

İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzeysel Kaçak Akımlar Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK^{1*}, Muhsin Tunay GENÇOĞLU²

¹ Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Malatya, Türkiye

² Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye

*¹ bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr, ² mtgencoglu@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 16/05/2023;

Kabul/Accepted: 27/07/2023)

Öz: Dünya nüfusunun artmasıyla birlikte enerji üretimi ve dağıtımının önemi de artmaktadır. Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının güvenilirliği ve sürekliliğinde en etkin rol oynayan elemanlardan biri izolatörlerdir. İzolatörlerden kaynaklanan arızalar güç sistemi arızalarının en yüksek oranını oluşturmaktadır. Buzlanma ve sonrasında oluşan izolator arızaları, yoğun kış koşullarının gerçekleştiği bölgelerde izolator yüzeyinde atlamalara neden olarak elektrik kesintilerine ve büyük sosyoekonomik sonuçlara yol açmaktadır. Sızıntı akımları buzla kaplı izolatorlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu çalışmada farklı malzemelerden yapılmış izolatorler laboratuvar ortamında buzlandırılmış ve buzlanma derecelerine göre izolatorlere şebeke frekanslı alternatif gerilim uygulanarak sızıntı akımları incelenmiştir. LabVIEW programı yardımıyla veriler elde edilmiş ve porselen, cam ve silikon izolatorlerin sızıntı akımları karşılaştırılmıştır. İzolatörün bulunduğu ortam sıcaklığı ve nem değerleri ölçülerek, bu değerlerle sızıntı akımları arasında ilişkiler belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: İzolatör, Buzlanma, Sızıntı akımı, LabVIEW.

Investigation of the Effect of Icing on Insulators on Surface Leakage Currents

Abstract: With the increasing world population, energy production and distribution has a very important place today. Insulators are one of the elements that play the most active role in the reliability and continuity of electrical transmission and distribution lines. Faults from insulators account for the highest rate of power system failures. Icing and subsequent insulator failures cause flashover on the insulator surface in areas where intense winter conditions occur, leading to power outages and major socioeconomic consequences. Leakage currents are directly related to the surface properties of ice-coated insulators. In this study, the surface of insulators made of different materials were iced in a laboratory environment and leakage currents were studied by applying an alternating voltage with a network frequency to the insulators according to the degree of icing. Data were obtained with the help of LabVIEW program and leakage currents of porcelain, glass and silicon insulators were compared. The relationship between the leakage current was established by measuring the ambient temperature and humidity values of the insulator.

Key words: Insulator, Icing, Leakage current, LabVIEW.

1. Giriş

Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının temel elemanlarından biri olan izolatörler, güç sistemlerinin güvenliği için önemli bir rol oynamaktadır. İzolatörlerin performanslarının yüksek olması güç sisteminin güvenliğini ve kararlılığını arttırmaktadır. İzolatörlerdeki arızaların tespiti, güç sistemlerindeki kararsızlığı ve ekonomik kayıpları azaltabilmektedir. Elektriksel atlama olayı izolatorlerde sıklıkla karşılaşılan bir problemdir. Atlama olayı, biriken kir, buz, buz yoğunluğu, buzun sıcaklığı vb. çevresel sorunlara bağlıdır. Sızıntı akımları buzla kaplı izolatorlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sızıntı akımının ölçümüyle izolatorlerin buzlanma durumu ve atlamalar analiz edilebilir. Buzlanma olayı, izolator yüzeyinde elektriksel alanı etkileyerek yalıtım özelliğinin kaybolmasına, kısmi deşarjlara ve atlamalara neden olmaktadır.

Dünya üzerinde kış aylarının yoğun geçtiği ve buzlanma olayının sık yaşandığı çeşitli ülkelerde, izolator atlaması ile ilgili arızaları içeren olaylar bildirilmiştir [1-2]. Bu raporlara göre, izolator yüzeyinde buz veya kar birikmesinin ardından ortam sıcaklığının 0 °C'nin üzerine çıkmasıyla, erime durumu ile birlikte elektriksel atlama olaylarının sayısı artmaktadır. Uluslararası Yapıların Atmosferik Buzlanması Çalıştayı (IWAIS) gibi özel konferanslarda, 1982'den beri bu konuya ayrılmış oturumlar düzenlenmektedir. Ayrıca ISH (Uluslararası Yüksek Gerilim Mühendisliği Sempozyumu), ICHVE (Uluslararası Yüksek Gerilim ve Uygulama Konferansı) ve IEEE

* Sorumlu yazar: bugracan.ozkucuk@ozal.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-1466-2502, ² 0000-0002-1774-1986

Elektrik Yalıtımı Konferansı vb. yüksek gerilim ve yalıtım konulu konferanslarda elektriksel atlama olayının buzlanma üzerinde etkileri düzenli olarak ele alınmaktadır.

Farzaneh vd. tarafından, buzla kaplı bir izolatörün çapının atlama gerilimi üzerine etkisi araştırılmıştır. Çalışmaya göre, izolatör çapı arttıkça dayanım gerilimi azalmıştır. Dayanım gerilimindeki azalma, izolatör buz tabakasındaki direncin azaldığını göstermektedir. Bir zincir izolatör dizisinin altında meydana gelen ark ile mesnet izolatörün üst kısmında oluşan ark karşılaştırıldığında, arkın buz yüzeyi boyunca zincir izolatörün üst kısmına doğru yayılma olasılığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Arkın kendisi tarafından oluşturulan termal kaldırma kuvveti nedeniyle, izolatörün üst kısmında oluşan bir ark için atlama sabitinin değerinin alt kısmında oluşan arkta daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [3].

Jiang vd. tarafından, kirlenmiş ve buzlu zincir izolatörün alternatif akımda atlama gerilimi üzerine etkisi incelenmiştir. Buzla kaplı bir zincir izolatörün atlama performansının, buzlanma seviyesinin yanı sıra kirlilik seviyesiyle de ilgili olduğu görülmüştür. Buz tabakası iletkenliğinin ürünü olarak tanımlanan ISP ve kuru ark mesafesinin santimetre başına buz tabakası ağırlığı, buzla kaplı bir zincir izolatörün atlama gerilimi üzerindeki buz birikimlerinin ve kirlenmenin etkisini belirlemek amacıyla karakteristik bir parametre olarak alınmıştır. Buzla kaplı zincir izolatörün atlama gerilimi, ISP karakteristik parametresinin artmasıyla azalmıştır. Buzla kaplı izolatörde atlama gerilimi, izolatör üzerinde biriken buzun direnç özelliği nedeniyle izolatör uzunluğunun artmasıyla doğrusal olarak artmıştır [4].

