

**ATP-EMTP Kullanılarak 154 kV Çatal Pilon Direkli Havai İletim Hatları için Direk opraklama Direncinin Yıldırım Aşırı Gerilimine Etkisinin İncelenmesi**

Mustafa ŞEKER<sup>1\*</sup>, Murat ÇIKAN<sup>2</sup>

**ÖZET:** Yıldırım çarpmalarının neden olduğu aşırı gerilimler elektrik güç sistemlerinde önemli elektrik kesintilerine ve sistem elemanlarının ciddi hasar görmesine neden olmaktadır. Yüksek gerilim direklerinde ve transformatörlerinde koruma topraklaması kullanılmaktadır ve koruma topraklaması haricinde özel bir koruma yöntemi uygulanmamaktadır. Havai iletim hatlarında yıldırım çarpmaları genellikle yıldırımın koruma iletkenine çarpması veya direğe çarpması şeklinde görülmektedir. İletim hattı yıldırım darbesine maruz kaldığında yıldırım akımı direk topraklaması üzerinden toprağa akar. Yıldırım darbesi direk topraklama direncine bağlı olarak direk üzerinde yüksek gerilimlerin oluşmasına neden olur. Oluşan bu gerilim izolatör darbe geriliminin üzerinde oluşursa izolatörlerin hasar görmesine yol açar. Bu nedenle yüksek gerilim iletim hatlarında direk topraklama direncinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Türkiye’ de 154 kV enerji nakil hatlarında yaygın olarak kullanılan çatal pilon direkli iletim hattının koruma iletkenine ve taşıyıcı direğine yıldırım çarpması ile ortaya çıkabilecek aşırı gerilimler Alternative Transient Program (ATP) kullanılarak analiz edilmiştir. Analizde çatal pilon direğin eşdeğer modeli üniform olmayan direk modeli olarak tanımlanmıştır. Yıldırım akımı dalga formu ise 8/20  $\mu$ s’ lik yıldırım darbesine sahip Heidler fonksiyonu olarak modellenmiştir. Direk topraklama elektrotunun farklı pozisyonları ve uzunlukları için direk toprak direncinin yıldırım çarpmalarında oluşan aşırı gerilimler üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Sonuçlar, aynı toprak yapısına sahip direklerde, 5 metre altındaki kısa elektrot uzunluğu ile yapılacak topraklamalarda yatay topraklama yapılmasının izolatör üzerindeki aşırı gerilimleri azalttığını göstermektedir. Eğer elektrot uzunluğu 5 metrenin üzerinde olursa dikey topraklama yapılması önerilmektedir. 154 kV çatal pilon direklerinin kurulacağı alanda toprak yapısı detaylı olarak incelenmeli ve toprak yapısına uygun olarak topraklama elektrodu ve elektrot pozisyonu seçilmelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Havai İletim Hatları, Yıldırım Aşırı gerilimler, Alternatif Transient program (ATP), Çatal Pilon Direk, Direk Toprak Direnci.

**Examining the Influence of Tower Grounding Resistance on Lightning Overvoltages for 154 kV Overhead Transmission Line with Fork Pylon Tower using ATP-EMTP**

**ABSTRACT:** Overvoltages by lightning strikes cause significant power outages in electrical power systems and serious damage to electrical system components. Protective grounding is used in high voltage tower and transformers and it is not applied any special protection method other than protective grounding. It is observed that lightning strikes in the overhead transmission line are often seen as the lightning strike on the lightning protection conductor or a tower. When the transmission line is exposed to a lightning strike, the lightning current flows to the ground via tower grounding. The lightning strike causes high voltages on the tower depending on the tower grounding resistance. If this voltage occurs above the isolator impulse voltage, the isolators will be damaged. Therefore, the determination of direct grounding resistance in high voltage transmission lines is very important. In this study, overvoltages due to lightning strikes on the protection conductor or tower of a transmission line with fork pylon tower widely used in 154 kV transmission lines in Turkey have been analyzed using the Alternative Transient Program (ATP). In the analysis, the equivalent model of the fork pylon tower is defined as non-uniform tower model. The lightning current waveform is modelled as a Heidler function with a lightning pulse of 8/20  $\mu$ s. The effect of the tower ground resistance on overvoltages occurring in the lightning strikes is evaluated for different positions and lengths of the tower grounding electrode. The results show that horizontal grounding in the same earth structure tower with short electrode length below 5 meters reduces excessive voltages on the insulator. When the length of the electrodes is more than 5 meters, vertical grounding can be recommended. Determining the appropriate grounding position by conducting soil analysis in the area where the tower will be installed prevents the insulators from overvoltages caused by lightning strikes. In the area where 154 kV fork pylon tower will be installed, the soil structure should be examined in detail and the ground electrode and electrode position should be selected in accordance with the soil structure.

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

<sup>1</sup> Mustafa ŞEKER (Orcid ID: 0000-0003-1078-8340), Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Gölhisar Uygulamalı Bilimler Yüksekokulu, Gölhisar/Burdur, Türkiye

<sup>2</sup> Murat ÇIKAN (Orcid ID: 0000-0001-6723-5769), Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Adana, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa ŞEKER, e-mail: mseker@mehmetakif.edu.tr

## GİRİŞ

Yıldırımlar; atmosferik olaylara bağlı olarak bulut ile yeryüzü arasında oluşan gerilimin dielektrik dayanımı aşması ile meydana gelir (Minnaar ve ark., 2012). Yıldırım darbelerinin oluşturacağı maksimum yıldırım akım seviyelerinin belirlenmesi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde yıldırım akımlarının tespit edilen tepe değerlerine bağlı olarak “birikmeli olasılık dağılımları” tanımlanmıştır (Özkaya, 1996). Birikmeli olasılık dağılımlarına göre yıldırım akımlarının genellikle birkaç kiloamperden 30 kA' i aşan akım darbelerinin oluşmasına neden olduğunu ve bazen de bu akım darbelerinin değerinin 100 kA' e kadar ulaşabileceğini görülmektedir. Fakat yıldırım akımının 100 kA' den yüksek olma olasılığı %3'tür. 10 kA ve üzerinde olma olasılığı ise %85'dir (Özkaya, 1996).

