

Yüksek Gerilim Sistemlerinde Yıldırım Darbe Aşırı Gerilim Analizi

*¹Fatma Yaprakdal, ²Özcan Kalenderli, ³Oktay Arıkan

^{1,3}Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Özet

Havai iletim hat arızalarının önemli bir kısmı, genellikle yıldırımın şiddetli olduğu bölgelerde gözlemlenmektedir. Yıldırım aşırı gerilimlerinin etkisinin azaltılması için uygulanacak koruma yöntemini belirlemeden önce her bir iletim hattının performansının ayrıntılı olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, Türkiye enerji iletim sisteminde kullanılan 154 kV'luk, çift devre, tek koruma hatlı, kafes direkli havai iletim hatlarına direkt yıldırım düşmesi durumu, ATP - EMTP yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. ATP - EMTP simülasyonları, bu tip direk üzerindeki izolatörlerde koruma hattı hatası nedeniyle iletim hattına direkt düşebilecek ve gerilim atlamasına sebep olabilecek minimum (kritik, I_c) ve maksimum yıldırım akımlarını (I_{MSF}) tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu minimum ve maksimum yıldırım akımları, iletim hatlarına direkt olarak düşen yıldırım akımları sonucu izolatörlerdeki gerilim atlaması oranının tahmininde ve iletim hatlarının izolasyon koordinasyonu çalışmalarında büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, izolatörlerdeki gerilim atlaması oranının tahmini, transformatörlerden önce yerleştirilen parafudrların arıza durumunda devrede olmamaları hali için de çalışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Havai iletim hatları, yıldırım aşırı gerilimleri, minimum ve maksimum koruma hattı hatası akımları

Abstract

An important part of overhead transmission line outages have been mostly observed in areas where lightning is severe. It is necessary to evaluate lightning performance of any transmission line in detail for reducing the impact of lightning over-voltages before defining the protection method that will be implemented. In this study, the case of direct lightning to 154 kV transmission line with double circuit - single ground wired lattice pylon that is used in Turkey energy transmission system is analyzed by using ATP-EMTP software program. ATP-EMTP simulations are used to estimate the minimum (critical, I_c) and maximum (I_{MSF}) shielding failure lightning currents which could cause flashover of insulators on that type of towers. These minimum and maximum lightning currents are of a great importance estimating the shielding failure flashover rates and transmission lines insulation coordination works. Furthermore, estimating of that shielding failure rate is also worked for the case that surge arresters are not online because of the fact that they are in faulty position.

Key words: Overhead transmission lines, lightning over-voltages, direct stroke shielding, maximum and minimum shielding failure current

1. Giriş

Yüksek gerilim hatlarında dış aşırı gerilimler, ya doğrudan doğruya yıldırım düşmesiyle ya da etkiyle (tesirle) elektriklenme nedeniyle meydana gelirler. Yıldırımın faz hattına, direğe veya koruma (toprak) hattına düşmesi halinde oluşan aşırı gerilimlere 'direkt yıldırım düşmesiyle oluşan aşırı gerilimler' ve yıldırım bulutundaki elektrik yükü ile hatta etkiyle elektriklenme

suretiyle bir yük dalgası meydana geldikten sonra yıldırımın yüksek gerilim hattının dışında herhangi bir yere düşmesiyle hatta serbest kalan yük dalgasının her iki tarafa doğru hareketiyle oluşan ve yürüyen dalgalar olarak adlandırılan aşırı gerilimlere de ‘tesirle elektriklenme yoluyla oluşan aşırı gerilimler’ denir [1].

Havai iletim hatlarının direkt yıldırım düşmelerine karşı korunması koruma hatları ile sağlanmaktadır. Ancak koruma hattı, düşen yıldırımın tümünü yakalayamaz ve bunların bir kısmı iletim hattına düşer. İletim hattına düşen yıldırım, hattın gerilim seviyesinde aşırı artışlara neden olur. Eğer, bu aşırı gerilimler hattın yalıtım seviyesini aşarsa izolatörlerde gerilim atlamasına yol açar. Bu nedenle, izolatörlerde gerilim atlamalarına neden olan minimum ve maksimum yıldırım akımları iletim hatlarının performansının değerlendirilmesinde önemli parametrelerdir. İletim hatlarına direkt yıldırım düşmesi durumu en büyük hat arıza nedenlerinden biridir ve genel olarak faz - toprak arızası niteliğindedir. İletim hatlarında da en sık yaşanan arızalar genel olarak faz - toprak arızalarıdır. Bu çalışmada, yıldırımın faz hattına direkt düşmesi yani koruma hattı hatası durumu incelenecektir.