Zhang vd. tarafından, alternatif akım (a.a.) atlama gerilimi altında farklı buzlanma koşulları ile buzlu zincir izolatörün değişiklik gösteren konumlandırılması üzerine çalışılmıştır. Zincir izolatörün potansiyel dağılımının, daha büyük çaplı izolatörlerle değiştiği gözlemlenmiştir. Daha büyük çaplı eteklere sahip her bir izolatör üzerindeki dayanma gerilimi, normal izolatör üzerindeki dayanma geriliminden çok daha yüksek olmuştur. Ancak büyük çaplı izolatör üzerindeki en yüksek gerilim, dikey olarak asılı yüksek gerilim iletkeni ile doğrudan bağlanan zincir izolatöründen daha düşük olmuştur [5].

Farzaneh tarafından, izolatör buzlanma atlamalarının, buz tipi ve yapısı, hava sıcaklığındaki değişiklikler gibi meteorolojik ve bazı çevresel faktörlerden etkilendiği göz önünde bulundurularak, matematiksel modeller eşliğinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elektrik alanının buz sarkıtlarının büyümesini ve morfolojisini etkilediği sonucuna varılmıştır. Buz sarkıtlarının daha yüksek elektrik alanlarında radyal olarak dışa doğru büyüme eğiliminde olduğu görülmüştür. Buzlanma koşulları için ark sabitleri ve kirlilik tabakası direnci oluşturulmuştur. Buz yüzeyindeki ark kökünün yarıçapı, izolatör yüzeyindeki çok noktalı bir temasın gerilim düşümünü temsil etmektedir. Arkın bu ark kökü dışında havada buz yüzeyinin üzerinde aktığı belirtilmiştir [6].

Xu vd. tarafından, izolatörlerin elektriksel performansının buzlanma ve kirlilikle birlikte izolatör yapısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İzolatör yüzeyinde su damlacıkları soğutularak yapay bir şekilde buz oluşturulmuş ve izolatör -10 °C hava sıcaklığı altında enerjilendirilmiştir. Atlama gerilimleri ve kaçak akım, buz erime rejimi sırasında kirliliğe maruz izolatörler üzerinde yapılan testlerle elde edilmiştir. Birikmiş tuz yoğunluğunun (SDD) artmasıyla atlama geriliminin azaldığı görülmüştür. İzolatör çapının arttığı ve buzlanma koşullarının aynı kaldığı durumda buzlanma alanı artacağından izolatör yüzeyinde daha küçük bir direnç oluşacaktır. Bu nedenle SDD'nin sabit, ortalama çapın artmasıyla atlama gerilimi azalmış, ancak atlama öncesi kaçak akım daha büyük olmuştur [7].

Yin vd. tarafından, kompozit izolatörlerin atlama performansını etkileyen faktörleri bulmak için buzla kaplı, enerjili ve enerjisiz deneyler yapılmıştır. İzolatörlerin enerjili veya enerjisiz koşullar altında farklı şekilde buzlandıkları gözlemlenmiştir. Enerjisiz durumda, buz sarkıtları dikey olarak aşağı doğru büyümüş ve izolatörlerin etek aralıkları, ağır buzlanmada buz sarkıtları ile köprülenmiştir. Enerjili durumda ise, buz sarkıtları aşağı doğru ve izolatörün eksenine doğru büyümüş olup ısı etkisi nedeniyle izolatör eteklerinin köprülenmesi zor olmuştur. Kaçak akım yolu uzunluğunun atlama gerilimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kaçak akım yolu uzunluğunun fazla olduğu durumlarda atlama gerilimi daha iyi performans sergilerken, küçük olduğu durumlarda atlama geriliminin daha düşük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8].

Jiang vd. tarafından, buzlu porselen, cam ve kompozit izolatörlerde, buz kalınlığı, kirlilik, hava basıncı vb. çeşitli faktörlerin atlama performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Buz kalınlığının, kirliliğin ve basıncın artmasıyla üç tip izolatörün de atlama gerilimi azalmıştır. Buz kalınlığının ve atmosfer basıncının buzlanma atlama gerilimine etkisi, kompozit izolatörlerde porselen ve cam izolatöre göre daha belirgin olmuştur [9].

Shu vd. tarafından, atlama ark yoluna bağlı olarak farklı etek aralıklarına sahip buzla kaplı kompozit izolatörlerin a.a. atlama gerilimlerini tahmin etmek için "çok arklı, çok buz tabakalı" matematiksel bir model önerilmiştir. Birden fazla çapta değişen eteklere sahip buzla kaplı kompozit izolatörler için, her sarkıtın ucundaki ark deşarjı iki farklı yol boyunca değişik konumlarda oluşturulmuştur. Bu durum farklı buzlanma dereceleri altındaki izolatörlerde değişkenlik göstermiştir. Bu değişkenlikler, atlamının oluşmasını önemli ölçüde etkilemiş ve dolayısıyla buzla kaplı kompozit izolatörlerin atlama gerilimleri üzerinde etkiye sahip olmuştur [10].

Porkar ve Farzaneh tarafından, dikey, yatay ve eğimli şekilde yerleştirilen zincir izolatörlerin buzlanma atlamaları, laboratuvar koşullarında matematiksel modeller kullanılarak sistematik bir şekilde incelenmiştir. Uygulanan su iletkenliği $\sigma = 60 \mu\text{S/cm}$ için, yatay bir pozisyon olarak yerleştirilen ağır buzlanma koşullarında 4 elemanlı bir zincir izolatörün minimum atlama geriliminin, $\theta = 60^\circ$ 'lik bir salınım açısına sahip eğimli bir pozisyon için %62 ve dikey pozisyon için %100 daha yüksek olduğu gösterilmiştir [11].

Tian vd. tarafından, porselen ve cam izolatörlerde, buzlanma birikmesi, buz şekli, sıcaklık, rüzgâr vb. parametreler gözetilerek testler uygulanmıştır. Porselen ve cam izolatörlerin buzlanma şeklinin benzer olduğu gözlenmiştir. İzolatörlerde rüzgârın estiği yönde daha çok buz birikmesi olmuştur. Rüzgâr hızının büyüklüğü su damlacıklarının çarpışmasını etkileyeceğinden rüzgâr hızının artmasıyla buz birikmesi de daha çok gerçekleşecektir. Sıcaklığın, havadaki aşırı soğumuş su damlacıklarının şekli ve izolatördeki yoğunlaşmalar üzerinde etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [12].

