

# Yüksek Gerilim Havai İletim Hat İzolatörleri Üzerinde Oluşan Geri Atlama Olayı Analizi

## Analysis of Backflashover Phenomenon Occured Across the High Voltage Transmission Line Insulators

Fatma Yaprakdal<sup>1</sup>, Oktay Arıkan<sup>2</sup>, Özcan Kalenderli<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü

<sup>1</sup>Akdeniz Üniversitesi, <sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi

fatmayaprakdal@akdeniz.edu.tr, oarikan@yildiz.edu.tr

<sup>3</sup> Elektrik Mühendisliği Bölümü

İstanbul Teknik Üniversitesi

kalenderli@itu.edu.tr

### Özet

Güç sistemlerinin güvenilirliği ve sürekliliği enerji iletim hatlarının performansından önemli ölçüde etkilenmektedir. Yıldırım geri atlama etkileri, iletim hattı arızasının başlıca nedenlerinden biri olarak bilinmektedir. Bu bildiride, Türkiye'deki 154 kV iletim hatlarından birinde gerçekleşen izolatörler üzerindeki geri atlama olayı ile ilgili bir çalışmayı sunmaktadır. Bu iletim hattı, yıldırımdan kaynaklı izolatör geri atlaması ile ilgili geçmiş arıza kayıtlarına sahiptir. ATP – EMTP yazılımı, iletim hattı izolatörlerinde gerilim atlamasına sebep olabilecek minimum yıldırım akımını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu minimum akım, izolatörlerdeki gerilim atlama oranının tahmininde ve iletim hatlarının yalıtım koordinasyonu çalışmalarında büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, izolatörlerdeki gerilim atlama oranının tahmini, transformatörlerden önce yerleştirilen parafudrların arıza durumunda devrede olmamaları hali için de çalışılmıştır.

### Abstract

Reliability and sustainability of a country's power system is significantly affected by performance of energy transmission lines. The lightning backflashover effects are known as one of the major causes of transmission line outage. This paper presents a study regarding backflashover phenomenon across insulators carried out on one of the 154 kV transmission lines in Turkey. This transmission line has past records of lightning caused insulator flashover related outage. ATP-EMTP software is used to estimate the minimum backflashover current which could cause flashover of insulators. This minimum current is of a great importance estimating the backflashover rate and transmission lines insulation coordination works. Estimating of that backflashover rate is also worked for the case that surge arresters are not online because of the fact that they are in faulty position.

### 1. Giriş

İletim hatlarının yıldırım darbe gerilimi geri atlamalarına karşı korunması modern güç sistemlerinde en önemli araştırma

alanlarından biri olarak düşünülmektedir. Çünkü, izolatörlerdeki gerilim geri atlamaları hatlarda oluşan arızaların dikkate alınması gereken bir kısmını oluşturmaktadır. Geri atlama, yıldırımın direğe ya da koruma hattına düşmesi ile izolatörler üzerinden faz hattına olan atlamadır. Düşen bu yıldırımlar, koruma hattı üzerinde yürüyen akım ve gerilim dalgaları oluştururlar ve empedans süreksizliğinin olduğu her noktada geri yansıma ve kırılmaya uğrarlar. Dalga akımının bir kısmı koruma hattı üzerinde yürüyerek yakındaki direklere, diğer bir kısmı da direktten aşağıya toprağa doğru ilerleyecektir. Direğin dalga empedansı yürüyen dalgaların direğin tepesine ve iletim hatlarına yansımaya neden olacaktır. Sonuç olarak, bu durum direğin tepesindeki potansiyeli artırırken izolatör üzerindeki potansiyeli düşürecek. Faz iletkeni ile direk arasındaki gerilim farkı izolatör geri atlamasına neden olması için hattın kritik geri atlama gerilimini aşması gerekmektedir. Bu olay daha önce deneyimlenen gerilim atlamalarına göre ters yönde olmasından dolayı geri atlama olarak adlandırılmaktadır.

