



## Investigation of Overvoltage Effects on Poles in Case of Lightning Striking Different Points in 154 kV Double Circuit Pylon Overhead Transmission Lines

Bezza Nur Özdamar<sup>1,a,\*</sup>, Mustafa Şeker<sup>2,b</sup>, Melih Yahya Gülkaya<sup>3,c</sup>, Büşra Deliser<sup>4,d</sup>

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, Sivas, 58140, Türkiye

<sup>2</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Bölümü, Elektrik Makinaları Anabilim Dalı, Sivas, 58140, Türkiye

<sup>3</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, Sivas, 58140, Türkiye

<sup>4</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, Sivas, 58140, Türkiye

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 25/12/2024

Accepted: 26/12/2024

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

#### Süreç

Geliş: 25/12/2024

Kabul: 26/12/2024

### ABSTRACT

Lightning strikes cause significant damage to electrical power systems. High voltage poles and transformers are equipped with protective earthing to protect them from such effects. In overhead transmission lines, lightning usually strikes the protective conductor or the pole. When the transmission line is affected by the lightning strike, the lightning-induced current reaches the ground through the grounding system of the pole. However, in this case, high voltages are generated due to the grounding resistance on the pole. If this voltage level exceeds the impulse voltage resistance of the insulators, damage to the insulators is inevitable. Therefore, it is vital to accurately determine the pole grounding resistance in high voltage transmission lines. The overvoltages that may occur in the protection conductor and the carrier pole in case of lightning strikes on transmission lines with pylon poles, which are frequently used in 154 kV power transmission lines in Turkey, were investigated using Alternative Transients Program (ATP) software. In the study, the pylon pole is modelled non-uniformly. The waveform of the lightning current is represented by the Heidler function with a pulse of 1.2/50  $\mu$ s.

**Keywords:** Alternative Transient Program (ATP); Tower Earth Resistance; Overhead Transmission Line; Pylon Tower; Lightning Overvoltages

## 154 kV Çift Devre Pylon Direkli Havai İletim Hatlarında Farklı Noktalara Yıldırımın Düşmesi Durumunda Direkler Üzerindeki Aşırı Gerilim Etkisinin İncelenmesi

### Öz

Yıldırım çarpmaları, elektrik güç sistemlerinde önemli hasarlara yol açmaktadır. Yüksek gerilim direkleri ve transformatörleri, bu tür etkilerden korunmak amacıyla koruma topraklaması ile donatılmaktadır. Havai iletim hatlarında yıldırım genellikle koruma iletkenine ya da direğe isabet eder. İletim hattı yıldırım darbesinden etkilendiğinde, yıldırımdan kaynaklanan akım direğin topraklama sistemi üzerinden toprağa ulaşır. Ancak bu durumda direk üzerinde bulunan topraklama direnci sebebiyle yüksek gerilimlerin oluşması durumu ortaya çıkmaktadır. Eğer bu gerilim seviyesi, izolatörlerin darbe gerilim dayanımını aşarsa izolatörlerin zarar görmesi kaçınılmazdır. Bu yüzden yüksek gerilim iletim hatlarında direk topraklama direncinin doğru bir şekilde belirlenmesi hayati önem taşır. Türkiye'deki 154 kV enerji nakil hatlarında sıkça kullanılan pylon direkli iletim hatlarına yıldırım çarpması durumunda koruma iletkeni ve taşıyıcı direkte oluşabilecek aşırı gerilimler Alternative Transients Program (ATP) yazılımı aracılığıyla incelenmiştir. Yapılan çalışmada pylon direk üniform olmayan bir şekilde modellenmiştir. Yıldırım akımının dalga şekli, 1/40  $\mu$ s'lik bir darbe ile Heidler fonksiyonu yardımıyla temsil edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Alternatif Transient Program (ATP); Direk Toprak Direnci; Havai İletim Hatları; Pylon Direk; Yıldırım Aşırı Gerilimler

<sup>a</sup> beyzasknur@gmail.com

<sup>b</sup> 0000-0002-6617-1131

<sup>b</sup> mustafaseker@cumhuriyet.edu.tr

<sup>b</sup> : 0000-0002-3793-8786

<sup>c</sup> 20239233007@cumhuriyet.edu.tr

<sup>c</sup> 0009-0007-5289-325X

<sup>d</sup> De-li-der@hotmail.com

<sup>d</sup>

## GİRİŞ

Yıldırım, bulut ile yeryüzü arasındaki gerilim farkının atmosferin dayanamayacağı bir seviyeye ulaşmasıyla oluşan bir elektrik boşalmasıdır [1]. Yıldırım çarpmalarının oldukça yüksek yıldırım akımına neden olabileceği araştırmacılar tarafından ele alınmıştır. Bu araştırmalar sonucunda, yıldırım akımlarının tepe değerlerine bağlı olarak “kümülatif olasılık dağılımları” tanımlanmıştır [2]. Kümülatif olasılık dağılımlarına göre, yıldırım akımları 30 kA’i aşarak 100 kA’e kadar çıkabilir. Ancak, yıldırım akımının 100 kA’den fazla olma ihtimali düşüktür [2].

Yüksek gerilim havai iletim hatlarının direkleri ve transformatörleri, yıldırım çarpmasına karşı koruma topraklaması ile donatılmıştır. Başka bir koruma sistemi bulunmamaktadır [3]. Yıldırım, yüksek gerilim hatlarına isabet ettiğinde yıldırım akımı direk topraklama direnci aracılığıyla toprağa geçer. Oluşan akım, direk topraklama direnci sebebiyle direkte oldukça yüksek bir gerilim oluşturur. Eğer bu gerilim, izolatörlerin dayanabileceği gerilimden fazla olursa, izolatörler hasar görür ve elektrik kesintilerine yol açar (Kaygusuz, Mamiş, and Akin 2003). Yüksek gerilim havai hat direklerine yüksek akımlı yıldırımların çarpması sık rastlanan bir olaydır. Ayrıca yıldırım çarpması olayı, yıldırımın faz iletkenlerine ya da koruma iletkenine düşmesi şeklinde de gerçekleşebilir. Fakat üç durum içinde yıldırım aşırı gerilimleri iletim hatlarında normal değerden daha fazla yüksek gerilim artışlarına yol açar [5][6]. Yıldırım çarpmaları genelde yıldırımın koruma iletkenine düşmesiyle ya da iletim hattının taşıyıcı direğine düşmesiyle meydana gelmektedir.

Yıldırım aşırı gerilimlerinin oluşması elektrik iletim hatlarında çok yüksek voltajlara neden olur ve bu da elektrik sistemine bağlı diğer cihazların hasar görmesine veya bozulmasına sebep olur [7]. Özellikle güç transformatörleri, yıldırım aşırı gerilimlerinden etkilenecek izolasyonlarında sorunlar yaşayabilir. Bu yüzden, yıldırım aşırı gerilimlerinin elektrik iletim hatlarında bıraktığı etkileri analiz etmek güç sistemlerinin istikrarını sağlamak için çok önemli bir konudur.