Li vd. tarafından, izolatörlerin buzlanma atlamaları tahmini için sızıntı akımının dönüşümü ve analizi yapılmıştır. Sızıntı akımının karakteristik miktarındaki değişiklik, buzla kaplı izolatörlerin yüzey özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Sızıntı akımının ölçümüyle izolatörlerin buzlanma durumu analiz edilmiş ve atlamalar tahmin edilmiştir. Sızıntı akımı, dalgacık analizi kullanılarak gürültüden arındırılmış ve buzlanma sürecinin her aşamasında akım detayları, bileşenleri ve yüzey deşarj özellikleri analiz edilmiştir. Buzlanma sırasında izolatörün sızıntı akımı ve yüzey deşarj özellikleri incelenmiş ve deşarj frekansının negatif gerilimlerde daha fazla olduğu bulunmuştur [13].

Zong vd. tarafından, sır buzla kaplı izolatörlerin doğal ortamda a.a. atlama özellikleri ve ark gelişim süreci incelenmiştir. İzolatöre enerji verilip verilmediğine bakılmaksızın, rüzgâr tarafındaki buz birikimi, tipik bir asimetric dağılım sergileyen rüzgâr altı taraftakinden çok daha fazla olmuştur. Daha kalın çaplı buz sarkıtları, enerjisi kesilen bir izolatör üzerinde dikey olarak büyümüşür. Enerjili buzlanma durumunda, küçük çaplı buz sarkıtları izolatör eksenine doğru büyümüşür. Elektrik alanın buzlanma üzerindeki etkisi esas olarak korona deşarjının frekansına yansımakta ve uygulanan gerilimin artmasıyla kısmi ark artmaktadır. Enerji verilmiş izolatörün buz kalitesi, gerilimsiz izolatörünkünden daha düşük olmuştur. Uygulanan gerilim ne kadar yüksek olursa, sırlı buz kalitesi ve saçağın çapı o kadar küçük olmaktadır. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında buzlu izolatörün doğal koşullardaki atlama gerilimi laboratuvar koşullarına göre yaklaşık %14-%17 daha yüksek olmuştur. Bunun nedeni, odadaki buzlu izolatöre gerilim uygulanmadan önce sıcaklığın 0°C 'den yüksek olmasıdır [14].

Qiao vd. tarafından, farklı doğal ortamlarda buzlu ve kirli kompozit izolatörlerin a.a. arıza gerilimi incelenmiştir. Atlama geriliminin farklı ortamlarda büyük ölçüde değiştiğini görülmüştür. Ayrıca, hem kırağı buzu hem de kuru atlama gerilimi ve eşdeğer tuz birikintisi yoğunluğu (ESDD) birbirinden bağımsız olduğu belirlenmiştir. Ancak doğal ortamda hem kirlilik hem de sırlı buzlanma gerilimi ile ESDD arasında negatif bir güç fonksiyonu (NPF) ilişkisi olduğu görülmüştür. Üstel fonksiyon ile karşılaştırıldığında, güç fonksiyonu sır buzlu atlama gerilimi ve sır buz ağırlığı arasındaki uyum fonksiyonu için daha uygun olmuştur [15].

Son yıllarda izolatörlerdeki buzlanma durumu gelişen teknoloji ile birlikte makine öğrenmesine dayalı olarak görüntü izleme teknolojisiyle de incelenmiştir. Yapılan çalışma iki aşamalıdır. İlk olarak izolatörlerin buzlanma atlamasını etkileyen ana faktörler analiz edilip, buzlanma tipi, buzlanma miktarı, buzlanma uzunluğu, köprülenme durumu, izolatör kirliliği vb. buzlu izolatörlerin morfolojik özellikleri derinlemesine incelenmiştir. Bu özellikler buzlanma atlama risk tahmin modelinde girdi parametreleri olarak kullanılmıştır. İkinci olarak, buzlu izolatörün izleme yöntemleri analiz edilip karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, görüntü izleme teknolojisinin buzlanma atlama tahmininde avantajlara sahip olduğunu göstermiştir [16].

Bu çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlerin yüzeyinde, bir deney kabini içerisinde hafif buzlu ve buzlu olarak nitelendirilen kalınlıklarda buz biriktirilmiştir. İzolatörlere buzsuz, hafif buzlu ve buzlu durumlarda, buz eriyene kadar 15° er dakikalık periyotlarla, 5, 10, 15 ve 20 kV değerlerinde gerilim uygulanmıştır. Deney kabini içerisindeki nem değerleri ve sıcaklık değerleri kaydedilerek izolatör yüzey kaçak akımları incelenmiştir.

2. Buzla Kaplı İzolatör Yüzeyinde Atlama Sürecinin Matematiksel Modellenmesi

Genel olarak buzlu izolatör yüzeyindeki elektriksel atlama süreci, d.a. kullanılarak oluşan atlamalar için Obenaus yaklaşımına uyarlanmıştır. Bu model a.a.'da arkin yeniden oluşma koşullarındaki değişiklikler dikkate alınarak adapte edilmiştir. Bu durum, ark sabitleri, yüzey iletkenliği ve yeniden ark oluşma koşullarını doğrudan laboratuvar ölçümlerine dayandırmaktadır [16]. Bu yaklaşım, kirli yüzeylerde atlama için bulunan matematiksel modellerden sistematik olarak farklı değerlere yol açmaktadır.

2.1. Buzla kaplı izolatörlerin DA atlama modeli

Buzla kaplı izolatörler için matematiksel model, dağıtılmış bir kirlilik tabakası ile bir hava boşluğunun varlığına dayanmaktadır. Uygulanan sabit d.a. için, toplam besleme gerilimi üç bileşenin toplamıdır [17].

$$V = V_e + A \cdot K_p \cdot x \cdot I^{-n} + IR(x) \quad (1)$$

Denklem (1)'de; V_e elektrotların gerilim düşümü (V), A ve n ark sabitleri, x ark kökünün sızıntı yolu boyunca konumu (cm), K_p havadaki kısmi ark uzunluğunun ark kök konumuna oranı, $R(x)$ x konumundan diğerine sızıntı yolu boyunca direnç (Ω), I akım (A) ve V gerilimdir (V).