İzolatörlerde geri atlama oluşturabilecek gerilimi yaratacak minimum yıldırım akımının tahmini, havai iletim hatlarının geri atlama oranının hesabında önemli bir etkidir. Ancak, iletim hattı direklerinin tepesine direkt olarak düşerek izolatörlerde geri atlamaya neden olan yıldırım darbe gerilimleri, dalga şekli olarak standart darbe gerilimlerinden oldukça farklıdır. İzolatörde gerilim atlamasına neden olan kritik akım, IEEE İletim ve Dağıtım komitesi tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntemle alternatif olarak bilgisayar simülasyonları kullanılarak tahmin edilebilir [1]. Bu çalışmada, daha önce Datsios Z. G. Ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmada ATP – EMTP ortamında geliştirilen bir araç kullanılarak daha detaylı şekilde kritik akım tahmini yapılmıştır [2].

Modelleme ve analiz çalışmalarında, yıldırımın 154 kV anma gerilimli sistemdeki çift devre, tek koruma hatlı, kafes direğin tepesine direkt düşmesi durumu incelenmiştir. Türkiye'de Antalya bölgesi en çok yağış alan ve yıldırımlı gün sayısı en fazla olan iller sıralamasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bu duruma bağlı olarak, bölgede çok sık faz - toprak arızaları

gözlenmektedir. Bu çalışmaya TEİAŞ - 19. İletim Tesis İşletme Bölge Müdürlüğü'ne bağlı Yalnızardıç - Mahmutlar arasındaki iletim hattında daha önce kaydedilen ve yıldırımdan kaynaklı olduğu tahmin edilen bir arızadan yola çıkılarak başlanmıştır. Yapılan simülasyonlarla, direğin tepesine direkt düşerek iletim hattı izolatorleri üzerinde geri atlamaya sebep olan minimum yıldırım akımları, trafo merkezinin parafudrlu ve parafudrsuz olması durumları için elde edilmiştir. Maksimum yıldırım akımı da 200 kA alınarak, bu sınır değerler çerçevesinde iletim hattının üzerine çektiği yıldırım sayısı parametresi kullanılarak iletim hattında geri atlama oranı hesabı yapılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmanın amacı, Antalya Bölgesi'ndeki Yalnızardıç - Mahmutlar arasındaki iletim hattındaki daha önce kaydedilen ve yıldırımdan kaynaklı olduğu tahmin edilen bu arızanın yıldırımın direkt iletim hattı direğine düşmesi durumundan kaynaklı olup olmadığını araştırmak ve transformatörden önce yerleştirilen parafudrun direğe yıldırım düştüğünde hattaki aşırı gerilimlere ve böylelikle gerilim geri atlamalarına etkisini incelemektir.

## 2. Yıldırım Akımları

Yıldırımların yaklaşık olarak dörtte biri toprağa düşmektedir. Bulut ile toprak arasındaki yıldırım boşalmaları, buluttan toprağa doğru ya da topraktan buluta doğru olmaktadır ve pozitif ya da negatif kutupludur. İletim hatlarına düşen yıldırımlar aşağı yönlüdür ve buluttan toprağa doğru olan yıldırım boşalmalarının %90'ı negatif kutupludur [3].

Aşağı yönlü negatif yıldırım akımı, en yüksek 200 kA ve en az 3 kA seviyesindedir. CIGRE TB 63 tarafından izolatorlerde geri atlama durumu için ( $I > 20\text{kA}$ ) önerilen global medyan  $I_\mu$  değeri 33.3 kA olup standart sapma  $\sigma_{\ln I}$  değeri ise 0.605'tir [4]. Yıldırım akım parametreleri log-normal dağılımdan hesaplanabilmektedir. Yıldırım akımının olasılıksal yoğunluk fonksiyonu  $f(I)$ 'dir. Bu fonksiyon;

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln I} I} \exp \left[ -\frac{(\ln I - \ln I_\mu)^2}{2\sigma_{\ln I}^2} \right] \quad (1)$$

Analizi yapılacak yerle ilgili yıldırım düşme sıklığı ( $N_g$ ) hakkında kaydedilmiş bir bilgi yoksa fırtınalı gün sayısı ( $T_D$ )'den yıldırım sıklığı hesaplanabilir [3]:

$$N_g = 0.04 \cdot T_D^{1.25} \quad (2)$$

Bu çalışmada, analizi yapılan bölge için bir yıldaki fırtınalı gün sayısı 35-40 arasında değişmektedir. Denklem (2)'den yıldırım sıklığı hesaplanırsa  $N_g$  değeri 4 olarak bulunur.