Yıldırım aşırı gerilimlerin laboratuvar ortamında nasıl oluştuğunu ve nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemek hem çok zor hem de çok pahalıdır. Bu nedenle, bu konuda çalışan araştırmacılar için çeşitli simülasyon programları geliştirilmiştir. Bu programlar sayesinde, yıldırım çarpması sonucu oluşan aşırı gerilimlerin analizi yapılabilir. Ancak, doğru bir şekilde analiz yapabilmek için yıldırım dalgasının şekli, elektrik hattının özellikleri, direklerin ve izolatörlerin modelleri gibi elektrik sistemine ait unsurların doğru bir şekilde modellenmesi şarttır. Dommel’in çalışmalarına dayanan Alternative Transients Program (ATP), elektrik sistem unsurlarının modellenmesine imkan vermektedir ve elektrik sistemlerinin araştırılmasında sıkça tercih edilmektedir [8] [9].

Yıldırım akımı ve gerilimi dalga formlarını belirlemek için Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından belirlenen standartlar kullanılır. IEC standartlarına göre, yıldırım akımı dalga formu 10/350  $\mu$ s ve 8/20  $\mu$ s olarak tanımlanır. Bu değerler, akımın maksimum değerine ulaşması için gereken süre ve akımın maksimum değerinin yarısına düşmesi için gereken süre olarak yorumlanır (IEC

Standartları, 61643-11). IEC standartlarına göre yıldırım geriliminin dalga şekli 1.2/50  $\mu$ s olarak tanımlanır. Bu değer, gerilimin maksimum değerine ulaşması için gereken süre ve gerilimin maksimum değerinin yarısına düşmesi için gereken süre olarak yorumlanır (IEC Standartları, 61000-4-5).

İletim hatlarının farklı özelliklerini tanımlamak için PI ve J. Marti gibi modeller kullanılmaktadır. PI model, kısa iletim hatları için basit bir modelleme sunmaktadır. J. Marti model ise, uzun iletim hatlarının daha gerçekçi bir şekilde modellenmesi için uygundur ve iletim hatlarının yüksek frekans davranışlarını dikkate alır [10].

Elektrik direkleri ve iletim hatlarının analizi için elektromanyetik alan etkisinden yararlanılmıştır. Direklerin geometrik yapısı, elektromanyetik alan etkisine göre tasarlanmıştır. Geometrik şekiller kullanılarak, elektrik direkleri için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Kawai, iletkenlerin karakteristik empedansı ile dalga boyunun nasıl ilişkili olduğunu göstermiştir [11]. Chow ve arkadaşları, iletkenlerin karakteristik empedansları ve yayılma sabitleri üzerine araştırmalar gerçekleştirmişlerdir [12]. İlk zamanlar elektrik direkleri ve hatlarının modellenmesinde, direklerde bulunan koruma iletkeninin rolü göz ardı edilmiştir. Ishii ve arkadaşları ise koruma iletkenlerinin de direk modeline dahil edilmesi gerektiğini belirtmiş ve sayısal yöntemler kullanarak çok katlı direk modelini oluşturmuşlardır [13].

Türkiye’de 2017 yılından bu yana 154 kV Enerji İletim Hatlarında oluşan arızaların endeksi 7,19 olarak hesaplanmıştır [14]. Yağışlı, şarjlı ve fırtınalı hava koşullarında normal hava koşullarına göre arızaların daha sık yaşandığı görülmektedir [15]. Yağışlı, şarjlı ve fırtınalı hava koşullarında ortaya çıkan arızaların büyük bir bölümü, yıldırım aşırı gerilimlerinin etkisinden dolayı meydana gelmektedir.

Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında yaygın olarak kullanılan pylon direkli iletim hattının yıldırım çarpmasına maruz kalması durumunda oluşan aşırı gerilimler bu çalışma kapsamında Alternative Transients Program (ATP) üzerinden analiz edilmiştir. Benzetimde, iletim hattı 5 direkten oluşmaktadır. Direğe, faz iletkenine ve koruma iletkenine yıldırım isabet ettiğinde, yıldırım düşen direkte ve yanındaki diğer iki direktteki izolatörlerde meydana gelen aşırı gerilimler incelenmiştir. Yıldırım darbesi, 1.2/50  $\mu$ s’lik 20 kA olarak yıldırım dalga formu biçiminde belirlenmiştir. Yıldırım akımının modellenmesinde Heidler fonksiyonu kullanılmıştır. Heidler fonksiyonunda yıldırım akımının maksimum değeri 20 kA olarak seçilmiştir [2]. J. Marti frekans bağımlı model kullanılarak iletim hattının karakteristiği belirlenmiştir [10]. Uniform olmayan direk modeli ile pylon direğin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İletim hattı direkleri için yıldırım akım darbesinin koruma iletkeni, direk gövdesi ve faz iletkenine düşmesi sonucu oluşan aşırı gerilimler araştırılmıştır. Direğin farklı noktalarına yıldırım akım darbesinin düşmesi sonucunda izolatörlerde oluşan aşırı gerilimlerin etkileri değerlendirilmiştir.

## Materyal ve Yöntem

İletim hattının yıldırım aşırı gerilimlerine karşı analizi için iletim hattının modellenmesinin doğru olarak yapılması gereklidir. İletim hattında bulunan iletkenlerin özellikleri, geometrik şekli, iletkenlerin yeryüzüne ve birbirlerine olan

uzaklıkları, iletim hattında kullanılan direğin şekli ve boyu gibi birçok faktör göz önüne alınmalıdır.

#### Eşdeğer Devre Modelinin Pilon Direk İçin Oluşturulması

Şekil 1’de Türkiye’de 154 kV iletim sistemlerinde tercih edilen pilon direğin parçaları gösterilmektedir. Pilon direklerde iki adet devre ve bir adet koruma iletkeni bulunmaktadır. Üç fazlı iletim sisteminde, iki devreye ait olan A-B-C fazları ve koruma iletkeni Şekil 2’deki gibi yerleştirilmiştir. Şekil 1’de verilen pilon direğin şekline ve yapısına göre, bu çalışma için kullanılan direk ölçüleri Tablo 1’de sunulmuştur. Pilon direğin direk modelinin oluşturulmasında üniform olmayan iletim hattı modeli

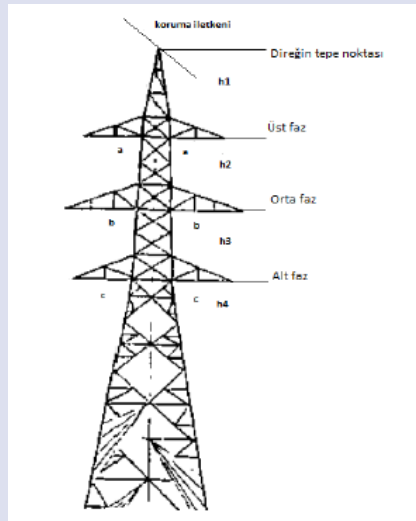
kullanılmıştır. Modelde direk eşit olacak şekilde bölümlere ayrılır ve bütün bölümler için karakteristik empedanslar seçilir. Bu durum üstel fonksiyon olarak Denklem (1)’de gösterilir [4].

$$Z_0(x) = 150 \cdot e^{q \cdot x} \quad (1)$$

Denklemde verilen  $q$  terimi direk yüksekliğine bağlı bir sabit olarak tanımlanır.  $X$  ise yerden olan yüksekliği ifade etmektedir. Tablo 1’de verilen ölçüler göz önüne alındığında direğin karakteristik empedansları, direğin üst bölgesinde 210  $\Omega$ , orta bölgesinde 200  $\Omega$  ve alt bölgesinde 150  $\Omega$  olarak belirlenmiştir.