Tüm yüksek gerilim havai iletim hattı direklerinde ve transformatörlerinde koruma topraklaması kullanılmaktadır. Koruma topraklaması haricinde özel bir koruma yapısı mevcut değildir (Gencer, 2015). Yüksek gerilim hatlarına yıldırım çarpması durumunda yıldırım akımı direk olarak topraklama direnci üzerinden toprağa akar. Akan bu akım, direk topraklama direncine bağlı olarak direk üzerinde yüksek bir gerilimin oluşmasına neden olur. Şayet oluşan bu gerilim izolatörler üzerinde darbe dayanma geriliminden yüksek bir seviyeye ulaşırsa izolatörlerin zarar görmesine neden olur ve elektrik kesintilerine sebebiyet verir (Kaygusuz ve ark., 2003). Yüksek akım darbelerine sahip yıldırımların yüksek gerilim havai hat elektrik direklerine çarpmaları oldukça sık karşılaşılan bir durumdur. Ayrıca direklerde meydana gelen yıldırım çarpmaları; yıldırımın iletim hatlarındaki faz iletkenlerine veya koruma iletkenine çarpması şeklinde de görülebilir. Fakat her üç durumda da ortaya çıkan aşırı gerilimler iletim hatlarında nominal değer çok üzerinde gerilim yükselmelerine neden

olmaktadır (Beaty, 2006, Ueda ve ark., 2000). Yıldırım çarpmaları genellikle yıldırımın koruma iletkenine çarpması veya iletim hattındaki taşıyıcı direğe düşmesi şeklinde olmaktadır.

Yıldırım aşırı gerilimler nedeni ile iletim hattında yüksek gerilimlerin oluşması elektrik sisteminde kullanılan diğer ekipmanların da ciddi zarar görmelerine neden olur. Ayrıca iletim hattına bağlı olan güç transformatörlerinde izolasyon bozulmalarına da yol açarlar. Bu nedenle yıldırım aşırı gerilimlerinin elektrik iletim hatları üzerinde oluşturacağı etkilerin değerlendirilmesi güç sistemlerinin kararlılığının sağlanması açısından oldukça önemlidir.

Yıldırımların neden olduğu aşırı gerilimlerin laboratuvar ortamında deneysel olarak gözlemlenmesi ve değerlendirilmesi oldukça zordur. Ayrıca bu uygulamalar yüksek maliyetler içermektedir (Greenwood, 1991). Bu zorluğun üstesinden gelmek ve bu alanda çalışan araştırmacılara yardımcı olmak amacıyla çok sayıda benzetim programı geliştirilmiştir. Geliştirilen benzetim programları yardımıyla yıldırım çarpmalarının neden olduğu aşırı gerilimlerin analiz edilmektedir. Fakat daha doğru bir analiz gerçekleştirebilmek için yıldırım dalga formu şekli, elektrik sistemine ait hat tipleri, direk modelleri ve izolatörler gibi sistem elemanlarının doğru bir şekilde modellenmesi gereklidir. Dommel' in çalışmalarını temel alan Alternative Transient Program (ATP) elektrik sistem elemanlarının doğru bir şekilde modellenmesine olanak sağlamaktadır ve elektrik sistemlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dommel, 1969, Dommel, 1995).

Yıldırım dalga formunu tanımlanmasında Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission – IEC) tarafından tanımlanan dalga formları kullanılır. IEC tarafından yıldırım akımı dalga formu için 10/350 µs ve 8/20 µs'lik akım dalga formları kullanılmaktadır. Bu dalga formlarında birinci kısımdaki sayısal değer akımın pik

değerine ulaşma süresini, ikinci kısımdaki değer ise akımın pik değerinin yüzde ellisine ulaşması için geçen süreyi temsil etmektedir (IEC Standarts, 61643-11). IEC standartlarında yıldırım gerilimi dalga formu ise 1.2/50  $\mu$ s' lik gerilim darbesi olarak tanımlanır (IEC Standarts, 61000-4-5).

İletim hatlarının modellenmesinde PI ve Jmarti modelleri gibi farklı hat parametreleri tanımlanmaktadır. PI model kısa iletim hatlarının modellenmesi için uygundur. Jmarti model ise uzun iletim hatlarının modellenmesinde kullanılabilir ve yüksek frekans bağımlılığına sahip olduğu için iletim hatlarını daha gerçekçi bir şekilde karakterize eder (Orlando, 1999).

İletim hatlarını taşıyan elektrik direkleri analiz edilirken ilk olarak elektromanyetik alan etkisi kullanılmıştır. Direğin geometrik yapısı elektromanyetik alan etkisi göz önüne alarak tasarlanmıştır. Geometrik şekiller yardımıyla ile yapılan hesaplamalar kullanılarak elektrik direkleri için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Kawai, iletkenler üzerine yapmış olduğu çalışmada iletkenin karakteristik empedansı ile dalga boyu arasındaki ilişkiyi

tanımlamıştır (Kawai, 1964). Chow' da iletkenlerin karakteristik empedansları ve yayılım sabiti ile ilgili çalışmalar yapmıştır (Chow ve ark., 1991). Başlangıçta, elektrik direkleri ve hatların modellenmesi ile ilgili çalışmalarda direklerde kullanılan koruma iletkenin etkisi dikkate alınmamıştır. Ishii ise gerçekleştirmiş olduğu çalışmada koruma iletkenlerinin de direk modelinde dikkate alınması gerektiğini göz önüne alarak nümerik yöntemler yardımı ile çok katlı direk modelini geliştirmiştir (Ishii ve ark., 1991).

Türkiye' de 2017 yılı itibari ile 154 kV Enerji İletim Hatlarında arıza endeksi 7,19 olarak belirlenmiştir (Türkiye Elektrik İşletmeleri A.Ş (TEİAŞ) Faaliyet Raporu, 2017). Yağışlı-Şarjlı ve Fırtınalı günlerde normal durumlara göre arızaların daha fazla olduğu bilinmektedir (Çiftçi ve ark., 2017). Yağışlı-Şarjlı ve fırtınalı günlerde oluşan arızaların önemli bir kısmını da yıldırım aşırı gerilimlerden kaynaklanmaktadır. Şekil 1'de Türkiye' deki yıllık ortalama yıldırımlı ve fırtınalı gün sayıları bölgesel olarak gösterilmiştir (Yıldırımdan Koruma Yönetmeliği).



Şekil 1. Türkiye'deki yıllık ortalama yıldırımlı fırtınalı gün sayısı haritası.

