

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



İZOLATÖRLERDE BUZLANMANIN YÜZEY KAÇAK
AKIMLARI ÜZERİNE ETKİSİ

Muhammed Buğraçan ÖZKÜÇÜK

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Elektrik Tesisleri

TEMMUZ 2022

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

İZOLATÖRLERDE BUZLANMANIN YÜZEY KAÇAK AKIMLARI ÜZERİNE ETKİSİ

Tez Yazarı

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK

Danışman

Prof.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU

TEMMUZ 2022

ELAZIĞ

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Başlığı:	İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzey Kaçak Akımları Üzerine Etkisi
Yazarı:	Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK
İlk Teslim	03.06.2022
Savunma	04.07.2022

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof. Dr. Mehmet CEBECİ Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Dr. Öğr. Üyesi Harun GÜLAN Munzur Üniversitesi. Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza
Prof. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzey Kaçak Akımları Üzerine Etkisi” Başlıklı Yüksek Lisans Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

04.07.2022

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında bilgi birikimi, tecrübesi ve yardımlarını eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince kıymetli vaktini ayırarak, deneyim ve bilgilerini aktararak yardımcı olan değerli hocam Doç. Dr. Hasan GÜLER'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca bana inanan ve güvenen, varlıklarıyla ve destekleriyle sürekli yanımda olan sevgili aileme çok teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (FÜBAP) tarafından **MF.21.68** protokol numaralı proje ile desteklenmiştir.

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK

ELAZIĞ, 2022



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Özeti	2
1.2. Tezin Amacı	5
1.3. Tezin Yapısı.....	5
2. İZOLATÖRLERDE BUZLANMA.....	7
2.1. Buzun Elektriksel Özellikleri	7
2.1.1. Buzun ve Buz Yüzeyinin İletkenliği	7
2.1.2. Buzun Yüksek Frekans Davranışı	10
2.2. Buzlanma Türleri.....	11
2.2.1. Çok Hafif Buzlanma.....	12
2.2.2. Hafif Buzlanma	13
2.2.3. Orta Düzeyde Buzlanma	15
2.2.4. Ağır Buzlanma	16
2.3. İzolatörlerde Farklı Buzlanma Türlerinin Özellikleri	17
2.3.1. İzolatörlerin Kuru Büyüme Buzlanması.....	18
2.3.2. İzolatörlerin Islak Büyüme Buzlanması	18
2.3.3. İzolatörlerin Kuru ve Islak Büyüme Buzlanmasının Parametrelendirilmesi	19
2.4. İzolatörlerde Buzlanma Durumları İçin Kritik Koşullar.....	20
2.4.1. Su Damlacıklarının Donma Süresi	20
2.4.2. Su Damlacıklarının Çarpışma Aralığı Süresi	22
2.4.3. İzolatörler Üzerindeki Damlacıkların Yerel Donma Verimliliği.....	23
2.5. Atmosferik Buzlanma Açısından İzolatör Seçimi	25
2.5.1. Deterministik Yaklaşım.....	25
2.5.2. Olasılıksal Yaklaşım	26
2.6. Elektrik Alanın İzolatör Buz Birikimi Üzerine Etkisi	27
3. BUZLANMA MODELLERİ.....	30
3.1. Buzlanma Atlaması için Ampirik Modeller.....	31
3.2. Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Atlama Süreci	34
3.2.1. Buz Yüzeyinde Deşarjin Başlaması ve Yayılması	35