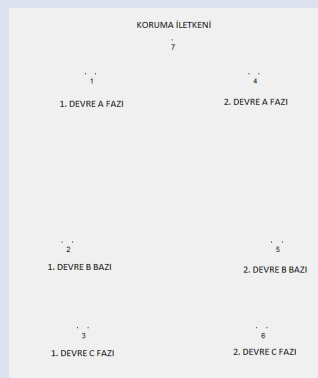
**Tablo 1.** Pilon direğin ölçüleri. **Table 1.** Dimensions of the pylon tower.

a	a'	f	h1	h2	h3	h (h1+h2+h3)
5.9m	5.9m	7.2m	3.85m	8m	15.15m	27m



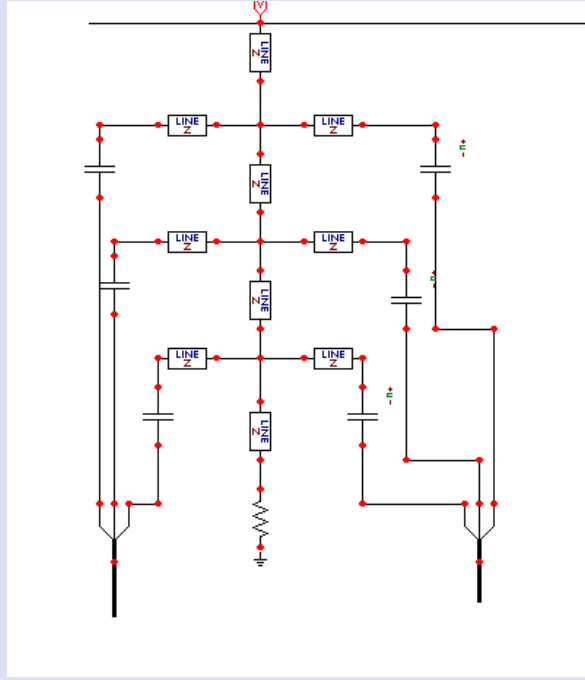
**Şekil 1.** Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında genel olarak seçilen pilon direğin bölümleri.

**Figure 1.** The sections of the pylon tower generally selected for 154 kV transmission lines in Türkiye.



**Şekil 2.** Pilon direk için fazlar ile koruma iletkeni arasındaki hat geometrisinin gösterimi.

**Figure 2.** Illustration of the line geometry between the phases and the shield (ground) wire for the pylon tower.



Şekil 3. Çift devre pylon direğin eşdeğer ATP devre modeli.

Figure 3. The equivalent ATP circuit model of the double-circuit pylon tower.

#### İletim Hattı İçin Karakteristik Değerler

Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında kardinal tip iletken çok sık ve verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada yapılan modellemede kardinal tipi iletken kullanılmıştır. 7N8 tipi iletken ise koruma iletkeni olarak belirlenmiştir. TEİAŞ’dan alınan verilere göre karakteristik

değerler Tablo 2’de verilmiştir. Şekil 2’de verilen hat geometrisine göre havai iletkenin nasıl yerleştirildiği Tablo 3’te gösterilmiştir. Bu tablodan yararlanarak J. Marti modelinin bileşenleri belirlenmiştir ve LCC iletim hattının modeli yapılmıştır.

Tablo 2. İletim hattı için karakteristik değerlerinin gösterimi.

Table 2. Presentation of the characteristic parameters for the transmission line.

İletken	Tip	İletken Çapı	Direnç(Ω/km)
Faz İletkenleri	Kardinal	30,35	0,0586
Koruma İletkeni	Koruma İletkeni	9,78	1,4625

Tablo 3. Şekil 3 baz alınarak havai iletkenlerin konfigürasyonu.

Table 3. Configuration of the overhead conductors based on Figure 3.

	Ph. No.	R <sub>in</sub>	R <sub>out</sub>	Resis	Horiz	Vtower	Vmid	Separ	Alpha	NB
#		[cm]	[cm]	[ohm/km DC]	[m]	[m]	[m]	[cm]	[deg]	
1	1	0.3505	1.517	0.0586	-3.2	29.35	24.2	40	0	2
2	2	0.3505	1.517	0.0586	-4.1	22.05	17.9	40	0	2
3	3	0.3505	1.517	0.0586	-3.5	17.9	14.9	40	0	2
4	4	0.3505	1.517	0.0586	3.2	29.35	24.2	40	0	2
5	5	0.3505	1.517	0.0586	4.1	22.05	17.9	40	0	2
6	6	0.3505	1.517	0.0586	3.5	17.9	14.9	40	0	2
7	7	0.2445	0.489	0.0586	0	29.35	26.2	0	0	0

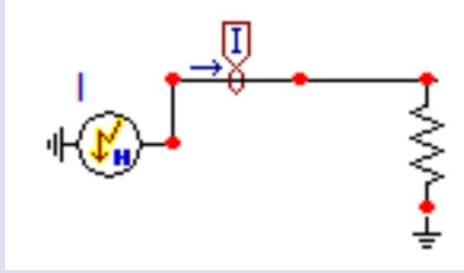
#### Yıldırım Dalga Şekli İçin Modelleme Yapılması

Simülasyonlarda kullanılacak yıldırım akımı ve gerilimi dalga formlarını belirlemek için IEC tarafından belirlenen ve kullanıma sunulan standartlar kullanılır. IEC standartlarına göre yıldırım akımı dalga formu 10/350 µs ve 8/20 µs olarak tanımlanır. 10/350 µs’lik dalga formu yıldırımın dolaylı

etkisini ifade etmektedir. 8/20 µs’lik dalga formu ise yıldırımın doğrudan etkisini ifade etmektedir. Bu ifadelerde yer alan 8/20 µs’lik dalga formu yıldırım akımının 8. µs’de maksimum değerine ulaştığını ve 20. µs’de maksimum akım değerinin yarısına indiğini gösterir. Yıldırım akımının maksimum genliği en çok 10 kA ile 20 kA arasında

oluşmaktadır [16]. Bu çalışmayla yıldırım akımlarının iletim hattında yer alan direklerde bulunan izolatörlerde oluşan minimum etkisini incelemek amacıyla, yıldırım akımı için

maksimum değer 20 kA olarak seçilmiştir. Yıldırım akımı dalga formu, Şekil 4'teki gibi ifade edilmektedir. [17].



Şekil 4. ATP programında yıldırım darbesi modelinin gösterimi.