İletim hattı direğinin yüksekliğinin artması ile üzerine çektiği yıldırım sayısı artar ve bunun oranı denklem (3)'ten hesaplanır [5].

$$N_s = N_g \left( \frac{28h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (3)$$

Burada  $h$ , direğin yüksekliği ve  $b$  ise direğin tepesindeki koruma hatları arasındaki açıklıktır. Bu çalışmada incelenen direkler üzerinde tek koruma hattı bulunduğu için bu açıklık

sıfır olarak alınmıştır. Direğin yüksekliği %10'u kadar arttırılırsa yıldırım sayısı oranı %6'sı kadar artmaktadır.

## 2.1. İletim Hattı İzolatörlerinde Geri Atlama

Koruma iletkenleri, faz iletkenlerine düşebilecek yıldırım sayısını en aza indirebilmek için direkler üzerinde konumlandırılırlar. Enerji iletim hava hatlarında koruma hatası oluşmadığı durumda direğin tepe noktasına ya da koruma iletkenine düşmektedir. Eğer koruma iletkeni ile maksimum koruma sağlanmışsa, geri atlama olayının meydana gelmesi tesirle elektriklenme ve faz hattına direkt yıldırım düşmesi durumundan dolayı arıza oluşma olasılığından çok daha yüksek olmaktadır [6].

Yıldırımın iletim hattı direğinin tepe noktasına ya da koruma hattına direkt düşmesiyle, hattın yalıtımını zorlayan dik ön cephe aşırı gerilimler meydana gelmektedir. Bu aşırı gerilimler, izolatorlerde geri atlamaya yol açar ve bunun sonucunda iletim hattı arızaları ve ekonomik kayıplar yaşanır. Bir iletim hattı izolatoründeki geri atlama oranının hesabı için, direğin üzerine çektiği yıldırım sayısına ek olarak bu izolatorde geri atlama oluşabilmesi için gereken minimum yıldırım akımı değerinin ( $I_{min}$ ) bilinmesi gerekmektedir. Minimum yıldırım akımı basitleştirilmiş ifadeyle [6]-[7] hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda, minimum yıldırım akımı ATP-EMTP yazılımı kullanılarak simülasyon ortamında da belirlenebilmekte ve böylece standart olmayan bir yıldırım darbe gerilimi altında izolatorlerdeki geri atlama olayı analiz edilebilmektedir [8].

Enerji iletim hattı izolatorlerinde geri atlama oranı ( $BFR$ ), koruma hattına düşen ve izolatorde atlamaya neden olan yıldırım darbesinin oranı olarak tanımlanmaktadır. Ancak yıldırımın direğin tepe noktasına düşerek yarattığı aşırı gerilim etkisi koruma hattına düşmesi durumundakinden çok daha fazla olduğu için CIGRE [2]'ye göre bu oran 0.6 katsayısıyla çarpılmaktadır ve aşağıdaki ifade ile verilmektedir.

$$BFR = 0.6 N_s \int_{I_{min}}^{I_{max}} f(I) dI \quad (4)$$

Denklem (4)'ün kullanılmasıyla sonuç geri atlama/100km/yıl olarak elde edilir. Burada,  $N_s$ ,  $f(I)$  ve  $I_{min}$  ifadeleri daha önce tanımlanmıştır.  $I_{max}$  ise 200 kA olarak alınmaktadır [4].

## 3. 154 kV Türkiye İletim Sisteminin İzolatör Geri Atlaması Durumu İçin Modellenmesi

Ülkemiz 154 kV anma gerilim seviyesindeki havai iletim hattı direkleri tepesine düşen ve iletim hattı ile direk arasına bağlı izolatorde geri atlamaya sebep olabilecek minimum yıldırım akımlarını hesaplamak için ATP-EMTP simülasyonları kullanılmıştır. İncelenen sistem; besleme kaynağı, havai iletim hatları, direkler, izolatorler, kesiciler, parafudr ve transformatörlerden oluşmaktadır.

Simülasyonlarda negatif yıldırım darbe gerilimi direğin tepe noktasına direkt olarak uygulanmıştır. Hat geometrisinin sonucu olarak, düşen bu yıldırım akımı ile ilk olarak direk konsolunun en altına bağlı olan iletim hattında geri - atlama olayı görülür. Bu nedenle, en alttaki C-fazının açısı 30'ar derece artırılarak denemeler yapılmış ve güç frekansı pozitif

gerilimin tepe değerine ayarlanarak en kötü koşullardaki durum değerlendirilmesi için uygun hale getirilmiştir.