Bu çalışmada, Türkiye’de 154 kV iletim hatlarında yaygın olarak kullanılan çatal pilon direkli iletim hattının koruma iletkenine ve taşıyıcı direğe yıldırım çarpması durumundaki aşırı gerilimler Alternative Transient Program (ATP) kullanılarak incelenmiştir. Benzetimde iletim hattı 7 direk ile modellenmiştir. Direğe ve koruma iletkenine yıldırım çarpması durumunda yıldırımın düştüğü direkte ve komşuluğundaki direkte izolatörler üzerinde oluşan aşırı gerilimler incelenmiştir ve direk topraklama direncinin yıldırım aşırı gerilimleri ile olan ilişkisi değerlendirilmiştir. Yıldırım darbesi 8/20 µs’ lik yıldırım dalga formu olarak tanımlanmıştır. Yıldırımın akımı Heidler fonksiyonu olarak modellenmiştir. Heidler fonksiyonunda maksimum yıldırım akımı değeri ise istatistiklere göre en sık karşılaşılan durum olan 10 kA olarak tanımlanmıştır (Özkaya, 1996). İletim hattının karakteristiği tanımlamada JMarti frekans bağımlı model kullanılmıştır (Orlando, 1999). Çatal pilon direğin modellenmesinde uniform olmayan direk modeli seçilmiştir. İletim hattı direklerinde, topraklama elektrodunun yatay ve dikey yerleşim pozisyonlarının yıldırım aşırı gerilimlerine olan etkisini değerlendirilmiştir. Farklı uzunluklardaki topraklama iletkeninin yatay ve düşey pozisyonları için yıldırım aşırı gerilimlerin izolatörler üzerinde oluşturduğu etkiler değerlendirilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Yıldırımların neden olduğu aşırı gerilimlerin analizinin yapılabilmesi için iletim hattının doğru bir şekilde modellenmesi gereklidir. İletim hattında kullanılan iletkenlerin

çapları ve metrik direnç değerleri, iletkenlerin geometrik yapısı, iletkenlerin yeryüzü ve birbirleri arasındaki mesafeler, iletim hattında kullanılan direğin geometrik yapısı ve direk yüksekliği gibi birçok parametrenin dikkate alınması gereklidir.

## Çatal Pilon Direk için Eşdeğer Devre Modelinin Tanımlanması

Türkiye’de 154 kV iletim sisteminde kullanılan çatal pilon direği oluşturan kısımlar Şekil 2’ de sunulmuştur. Şekilden 2’den görüldüğü gibi çatal pilon direklerde iki adet koruma iletkeni kullanılmaktadır. Üç fazlı iletim sistemi için A-B-C fazlarının ve koruma iletkenlerinin hat geometrisi Şekil 3’ deki gibidir. Şekil 2’ de sunulan çatal pilon direğin geometrik yapısı kullanılarak bu çalışmada kullanılacak olan direk boyutları ise Çizelge 1’ de gösterilmiştir.

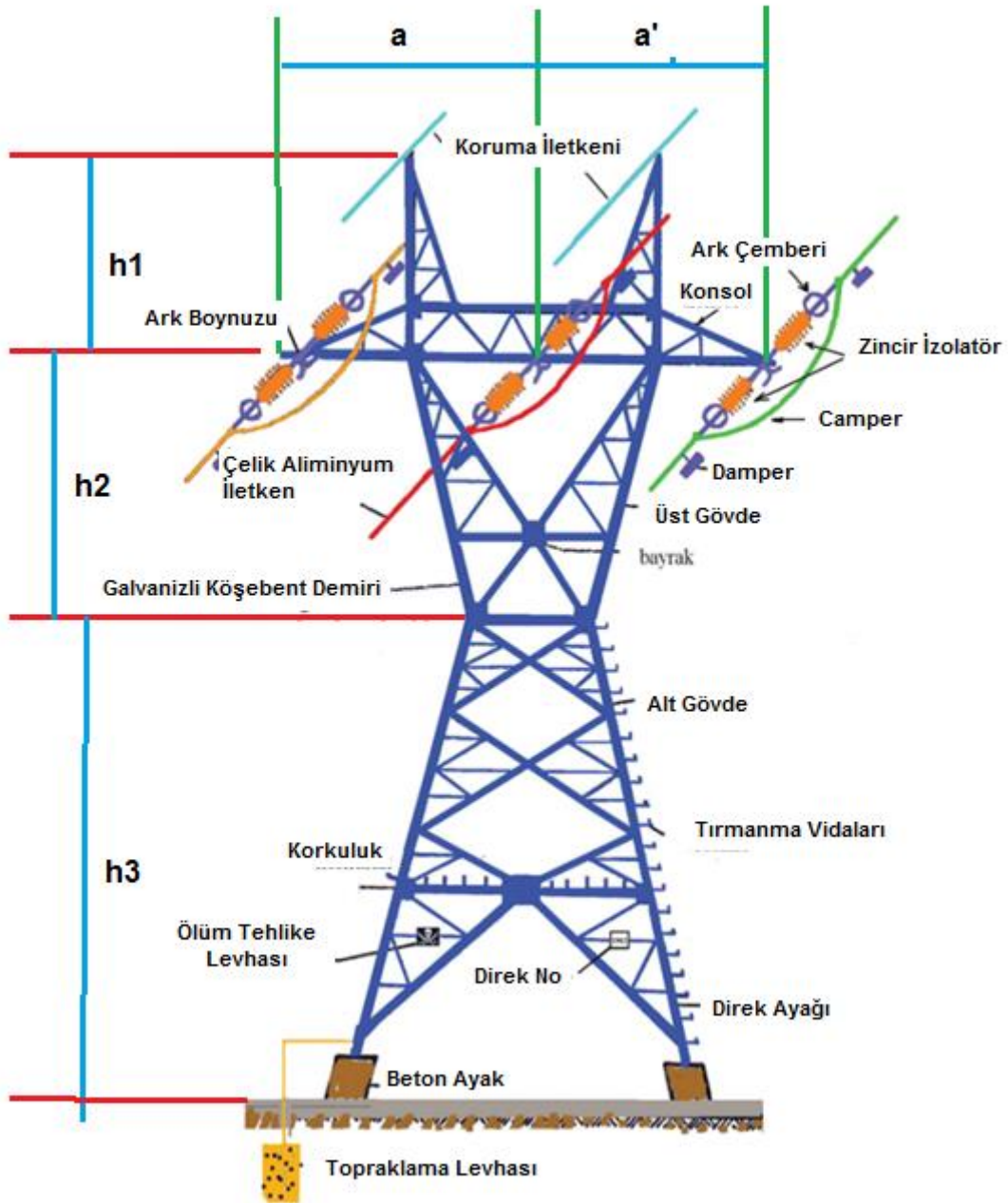
Çatal pilon direğin direk modelinin tanımlanması üniform olmayan iletim hattının modellenmesine dayanmaktadır ve bu kabulde direk eşit parçalara bölünerek her bir bölüm için karakteristik empedanslar tanımlanır. Bu değişim denklem 1’ de sunulan üstel bir fonksiyon olarak ifade edilir (Kaygusuz ve ark., 2002).