Figure 4. Representation of the lightning impulse model in the ATP program.

Yıldırım akımı dalga formunun belirlenmesinde Heidler fonksiyonundan yararlanılmıştır. Bu fonksiyonda, yıldırım akımının tepe değeri 20 kA, paralel direnç değeri ise 400  $\Omega$  olarak kabul edilmiştir [18]. Heidler fonksiyonunu, matematiksel olarak Denklem (2) ve Denklem (3) ile tanımlanmak mümkündür.

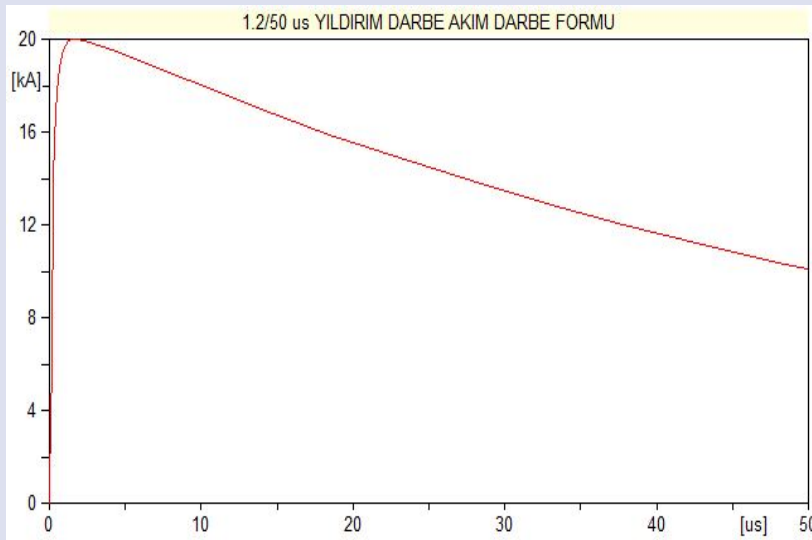
$$i(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{(t-\tau_1)^n}{\left(\frac{t}{\tau_2}\right)^n + 1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2)$$

(2) denkleminde;  $I_0$  yıldırım akımının maksimum değerini,  $\tau_1$  akımın artma süresine bağlı olarak zaman sabitini,  $\tau_2$

akımın azalma süresine bağlı olarak zaman sabitini ve  $n$  yıldırım akımının diklik katsayısını temsil etmektedir.

$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (3)$$

(3) denkleminde yer alan diklik katsayısı, yıldırım akımının en yüksek değerine ulaşma zamanını etkiler. 8/20  $\mu$ s'lik yıldırım akımı sağlamak için  $n$  katsayısı 2 olarak seçilmiştir. Bu çalışma için seçilen 1.2/50  $\mu$ s'lik yıldırım akımının dalga şekli Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 5. ATP simülasyonunda Heidler fonksiyonuyla oluşturulan 1.2/50  $\mu$ s yıldırım akımı dalga şekli.

Figure 5. The 1.2/50  $\mu$ s lightning current waveform generated using the Heidler function in the ATP simulation.

#### Direk Topraklama Direncinin Belirlenmesi

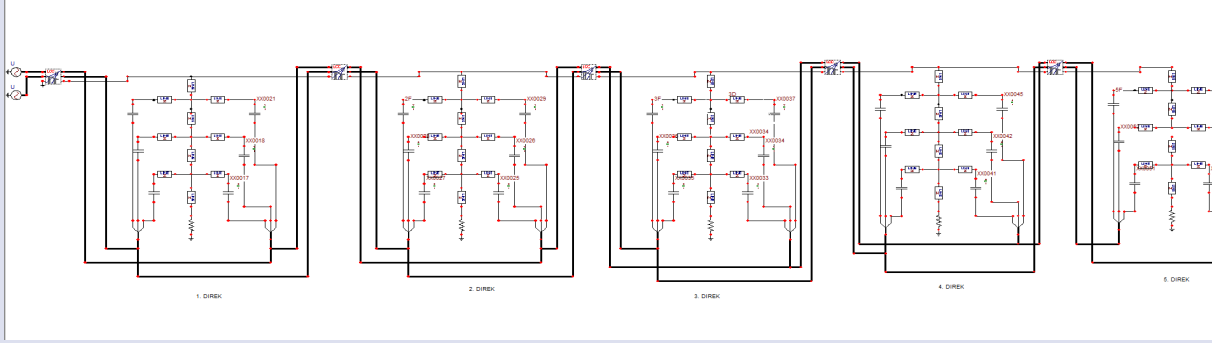
Elektrik direkleri ve havai iletim hatlarının topraklanması hem canlı hem de iletim hattının korunması için gerekli ve zorunludur. Bu çalışmada iletim hattında yer alan 5 adet direkte de topraklama direnç değerleri 15  $\Omega$  olarak belirlenmiş ve simülasyon bu değere göre gerçekleştirilmiştir.

#### 154 kV İletim Sisteminin ATP Modelinin Oluşturulması

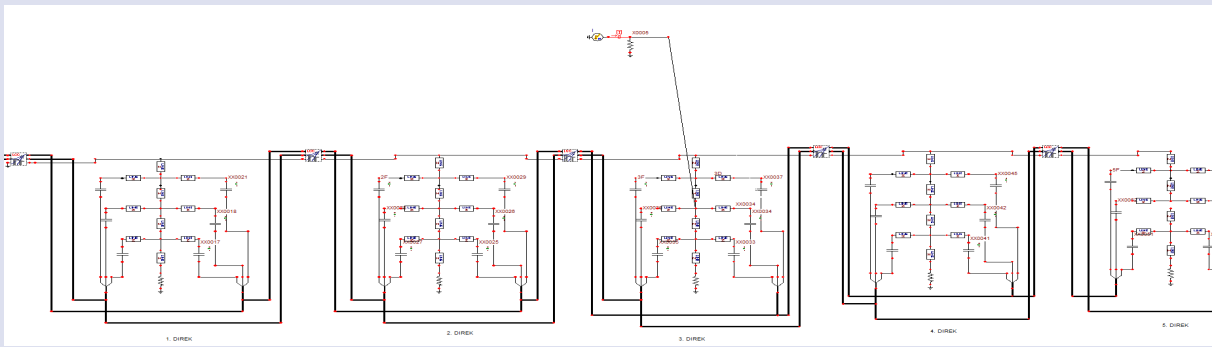
Tablo 3'te verilen parametrelere göre, iletim hattının ATP simülasyon modeli Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu modelde, iletim hattında yer alan direklerin arasındaki mesafe 400 metre olarak kabul edilmiştir. Modellemede elektrot çapı 2,5 mm<sup>2</sup>,  $d=0,8$  metre,  $\rho=50$  ve  $\mu=10^{-3}$  (0,001) olarak kullanılmıştır. Ayrıca analizlerde izolatörlerin kapasite değeri, zincir izolatörün eşdeğeri olan 80 pikofarad (pF) şeklindedir [19]. İletim hattı modeli oluşturulurken iletim hattında yer

alan tüm direkler aynı parametrelere sahiptir. Tüm direkler için topraklama direnç değeri  $15\Omega$  olarak kabul edilmiştir. Direk modellerindeki tüm  $Z_{LINE}$  modellerinde  $R/l$  oranı 4 ve "v" değerleri 300000000 olarak kabul edilmiştir. Direklerde düşey eksende yer alan  $Z_{LINE}$  modellerinde Z değeri direğin en üstünden alt kısma doğru sırasıyla 220, 200, 180 ve 150 olarak; direklerde yatay eksende ise üst devreden alt devreye doğru  $Z_{LINE}$  modellerinde Z değeri direklerin üst kısımlarından

alt kısımlara doğru sırasıyla 210, 200 ve 180 olarak belirlenmiştir. Beş adet pylon direkli 154 kV iletim hattı Şekil 7'de yıldırımın direk gövdesine düşme durumu, Şekil 8'de yıldırımın faz iletkenine düşme durumu ve Şekil 9'da yıldırımın koruma iletkenine düşme durumu olarak incelenmiştir.