İzolatörlerde atlamaya neden olan kritik akım (I_c) genellikle izolatörün standart yıldırım darbeleri altındaki kritik atlama gerilimi ve iletim hattı karakteristik empedansı göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Ancak iletim hatlarına direkt olarak düşerek izolatörlerde atlamaya neden olan yıldırım darbe gerilimleri standart darbe gerilimlerinden dalga şekli olarak oldukça farklıdır. İzolatör gerilim atlamalarına neden olan kritik akım, IEEE İletim ve Dağıtım komitesi tarafından önerilen basitleştirilmiş yöntem [2] alternatif olarak bilgisayar simülasyonları kullanılarak tahmin edilebilir. Bu çalışmada, daha önce Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E. tarafından gerçekleştirilen çalışmada [3] ATP – EMTP ortamında geliştirilen bir araç kullanılarak daha detaylı şekilde kritik akım tahmini yapılmıştır.

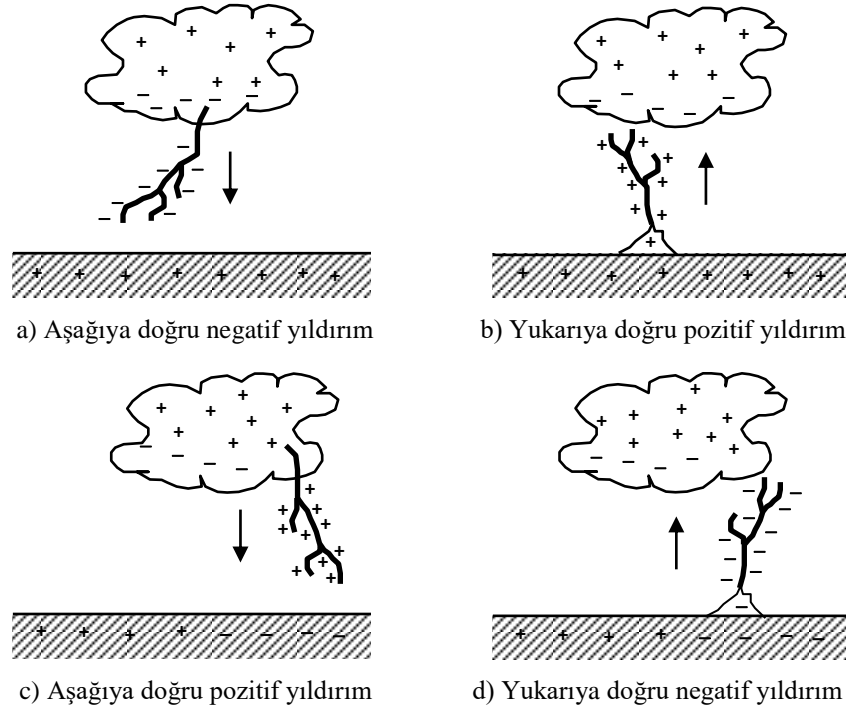
Maksimum koruma hattı hatası akımı ise ‘Elektrogeometrik Model’, ‘Erikson’nun Kapsamlı Modeli’ ve ‘İstatistiksel Model’e göre hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada çok uzun zamandan beri literatürdeki çalışmalarda geniş çapta kullanılan ‘Elektrogeometrik Model’ kullanılmıştır [4].

Türkiye’de Antalya bölgesi en çok yağış olan ve yıldırımlı gün sayısı en fazla olan iller sıralamasında ilk sıralarda yer almaktadır. Bu duruma bağlı olarak bölgede çok sık faz - toprak arızaları gözlemlenmektedir. 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 iletim hattı izolatörleri üzerinde oluşan aşırı gerilimler ve buna sebep olan kritik ve maksimum yıldırım akımları elde edilmiştir. Bu sınır değerler çerçevesinde, bölgeyle ilgili yıldırımlı gün sayısı ve iletim hattı karakteristikleri kullanılarak iletim hattına direkt düşme olasılığı olan yıldırım 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 hattına düşmesi durumundan kaynaklı olup olmadığını araştırmak ve transformatörden önce yerleştirilen parafudrun hatta yıldırım düştüğünde hattaki aşırı gerilimlere ve böylelikle gerilim atlamalarına etkisinin incelenmesidir.