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

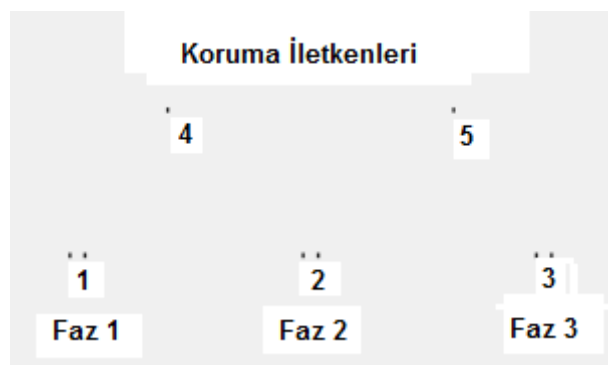
Bu ifadede q direk yüksekliğine bağlı sabittir. x ise yer seviyesinden olan yüksekliktir. Çizelge 1’de sunulan ölçülendirmeler dikkate alınarak elektrik direğinin karakteristik empedansları direğin üst bölümlerinde 220 Ω ve direğin alt kısmında ise 150 Ω olarak hesaplanmıştır (Şeker ve Kaygusuz, 2011).

**Çizelge 1. Şekil 1’de sunulan çatal pilon direğin boyutları**

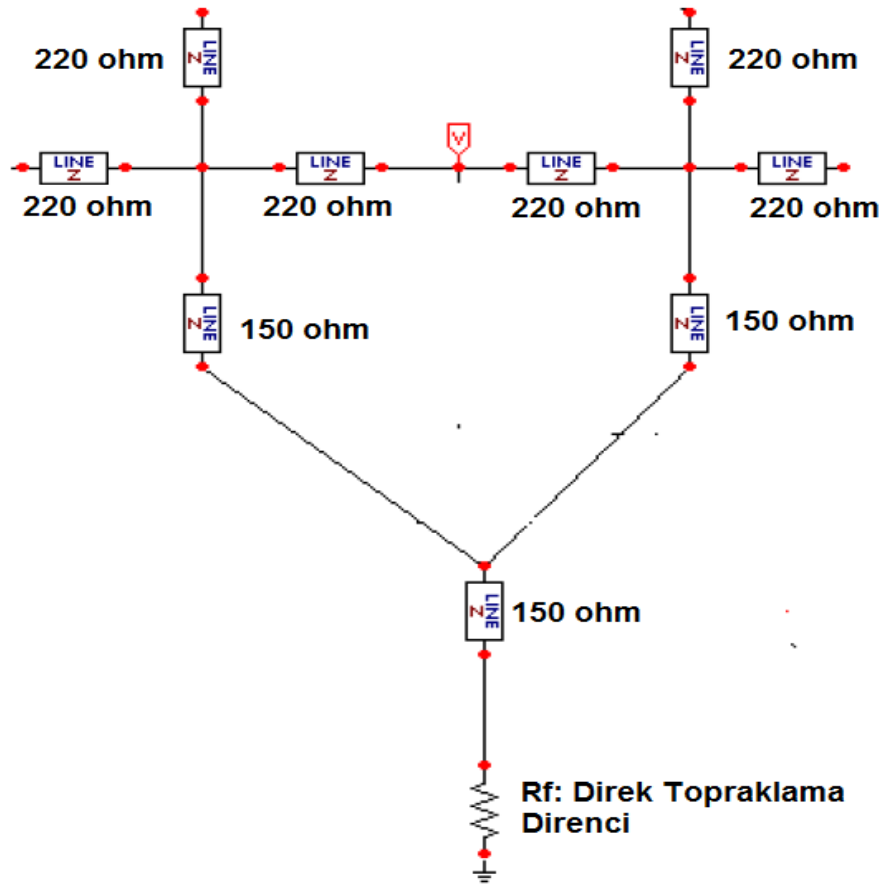
| a    | a'   | f    | h1    | h2 | h3     | h (h1+h2+h3) |
|------|------|------|-------|----|--------|--------------|
| 5.9m | 5.9m | 7.2m | 3.85m | 8m | 15.15m | 27m          |



Şekil 2. Türkiye'de 154 kV iletim hatlarında kullanılan çatal pilon direği oluşturan kısımlar.



Şekil 3. Çatal pilon direkte fazlar ve koruma iletkenleri arasında oluşan hat geometrisi.



Şekil 4. Çatal pylon direğin eşdeğer ATP devre modeli (Şeker ve Kaygusuz, 2011).

Çizelge 2. İletim hattının karakteristik değerleri.

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

|   | Ph.no. | Rin    | Rout  | 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      | -5.9  | 23.15  | 18.5  | 40    | 0     | 2  |
| 2 | 2      | 0.3505 | 1.517 | 0.0586      | 0     | 23.15  | 18.5  | 40    | 0     | 2  |
| 3 | 3      | 0.3505 | 1.517 | 0.0586      | 5.9   | 23.15  | 18.5  | 40    | 0     | 2  |
| 4 | 4      | 0.2445 | 0.489 | 1.4625      | -3.6  | 27     | 22.15 | 0     | 0     | 0  |
| 5 | 5      | 0.2445 | 0.489 | 1.4625      | 3.6   | 27     | 22.15 | 0     | 0     | 0  |

Şekil 5. Şekil 2' de sunulan hat geometrisine bağlı olarak havai iletkenlerin konfigürasyonu.

### İletim Hattının Karakteristik Değerleri

Türkiye'de 154 kV iletim hatlarında kardinal tipi iletken yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmada gerçekleştirilen analizlerde iletim hattının kardinal tipi iletken

içerdiği kabul edilmiştir. Koruma iletkeni için ise 7N8 tipi iletken kullanılmıştır. TEİAŞ katalog bilgileri kullanılarak elde edilen iletim hattının karakteristik değerleri Çizelge 2' deki gibidir. Şekil 3'de sunulan hat geometrisine

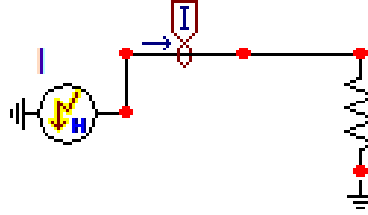
bağlı olarak havai iletkenlerin konfigürasyonu ise Şekil 5’ de sunulmuştur. Bu çizelge kullanılarak JMarti modelin parametreleri tanımlanarak LCC iletim hattı modeli tanımlanmıştır.