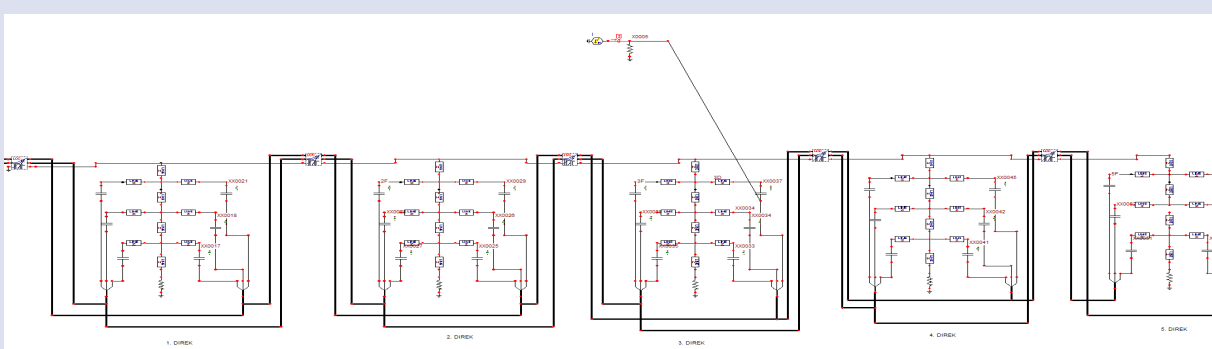


Şekil 6. 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP ile modellenmesi.



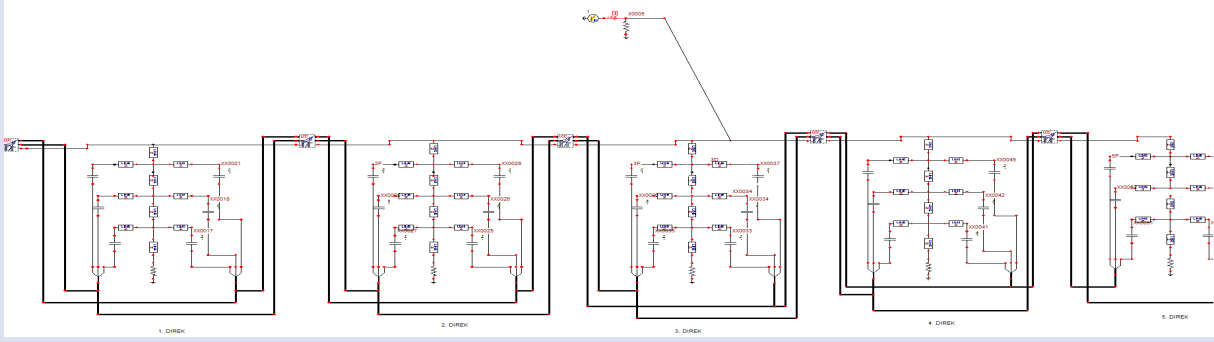
Şekil 7. 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın direk gövdesine düşme durumu.

Figure 7. The case of a lightning strike to the tower body in the ATP model of five pylon towers on a 154 kV transmission line.



Şekil 8. 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın faz iletkenine düşme durumu.

Figure 8. The case of a lightning strike to the phase conductor in the ATP model of five pylon towers on a 154 kV transmission line.

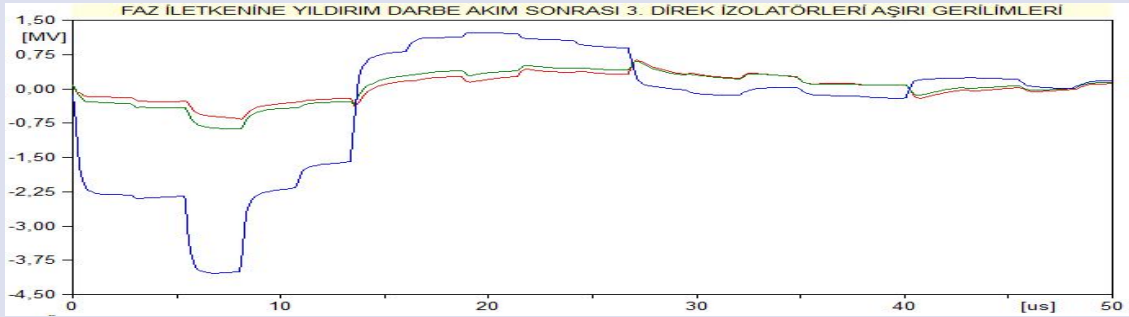


**Şekil 9.** 154 kV iletim hattında bulunan beş adet pylon direğin ATP modelinde yıldırımın koruma iletkenine düşme durumu.

**Figure 9.** The case of a lightning strike to the shield (ground) wire in the ATP model of five pylon towers on a 154 kV transmission line.

**Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin 2. Devre A Fazına Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi**

Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir.

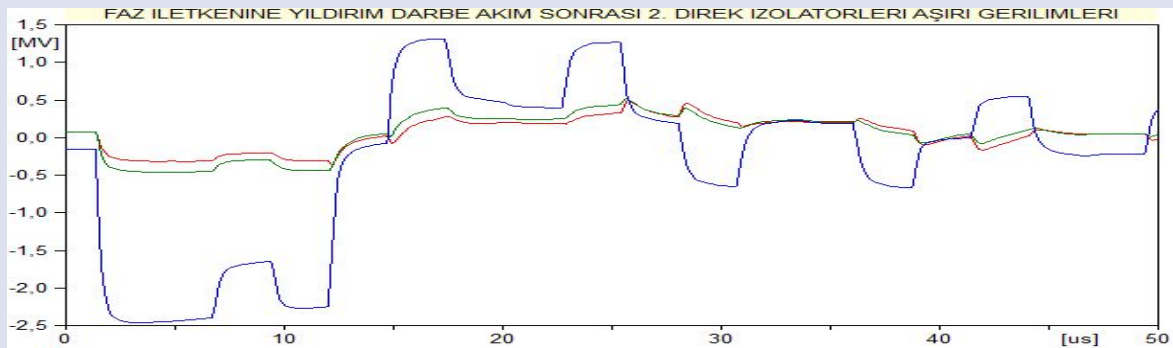


**Şekil 10.** Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.

**Figure 10.** Voltages at the third tower resulting from a lightning current impulse to the phase conductor.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C

fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 10'da görüldüğü gibidir.