Denklem (1)'deki K_p değeri, buzla kaplı izolatörlerde d.a. atlama üzerindeki ark yollarına dayalı olarak d.a. atlama modeline eklenmiştir. K_p katsayısı izolatör yüzeyinde biriken buzun kalınlığına göre farklılık göstermektedir. Bu katsayı d.a. için 1,2 ile 1,4 arasında değişmekte olup buzun izolatör yüzeyini tam köprülemesi durumunda ortalama değer 1,3 olarak önerilmiştir [17].

Toplam kaçak sızma yolu uzunluğu (L), orta ve yoğun buz için kuru ark mesafesine yaklaşık olarak eşittir. Soğuk sis koşulları vb. çok hafif buzlanma durumlarında ise kaçak mesafesine eşittir. Genel olarak, tek tip bir kirlilik katmanı için $R(x) = r_p(L - x)$ (Ω/cm) olarak verilir. Neumärker, bunu kullanarak Denklem (1)'in türevini almış ve kritik ark uzunluğunu elde etmiştir [18].

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (2)$$

Düzgün kirlilik katmanı ile arkın X_c konumuna ulaşması için yeterli gerilim varsa, kaçak mesafesinin geri kalanında atlama işlemini tamamlamak için yeterli potansiyel vardır. Tipik olarak, n değeri yaklaşık 0.5'dir. Böylece, toplam kaçak sızma yolu uzunluğu X_c değerinin yaklaşık üçte ikisi kadardır. Denklem (1)'i I 'ya göre farklılaştırarak ve sifıra eşitleyerek, atlamada kritik akım I_c ve kritik gerilim V_c 'yi oluşturmak da mümkündür

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{1/(n+1)} \quad (3)$$

$$V_c = L \cdot A^{1/(n+1)} \cdot r_p^{n/(n+1)} \quad (4)$$

Yüzey iletkenliği (γ_e) değeri d.a. için incelenmiş ve 0 - 300 $\mu S/cm$ aralığında, polarite ve uygulanan su iletkenliği (σ_{20}) ile arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilmiştir [15].

$$\gamma_{e1} = 0.0599\sigma_{20} + 2.59 \text{ dc}^- \quad (5)$$

$$\gamma_{e2} = 0.082\sigma_{20} + 1.79 \text{ dc}^+ \quad (6)$$

Denklem (5) ve (6)'daki katsayılar, iletkenliği 300 $\mu S/cm$ olan su için yaklaşık 0,6 - 0,8 mm'lik bir "yarı-su" tabakası kalınlığını ifade etmektedir. D.a. atlama hesaplanmasının son adımı, arka seri olan buz tabakasının direncinin değerlendirilmesidir. Bu durum denklem (7) ile ifade edilmiştir.

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + N \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (7)$$

Denklem (7)'de, $R(x)$ x konumundan diğerine sızıntı yolu boyunca direnç (Ω), L ark yolunun uzunluğu (cm), x ark kökünün sızıntı yolu boyunca pozisyonu (cm), D izolatör çapı (cm), t buz kalınlığı (cm), N buz yüzeyindeki toplam ark kökü sayısı ve r ark kökü yarıçapıdır (cm).

2.2. Buzla kaplı izolatörlerin AA atlama modeli

Denklem (1)'deki d.a. koşullarını a.a. koşullarına uyarlamak için birkaç değişiklik gerekmektedir. Elektrot gerilim düşümü (V_e), d.a.da a.a.ya göre daha düşüktür ve bu durumda diğer terimlerin hesaplanmasını etkilemektedir. A.a.da gerilim değerinin tepe noktasında atlama oluşma eğilimi olduğundan analiz yapılırken

maksimum gerilim ve maksimum akımın tepe değerleri kullanılmaktadır. Bu durum denklem (8) ile ifade edilmektedir.

$$V_m = AK_p x. I_m^n + I_m R(x) \quad (8)$$

Denklem (8)'de V_m , uygulanan a.a. geriliminin tepe değeri (V), I_m a.a. akımının tepe değeri (I), A ve n ark sabitleridir.

A.a.da yüzey iletkenliği denklem (9)'daki gibi ifade edilir.

$$\gamma_e = 0.0675\sigma_{20} + 2.45 \quad (9)$$

Denklem (8)'de yer alan direnç ifadesini ($R(x)$) hesaplamak için denklem (9)'dan ve ark köklerinin sayısı N ve ark kök yarıçapı r ile birlikte kullanmak gerekir. Bu durum denklem (10) ile ifade edilmiştir.

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + (N' + N'') \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (10)$$

Denklem (10)'da; x konumundan toprak elektroduna kaçak yolu boyunca direnç (Ω), γ_e eşdeğer yüzey iletkenliği (μS), L ark yolunun uzunluğu (cm), X ark kökünün sızıntı yolu boyunca pozisyonu (cm), D izolatör çapı (cm), t buz kalınlığı (cm), N' bir metal elektrottan buz yüzeyine kadar olan toplam ark sayısı, N'' buz yüzeylerinden buz yüzeylerine kadar olan hava boşluklarındaki toplam ark sayısı ve r ark kökü yarıçapıdır (cm).

Buz yüzeyi boyunca ark kökünün her konumundaki durum göz önünde bulundurularak a.a.da arkın yeniden oluşma koşulu denklem (11)'deki gibi ifade edilmiştir.

$$V_m \geq \frac{k.K_{px}}{I_m^b} \quad (11)$$

Denklem (11)'de k ve b, ark yeniden oluşma sabitleri, K_{px} , sızıntı yolu boyunca x konumunda kısmi arkın uzunluğu, V_m , uygulanan gerilimin tepe değeri (V) ve I_m , akımın tepe değeridir (A).

Buz yüzeyindeki arkın yeniden oluşma süreci, normalde kirli yüzeyler için kullanılanlardan farklı katsayılara sahiptir [19]. Ayrıca buzlu yüzeylerdeki ark yayılma hızı kirli yüzeylerdekinden biraz daha yavaştır. Bu durum buzlu yüzeylerdeki ark yeniden oluşma sürecinin neden kirli yüzeylerde bulunanlardan farklı katsayılara sahip olduğunu açıklamada sıcaklığa alternatif bir faktör olabilmektedir.