Yıldırım darbesi, CIGRE akım kaynağı modeli [4] ve buna paralel 1000  $\Omega$  değerinde yıldırım yolu empedansı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca [4]'a göre de yıldırım akım darbesinin sırt süresi  $t_h$ , 77.5  $\mu$ s olarak alınırken, cephe süresi  $t_f$ , ve maksimum dikliği  $S_m$ , yıldırım akımı tepe değerinin fonksiyonu olarak denklem (8)'e göre hesaplanmıştır. Burada maksimum yıldırım akımı değeri 200 kA alınarak,  $t_f$  değeri 8  $\mu$ s ve  $S_m$  değeri ise 47.65 kA/ $\mu$ s olarak bulunmuştur.

$$t_f = \begin{cases} 1.77 I_{MSF}^{0.188}, & 3 \leq I_{MSF} \leq 20 \text{ kA} \\ 0.906 I_{MSF}^{0.411}, & I_{MSF} > 20 \text{ kA} \end{cases} \quad (5)$$

$$S_m = \begin{cases} 12 I_{MSF}^{0.171}, & 3 \leq I_{MSF} \leq 20 \text{ kA} \\ 6.5 I_{MSF}^{0.376}, & I_{MSF} > 20 \text{ kA} \end{cases}$$

Havai iletim hatları için ATP-EMTP ortamında, direklerin geometrisi ve hat aralıkları göz önünde bulundurularak, J. Marti frekansa bağlı hat modeli kullanılmıştır. Hat parametreleri toprak öz direnci 200  $\Omega$ m değeri alınarak hesaplanmıştır. Simülasyonu yapılan iletim hattı parçasında iki direk arası mesafe/açıklık 350 m olup, toplamda 5 adet direğin bulunduğu sistem parçası için çalışma yapılmıştır. Bunlara ek olarak hat sonu yansımalarından kaçınmak için yeteri kadar uzunlukta hat ilave edilmiştir. Ayrıca, simülasyonlarda korona etkisi ihmal edilmiştir.

İletim hattı direkleri, art arda bağlı dört adet eşit dalga empedansına ( $Z_T$ ) sahip dikey, kayıpsız, tek fazlı, frekanstan bağımsız ve dağıtılmış parametrelili hat modeli kullanılarak modellenmiştir. Hat üzerindeki yürüyen dalga hızının yayılma hızı ışık hızının %85'i olarak alınmıştır [5]. Yıldırımın çift devreli direğin tepe noktasına düşmesi durumu için dalga empedansı  $Z_T$ , [9]'a göre direğin koni benzetimiyle denklem (9) ile hesaplanmıştır. Direğin topraklama direnci 20  $\Omega$  olarak alınmış ve hesaplarda sabit tutulmuştur.

$$Z_T = 60 \ln \left( \sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right) \quad (6)$$

Bu gerilim seviyesindeki iletim hatlarına ait izolator zincirleri, 750 kV standart yıldırım darbe gerilimi dayanımına sahip olup 1.60 m uzunluğundadır. Bu izolatorlerdeki gerilim atlaması durumu daha önceki bir çalışmada modellenmiş olan ve TACs type 13 anahtarını kontrol eden bir modeli barındıran ISF objesi kullanılarak modellenmiştir. ISF'de atlama olayı; gerilim-zaman eğrisi, integrasyon yöntemi, öncü boşalma gelişimi modelleri uygulanarak modellenmektedir. Gerilim-zaman eğrisi ve integrasyon yönteminde izolatorlerin standart pozitif yıldırım darbe gerilimindeki atlama gerilimi referans olarak alınmaktadır. Sözü edilen modeller arasında öncü boşalma gelişimi modellerinde diğer modellere göre daha yüksek atlama gerilimleri tahmin edildiği gözlemlenmiştir. Bu model, büyük açıklıklarda havada boşalmanın fiziksel delinmesi temeline dayanılarak elde edilmiştir. Korona başlangıcı, kanal gelişimi ve öncü boşalmanın ilerlemesi olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır. Böylece atlama için geçen toplam süre;