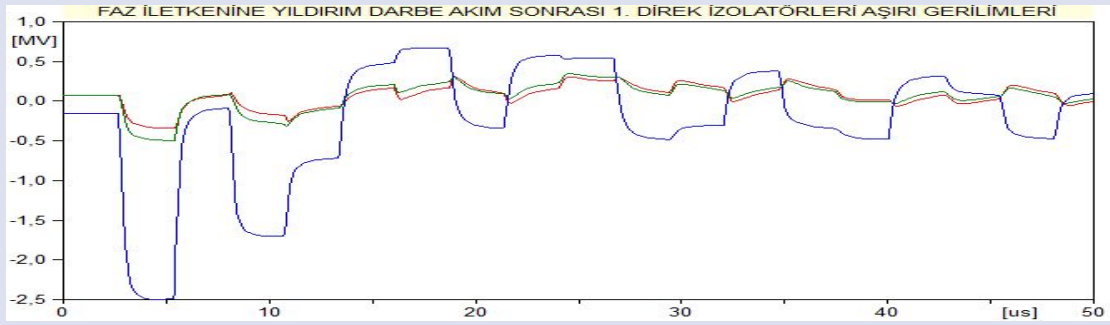


**Şekil 11.** Faz iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.

**Figure 11.** Voltages at the second tower resulting from a lightning current impulse to the phase conductor.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer

alan 2 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatorlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 11'de görüldüğü gibidir.



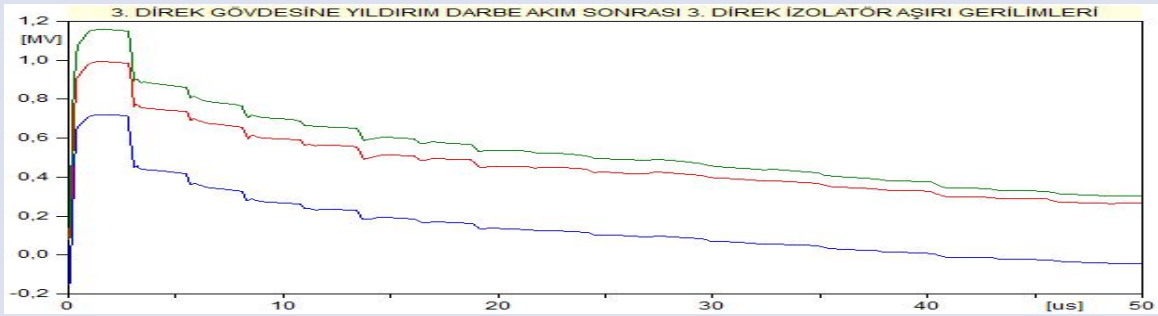
Şekil 12. Faz iletkenine Yıldırım Akım Darbesi Sonucu 1. Direk Gerilimleri

Figure 12. Voltages at the first tower resulting from a lightning current impulse to the phase conductor.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direk ikinci devre A faz iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatorlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 12'de görüldüğü gibidir.

#### Yıldırım Akım Darbesinin Hattın Ortasında Yer Alan 3 Numaralı Direğin Gövdesine Düşmesi Sonucunda İzolator Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi

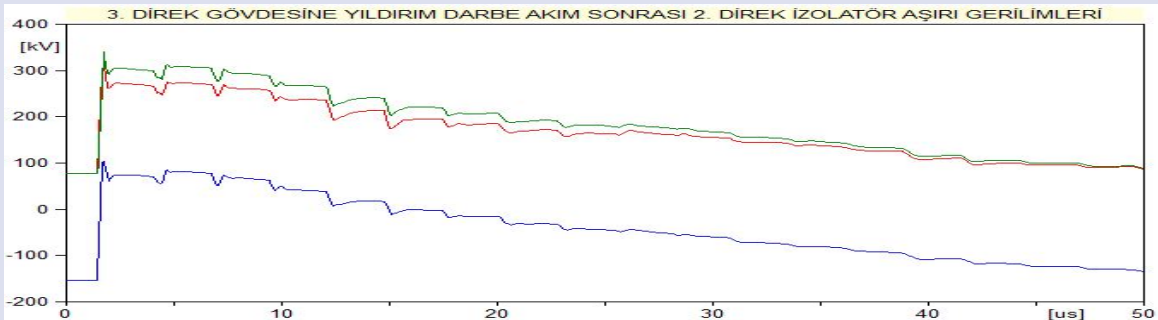
Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir.



Şekil 13. Direk Gövdesine Yıldırım Akım Darbesi Sonucu 3. Direk Gerilimleri

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki

izolatorlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 13'te görüldüğü gibidir.

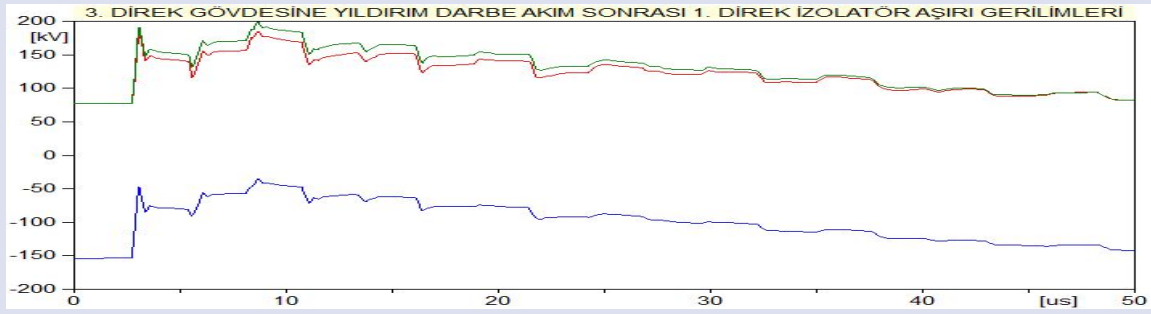


Şekil 14. Direk Gövdesine Yıldırım Akım Darbesi Sonucu 2. Direk Gerilimleri

Figure 14. Voltages at the second tower resulting from a lightning current impulse to the tower body.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki

izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 14'te görüldüğü gibidir.



Şekil 15. Direk gövdesine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.

Figure 15. Voltages at the first tower resulting from a lightning current impulse to the tower body.