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 bu buluttan toprağa doğru olan yıldırım boşalmalarının 90%'ı negatif kutupludur [1-5].



Şekil 1. Bulut-yer arası yıldırım boşalması türleri

Analizi yapılacak yerle ilgili yıldırım düşme sıklığı (N_g) hakkında kaydedilmiş bir bilgi yoksa fırtınalı gün sayısı (T_D)'den yıldırım sıklığı hesaplanabilir [5]:

$$N_g = 0.04 \cdot T_D^{1.25} \quad (1)$$

Bu çalışmada, analizi yapılan bölge için fırtınalı gün sayısı 35-40 arasında değişmektedir. Denklem (1)'den yıldırım sıklığı hesaplanırsa N_g değeri 4 olarak bulunur. Aşağı yönlü negatif yıldırım akımının en yüksek yaklaşık 200 kA ve en az değeri de 3 kA seviyesindedir. CIGRE TB 549 tarafından önerilen global medyan I_μ değeri 30 kA olup standart sapma $\sigma_{\ln I}$ değeri ise 0.61'dir [5]. Yıldırım akım parametreleri log-normal dağılımdan hesaplanabilmektedir. Yıldırım akımının olasılıksal yoğunluk fonksiyonu $f(I)$ 'dir. Bu fonksiyon;

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

olarak ifade edilir.

2.1. Yıldırım Akımı Analizi

Havai koruma hattı iletkenleri belirli bir koruma açısı ile yüksek gerilim direklerinin en tepesine, direk ve direk üzerinden toprakla bağlantılı olarak yerleştirilerek faz iletkenlerinin yıldırma karşı korunması sağlanır. Eğer faz iletkeni yatay olarak koruma iletkeninden daha dışarda kalıyorsa koruma hattı açısı pozitifdir, aynı hizada ise sıfır ve daha içte kalıyorsa negatifdir [6]. Bu çalışmada kullanılan direkler çift devreli ve tek koruma hatlı çatal pylon direklerdir ve koruma hattı açısı pozitifdir. Koruma hattının fonksiyonelliği ‘Koruma Hattı Hata Oranı (SFR)’ ile değerlendirilebilmektedir. Bu oran yılda 100 km’lik hat boyunca faz hattına düşen yıldırım sayısını ifade etmektedir ve aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir;

$$SFR = 0.2N_g \int_{3kA}^{I_{MSF}} W(I) \cdot f(I) dI \quad (3)$$

Burada;

- N_g , bir yılda km² başına toprağa düşen yıldırım sayısı,
- I_{MSF} (kA), maksimum koruma hattı hatası akımı veya elektrojeometrik modele göre hesaplanan iletim hatlarına düşebilecek maksimum yıldırım akımı,
- W (m), elektrojeometrik modele göre hesaplanan ve iletim hatlarının yıldırım akımına maruz kalabileceği enine genişlik,
- $f(I)$, maksimum yıldırım akımı olasılıksal yoğunluk fonksiyonudur.

İletim hattına düşen yıldırımların hepsi izolatörlerde gerilim atlamasına sebep olmayacak yani sistemde yalıtım bozulması yaşanmayacaktır. İletim hattına düşerek izolatörlerde atlamaya sebep olan yıldırım sayısı (SFFOR);

$$SFFOR = 0.2N_g \int_{I_c}^{I_{MSF}} D_c(I) \cdot f(I) dI \quad (4)$$

ifadesiyle belirlenir [7]. Burada I_c , koruma hattı hatasıyla iletim hattına düşebilecek minimum (kritik) akım değeridir. Bu değer, IEEE 1243 standardında önerilen basitleştirilmiş ifade,

$$I_c = 2.CFO / Z_c \quad (5)$$

ile belirlenebilmektedir. Burada, CFO (kV), izolatör zincirinin kritik atlama gerilimi ve Z_c (Ω) ise faz iletkeninin karakteristik empedansdır [8].