### Yıldırım Dalga Şeklinin Modellenmesi

Yıldırım darbelerinin modellenmesinde IEC tarafından tanımlanan 10/350 µs ve 8/20 µs’ lik yıldırım akımı dalga formları kullanılmaktadır. 8/20 µs’ lik yıldırım akımı dalga formu, yıldırımın direk olarak etkisini tanımlarken 10/350 µs’ lik yıldırım akımı dalga formu ise yıldırım akımının endirekt etkisini tanımlamaktadır. 8/20 µs’ lik dalga formu ifadesinin anlamı, yıldırım akımının maksimum

değere 8. µs’ de ulaşacağını ve 20. µs’de maksimum akım değerinin %50’ sine düşeceğini belirtmektedir. İstatistiksel olarak en sık olarak görülen yıldırım akımının maksimum genlik değeri 10 kA ile 20 kA aralığında görülmektedir (Uman, 1986). Bu çalışmada yıldırım akımlarının izolatörler üzerinde minimum oluşturacağı etkiyi değerlendirmek için yıldırım akımının maksimum değeri 10 kA olarak alınmıştır.

Yıldırım akımı dalga formu, Şekil 6’ da gösterildiği gibi, akım kaynağı ve akım kaynağına paralel bir direnç yardımı ile modellenilebilir (Ametani ve Kawamura, 2005).



Şekil 6. ATP program ile akım kaynağı ve paralel empedans ile modellenen yıldırım darbesi modeli.

Yıldırım akımı dalga formunu tanımlamada Heidler fonksiyonu kullanılmıştır ve yıldırım akımı dalga formunun maksimum akım değeri 10 kA, paralel direnç değeri ise 400 Ω olarak alınmıştır (Bewly, 1963). Heidler fonksiyonu denklem (2) ve denklem (3) ‘ de sunulan matematiksel ifadeler ile tanımlanır.

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

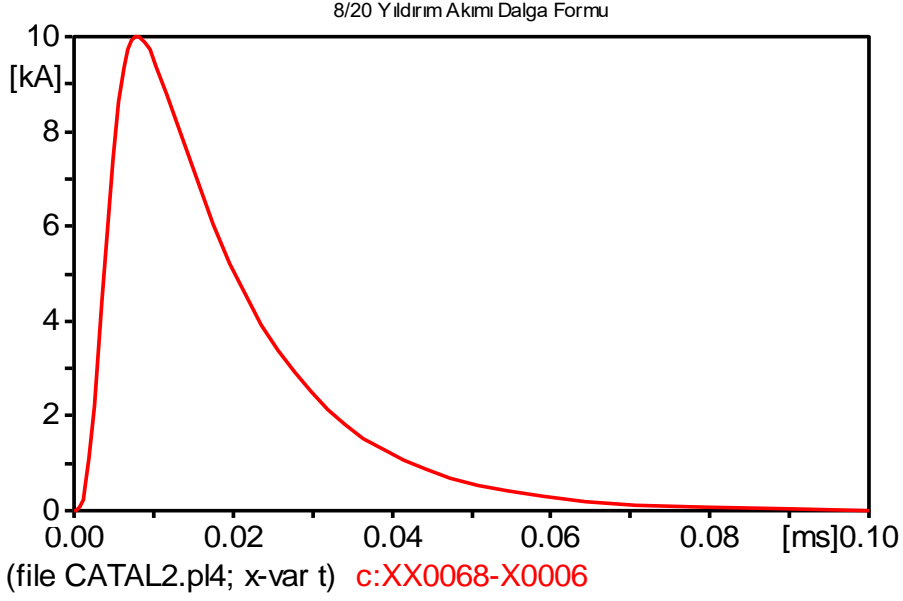
(2) ifadesinde;  $I_0$ -yıldırım akımının tepe değeri,  $\tau_1$ -Akımın yükselme zamanına bağlı zaman sabiti,  $\tau_2$  -Akımın gecikme zamanına bağlı zaman sabiti,  $n$ - Akımın diklik faktörüdür.

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

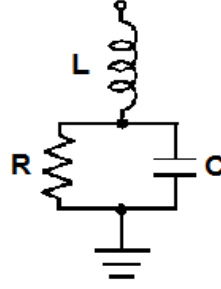
(3) denklemindeki diklik faktörü yıldırım akımının maksimum değere ulaşma süresini belirlemektedir. 8/20 µs’ lik yıldırım akımının elde edilebilmesi için  $n$  değeri 2 olarak alınmıştır. Çalışmada kullanılan 8/20 µs’ lik yıldırım akımı dalga formu Şekil 7’ de sunulmuştur.

### Direk Topraklama Direncinin Belirlenmesi

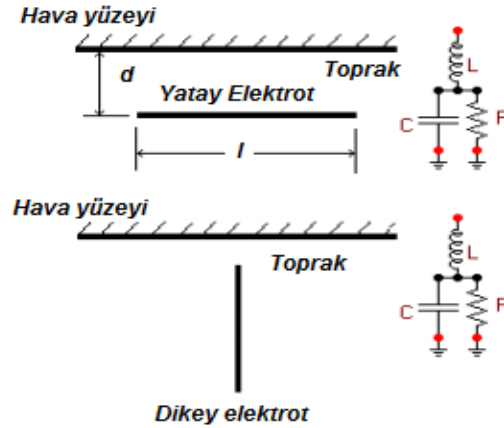
Havai iletim hatlarını taşıyan direklerin direk dibinde topraklanması gereklidir. Düşük frekans durumlarında topraklama direnci elektrotun yatay veya düşey pozisyonda kullanılmasına göre değişiklik göstermektedir. Yıldırım aşırı gerilimlerin oluşturduğu yüksek akım nedeni ile topraklama direnci Şekil 8’ de sunulduğu gibi toplu devre yüksek frekans modeli ile tanımlanır (Rudenberg, 1968).



Şekil 7. ATP yazılımı kullanılarak Heidler fonksiyonu ile elde edilen 8/20  $\mu$ s'lik dalga formu.



Şekil 8. Topraklama direnci için toplu devre yüksek frekans modeli.



Şekil 9. Topraklama direnci için yatay ve düşey elektrot yapısı ile toplu devre yüksek frekans modeli.

Topraklama elektrotlarının dikey veya yatay pozisyonda kullanılabilir. Her iki durumda toplu devre yüksek frekans devre modelleri Şekil 9' deki gibidir.

Rudenber tarafından sunulan toplu devre yüksek frekans toprak direnç modelinde

elektrotların yatay veya dikey olması durumuna göre R direnç değerleri Dwight ve Sunde tarafından sunulan matematiksel eşitlikler ile ifade edilir. Dwight' a göre topraklama elektrotunun dikey olarak kullanılması durumundaki direnç matematiksel ifadesi (4)



eşitliğinde sunulmuştur (Dwight, 1936). Sunde'ye göre ise topraklama elektrotlarının yatay olarak yerleştirilmesi durumunda direnci değeri (5) eşitliği ile ifade edilmektedir (Sunde, 1968).