3.2.2. Buz Yüzeyi Üzerinde Ark Yayılımının Özellikleri	37
3.2.3. Buz Yüzeyinde Ark Yayılma Hızı	38
3.2.4. Atlama İçin Ark Gelişimi	39
3.2.5. İzolatör Atlama Geriliminin Tahmini	39
3.3. Buz Kaplı İzolatör Üzerinde Atlama Sürecinin Matematiksel Modellenmesi	40
3.3.1. Buzla Kaplı İzolatörlerin DA Atlama Modeli	41
3.3.2. Kirlenmenin Buzla Kaplı İzolatörler Üzerindeki Etkisi	44
3.3.3. Buzla Kaplı İzolatörlerin AA Atlama Modeli	45
4. UYGULAMA	47
4.1. Deney Düzeneği	47
4.2. Deneylerde Kullanılan İzolatörler	50
4.3. Tek Elemanlı Porselen Zincir İzolatörde Buzlanma	51
4.3.1. Buzsuz Durum	51
4.3.2. Hafif Buzlanma	53
4.3.3. Buzlanma	57
4.4. Cam İzolatörde Buzlanma	63
4.4.1. Buzsuz Durum	63
4.4.2. Hafif Buzlanma	65
4.4.3. Buzlanma	69
4.5. İki Elemanlı Porselen Zincir İzolatör	73
4.5.1. Buzsuz Durum	73
4.5.2. Hafif Buzlanma	75
4.5.3. Buzlanma	78
4.6. Üç Elemanlı Porselen Zincir İzolatör	82
4.6.1. Buzsuz Durum	82
4.6.2. Hafif Buzlanma	84
4.6.3. Buzlanma	87
4.7. Silikon İzolatörde Buzlanma	91
4.7.1. Buzsuz Durum	91
4.7.2. Hafif Buzlanma	93
4.7.3. Buzlanma	96
4.8. Sıvı İletkenliğinin Buzlanmış İzolatör Üzerine Etkisi	102
4.8.1. Porselen İzolatör	102
4.8.2. Cam İzolatör	114
4.8.3. Silikon İzolatör	125
4.9. Tartışma	137
5. SONUÇLAR	139
KAYNAKLAR	140
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

İzolatörlerde Buzlanmanın Yüzey Kaçak Akımları Üzerine Etkisi

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK

Yüksek Lisans Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2022, Sayfa: xix + 142

İzolatörler, elektrik dağıtım ve iletim hatlarında iletkenleri mekanik olarak taşıyan ve elektriksel olarak izole eden temel ekipmanlardır. İzolatör arızası, enerji nakil hatlarının sürekliliği ve güvenliği için doğrudan bir tehdittir. İstatistiksel olarak, izolatörlerden kaynaklanan arızalar, güç sistemi arızalarının en yüksek oranını oluşturmaktadır.

Buzlanma ülkemizin engebeli coğrafyası ve karasal iklimi göz önüne alındığında sık karşılaşılan bir durumdur. Buzlanma ve sonrasında izolatör arızaları, yoğun kış koşullarının gerçekleştiği bölgelerde enerji kesintilerine neden olmakta ve ülke ekonomisine büyük zararlar vermektedir. Uzun yıllardan beri izolatörlerde buzlanma ile ilgili çalışmalar devam etmekle birlikte, konuya tam olarak çözüm getirecek bir yöntem henüz bulunamamıştır.

Bu çalışmada farklı izolatör tipleri laboratuvar ortamında buzlandırılarak sızıntı akımları incelenmiştir. Buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için izolatörlere şebeke frekanslı alternatif gerilim uygulanarak, Labview programı yardımıyla veriler elde edilmiş ve porselen, cam ve silikon izolatörlerin buzlanma öncesi ve sonrasındaki sızıntı akımları karşılaştırılmıştır. İzolatörün bulunduğu ortam sıcaklığı ve nem değerleri ölçülerek sızıntı akımı arasında ilişki kurulmuştur. Ayrıca, izolatörler farklı iletkenlik değerlerinde buzlandırılıp, iletkenliğin sızıntı akımı ve izolatör çeşitleri üzerine etkisi incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: İzolatör, Buzlanma, Sızıntı akımı

ABSTRACT

Effect of Icing on Insulators on Surface Leakage Currents

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK

Master's Thesis

FIRAT UNIVERSITY

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

July 2022, Pages: xix + 142

Insulators are the basic equipment that mechanically carries conductors and electrically isolates them in electrical distribution and transmission lines. Insulator failure is a direct threat to the continuity and safety of power transmission lines. Statistically, failures caused by insulators account for the highest proportion of power system failures.

Icing is a common occurrence given the rugged geography and continental climate of our country. Icing and subsequent insulator failures cause power outages in regions with intense winter conditions and cause great damage to the country's economy. Although studies on icing in insulators have been ongoing for many years, a method that will fully solve the issue has not yet been found.