$$t_c = t_i + t_s + t_l \quad (7)$$

olmaktadır. Burada  $t_i$ , korona başlangıcına kadar geçen süredir;  $t_s$  kanal oluşum süresi,  $t_l$  de öncü boşalma gelişim aşamasında geçen süredir. Hava aralığındaki ortalama elektrik alan şiddeti, kritik  $E_0$  değerine ulaştığında kanalların bu aralıkta köprü oluşturdıkları düşünülür ve sonra bu faz tamamlanır. Arkasından, öncü boşalma ilerleme fazı başlar ve öncü boşalmanın aralığı köprülemesiyle gerilim atlama olayı gerçekleşir. Genellikle öncü boşalmanın hızı, uygulanan gerilimin ve henüz köprülenmemiş hava aralığının açıklığının yani öncü boşalmanın L boyunun fonksiyonu olarak açıklanabilmektedir. İzolatörler için deneysel araştırmalar sonucunda elde edilen birçok öncü boşalma ilerleme modelleri mevcuttur [4-10], [11-12]. Bu çalışmada, izolatorde atlamının olabilmesi için gereken gerilimi yaratacak minimum akım değerinin hesabında CIGRE öncü boşalma gelişim modeli tercih edilmiştir. CIGRE modeli aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir [13];

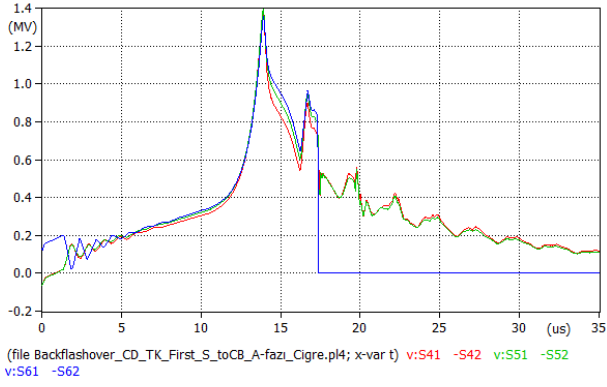
$$\frac{dL}{dt} = k_3 V [V / (D - L) - E_0] \quad L \geq D \quad (8)$$

[14]'a göre,  $k_3 = 1.3 \text{ (m}^2 \cdot \text{kV}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$  ve  $E_0 = 600 \text{ (kV/m)}$ 'dir. Simülasyonlar bir de iletim sistemi şalt sahalarında olduğu gibi transformator girişine parafudr yerleştirilerek yapılmıştır. Parafurlar, sistem bilgileri ile Pinceti ve Giannetoni'nin frekansa bağlı modeline dayanılarak [2].

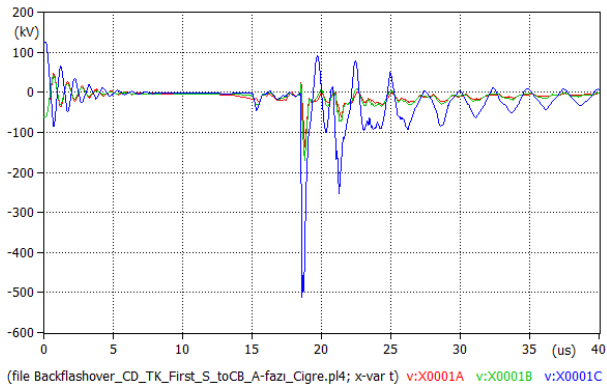
#### 4. ATP – EMTP Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışmaları 154 kV anma gerilimli sistemde, trafo merkezinden itibaren sayılan ikinci direğin 8x77.5 $\mu$ s'lık bir yıldırım darbe akımına maruz kalması durumu için gerçekleştirilmiştir. Buradaki amaç daha önce de bahsedildiği gibi, izolatorlerde geri atlamaya sebep olacak minimum (kritik) yıldırım darbe akımını ( $I_{min}$ ) bulmaktır. İlk aşamasında, transformator merkezinden önce sistemde parafudr olması durumu için dört kere simülasyon çalışması yapılırken ikinci aşamasında da sistemde bu noktada parafudr olmaması durumu için aynı sayıda simülasyon yapılmıştır. Her iki aşamada da, minimum darbe akımları ( $I_{min}$ ) altında hat izolatorleri ve kesicileri üzerindeki aşırı gerilimler gözlemlenmiştir.