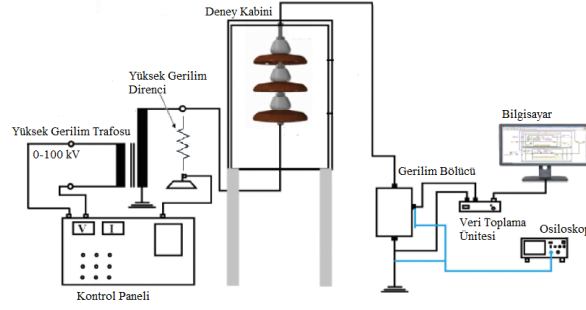
3. Materyal ve Metot

İzolatörler güç sistemlerinde arızaların en sık gerçekleştiği elemanlardan biridir. İzolatör arızalarında kirlilik ve buzlanma durumları önemli bir yer almaktadır. Buzlanma sorunu, izolatör yüzeyinde yer alan aşırı soğumuş su damlacıklarının neden olduğu yalıtkan yüzeyinin köprülenmesiyle, izolatör eteğinin elektrik alan dağılımının bozulmasından kaynaklanan bir sorundur. Buzlanma nedeniyle, nominal çalışma geriliminde izolatör yüzeyi boyunca atlamalar meydana gelebilir. Bu durum büyük elektrik kesintilerine ve hatta yangınlara neden olabilmektedir. Bu nedenle izolatörlerde buzlanma olayı detaylı incelenmesi gereken bir konudur. Bu çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlere laboratuvar şartlarında buzlandırma işlemi Şekil 1'deki gibi uygulanmıştır.



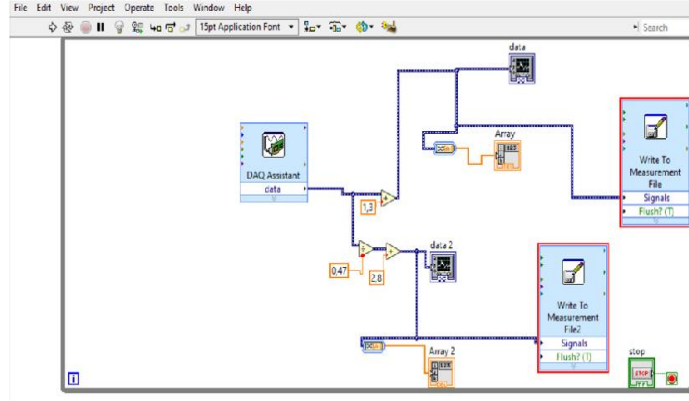
Şekil 1. Buzlandırma işlemi

Buzlanan izolatlara Şekil 2’de gösterilen deney düzeneğinde yüksek gerilim uygulanmış ve yüzeysel kaçak akımlar ölçülmüştür.



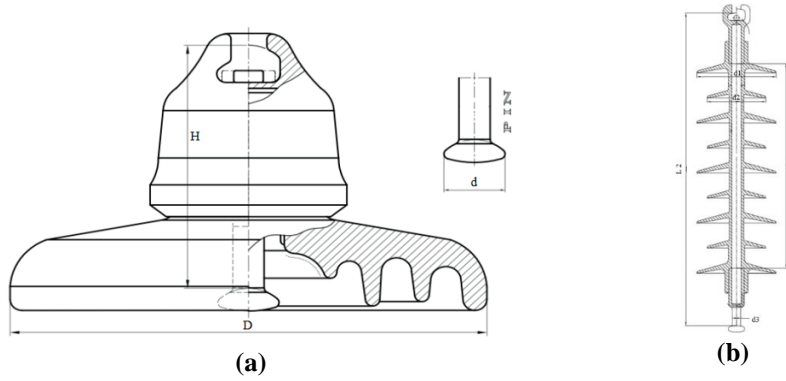
Şekil 2. Deney düzeneği

İzolator yüzeyindeki sızıntı akımlarını ölçmek için LabVIEW programında Şekil 3’te gösterilen bağlantı şeması kullanılmıştır.



Şekil 3. LabVIEW bağlantı şeması

Deneylerde kullanılan porselen, cam ve silikon izolatlara ait kesitler Şekil 4’te, cam ve porselen izolatörlerin bir elemanına ait karakteristik değerler Tablo 1’de, silikon izolatöre ait büyüklükler ise Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 4. (a) Porselen ve cam izolator kesiti (b) Silikon izolator kesiti

Tablo 1. Porselen ve cam izolatöre ait karakteristik değerler

İzolator Tipi	Çap (D) (mm)	Yükseklik (H) (mm)	Pin çapı (d) (mm)	Kaçak akım yolu uzunluğu (mm)
U100 BL (K3) Porselen	255	146	16	280
U100 Cam	255	146	16	280

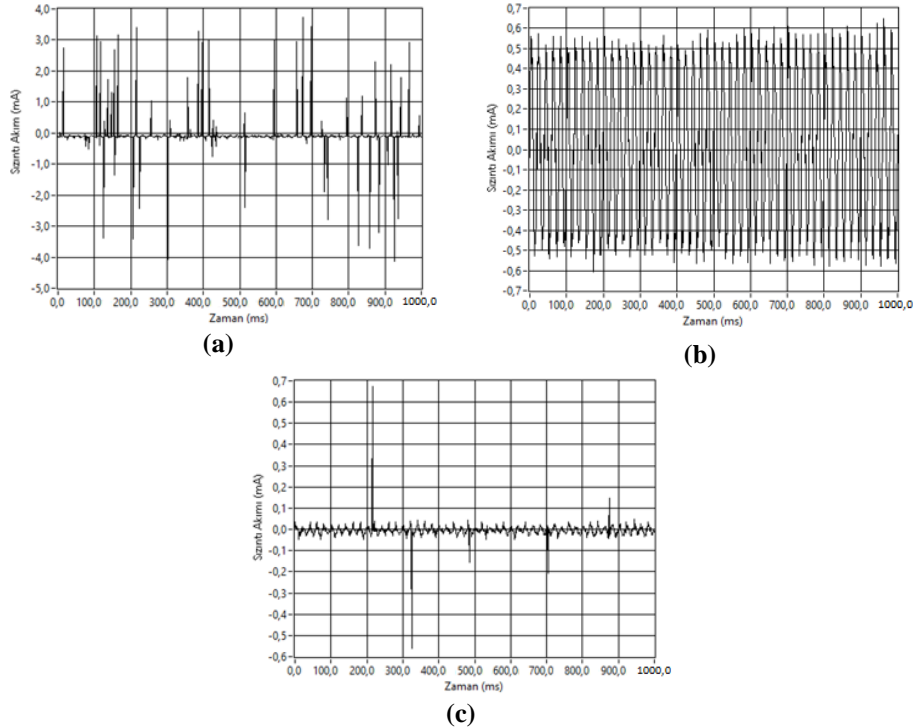
Tablo 2. Silikon izolatöre ait karakteristik değerler