In this study, leakage currents were examined by icing different types of insulators in a laboratory environment. For ice-free, light icing and icing situations, alternating voltage with mains frequency was applied to the insulators, data were obtained with the help of Labview program and leakage currents of porcelain, glass and silicone insulators before and after icing were compared. The relationship between the leakage current was established by measuring the ambient temperature and humidity values of the insulator. In addition, the insulators were frosted at different conductivity values, and the effect of conductivity on leakage current and insulator types was investigated.

Keywords: Insulator, Icing, Leakage current

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	Eşdeğer yüzey iletkenliği γ_e ve σ_{20} arasındaki ilişki 9
Şekil 2.2.	(a) Buz-hava ara yüzünde pozitif ark için ark kökü yarıçapının ölçümleri (b) Buz tabakası içindeki ark 9
Şekil 2.3.	$1000 / (273 \text{ K}) = 3.65$ ve $1000 / (263 \text{ K}) = 3.80$ ile ters sıcaklığın fonksiyonu olarak buzun gevşeme süresi 10
Şekil 2.4.	-10°C 'de saf buz kristalinin kompleks dielektrik tepkisi 11
Şekil 2.5.	(a) Hat izolatörü (b) Mesnet izolatör (c) 500 kV'luk istasyonda sis koşulları 14
Şekil 2.6.	Dondurucu yağmurdan sonra yaygın olarak 500 kV güç sistemi kesintilerine yol açan ve yol açmayan hava olaylarının karşılaştırılması 14
Şekil 2.7.	Erime noktasında atlamaya neden olan ve olmayan hava olaylarının karşılaştırılması 15
Şekil 2.8.	Buzlanma olayı sırasında standart 500 kV izolatör dizisinde buz birikimi 16
Şekil 2.9.	İzolatör çifti üzerinde buz birikimi 17
Şekil 2.10.	Hydro - Québec izolatörlerinde buz birikmesi (a) 161 kV mesnet izolatör (b) 735 kV zincir izolatör 17
Şekil 2.11.	İzolatör üzerinde kuru büyüme buzlanması 18
Şekil 2.12.	İzolatör üzerinde ıslak büyüme buzlanması 19
Şekil 2.13.	İzolatör üzerinde farklı buzlanma türleri (a) Kuru büyüme buzlanması (b) Sarkıtsız ıslak büyüme buzlanması (c) Sarkıtlı ıslak büyüme buzlanması 19
Şekil 2.14.	İzolatör üzerindeki su damlacıklarının çarpışması 20
Şekil 2.15.	(a) Su damlacıklarının donma süresi, (b) Su damlacıklarının çarpışma aralığı süresi 23
Şekil 2.16.	İzolatörün j birimi üzerinde kütle ve enerji dengesinin şematik gösterimi 23
Şekil 2.17.	Olasılıksal yaklaşıma dayalı tasarım için illüstrasyon 26
Şekil 2.18.	$238 \mu\text{S/cm}$ uygulanan su iletkenliği ile doğru akımın buzun birikmesine etkisi 27
Şekil 2.19.	(a) İzolatör diskinde buz ve buz saçağı oluşumunun görünümü 27
Şekil 2.20.	Enerjili bir mesnet izolatör üzerindeki buz sarkıtları 28
Şekil 2.21.	Buz sarkıtlarının üst, orta ve alt bölümlerinde kabarcık özelliği ve tane dokusu ile enerjilenmiş ve enerjisiz koşullar altında yetiştirilen buz saçağı örneği 29
Şekil 3.1.	Bir buz yüzeyinde atlama modeli 30
Şekil 3.2.	Temiz sis ve soğuk sis atlama gerilimlerinin karşılaştırılması 32
Şekil 3.3.	Silikon izolatör üzerindeki buzlanma 33
Şekil 3.4.	Ark oluşumu ve yayılma süreci 35
Şekil 3.5.	Test edilen buz modelinin dikey kesimi 36