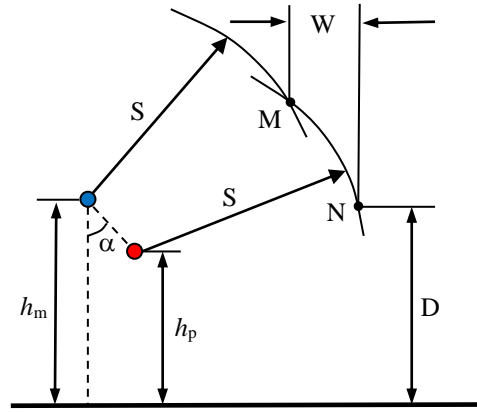
2.2. Maksimum Koruma Hattı Hatası Akımı Hesabı

Maksimum koruma hattı hatası akımı, ‘Elektrojeometrik Model’, ‘Erikson’ nun Kapsamlı Modeli’ ve ‘İstatistiksel Model’e göre hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada çok uzun zamandan

beri literatürdeki çalışmalarda geniş çapta kullanılan ‘Elektrogeometrik Model’ kullanılmıştır. Bu modelin yıldırımdan koruma tasarımında yani koruma hattı yerleşiminde uygulanması, yıldırımın düştüğü noktanın uzaklığına dayanmaktadır. Bu uzaklık S , tamamen olası maksimum yıldırım akımı ile ilgilidir ve yıldırım akımının düştüğü noktanın yere olan uzaklığı, D ile γ katsayısı kullanılarak aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir;

$$S = AI^B = \gamma D \quad (6)$$

Bu eşitlikte, S ve D ’nin birimleri metredir. I ise kA olarak olası maksimum yıldırım akımını ifade eder. Buradaki A , B ve γ katsayıları için birçok kişi ve kurum tarafından önerilen ve kullanılan değerler vardır. Bu çalışmada, bu katsayılar için Love’ın önerdiği $A = 10$, $B = 0.65$ ve $\gamma = 1$ değerleri kullanılmıştır [9]. Elektrogeometrik modelin iletim hatlarının yıldırımdan korunma analizi için uygulaması Şekil 2’ye dayanarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 2. Elektrogeometrik model

Bu modelin oluşturulabilmesi için; maksimum yıldırım akımı I_d ; yıldırımın düştüğü noktanın faz ve koruma hattına uzaklıkları S ve toprak yüzeyine olan uzaklığı D , (6)’ya ve Love tarafından verilen katsayılarla göre hesaplanır. Sonrasında, S yarıçaplı yay faz ve koruma hattı merkez alınarak ve D ise toprak yüzeyine paralel bir yükseklik olarak çizilir. Elektrogeometrik modele göre M ve N arasındaki yay üzerine düşen yıldırım akımları direkt olarak faz iletkenine düşecektir. Burada, koruma hattı hatası genişliği W olarak tanımlanmaktadır. Maksimum yıldırım akımının I_d artmasıyla bu koruma hattı hatası genişliği W değeri azalmaktadır. W değerinin sıfır olması durumundaki kritik tasarım akımına maksimum koruma hattı hatası akımı (I_{MSF}) denilmektedir ve bu akım aşağıdaki denklemle hesaplanabilmektedir;

$$I_{MSF} = \left[\frac{\gamma(h_m + h_p) / 2}{A(1 - \gamma \sin \alpha)} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (7)$$

Bu denklemde A , B ve γ değerleri daha önce belirtilen katsayılardır. h_m (m) ve h_p (m) büyüklükleri, Şekil 2’den görüleceği gibi sırasıyla metre cinsinden koruma hattının ve faz

hattının yerden yükseklikleridir. I_{MSF} akımı kA olarak bulunur. Denklem (7)'ye göre I_{MSF} değeri iletim hattı yüksekliğinin, γ katsayısının ve koruma hattı α açısının artmasıyla artarken A ve B katsayılarının değerlerinin artmasıyla azalmaktadır. A ve B katsayıları sabit değerli katsayılardır. Ancak, sabit bir maksimum yıldırım akımı için tanımlanan yıldırımın düştüğü noktanın uzaklığının S , artmasıyla bu katsayılar artabilmektedir [10]. Buna göre kendi çalıştığımız sistemde a-fazında oluşabilecek I_{MSF} akımı yaklaşık 26.5 kA iken b-fazında yaklaşık 13.5 kA mertebelerindedir.

