. Bu durumda hat sonu gerilimi;

$$V_R = \frac{V_S}{\text{Cosh} \gamma l} \quad (5)$$

olarak elde edilebilir.

s-domeni analizi ile elde edilen yıldırımın düştüğü nokta ile hat sonu gerilimlerinin değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yıldırım dalgasının hat sonuna ulaşması bir zaman gecikmesi ile olmuştur. Bu gecikme teorik değer $\tau = (l/2)/v = 16.7 \mu\text{s}$ ($v = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) ile uyumludur.

Hat sonunda oluşan gerilimin tepe değeri 220 p.u. dur. Yıldırımın düştüğü noktada gerilim yaklaşık olarak 110 p.u. değerine ulaştıktan sonra $t=34 \mu\text{s}$ 'de yaklaşık olarak 75 p.u. değerine düşmekte ve bu noktadan sonra negatif yansıma olmaktadır. Bu nedenle gerilim değeri 175 p.u. değerine ulaşacaktır. Hat sonu gerilimi incelendiğinde yıldırım dalgasının hat sonuna ulaşması bir zaman gecikmesi ile olmaktadır. Bu gecikmenin yukarıda belirttiği üzere teorik değer ile uyumlu olduğu görülmektedir. Hat sonu gerilimi $t=17$

μs 'de yaklaşık 220 p.u. değerine ulaşmakta ve $t=50$ μs 'de 145 p.u. değerine düşmektedir.

Yıldırımın bir faza düşmesi halinde, düşme noktasından itibaren her iki yönde ilerleyen birer yürüyen dalga meydana gelir. Dalgaların şekli yıldırım boşalmasındaki akım şekline benzer, yani yıldırım akımı

$$i(t) = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

şeklinde olduğuna göre yürüyen gerilim dalgaları da

$$u(t) = \frac{1}{2} Z \cdot i(t) = \frac{1}{2} Z I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) = U_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

şeklinde olacaktır. Bu formülden görüleceği üzere $e^{-\alpha t}$ pozitif taraftan azalan, $-e^{-\beta t}$ negatif taraftan azalan fonksiyondur ve toplamı çift üssel fonksiyonu vermektedir. Dolayısı ile Şekil 8'de görülen değişimin teorik olarak da sağlandığı açıktır.

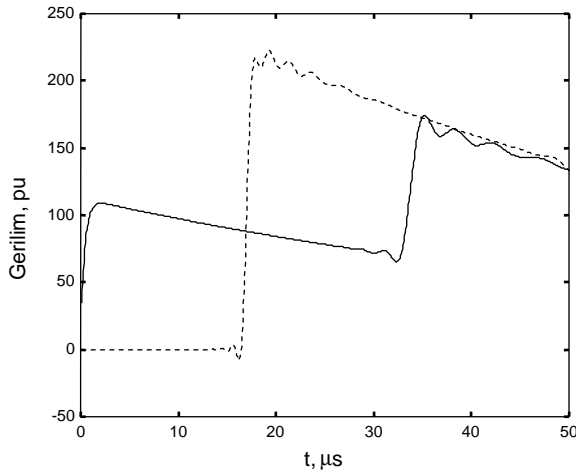
Şekil 9'da yıldırımın düştüğü noktadaki gerilimin frekans bağımlı ve frekans bağımsız olma durumları için değişimleri görülmektedir.

4. SONUÇ

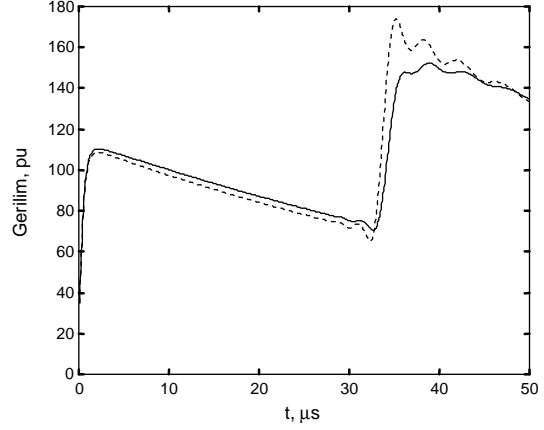
Bu çalışmada, yatay ve dikey konumdaki iletim hatlarının yıldırım dalgası cevabı bulunmuştur. Dikey iletkenler için uniform olmayan hat modeli kullanılmıştır. Yıldırım yolunun ve toprak empedansının etkisi ile frekans bağımlılık ve nonuniform model kullanımının etkileri incelenmiştir. Ayrıca değişik uzunluktaki dikey iletkenlerde yıldırımın oluşan aşırı gerilimler bulunmuştur.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın bir bölümü İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 99/15 Nolu proje kapsamında desteklenmiştir



Şekil 8. Laplace dönüşümü ile elde edilen gerilimler.
(-----) Hat sonu gerilimi,
(—) Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilim.



Şekil 6.9. Yıldırımın düştüğü noktadaki gerilimin değişimi.

(—) Frekans bağımlı hat modeli,
(-----) Frekans bağımlı olmayan hat modeli.

KAYNAKLAR

- [1] Greenwood A., Electrical Transients in Power Systems, JOHN WILEY & SONS, INC., pp.463-490, 1991.
- [2] Almeida M. E., Correia De Barros M. T., Tower modelling for lightning surge analysis using Electro-Magnetic Transient Program, IEE PROC.-GENER, TRANSM. DISTRIB., Vol. 141, No.6, 1994.
- [3] Ishii M., Baba Y., Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response, IEEE TRANS. ON POWER DEL., vol. 12, no. 1, pp. 483-488, 1997.
- [4] Akçin, M., Enerji iletim sistemlerinde yıldırım geçici rejimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi FBE, 2002.
- [5] Mamiş M. S., Köksal M., Lightning surge analysis using nonuniform, single-phase line model, IEE PROC.-GENER. TRANSM. DISTRIB., Vol. 148, No. 1, 2001.
- [6] Kaygusuz A., Mamiş M. S., Akın E., s-domain analysis of lightning surges on transmission towers, FIRST INT. CONF. ON TECHNICAL AND PHYSICAL PROBLEMS IN POWER ENG. (TPE), Bakü, Azerbaycan, 2002.
- [7] Hosono T., Numerical inversion of Laplace-transform and some applications to wave optics, RADIO SCI., pp. 1015-1019, 1982.
- [8] Wagner C. F., Hileman A. R., A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines III-A simplified method: stroke to tower, IEEE TRANS., PAS-79, pp. 589-603, 1960.