Şekil 3.6.	Buz yüzeyi üzerinde yayılan deşarj iyonizasyonuna ve bağlanmaya katkıda bulunan temel işlemler	36
Şekil 3.7.	Basitleştirilmiş geometri buz modeli	37
Şekil 3.8.	Üst (a) ve alt (b) hava boşluğu konumlarına karşılık gelen ark kanalı.....	38
Şekil 3.9.	Yayılma işlemi, σ_{20} ile buz yüzeyinde 27 kV'da ark	42
Şekil 3.10.	D.a. için γ_e buz yüzeyi iletkenliği dc- ve dc + koşulları	43
Şekil 3.11.	Buzlanma koşullarında mesnet izolatörlerde tipik arklar ve hava boşlukları.....	46
Şekil 4.1.	Buzlandırma kabini.....	47
Şekil 4.2.	Gerilim bölücü ve yüksek gerilim transformatörü	47
Şekil 4.3.	Kontrol paneli ve veri toplama ünitesi	48
Şekil 4.4.	Labview programı.....	48
Şekil 4.5.	Deney şeması	49
Şekil 4.6.	Nem ve sıcaklık ölçer	49
Şekil 4.7.	Porselen ve cam izolatör kesiti	50
Şekil 4.8.	Silikon izolatöre ait kesit	51
Şekil 4.9.	Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör	52
Şekil 4.10.	Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları.....	52
Şekil 4.11.	Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları.....	52
Şekil 4.12.	Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları.....	53
Şekil 4.13.	Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları.....	53
Şekil 4.14.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör.....	54
Şekil 4.15.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	54
Şekil 4.16.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	54
Şekil 4.17.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	55
Şekil 4.18.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	55
Şekil 4.19.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	55
Şekil 4.20.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	56
Şekil 4.21.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	56
Şekil 4.22.	Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	56
Şekil 4.23.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör.....	57
Şekil 4.24.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları.....	58
Şekil 4.25.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları.....	58
Şekil 4.26.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları.....	58
Şekil 4.27.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	59

Şekil 4.28.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	59
Şekil 4.29.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	59
Şekil 4.30.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	60
Şekil 4.31.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20kV'da sızıntı akımları	60
Şekil 4.32.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	60
Şekil 4.33.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	61
Şekil 4.34.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	61
Şekil 4.35.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	61
Şekil 4.36.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	62
Şekil 4.37.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	62
Şekil 4.38.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	62
Şekil 4.39.	Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	63
Şekil 4.40.	Buzsuz cam izolatör	64
Şekil 4.41.	Buzsuz cam izolatörün 5 kV'da sızıntı akımları	64
Şekil 4.42.	Buzsuz cam izolatörün 10 kV'da sızıntı akımları	64
Şekil 4.43.	Buzsuz cam izolatörün 15 kV'da sızıntı akımları	65
Şekil 4.44.	Buzsuz cam izolatörün 20 kV'da sızıntı akımları	65
Şekil 4.45.	Hafif buzlu cam izolatör	66
Şekil 4.46.	Hafif buzlu cam izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	66
Şekil 4.47.	Hafif buzlu cam izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	66
Şekil 4.48.	Hafif buzlu cam izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	67
Şekil 4.49.	Hafif buzlu cam izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	67
Şekil 4.50.	Hafif buzlu cam izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	67
Şekil 4.51.	Hafif buzlu cam izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	68
Şekil 4.52.	Hafif buzlu cam izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	68
Şekil 4.53.	Hafif buzlu cam izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	68
Şekil 4.54.	Buzlu cam izolatör	69
Şekil 4.55.	Buzlu cam izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	70
Şekil 4.56.	Buzlu cam izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	70
Şekil 4.57.	Buzlu cam izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	70
Şekil 4.58.	Buzlu cam izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	71
Şekil 4.59.	Buzlu cam izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	71
Şekil 4.60.	Buzlu cam izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	71
Şekil 4.61.	Buzlu cam izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	72