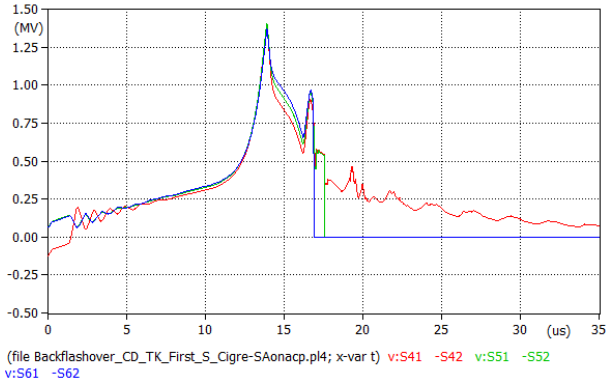
Şekil 1'de, sistemde parafudr devre iken gerçekleştirilen simülasyon sonuçları yer almaktadır. Şekil 1.a ve 1.b, iletim hattı izolatorleri ve kesicileri üzerinde gözlemlenen aşırı gerilim değişimlerini göstermektedir. Buna göre, geri atlama en alttaki C-fazı izolatoründe görülmektedir. C-fazı izolatoründe geri atlama, minimum 80 kA'lık bir yıldırım darbe akımı uygulanarak elde edilebilmiştir. İzolatör uçlarındaki gerilimler 1.4 MV değerine ulaşırken, geri atlama olayı gözlemlenen C-fazında kesici üzerinde 512 kV'a kadar çıkan gerilim artışı görülmektedir. Şekil 1.c'de görülen, önce C-fazı ve sonrasında B-fazı izolatorlerinde geri atlama olayı minimum 81 kA'lık bir yıldırım darbe akımı uygulanarak elde edilebilmiştir. Bu durumda aynı şekilde izolator uçlarındaki gerilimler 1.4 MV değerine ulaşırken, geri atlama olayı gözlemlenen C-fazında kesicisi üzerinde 540 kV ve B-fazında kesicisi üzerinde 410 kV seviyelerinde gerilim artışı Şekil 1.d'de görülmektedir.



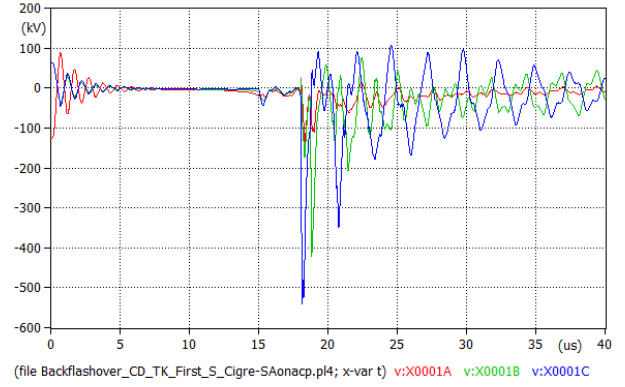
**a) 80 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı izolatörleri üzerindeki gerilim değişimi**



**b) 80 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı kesicileri üzerindeki gerilim değişimi**



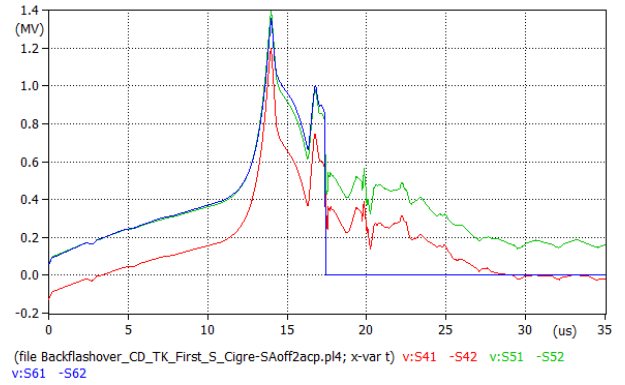
**c) 81 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı izolatörleri üzerindeki gerilim değişimi**



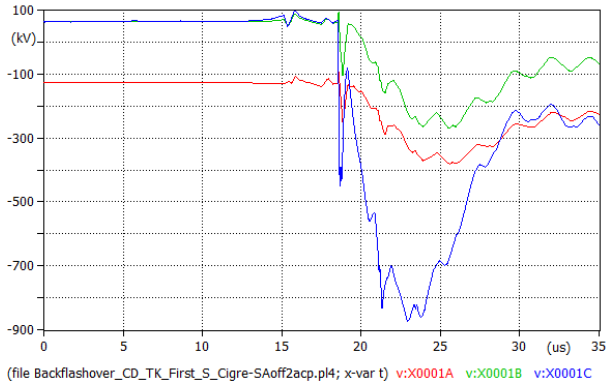
**d) 81 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı kesicileri üzerindeki gerilim değişimi**