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{4l}{a} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \left[ \ln \left( \frac{2l}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

Bu eşitliklerde;  $\rho$ - toprağın direnci,  $l$  - topraklama direncinin uzunluğu,  $a$  -topraklama elektrotunun yarıçapı,  $d$ -elektrotların gömülme derinliğidir ve  $l > a$  ve  $l > d$  olduğu kabul edilir. Topraklama direnci için sunulan, toplu devre yüksek frekans modelinde kapasitans değeri ise R direncine bağlı olarak (6) eşitliği ile tanımlanır (Sunde, 1968).

$$C = \frac{\rho \cdot \varepsilon}{R} \quad (6)$$

Bu eşitlikte  $\varepsilon$  ifadesi toprağın geçirgenliğini ifade etmektedir.

Topraklama direnci için sunulan, toplu devre yüksek frekans modelinde L ifadesi ise

hem yatay hem de düşey topraklama elektrotu kullanılması durumunda aynı matematiksel eşitlik ile ifade edilir ve bu eşitlik (7) ifadesi ile tanımlanır (Bourg ve ark, 1995).

$$L = \frac{\mu \cdot l}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2l}{a} \right) - 1 \right] \quad (7)$$

(7) ifadesindeki  $\mu$  toprağın geçirgenliğini ifade etmektedir.

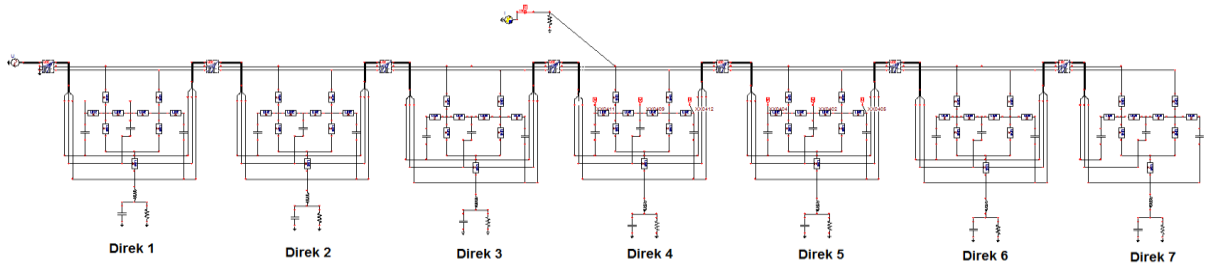
### 154 kV İletim Sisteminin ATP Modeli

Bölüm 2' de sunulan parametrelerine göre modellenen iletim hattının ATP modeli Şekil 10' da sunulmuştur. Uygulanan modelde direkler arası mesafe 400 m olarak alınmıştır. Hesaplamalarda elektrot çapı 2,5 mm<sup>2</sup>, d=0,8 m,  $\rho=50$  ve  $\mu=10^{-3}$  olarak kullanılmıştır. Analizlerde izolatörlerin kapasite değeri zincir izolatörün eşdeğeri olan 80 pF alınmıştır (Shaida ve Jamoshid).

Farklı elektrot uzunluğuna göre hesaplanan toplu devre yüksek frekans model parametre değerleri Çizelge 3' de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.** Yatay ve Düşey elektrot pozisyonu için elektrot uzunluğuna göre hesaplanan toplu devre yüksek frekans modeli parametre değerleri

| İletken Uzunluğu (m) | R <sub>Dikey</sub> (Ω) | C <sub>Dikey</sub> (F) | R <sub>Yatay</sub> (Ω) | C <sub>Yatay</sub> (F) | L (H)  |
|----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------|
| 1                    | 32.4292                | 0.0154                 | 20.7313                | 0.0241                 | 0.0054 |
| 2.5                  | 15.8883                | 0.0315                 | 14.1258                | 0.0354                 | 0.0171 |
| 5                    | 9.0473                 | 0.0553                 | 9.2693                 | 0.0539                 | 0.0397 |



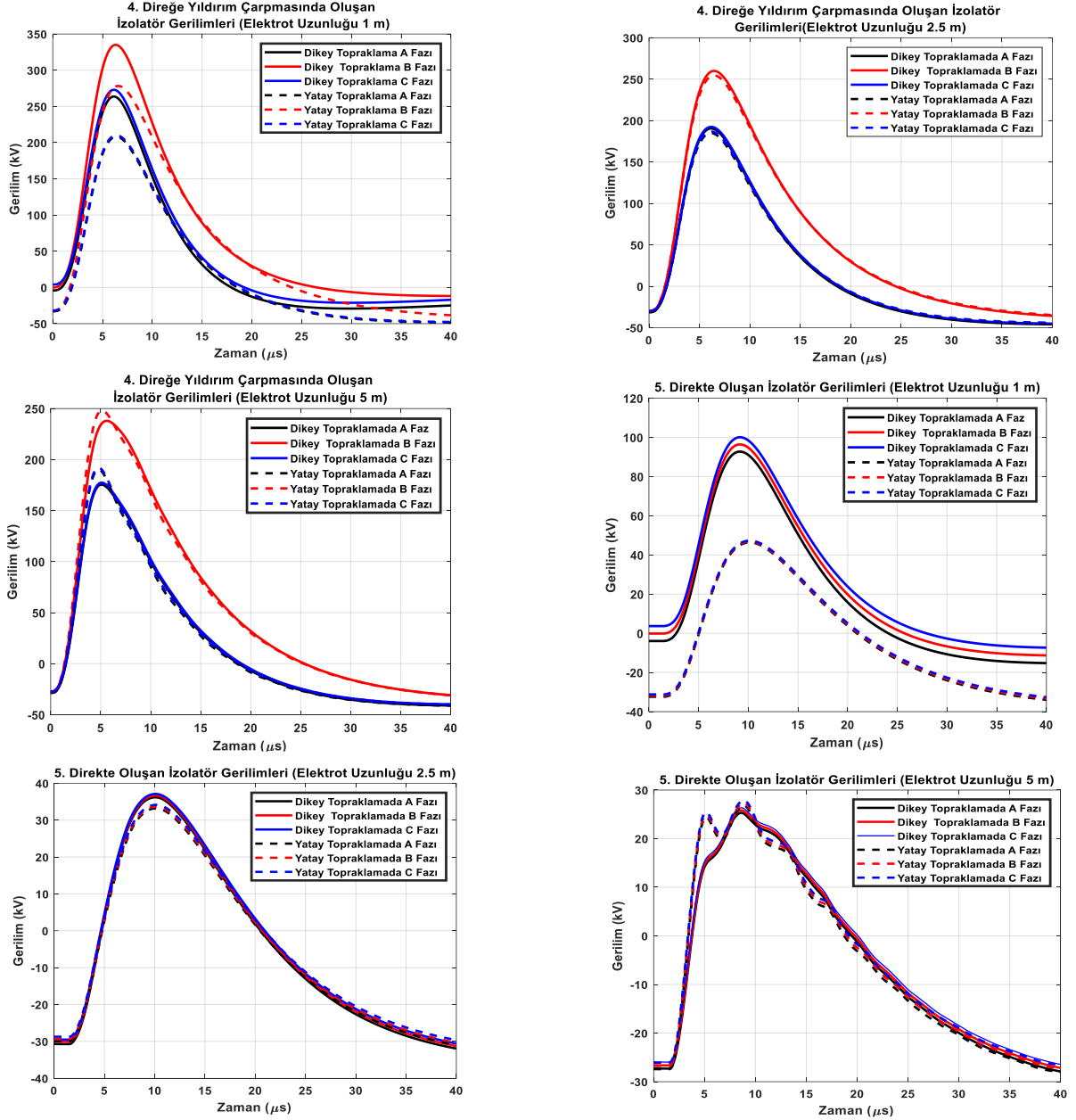
**Şekil 10.** Yedi çatal pylon direkli 154 kV iletim hattının ATP benzetim modeli