Şekil 4.62.	Buzlu cam izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	72
Şekil 4.63.	Tek elemanlı porselen izolatör ve cam izolatörün darbe sayılarının karşılaştırılması	73
Şekil 4.64.	Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör	73
Şekil 4.65.	Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	74
Şekil 4.66.	Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	74
Şekil 4.67.	Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	74
Şekil 4.68.	Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	75
Şekil 4.69.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör	75
Şekil 4.70.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	76
Şekil 4.71.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	76
Şekil 4.72.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	76
Şekil 4.73.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	77
Şekil 4.74.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	77
Şekil 4.75.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	77
Şekil 4.76.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	78
Şekil 4.77.	Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	78
Şekil 4.78.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör	79
Şekil 4.79.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	79
Şekil 4.80.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	80
Şekil 4.81.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	80
Şekil 4.82.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	80
Şekil 4.83.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	81
Şekil 4.84.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	81
Şekil 4.85.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	81
Şekil 4.86.	Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	82
Şekil 4.87.	Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör	82
Şekil 4.88.	Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	83
Şekil 4.89.	Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	83
Şekil 4.90.	Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	83
Şekil 4.91.	Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	84
Şekil 4.92.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör	84
Şekil 4.93.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	85
Şekil 4.94.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	85
Şekil 4.95.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	85

Şekil 4.96.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	86
Şekil 4.97.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	86
Şekil 4.98.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	86
Şekil 4.99.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	87
Şekil 4.100.	Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	87
Şekil 4.101.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör.....	88
Şekil 4.102.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	88
Şekil 4.103.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	89
Şekil 4.104.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	89
Şekil 4.105.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	89
Şekil 4.106.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	90
Şekil 4.107.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	90
Şekil 4.108.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	90
Şekil 4.109.	Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	91
Şekil 4.110.	Buzsuz silikon izolatör.....	91
Şekil 4.111.	Buzsuz silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	92
Şekil 4.112.	Buzsuz silikon izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	92
Şekil 4.113.	Buzsuz silikon izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	92
Şekil 4.114.	Buzsuz silikon izolatör için 20 kV'da sızıntı akımı	93
Şekil 4.115.	Hafif buzlu silikon izolatör	93
Şekil 4.116.	Hafif buzlu silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	94
Şekil 4.117.	Hafif buzlu silikon izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	94
Şekil 4.118.	Hafif buzlu silikon izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	94
Şekil 4.119.	Hafif buzlu silikon izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	95
Şekil 4.120.	Hafif buzlu silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	95
Şekil 4.121.	Hafif buzlu silikon izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	95
Şekil 4.122.	Hafif buzlu silikon izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	96
Şekil 4.123.	Hafif buzlu silikon izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	96
Şekil 4.124.	Buzlu silikon izolatör.....	97
Şekil 4.125.	Buzlu silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	97
Şekil 4.126.	Buzlu silikon izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları	98
Şekil 4.127.	Buzlu silikon izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları	98
Şekil 4.128.	Buzlu silikon izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları	98
Şekil 4.129.	Buzlu silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları	99

Şekil 4.130. Buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları	99
Şekil 4.131. Buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları	99
Şekil 4.132. Buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları	100
Şekil 4.133. Buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları	100
Şekil 4.134. Buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları	100
Şekil 4.135. Buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları	101
Şekil 4.136. Buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları	101
Şekil 4.137. Üç elemanlı porselen ve silikon izolatörün darbe sayılarının karşılaştırılması	102
Şekil 4.138. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	103
Şekil 4.139. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	103
Şekil 4.140. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	103
Şekil 4.141. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	104
Şekil 4.142. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	104
Şekil 4.143. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	104
Şekil 4.144. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	105
Şekil 4.145. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	105
Şekil 4.146. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	105
Şekil 4.147. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	106
Şekil 4.148. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	106
Şekil 4.149. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	106
Şekil 4.150. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	107
Şekil 4.151. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	107
Şekil 4.152. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	107
Şekil 4.153. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	108
Şekil 4.154. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	108
Şekil 4.155. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	108
Şekil 4.156. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	109
Şekil 4.157. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	109
Şekil 4.158. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	109
Şekil 4.159. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	110
Şekil 4.160. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	110
Şekil 4.161. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	110
Şekil 4.162. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	111
Şekil 4.163. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	111