3. 154 kV İletim Sisteminin Modellenmesi ve Analizi

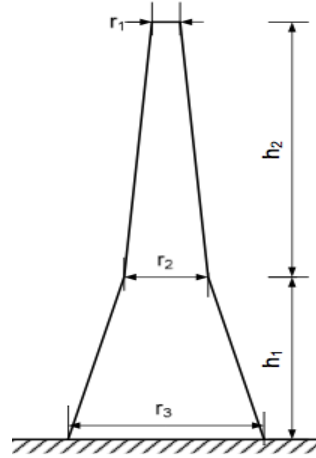
ATP-EMTP simülasyonları, ülkemiz 154 kV anma gerilim seviyesindeki havai iletim hatlarında atlamaya sebep olan kritik akımı hesaplamada kullanılmıştır. İncelenen sistem; besleme kaynağı, havai iletim hatları, direkler, izolatörler, kesiciler, parafudr ve transformatör elemanlarından oluşmaktadır. Simülasyonlarda negatif yıldırım darbe gerilimi en üstteki ve ortadaki yani en dıştaki iletim hattının orta noktasına direkt olarak uygulanmıştır. Bu hatlar için faz açıları 30'ar derece artırılarak denemeler yapılmış ve tepe değer ayarlanarak en kötü koşullardaki durum değerlendirmesi için uygun hale getirilmiştir. Yıldırım darbesi, CIGRE akım kaynağı modeli [11] ve buna paralel 1000 Ω değerinde yıldırım yolu empedansı kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca [11]'a göre de yıldırım akım darbesinin sırt süresi t_h , 77.5 μs olarak alınırken, cephe süresi t_f , ve maksimum dikliği S_m , yıldırım akımı tepe değerinin fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi alınmıştır. Bu denklemlerle kendi sistem değerlerimiz hesaplandığında a-fazına yıldırım düşmesi durumunda t_f değeri 3.48 μs ve S_m değeri ise 22.04 kA/ μs bulunurken, b-fazına yıldırım düşmesi durumunda t_f değeri 2.88 μs ve S_m değeri ise 18.66 kA/ μs olarak hesaplanmıştır.

$$t_f = \begin{cases} 1.77I_{MSF}^{0.188}, & 3 \leq I_{MSF} \leq 20kA \\ 0.906I_{MSF}^{0.411}, & I_{MSF} > 20kA \end{cases} \quad (8)$$

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

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 Ωm 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 ise dikey, kayıpsız, tek fazlı, frekanstan bağımsız ve dağıtılmış parametrelili hat modeli kullanılarak modellenmiştir. Hat üzerindeki yürüyen dalganın yayılma hızı ışık hızının %85'i olarak alınmıştır [4]. Çift devreli direğin dalga empedansı Z_{ort} , [11]'e göre direğin şekli itibariyle bel kısmından dolayı belli (waisted) direk benzetimiyle aşağıdaki denklemlerle hesaplanmıştır. Bu denklemlerde kullanılan yarıçap ve yükseklik değerleri Şekil 3'de gösterilmiştir. Direğin topraklama direnci 20 Ω olarak alınmış ve hesaplarda sabit tutulmuştur.



Şekil 3. Direğin ortalama yarıçapını belli (waisted) direk benzetimiyle bulmada kullanılan büyüklükler

$$R_{ort} = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{h_1 + h_2} \quad (9)$$

$$Z_{ort} = 60 \ln \left[\cot \left\{ 0.5 \tan^{-1} \left(\frac{R}{h} \right) \right\} \right] \quad (10)$$

Bu gerilim seviyesindeki iletim hatlarına ait izolatör zincirleri, 750 kV standart yıldırım darbe gerilimi dayanımına sahip olup 1.60 m uzunluğundadır. Bu izolatörlerdeki gerilim atlama 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 modellenebilmektedir. Gerilim-zaman eğrisi ve integrasyon yönteminde izolatörlerin 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 [7]. 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;

$$t_c = t_i + t_s + t_l \quad (11)$$

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 oluşturdukları düşünülür ve sonra bu faz tamamlanır. Arkasından, öncü boşalma ilerleme fazı başlar ve öncü boşalmanın aralığı köprülenmesiyle 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 [11-12], [13-14]. Bu çalışmada, izolatörde atlamının olabilmesi için gereken gerilimi yaratacak minimum akım değerinin hesabında CIGRE öncü boşalma gelişim modeli tercih edilmiştir. CIGRE modeli aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir [15];