## BULGULAR ve TARTIŞMA

### Durum 1: Yıldırımın Direğe çarpması

Şekil 10' da sunulan yedi direkli iletim hattı modelinde 4 numaralı direğe 10 kA'lık

yıldırım akım darbesi uygulandığında, farklı elektrot uzunluğu ve pozisyonları için topraklama direncine bağlı olarak 4 ve 5. direklerde oluşan izolatör gerilim seviyeleri şekil 11' da verilmiştir.



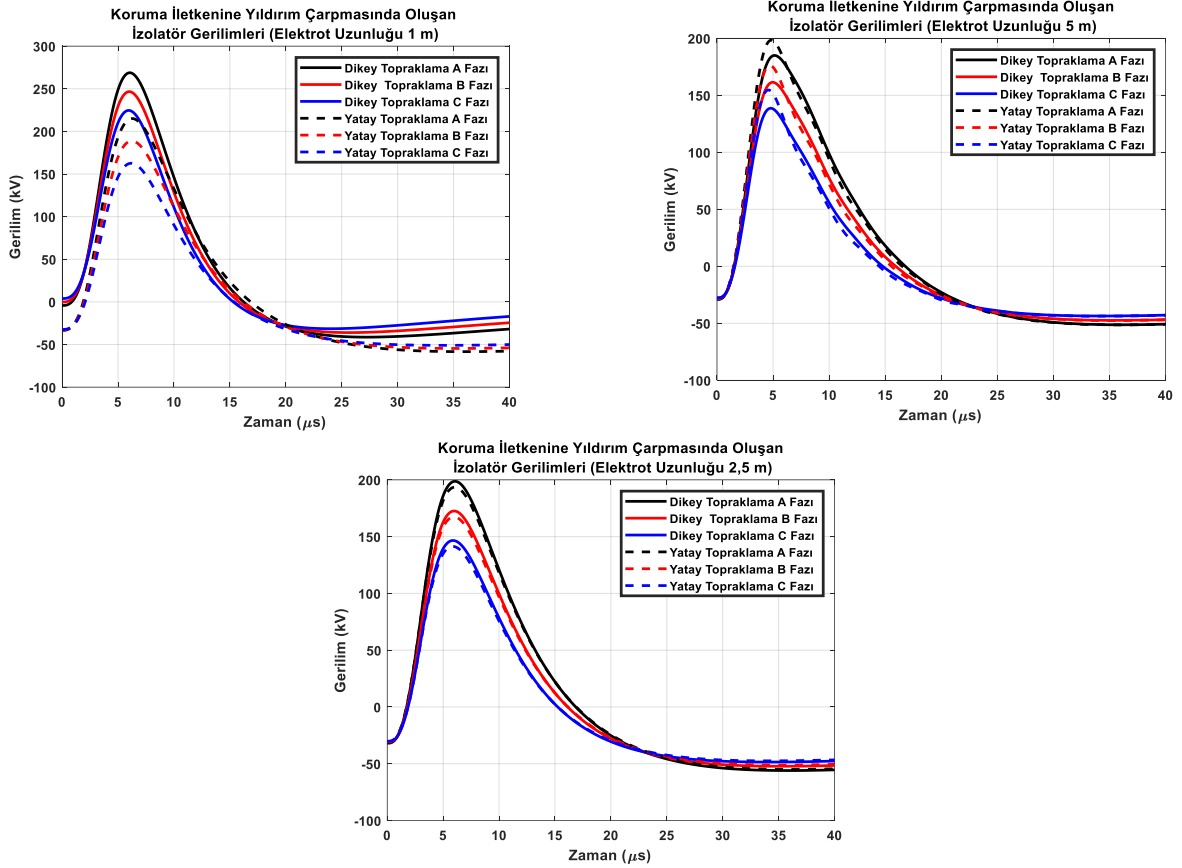
Şekil 11. 4. Direğe yıldırım çarpması durumunda, 4 ve 5. Direklerde izolatorleri üzerinde oluşan gerilim seviyeleri.

Şekil 11' den görüldüğü üzere aynı toprak yapısı dikkate alındığında, 2,5 metrenin altında yatay topraklama yapılması durumunda direğe yıldırım çarptığında izolator gerilim seviyelerini dikey topraklamaya göre daha az olmaktadır. Topraklama elektrot uzunluğunun 2,5 metre olması durumunda ise gerilim seviyeleri birbirine yakındır. Topraklama elektrotu 5 m seçildiğinde ise dikey topraklama yapılması izolator gerilimlerini azalmasında

yatay topraklamaya göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

### Durum 2: Yıldırımın Koruma İletkenine çarpması

Şekil 10' da sunulan yedi direkli iletim hattı modelinde 4 numaralı direğin koruma iletkenine 10 kA'lık yıldırım akım dardesi uygulandığında, farklı elektrot uzunluğu ve pozisyonları için topraklama direncine bağlı olarak 4. direkte oluşan izolator gerilim seviyeleri şekil 12'deki gibidir.



Şekil 12. 4. direğin koruma iletkenine yıldırım çarpması durumunda izolatör gerilim seviyeleri.

Şekil 12'den görüldüğü gibi, aynı toprak yapısı dikkate alınarak iletim hattının koruma iletkenine yıldırım düşmesi durumunda 2,5 meternin altında kullanılan topraklama elektrotları için yatay topraklama yapılması izolatörler üzerindeki gerilim etkisini azaltacaktır. 2,5 m elektrot uzunluğu seçildiğinde yatay ve dikey topraklama durumunda izolatör gerilim seviyeleri birbirine eşittir. Elektrot uzunluğunun 5 metre olması durumunda ise dikey topraklama yapılması, yıldırım aşırı gerilimlerin izolatörler üzerindeki oluşturacağı etkiyi azaltacaktır.