İzolator Tipi	L1 (mm)	L2 (mm)	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	Kaçak akım yolu uzunluğu (mm)
Silikon (K2)	248.8	440	120	90	17	900

4. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

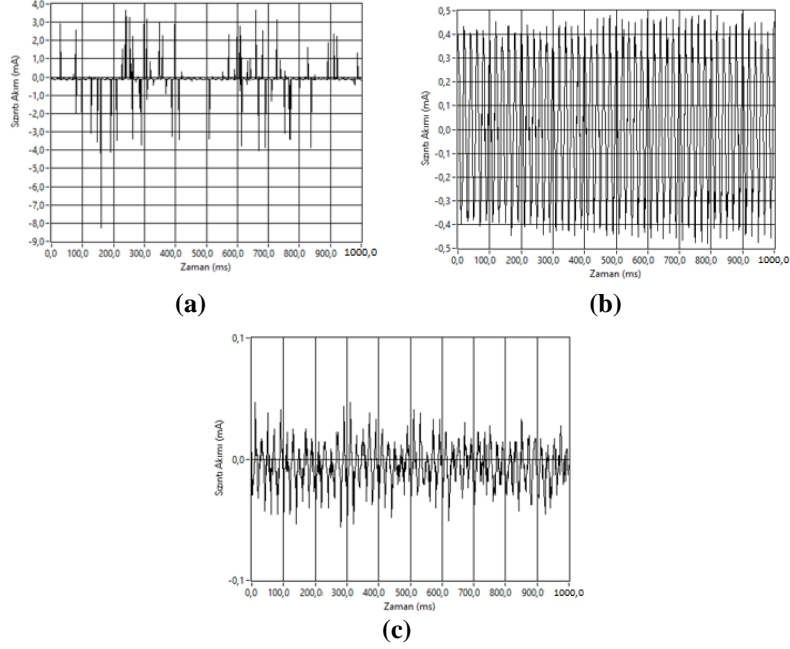
Gerçekleştirilen çalışmada, porselen, cam ve silikon izolatörlere buzlandırma kabini içinde hafif buzlu ve buzlu olarak nitelendirilen kalınlıklarda buzlanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Buzlanan izolatörlere 5, 10, 15 ve 20 kV'luk gerilimler, izolator yüzeyindeki buz eriyene kadar 15'er dakikalık aralıklarla uygulanmıştır. Gerilim uygulanırken veri toplama ünitesi yardımıyla, gerilim bölücünün çıkışına bağlanan direnç üzerindeki gerilim değeri ölçülerek, LabVIEW programı vasıtasıyla daha detaylı ve akım sıklığının analizde etkin olması için 100 ms periyotlarla sızıntı akımları elde edilmiştir. Ortam sıcaklığı ve nem değerleri elde edilerek sızıntı akımları ile ilişkisi yorumlanmıştır.

Şekil 5'te hafif buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre buzlandırma kabini içinde çıkarıldıktan hemen sonra uygulanan 5 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır.



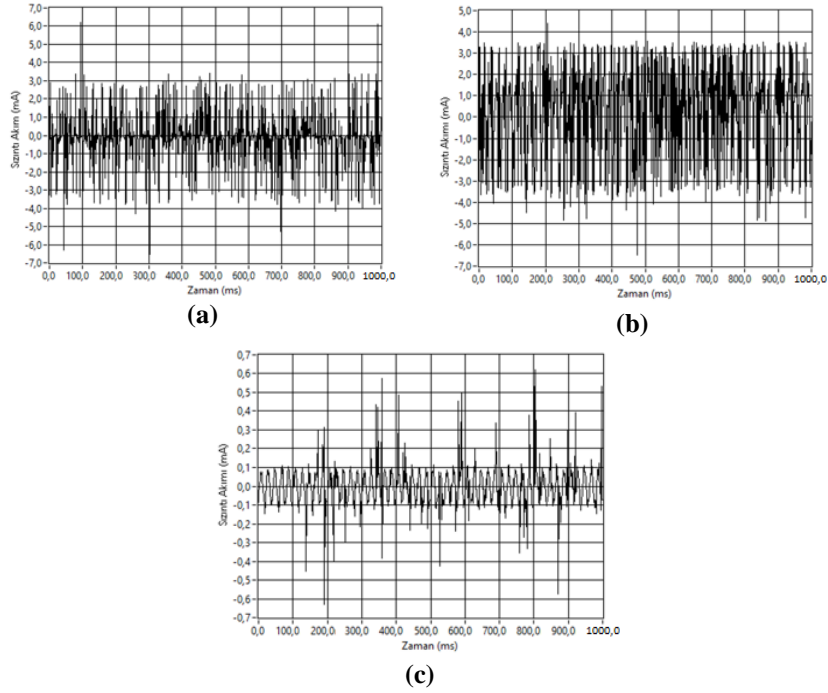
Şekil 5. Hafif buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolator için 5 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 6'da hafif buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre erimeye yakın uygulanan 5 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır. Hafif buzlu durumda tüm izolatör çeşitlerinde 15 dakika sonra izolatör yüzeyindeki buz tabakasının sıvı duruma yakın olduğu gözlemlenmiştir.



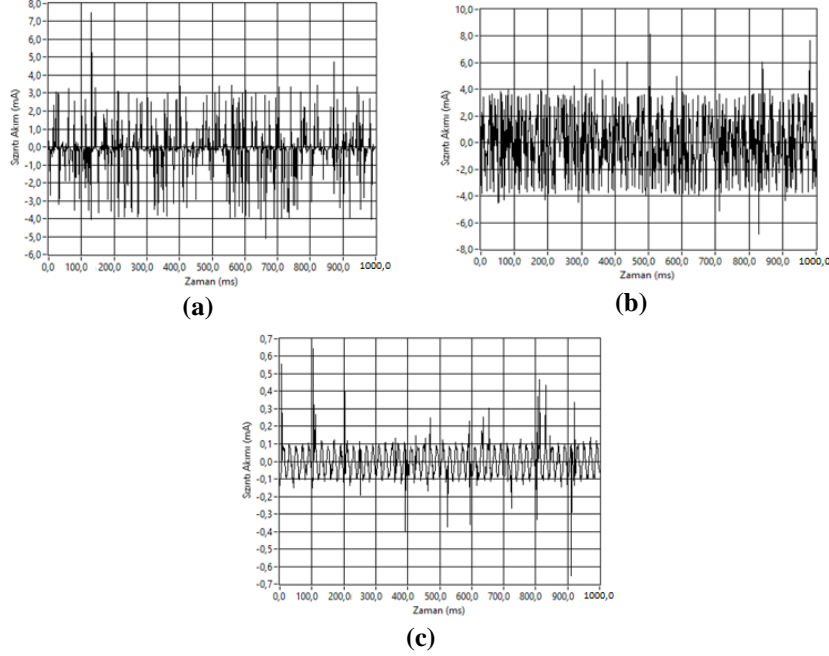
Şekil 6. Hafif buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için buz sıvılaşmadan hemen önce, 5 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 7'de buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre buzlandırma kabininden çıkarıldıktan hemen sonra uygulanan 20 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır.