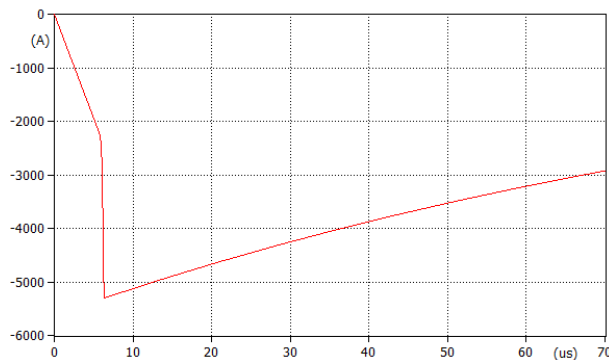
$$\frac{dL}{dt} = k_3 V [V / (D - L) - E_0] \quad L \geq D \quad (12)$$

[9]'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 transformatör girişine parafudr yerleştirilerek yapılmıştır. Parafurlar, sistem bilgileri ile Pinceti ve Giannettoni'nin frekansa bağlı modeline dayanılarak aşağıdaki gibi modellenmiştir [3].

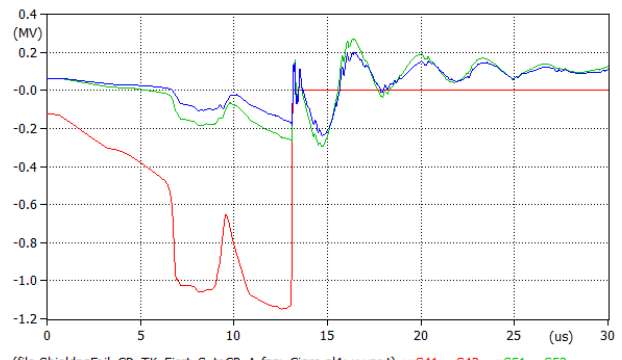
3.1. ATP – EMTP Simülasyon Sonuçları

Şekil 4.a 154 kV anma gerilimli sistemdeki izolatör uçlarındaki atlama aşırı gerilimlerini göstermektedir. Bu aşırı gerilimler en yüksekteki iletim hattının (A-fazı) orta noktasına güç frekanslı gerilimin negatif tepe değeri anında uygulanan Şekil 4.b'deki minimum (kritik) yıldırım darbe akımı sonucunda oluşmaktadır. Bu hat üzerindeki aşırı gerilimlerin 1.2 MV değerlerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 4.c'de ise aynı sistemdeki izolatör uçlarındaki atlama aşırı gerilimleri görülmektedir. Bu aşırı gerilimler ortadaki iletim hattının (B-fazı) orta noktasına güç frekanslı gerilimin negatif tepe değeri anında uygulanan Şekil. 4.d'deki minimum (kritik) yıldırım darbe akımı sonucunda oluşmaktadır. Bu fazda oluşan aşırı gerilim ise yaklaşık 1.2 MV değerindedir. Daha önce verilen tanım ve değerlere göre modellenen ISF objesiyle elde edilen koruma hattı hatası sonucundaki minimum yıldırım akımı (I_c) çalışılan sistemin A-fazı için 5.3 kA iken B-fazı için 6.7 kA'dır.

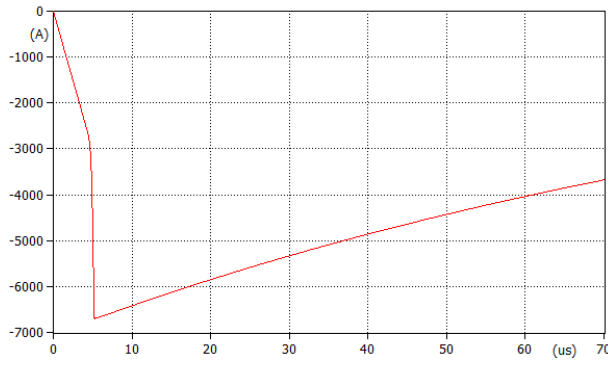
Şekil 5'de ise 154 kV anma gerilimli sistemde transformatörden önce bir parafudr bulunması durumunda izolatör uçlarındaki aşırı gerilimler ve bunlara sebep olan minimum yıldırım akım (I_c) değerleri görülmektedir. Burada aynı şekilde modellenen ISF objesiyle elde edilen koruma hattı hatası sonucundaki minimum yıldırım akımı (I_c) çalışılan sistemin A-fazı için 8.9 kA iken B-fazı için 8.5 kA'dır.