## SONUÇ

Yüksek gerilim havai iletim hattı direklerinde koruma topraklaması kullanılmaktadır. Koruma topraklaması haricinde özel bir koruma yapısı mevcut değildir. Yıldırım aşırı gerilimlerin neden olduğu deşarjlar direk topraklama direnci üzerinden toprağa akmaktadır. Bu çalışmada yıldırım

çarpmalarının neden olduğu yıldırım aşırı gerilimlerin 154 kV çatal pilon direkli iletim hatlarındaki izolatörler üzerindeki etkisi, direk topraklama direncinin değişimi ve topraklama elektrotunun pozisyonu dikkate alınarak ATP programı ile incelenmiştir. Topraklama direncinin tanımlanmasında toplu devre yüksek frekans modeli kullanılmıştır. Benzetim modelinde yıldırım çarpmasının en sık karşılaşılan durumu olan yıldırımın iletim hattını taşıyan direğe çarpması ve koruma iletkenine çarpması durumları dikkate alınmıştır.

Analiz sonuçları incelendiğinde, aynı toprak yapısına sahip 154 kV çatal pilon direklerine yıldırım çarpması durumunda en fazla etki, yıldırımın iletim hattını taşıyan direk üzerine çarpması durumunda oluşmaktadır. Çatal pilon direk için elektrot uzunluğunun 2,5 m'den kısa kullanılması durumunda yatay topraklama elektrotu kullanılması yıldırım çarpmalarında izolatörler üzerindeki aşırı gerilimlerin azaltılacağı belirlenmiştir. Topraklama elektrot

uzunluğu 2,5-5 metre aralığında seçildiğinde yatay ve dikey topraklamada elde edilen izolatör gerilim seviyeleri yakın olmaktadır. Elektrot uzunluğu 5 metrenin üzerinde seçilirse çatal pilon direk için dikey topraklamanın tercih edilmesi izalatör üzerinde oluşacak aşırı gerilimleri azaltılmasını açısından daha uygun olacaktır. Elektrot uzunluğunun topraklama pozisyonuna uygun olarak seçilmesi yıldırım aşırı gerilimlerinin izolatör üzerindeki etkilerini azaltarak elektriksel sistemin daha kararlı çalışmasını sağlayacaktır. 154 kV çatal pilon direklerinin kurulacağı alanda toprak yapısı detaylı olarak incelenmeli ve toprak yapısına uygun olarak topraklama elektrodu ve elektrot pozisyonu seçilmelidir.

## KAYNAKLAR

- Ametani A, Kawamura T, 2005. A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan using EMTP, IEEE Transaction on Power Delivery, (20): 867-875.
- Beaty HW, 2006. Standart Handbook for Electrical Engineers, New York: Mcgraw-Hill Professional, ISBN 978-0071762328.
- Bewly BV, 1963. Travelling Waves on Transmission Systems, New York Dover,
- Bourg S, Sacepe B, Debu T, 1995. Deep earth electrodes in highly resistive ground: Frequency behaviour, in Proc. 1995 IEEE International Symposium Electromagn. Compat. 1995, pp:584-589.
- Chislom WA, Chow YL, Strivastova KD, 1991. Lightning Surge Responce of Transmission Towers, IEEE Transaction, Pas- 102 (8): 3232-3242.
- Çiftçi A, Altundağ E, Bulut Ö, Uysal HH, 2017. Burdur İli Elektrik Dağıtım Şebekesinde Meydana Gelen Arızalara Genel Bir Bakış ve Çözüm Önerileri, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Özel Sayı 1, s. 44-55.
- Dwight HB, 1936. Calculation of the resistances to ground, Electr. Eng., (55): 1319–1328.
- Dommel HW, 1969. Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-88:388-399,
- Dommel HW, 1995. EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Conversion into Electronic Format by Canadian/American EMTP user Group .
- Gencer NC, 2015. Yıldırım Aşırı Gerilimlerin Yüksek Gerilim Hatlarına Etkileri-Direklerin Topraklama Direnci ile İzolatör Atlama Gerilimi İlişkisi-Parafudurlar Transformator Eklatörlerinin Etkinliği, TMMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni (2015/1).
- Greenwood A, 1991. Electrical Transients in Power Systems, New York: John Willey & Sons, ISBN 978-0471620587.
- International Electrotechnical Commission (IEC) Standarts 61643-11
- International Electrotechnical Commission (IEC) Standarts 61000-4-5
- Kaygusuz A, Mamiş MS, Akin E, 2002. S-Domain Analysis of Lightning Surges on Transmission Tower, First International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, Bakü, Azerbaijan.
- Kaygusuz A, Mamiş MS, Erhan A, 2013. Elektrik Direklerinde Oluşan Aşırı Gerilimlerin Laplace Dönüşümü ile Analizi, SAU Fen Bilimleri Enstitü Dergisi, Cilt 7, (Mart) Sayı 1.
- Kawai M, 1964. Studies of the Surge Responce on a Transmission Line Tower, IEEE Transaction, PAS-83:30-34.
- Minnaar UJ, Gaunt CT, Nicolls F, 2012. Characterisation of power system events on South African transmission power lines, Electric Power Systems Research (88): 25-32.

- Orlando PH, 1999. Alternative Transient Program: Comparison of Transmission Line Models, Revista Latinoamericana del ATP, (1): 1-5.
- Özkaya M, 1996. Yüksek Gerilim Tekniği Cilt 2– Aşırı Gerilimler ve Aşırı Gerilimlere Karşı Koruma, Yüksek Gerilimlerin Üretilmesi, Yüksek Gerilimlerin Ölçülmesi, s. 34-34, İstanbul.
- Rudenberg R, 1968. Electrical Shock Waves in Power System, Cambridge, MA: Harward Univ. Press.
- Shaida N, Jamoshid BT, 2008. 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, Malaysia.
- Sunde, E. D.,1968, Earth Conduction Effects in Transmission Systems, 2nd ed. New York: Dover.
- Şeker, M., Kaygusuz, A., 2011, 154 kV’luk Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan Kafes Direklerin Yıldırım Analizi, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Elazığ, Türkiye.
- Ueda , Ito T, Watanabe H, Funabashi T, Ametani A, 2000. A Comparasion between two Tower Model for Lightning Surge Analysis Of 77 kV System, International Conference on Power System Technology (POWERCON 2000), 4-7 December, Australia, Proceedings (CAT NO. 00EX409),
- Uman MA, 1986. All About Lightning. Toronto: Dower Publication,. Isbn 978-0486252377.
- Yıldırımdan Koruma Yönetmeliği, 2017. s. 67.