Şekil 7. Buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için 20 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Şekil 8'de buzlu olan porselen, cam ve silikon izolatöre erimeye yakın uygulanan 20 kV gerilimle elde edilen sızıntı akımları yer almaktadır. Buzlu durumda, cam izolatörde 15 dakika, porselen izolatörde 45 dakika ve silikon izolatörde 30 dakika sonra izolatör yüzeyindeki buz tabakasının sıvı duruma yakın olduğu gözlemlenmiştir.

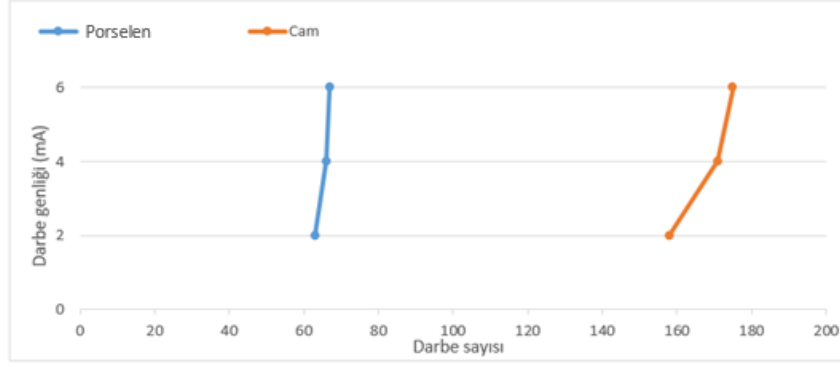


Şekil 8. Buzlandırılmış (a) porselen (b) cam (c) silikon izolatör için buz sıvılaşmadan hemen önce 20 kV gerilim altında elde edilen sızıntı akımları

Cam izolatörde hafif buzlanma durumunda, 15 dakika sonra gerilim uygulandığında, ilk duruma göre sızıntı akımlarının genişliğinde porselen izolatörün hafif buzlanma durumuna göre çok büyük fark oluşmadığı görülmüştür. Porselen izolatörün hafif buzlu durumuyla kıyaslandığında cam izolatörün sızıntı akımlarının sıklığının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Silikon izolatörde hafif buzlanma durumunda sızıntı akımı 2 mA'yi geçmemiştir. Silikon izolatörde, porselen ve cam izolatörün hafif buzlu durumuna kıyasla sızıntı akımı oldukça azdır. Porselen izolatörlerde buzlanma durumunda izolatöre beklemeden gerilim uygulandığında sızıntı akımı kısmen hafif buzlanmaya benzerlik gösterse de buzsuz duruma göre akım sıklığı artmaktadır. Bu durum buz tabakasının direnci ile ilgilidir. Buz tabakasının direnci buz tabakasının kalınlığı ile ters orantılıdır. Buz tabakasının kalınlığı buzun artık direncini azaltacak, bu da sızıntı akımının artmasına neden olacaktır. Buzlanma durumunda 20 kV'da sızıntı akımı genişliği yaklaşık olarak 8 mA'yi bulmaktadır. Bekleme süresi arttıkça buzun erimesi ile beraber sızıntı akımı sıklığı genel olarak artmaktadır.

Cam izolatörde buzlanma durumunda, izolatöre beklemeden ve 15 dakika beklendikten sonra gerilim uygulandığında, yüzeysel sızıntı akımının buzsuz durum ve hafif buzlanmaya göre daha belirgin olduğu görülmüştür. Buzlanma durumunda, 20 kV'da sızıntı akımı genişliği yaklaşık olarak 8 mA'yi bulmaktadır. Porselen zincir izolatöre göre buzlanma durumundaki sızıntı akımı daha belirgindir. Silikon izolatörde buzlu durumda buzun yüzeye tutunmasından dolayı erime durumu daha geç gerçekleşmektedir. Silikon izolatör için porselen ve cam izolatöre kıyasla buzlu durumda sızıntı akımları daha azdır. İzolatörlere uygulanan alternatif gerilimle birlikte izolatör yüzeyinin iletkenliğinin artmasıyla yalıtkan yüzeyinde oluşan arklar darbe olarak nitelendirilmektedir. Porselen izolatör ve cam izolatörün 20 kV'da, saniyedeki darbe sayılarının karşılaştırılması Şekil 9'da yer almaktadır.

Porselen izolatörde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA'de 63, 4 mA'de 66 ve 6 mA'de 67 olurken cam izolatörde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA'de 158, 4 mA'de 171 ve 6 mA'de 175 olmuştur. Cam izolatörde, porselen izolatöre göre daha fazla darbe oluşmuştur. Buzlandırılan izolatör için zamana bağlı olarak ölçülen, ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 3'te verilmiştir.



Şekil 9. Porselen izolatör ve cam izolatörün darbe sayılarının karşılaştırılması

Tablo 3. İzolatöre gerilim uygulanırken zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	37	21.6
15	43	20.2
30	47	20
45	50	19.8

İzolatörün buzlanma durumunda 15'er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile beraber ortamın nem değeri yükselmiş sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

5. Sonuçlar

İzolatörlerin yüzeyinden akan sızıntı akımları; izolatör yüzeyindeki buz kalınlığı, bulunduğu ortamın sıcaklığı, nemi vb. çevresel faktörlere, izolatörlerin büyüklüğü, etek aralığı, etek çapı ve izolatörün yapıldığı malzeme vb. mekaniksel durumlara bağlıdır.