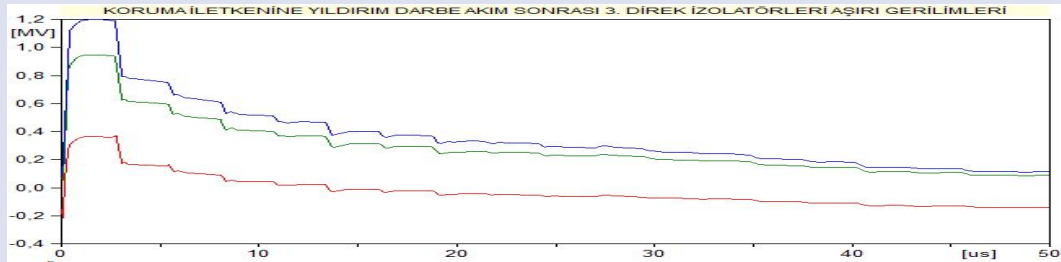
Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki

izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 14'te görüldüğü gibidir.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan ikinci devre A-B-C fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 15'te görüldüğü gibidir.

#### Yıldırım Akım Darbesinin Koruma İletkenine Düşmesi Sonucunda İzolatör Aşırı Gerilimlerinin İncelenmesi

Aşağıda yer alan grafiklerde mavi renge sahip olan grafik iletim hattı direğinde yer alan A fazını, yeşil renge sahip olan grafik B fazını, kırmızı renge sahip olan grafik ise C fazını temsil etmektedir.

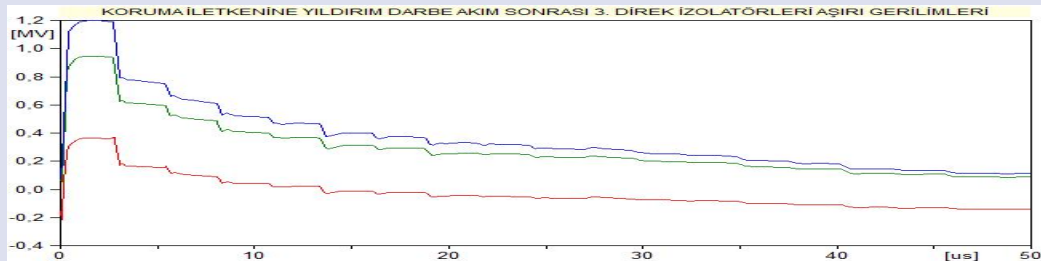


Şekil 16. Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 3. direk gerilimleri.

Figure 16. Voltages at the third tower resulting from a lightning current impulse to the shield (ground) wire.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 3 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C

fazlarındaki izolatörlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 16'da görüldüğü gibidir.

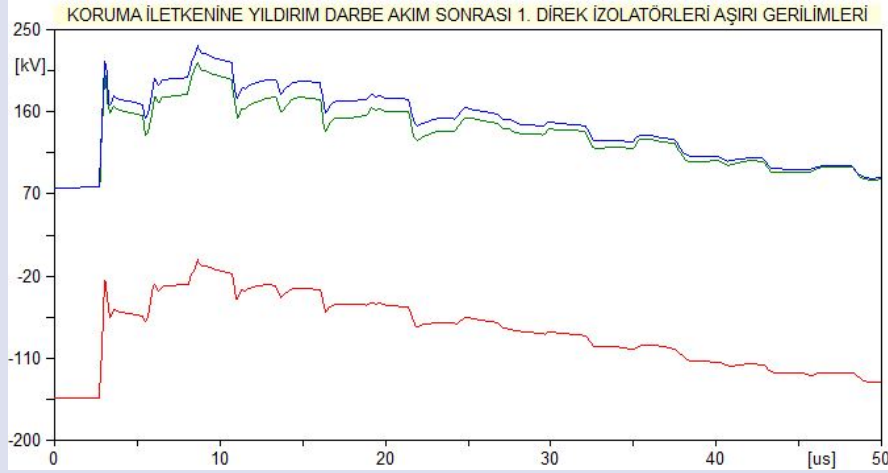


Şekil 17. Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 2. direk gerilimleri.

Figure 17. Voltages at the second tower resulting from a lightning current impulse to the shield (ground) wire.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 2 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C

fazlarındaki izolatorlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 17'de görüldüğü gibidir.



Şekil 18. Koruma iletkenine yıldırım akım darbesi sonucu 1. direk gerilimleri.

Figure 18. Voltages at the first tower resulting from a lightning current impulse to the shield (ground) wire.

Yıldırım akım darbesinin 3 numaralı direğin üstünde koruma iletkenine düşmesi sonucunda iletim hattında yer alan 1 numaralı direkte bulunan birinci devre A-B-C fazlarındaki izolatorlerinde oluşan aşırı gerilimler Şekil 18'de görüldüğü gibidir.

### Sonuç

ATP programı yardımıyla gerçekleştirilen bu çalışmadaki grafiklerden de görüleceği üzere yıldırım akım darbesinin hattın ortasında yer alan 3 numaralı direğin A faz iletkenine düşmesi sonucu A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 19,2  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 8,63 katı olan 1,33 MV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 27  $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 4,06 katı olan 625 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 27,1  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 3,9 katı olan 601 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin düştüğü direktten sonra yer alan 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 17,8  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 4,36 katı olan 672 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 24,5  $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 2,25 katı olan 347 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 26,9  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,99 katı olan 307 kV olduğu gözlemlenmiştir. Bu analizlerin sonucunda yıldırım darbesinin iletim hattında yer alan 3 numaralı direğin faz iletkenine düşmesi durumunda hem aynı direk üzerinde yer alan izolatorlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre uzaklıklarının hem de iletim hattında yer alan diğer direklerdeki izolatorlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre yatay ve düşey eksenindeki uzaklıklarının iletim hattında yer

alan izolatorler üzerinde indüklenen aşırı gerilimler üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Araştırma sırasında değerlendirilen diğer bir durum olan yıldırımın iletim hattının ortasında yer alan 3 numaralı direk gövdesine B fazı ile aynı seviyede olan direk gövdesine düşmesi durumunda da elde edilen grafikler incelenir ise; A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,7  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 4,68 katı olan 721 kV, yıldırım darbesinin düştüğü direk gövdesi ile aynı seviyede olan B fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,67  $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 7,53 katı olan 1,16 MV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 1,53  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 6,44 katı olan 993 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin düştüğü nokta C faz iletkenine A faz iletkeninden daha yakın olduğu için iletim hattında en altta yer alan C fazının izolatorleri üzerinde en üstte yer alan A fazının izolatorlerine göre yaklaşık olarak 272 kV daha fazla gerilim indüklenmiştir. Yıldırım darbesinin düştüğü 3 numaralı direktten sonra yer alan 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,71  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak (-0,233) katı olan -36 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,68  $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,28 katı olan 198 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 8,65  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,19 katı olan 184 kV olduğu gözlemlenmiştir. Bu analizlerin sonucunda yıldırım darbesinin iletim hattında yer alan 3 numaralı direğin gövdesine düşmesi durumunda hem aynı direk üzerinde yer alan izolatorlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre uzaklıklarının hem de iletim hattında yer alan diğer direklerdeki izolatorlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre yatay ve düşey eksenindeki uzaklıklarının iletim hattında