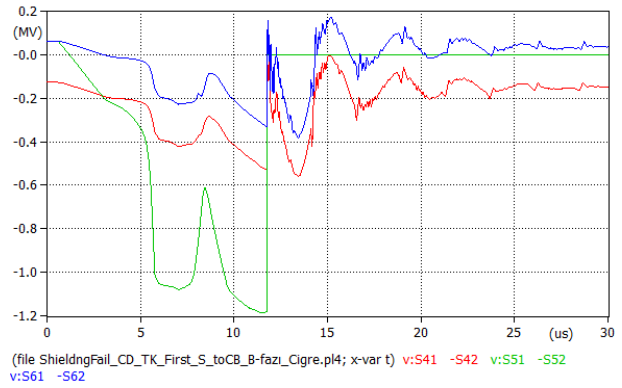
(a)



(b)



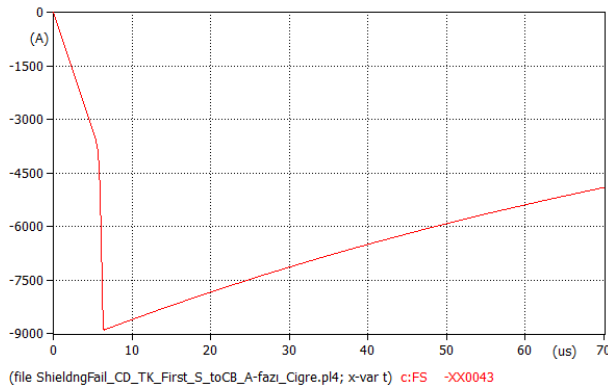
(c)



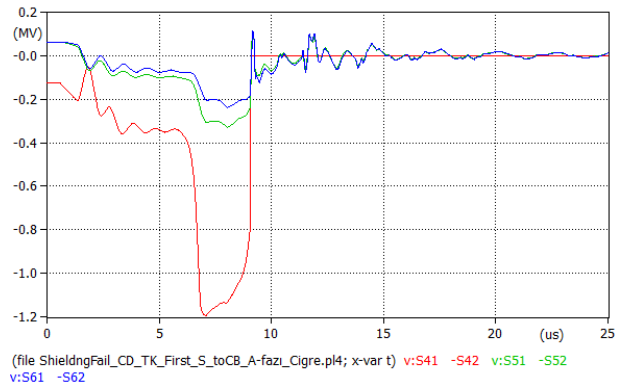
(d)

Şekil 4. Sistemde parafudrsuz durumdaki akım ve aşırı gerilimler.

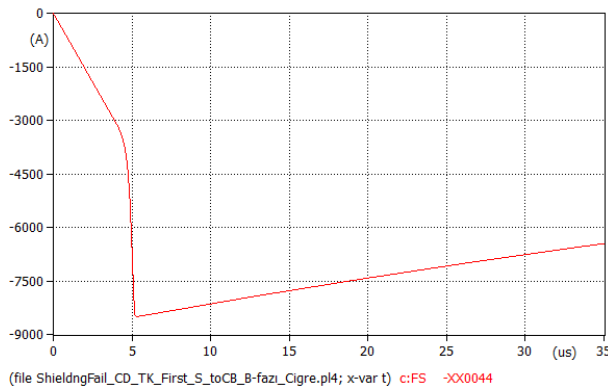
- a) En üstteki iletim hattının orta noktasına düşen yıldırım darbe akımı;
 b) Bu akım sonucunda oluşan 154 kV iletim hattı izolatörü A-fazı uçlarındaki aşırı gerilimler;
 c) Ortadaki iletim hattının orta noktasına düşen yıldırım darbe akımı;
 d) Bu akım sonucunda oluşan 154 kV iletim hattı izolatörü B-fazı uçlarındaki aşırı gerilimler



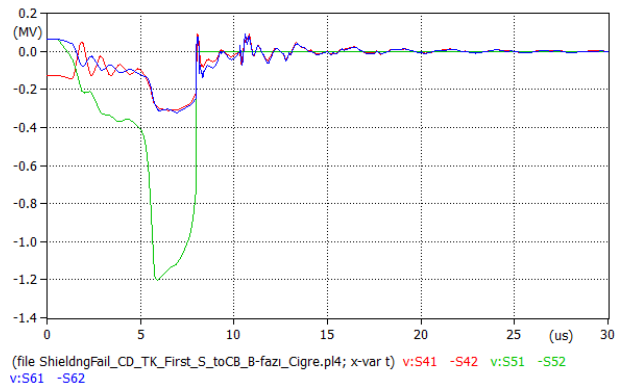
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5. Sistemde parafudr bulunması durumdaki akım ve aşırı gerilimler.