İzolatörlere uygulanan gerilimin genliğinin artması sızıntı akımının genliğinin artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda sızıntı akımının genliği izolatör yüzeyinde biriken buzun oranına da bağlıdır. Buz kalınlığı arttığında ve buzun erimeye başladığı andan sıvı hale geçinceye kadar sızıntı akımının sıklığı artmaktadır. Buz erimeye başladığı anda izolatörün bulunduğu ortamın nemi artmaktadır. Bu durum sızıntı akımını etkileyen bir durum olarak ele alınmalıdır.

Cam izolatörün sızıntı akımının sıklığı porselen ve silikon izolatöre göre daha fazladır. Porselen, cam ve silikon izolatörlerin yüzeylerinde buzun en erken olgunlaşması ve en geç erimesi silikon izolatörde olmaktadır. Buzun sıvı hale geçmeye başladığı andan itibaren uygulanan gerilimin genliği arttıkça ark sayısı da artmaktadır.

İzolatörlerin tasarımı gerçekleştirilirken bulunduğu bölgenin iklim şartlarına göre buzlanma seviyesi, sıcaklık ve nem değerleri göz önüne alınarak, etek çapı, etek aralığı, etek sayısı, yapıldığı malzeme vb. mekaniksel özelliklerin dikkate alınması buzlanmadan dolayı oluşabilecek sorunları azaltmaya yardımcı olacaktır.

Dünya üzerinde doğa olaylarının çevreye etkisinin tamamen yok olması söz konusu değildir. Bu yüzden izolatörlerde buzlanma olayının ve bununla birlikte çevresel faktörlerin enerji nakil hatlarına olan olumsuz etkileri devam edecektir. Bu durum ile beraber ülkemizin coğrafi durumu ve karasal iklimin yoğun yaşandığı kırsal kesim göz önünde bulundurulduğunda izolatörlerde buzlanmadan dolayı gerçekleşen arızalar oldukça fazladır. Bu arızalar, enerji kesintileri ile birlikte oluşan bakım ve onarım maliyetleri ile ülke ekonomimize büyük zararlar vermektedir. Ancak oluşacak olan olumsuz koşulların etkilerini minimize etmek mümkündür. İzolatörlerde buzlanma olayının etkisini azaltmak için gelecekteki çalışmalarda, sinyal işleme veya görüntü işleme teknikleri daha etkin bir şekilde kullanılabilir. Erken uyarı sistemi ile izolatörlere zamanında müdahale edilerek arızaların oluşması engellenebilir. Böylece enerji kesintileri ve onarımlar azaltılarak ekonomiye katkı sağlanabilir.

Teşekkür

Bu çalışma FÜBAP MF.21.68 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Farzaneh M, Kiernicki J. Flashover problems caused by ice build up on insulators. *IEEE Electr Insul Mag* 1995; 11(2): 5–17.
- [2] Chisholm WA. North American operating experience: Insulator flashovers in cold conditions. *CIGRE Study Committee 33 Colloq* 1997; 1–4.
- [3] Farzaneh M, Zhang J and Volat C. Effect of insulator diameter on AC flashover voltage of an ice-covered insulator string. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2006; 13(2): 264–271.
- [4] Jiang X, Wang S, Zhang Z, Xie S, and Wang Y. Study on AC Flashover Performance and Discharge Process of Polluted and Iced IEC Standard Suspension Insulator String. *IEEE Trans Power Delivery* 2007; 22(1): 472–480.
- [5] Zhang Z, Jiang X, Sun C, Hu J, Huang H and Gao DW. Influence of insulator string positioning on AC icing flashover performance. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2012; 19(4): 1335–1343.
- [6] Farzaneh M. Insulator icing flashover. 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena; 2013; Chenzhen, China. 1–15.
- [7] Xu Z, Xu T, Yao T, Li X, Li J, Chen J, ... & Jia R. Flashover performance of UHV amp; EHV post insulators under icing conditions. 2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP); 2014; Des Moines, IA, USA. 295–298.
- [8] Yin F, Jiang X, & Farzaneh M. Electrical performance of composite insulators under icing conditions. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2014; 21(6): 2584–2593.
- [9] Jiang X, Xiang Z, Zhang Z, Hu J, Hu Q and Shu L. Comparison on ac icing flashover performance of porcelain, glass, and composite insulators. *Cold Reg Sci Technol* 2014; 100: 1–7.
- [10] Shu L, Wang S, Jiang X, Hu Q, Liang J, Yin P & Chen J. Modeling of AC flashover on ice-covered composite insulators with different shed configurations. *IEEE Trans Dielectr Electr Insul* 2014; 21(6): 2642–2651.
- [11] Porkar B & Farzaneh M. Ac Flashover Performance of a Horizontal Insulator String Under Heavy Icing Conditions. *The 20th International Symposium on High Voltage Engineering*; 2017; Buenos Aires, Argentina.
- [12] Tian L, Zhang Z, Jiang X, Shu L, Hu J & Qin H. Study on the Icing Accretion Characterization of Porcelain and Glass Insulator. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE); 2018; Athens, Greece. 1–4.
- [13] Li C, Liu Y, Wang Z, Li Q, Farzaneh M and Du B. X. Transformation and Analysis of Leakage Current for Icing Flashover Prediction of HVDC Outdoor Insulators. 2023 IEEE 4th International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE); 2023; Shanghai. pp. 1-4.
- [14] Zong C, Hu Y, Jiang X, Xian R, Liu Z, & Sun J. AC flashover characteristics and arc development process of glaze ice-covered insulators in natural environment. *Int J Electr Power Energy Syst* 2022; 135, 107559.
- [15] Qiao X, Zhang Z, Jiang X, Sundararajan R, Ma X, & Li X. AC failure voltage of iced and contaminated composite insulators in different natural environments. *Int J Electr Power Energy Syst* 2020; 120, 105993.
- [16] Zhu Y, Zhou R, Zhang Y, Dong X, & Huang X. Review on flashover risk prediction method of iced insulator based on icing monitoring technology. *Cold Reg Sci Technol* 2021; 185, 103252.
- [17] Rizk FA. Mathematical models for pollution flashover. *Electra* 1981; 78(5): 71–103.
- [18] Farzaneh M, Zhang J, Chaarani R & Fikke SM. Critical conditions of AC arc propagation on ice surfaces. in *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)* 2000; 211–215.
- [19] Neumarker G. Verschmutzungszustand und kriechweg. *Monatsber D Deut Akad* 1959; 1: 352–359.
- [20] Farzaneh M, Chisholm W. A. *Insulators for icing and polluted environments*. Canada: John Wiley & Sons, 2009.