yer alan izolatörler üzerinde indüklenen aşırı gerilimlerin üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Araştırma sırasında değerlendirilen son durum olan yıldırım akım darbesinin iletim hattının ortasında yer alan 3 numaralı direğin üzerinde yer alan koruma iletkenine düşmesi durumunda da elde edilen grafikler incelenir ise; iletim hattının ortasında yer alan 3 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,6  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 7,72 katı olan 1,19 MV, B fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 1,59 $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 6,15 katı olan 948 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 2,74  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 2,39 katı olan 368 kV olduğu gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin koruma iletkeni üzerinde düştüğü nokta düşey eksende A fazının yer aldığı noktadan B ve C fazlarının yer aldığı noktalara doğru uzaklığı arttığından A, B ve C fazlarında yer alan izolatörler üzerinde indüklenen gerilimlerin de uzaklık arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Yıldırım darbesinin koruma iletkenine düştüğü durumda 1 numaralı direğin A fazında indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,68 $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık olarak 1,506 katı olan 232 kV, B fazından indüklenen gerilimin maksimum değerinin 8,65  $\mu$ s'de hattın nominal değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık 1,39 katı olan 214 kV, C fazına indüklenen gerilimin maksimum değerinin de 8,65  $\mu$ s'de hattın nominal gerilim değeri olan 154 kV değerinin yaklaşık (-0,149) katı olan -23 kV olduğu gözlemlenmiştir. Bu analizlerin sonucunda yıldırım darbesinin iletim hattında yer alan 3 numaralı direğin üzerinde yer alan koruma iletkenine düşmesi durumunda hem aynı direk üzerinde yer alan izolatörlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre uzaklıklarının hem de iletim hattında yer alan diğer direklerdeki izolatörlerin yıldırımın düştüğü noktaya göre yatay ve düşey eksendeki uzaklıklarının iletim hattında yer alan izolatörler üzerinde indüklenen aşırı gerilimlerin üzerinde doğrudan etkili olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan tüm simülasyon, değerlendirme, inceleme ve analizlerin sonucunda iletim hattının hepsinde veya herhangi bir noktasında analizi ve tasarımı yapılacak nokta ile şalt elemanlarının, yıldırım akım darbesinin düştüğü noktaya göre hem yatay hem de düşey eksende uzaklıklarının iletim hattında yer alan izolatörler üzerinde indüklenene ve istenmeyen durumlara neden olabilecek aşırı gerilimler üzerinde doğrudan etkili olduğu ayrıca kurulacak iletim hatlarının tasarım, projelendirme ve uygulama aşamalarında ATP gibi simülasyon programları ile iletim hatlarında istenmeyen durumlardan birisi olan yıldırım akım darbesinin faz iletkenine, direk gövdesine ve koruma iletkenine düşmesi gibi olası durumların simülasyon programları aracılığıyla incelenip iletim hattının kurulumu ve koruma ekipmanlarının nominal değerleri seçimi yapılır ise hem iletim hatları hem de iletim hatlarının beslediği çeşitli tüketiciler yıldırım aşırı gerilimlerin neden olabileceği ve maddi/manevi zararlara yol açabilecek istenmeyen durumlardan korunmuş olacağı sonucuna varılmıştır.

## Kaynakça

- [1] U. J. Minnaar, C. T. Gaunt, and F. Nicolls, "Characterisation of power system events on South African transmission power lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 88, no. July 2012, pp. 25–32, 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.01.015.
- [2] Özkaya M, "Aşırı Gerilimler ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, Yüksek Gerilimlerin Üretilmesi, Yüksek Gerilimlerin Ölçülmesi," in *Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 2*, 1996, p. 34.
- [3] Y. Olu, U. M. U. Genelikle, N. E. Ve, S. Edeb, Y. Enerj, and S. Etmes, "Yıldırım Ve Aşırı Gerilimlerin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkileri-Direklerin Topraklama Direnci İle İzolatörlerin Atlama Gerilimi İlişkisi – Eklatörlerinin Etkin (!) liği," pp. 15–20, 2015.
- [4] A. Kaygusuz, M. S. Mamış, and E. Akin, "s-DOMAIN ANALYSIS OF LIGHTNING SURGES ON TRANSMISSION TOWERS s - DOMAIN ANALYSIS OF LIGHTNING SURGES ON TRANSMISSION TOWERS," no. May, 2002.
- [5] Beaty HW, *Standart Handbook for Electrical Engineers*, New York: McgrawHill Professional. 2006.
- [6] T. Ueda, T. Ito, H. Watanabe, T. Funabashi, and A. Ametani, "A Comparison between two tower models for lightning surge analysis of 77 kV system," *PowerCon 2000 - 2000 Int. Conf. Power Syst. Technol. Proc.*, vol. 1, pp. 433–437, 2000, doi: 10.1109/ICPST.2000.900096.
- [7] M. ŞEKER and M. ÇIKAN, "ATP-EMTP Kullanılarak 154 kV Çatal Pilon Direkli Havai İletim Hatları için Direk Topraklama Direncinin Yıldırım Aşırı Gerilimine Etkisinin İncelenmesi," *İğdir Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 9, no. 4, pp. 1989–2001, 2019, doi: 10.21597/jist.549039.
- [8] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388–399, 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292459.
- [9] Dommel HW, "EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Conversion into Electronic Format by Canadian/American EMTP user Group," 1995.
- [10] O. PH, "Alternative Transient Program: Comparison of Transmission Line Models, Revista Latinoamericana del ATP," pp. 1–5, 1999.
- [11] A. S. H. Hamza and N. M. K. Abdel-Gawad, "Digital computer studies of the surge response of a transmission line tower," *Energy Convers. Manag.*, vol. 35, no. 12, pp. 1097–1105, 1994, doi: 10.1016/0196-8904(94)90013-2.
- [12] K. . Chislom, W.A., Chow Y.L., Strivastova, "Lightning Surge Response of Transmission Towers," pp. 3232–3242, 1991.
- [13] ve diğ Ishii, M., "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis," pp. 1327–1335, 1991.
- [14] TEIAS, "TEIAS Annual Report 2017," pp. 35–36, 2017, [Online]. Available: [https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-06/2017 TEİAŞ Faaliyet Raporu.pdf](https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-06/2017%20TEIAŞ%20Faaliyet%20Raporu.pdf)
- [15] A. Çıfçı, E. Altundağ, Ö. Bulut, and H. H. Uysal, "Burdur İli Elektrik Dağıtım Şebekesinde Meydana Gelen Arızalara Genel Bir Bakış ve Çözüm Önerileri a A General Overview of Failures Taken Place in Electrical Distribution Network of Burdur Province and Solution Suggestions," vol. 55, no. 1, pp. 44–55, 2017.
- [16] Uman MA, "All About Lightning. Toronto: Dower Publication," 1986.
- [17] A. Ametani and T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2 I, pp. 867–875, 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839183.
- [18] Bewly BV, "Travelling Waves on Transmission Systems, New York Dover," 1963.
- [19] J. B. Shaida N, "Lightning Simulation Study on Line Surge Arresters and Protection Design of Simple Structures, Degree Of Master Of Engineering (Electric – Power) Faculty of Electrical Engineering University Technology," 2008.