**Şekil 1. Sistemde parafıdr bulunması durumdaki aşırı gerilimler.**

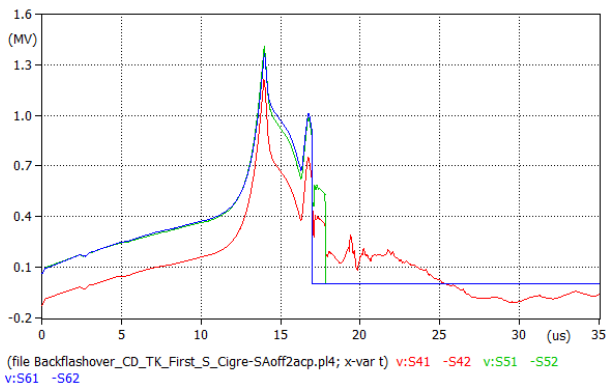
Şekil 2'de ise, sistemde parafıdr devrede değilken gerçekleştirilen simülasyon sonuçları yer almaktadır. Şekil 2.a'ya göre, geri atlama en alttaki C-fazı izolatöründe görülmektedir. C-fazı izolatöründe geri atlama, minimum 74 kA'lık bir yıldırım darbe akımı uygulanarak elde edilebilmiştir ve bu durumda izolatör uçlarındaki gerilimler 1.4 MV seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir. Geri atlama olayı gözlemlenen C-fazında kesici üzerinde 840 kV'a kadar çıkan gerilim artışı görülmektedir ve bu değer 750 kV olan kesici darbe dayanım gerilimini aşmaktadır. Şekil 1.c'de görülen, önce C-fazı ve sonrasında B-fazı izolatörlerinde geri atlama olayı minimum 75 kA'lık bir yıldırım darbe akımı uygulanarak elde edilebilmiştir. Bu durumda izolatör uçlarındaki gerilimler 1.4 MV değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 1.d'de, geri atlama olayı gözlemlenen C-fazın kesicisi üzerinde 945 kV ve B-fazı kesicisi üzerinde 800 kV'a kadar ulaşan gerilim seviyeleri görülmektedir.



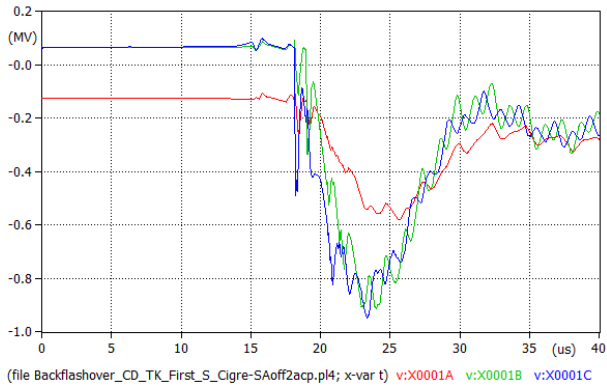
**a) 74 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı izolatörleri üzerindeki gerilim değişimi**



**b) 74 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı kesicileri üzerindeki gerilim değişimi**



**c) 75 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı izolatorleri üzerindeki gerilim değişimi**



**d) 75 kA yıldırım darbe akımı uygulandığında iletim hattı kesicileri üzerindeki gerilim değişimi**

**Şekil 2.** Sistemde parafudr bulunmaması durumdaki aşırı gerilimler.

## 5. Sonuç ve Değerlendirme

Bu çalışmada Türkiye 154 kV enerji iletim sisteminde kullanılan çift devre, tek koruma hatlı, kafes direğe direkt yıldırım düşmesi durumu, ATP-EMTP simülasyon ortamında analiz edilmiştir. ATP – EMTP yazılım programı, iletim hattı izolatorlerinde gerilim atlamasına sebep olabilecek minimum yıldırım akımını ( $I_{min}$ ) tahmin etmek için kullanılmıştır.