- a) En üstteki iletim hattının orta noktasına düşen yıldırım darbe akımı;
 b) Bu akım sonucunda oluşan 154 kV iletim hattı izolatörü A-fazı uçlarındaki aşırı gerilimler;
 c) Ortadaki iletim hattının orta noktasına düşen yıldırım darbe akımı
 d) Bu akım sonucunda oluşan 154 kV iletim hattı izolatörü B-fazı uçlarındaki aşırı gerilimler

Sonuç

Bu çalışmada Türkiye enerji iletim sisteminde kullanılan 154 kV'luk, çift devre, tek koruma hatlı, kafes direkli havai iletim hattının faz iletkenlerine direkt yıldırım düşmesi durumu, ATP-EMTP simülasyon ortamında analiz edilmiştir. ATP-EMTP simülasyonları direk üzerindeki izolatörlerdeki koruma hattı hatası nedeniyle iletim hattına doğrudan düşen ve gerilim atlamasına sebep olan minimum (kritik, I_c) ve maksimum yıldırım akımlarını (I_{MSF}) tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu değerlere göre hesaplanan koruma hattı hatası kaynaklı izolatörde gerilim atlaması oranları; sistemde parafudr olmaması durumunda A-fazında 0.022 yıldırım/km/yıl iken B-fazında 0.00445 yıldırım/km/yıl, sistemde parafudr olması durumunda ise A-fazında 0.019 yıldırım/km/yıl ve B-fazında 0.0035 yıldırım/km/yıl'dır. 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 hattır (B-fazı) ve buradaki kesici de arıza sırasında zarar görerek çalışamaz hale gelmiştir. Pratikte koruma hattı hatası kaynaklı izolatörde gerilim atlaması oranları için kabul edilebilen değer 0.05 yıldırım/km/yıl'dır. Simülasyonlar sonucunda bulunan değerler bu değerden çok daha az olmasına rağmen, gerçekte B-fazında arıza gözlemlenmiştir. Dolayısıyla geçmiş yıllarda yaşanan bu arıza olayı, direğe ya da koruma iletkenine doğrudan yıldırım düşmesi durumu için de incelenerek ileride yaşanacak yıldırım kaynaklı arıza durumları için alınacak yalıtım koordinasyonu önlemlerine ışık tutulmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Özkaya M., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 2, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std 1243 – 1997, pp. 1 – 44, 16 Dec. 1997.
- [5] CIGRE Working Group C4.407: Lightning Parameters for Engineering Applications, *Technical Bulletin* 549, Aug. 2013.
- [6] IEEE Working Group: Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – updates to analytical models, *IEEE Trans. Power Deliv.*, pp. 493 – 506, 1996.
- [7] Malicki P., Mackow A., Kizilcay M., Estimating the Lightning Performance of a Multi – Circuit Transmission Tower, ICLP 2016 International Conference on Lightning Protection, China, 2016.
- [8] Datsios Z. G., Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Estimation of the Minimum Shielding Failure Flashover Current for First and Subsequent Lightning Strokes to Overhead Transmission Lines, *Electric Power Systems Research* 113, 141-150, Elsevier, 2014.
- [9] 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.

- [10] Mikropoulos P. N., Tsovilis T. E., Lightning Attachment Models and Maximum Shielding Failure Current: Application to Transmission Lines, IEEE Bucharest Power Tech Conference, Romania, 2009.
- [11] CIGRE Working Group 33.01: Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines, *Technical Bulletin* 63, Oct. 1991.
- [12] 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.
- [13] Pignini 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.
- [14] Mozumi T., Baba Y., Ishii M., Nagaoka N., ve Ametani A., Numerical Electromagnetic Field Analysis of Archon Voltages During Back-flashover on a 500 kV Twin-Circuit Line, IEEE Trans. Power Del., vol. 18, no 1, pp 207-213, 2003.
- [15] 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.