Yapılan simülasyonlarla elde edilen minimum yıldırım darbe akımları ve daha önce hesaplanmış olan iletim hattı direğinin üzerine çektiği yıldırım sayısı ( $N_s$ ) parametreleri kullanılarak denklem (4)'e göre izolator geri atlama oranları hesaplanmıştır. Sistemde parafudr bulunması halinde, 80 kA'lık bir yıldırım darbe akımı altında bu oran 3.74 (geri atlama/100 km/yıl) olarak bulunurken, 81 kA'lık bir yıldırım darbe akımı altında 3.59 (geri atlama/100 km/yıl) olarak elde edilmiştir. Sistemde parafudr bulunmaması durumunda ise, 74 kA'lık bir yıldırım darbe akımı altında geri atlama oranı 4.763 (geri atlama/100 km/yıl) iken, 75 kA'lık bir yıldırım darbe akımı altında geri atlama oranı 4.763 (geri atlama/100 km/yıl)'tür.

Bu çalışmada kullanılan Antalya, Yalnızardıç - Mahmutlar arasındaki iletim hattındaki daha önce kaydedilen ve yıldırımdan kaynaklı olduğu tahmin edilen gerçek arıza verilerine göre arızanın olduğu hat ortadaki hatır (B-fazı) ve buradaki kesici de arıza sırasında zarar görerek çalışamaz hale gelmiştir. Dolayısıyla yaşanan bu arızanın, simülasyon sonuçları ve BFR hesaplamalarına göre minimum 81 kA ya da 75 kA'lık bir yıldırım darbe akımı kaynaklı olması kuvvetle muhtemeldir. Çünkü sistemde parafudrun devrede olması halinde 81 kA'lık bir yıldırım darbe akımı ile B ve C fazlarında geri atlama gözlemlenmekle beraber bu fazların kesicileri üzerinde oldukça yüksek gerilim değerleri gözlemlenmiştir. Sistemde parafudrun devrede olmaması halinde ise aynı durum 75 kA'lık bir yıldırım darbe akımı ile sağlanmaktadır.

## 6. Kaynaklar

- [1] IEEE Working Group: Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. A Simplified Method for Estimating Lightning Performance of Transmission Lines. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-104, No. 4, pp. 919-932, April 1985.
- [2] Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Insulator String Flashover Modelling with the Aid of an ATPDraw Object. UPEC 2011 Universities Power Engineering Conference, Germany, 2011.
- [3] CIGRE Working Group C4.407: Lightning Parameters for Engineering Applications, *Technical Bulletin* 549, Aug. 2013.
- [4] CIGRE Working Group 33.01: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, *Technical Bulletin* 63, Oct. 1991.
- [5] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std 1243 – 1997, pp. 1 – 44, 16 Dec. 1997.
- [6] A. R. Hileman., 'Insulation Coordination for Power Systems', CRC Pres, Boca Raton, FL, 1999.
- [7] A. J. Erikson, K. H. Weck., 'Simplified Procedures for Determining Representative Substation Impinging Lightning Overvoltages', CIGRE paper 33-16, 1998.
- [8] Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., S. I. Angelakidou, 'Estimation of the Backflashover Current of Overhead Lines of the Hellenic Transmission System through ATP – EMTP Simulations', CIGRE International Colloquium on Lightning and Power Systems, Bologna, 2016.
- [9] IEEE Working Group: Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – updates to analytical models, *IEEE Trans. Power Deliv.*, pp. 493 – 506, 1996.
- [10] Shindo T., Suzuki T., A new calculation method of breakdown voltage-time characteristic of long air gaps, IEEE

Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no.6, pp.1556-1563, 1985.

[11] Pigni A., Rizzi G., Garbagnati E., Porrino A., Baldo G., ve Pesavento G., Performance of Large Air Gaps under lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy of Predetermination Methods, IEEE Trans. Power Del., vol. 4, no 2, pp 1379-1392, 1989.

[12] Mozumi T., Baba Y., Ishii M., Nagaoka N., ve Ametani A., Numerical Electromagnetic Field Analysis of Archorn Voltages During Back-flashover on a 500 kV Twin-Circuit Line, IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no 1, pp 207-213, 2003.

[13] Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Estimation of the Minimum Shielding Failure Current Causing Flashover in Overhead Lines of the Hellenic Transmission System through ATP – EMTP Simulations, ICLP 2012 International Conference on Lightning Protection, Austria, 2012.

[14] Love E.R: 'Improvements in Lightning Stroke Modeling and Applications to Design of EHV and UHV Transmission Lines'. MSc dissertation, University of Colorado, Denver, CO, 1973.