Şekil 4.164. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	111
Şekil 4.165. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	112
Şekil 4.166. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	112
Şekil 4.167. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	112
Şekil 4.168. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	113
Şekil 4.169. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	113
Şekil 4.170. Tek elemanlı porselen izolâtörün iletkenlik ve sızıntı akımı arasındaki ilişki	114
Şekil 4.171. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	114
Şekil 4.172. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	115
Şekil 4.173. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	115
Şekil 4.174. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	115
Şekil 4.175. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	116
Şekil 4.176. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	116
Şekil 4.177. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	116
Şekil 4.178. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	117
Şekil 4.179. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	117
Şekil 4.180. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	117
Şekil 4.181. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	118
Şekil 4.182. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	118
Şekil 4.183. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	118
Şekil 4.184. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	119
Şekil 4.185. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	119
Şekil 4.186. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	119
Şekil 4.187. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	120
Şekil 4.188. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	120
Şekil 4.189. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	120
Şekil 4.190. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	121
Şekil 4.191. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	121
Şekil 4.192. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	121
Şekil 4.193. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	122
Şekil 4.194. Cam izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları	122
Şekil 4.195. Cam izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları	122
Şekil 4.196. Cam izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları	123
Şekil 4.197. Cam izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları	123

Şekil 4.198. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	123
Şekil 4.199. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	124
Şekil 4.200. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	124
Şekil 4.201. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	124
Şekil 4.202. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	125
Şekil 4.203. Cam izolatörün iletkenlik ve sızıntı akımı arasındaki ilişki	125
Şekil 4.204. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	126
Şekil 4.205. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	126
Şekil 4.206. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	126
Şekil 4.207. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	127
Şekil 4.208. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	127
Şekil 4.209. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	127
Şekil 4.210. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	128
Şekil 4.211. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	128
Şekil 4.212. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	128
Şekil 4.213. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	129
Şekil 4.214. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	129
Şekil 4.215. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	129
Şekil 4.216. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	130
Şekil 4.217. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	130
Şekil 4.218. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	130
Şekil 4.219. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	131
Şekil 4.220. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	131
Şekil 4.221. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	131
Şekil 4.222. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	132
Şekil 4.223. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	132
Şekil 4.224. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	132
Şekil 4.225. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	133
Şekil 4.226. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	133
Şekil 4.227. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	133
Şekil 4.228. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	134
Şekil 4.229. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	134
Şekil 4.230. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	134
Şekil 4.231. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	135

Şekil 4.232. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları	135
Şekil 4.233. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları	135
Şekil 4.234. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları	136
Şekil 4.235. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları	136
Şekil 4.236. Silikon izolatörün iletkenliği ve sızıntı akımı arasındaki ilişki.....	137



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Kaçak akımın fonksiyonu olarak ark kökü yarıçapı	10
Tablo 2.2. Enerji verilmiş porselen izolatörlerde buz birleştirme şiddetinin sınıflandırılması	12
Tablo 2.3. Buzlanma koşullarında atlamalar ile tipik fayda deneyimi	13
Tablo 3.1. Sis ve ön kirlenmenin yüzey iletkenliğine göreceli katkıları	31
Tablo 3.2. 254 mm izolatör zincirlerinde buz birikimi veya 300 mm çapında tek tip atkı profilli mesnet izolatör üzerinde referans silindir üzerindeki buz birikimi arasındaki ilişki	34
Tablo 4.1. Porselen ve cam izolatöre ait karakteristik değerler.....	50
Tablo 4.2. Silikon izolatöre ait karakteristik değerler	51
Tablo 4.3. Tek elemanlı porselen zincir izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri	57
Tablo 4.4. Cam izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri	69
Tablo 4.5. İki elemanlı porselen izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri	79
Tablo 4.6. Üç elemanlı porselen izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri	88
Tablo 4.7. Silikon izolatörün zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri	97

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Ark sabiti
D	: Çap
E	: Gerilim
L	: Uzunluk
k	: Geçirgenlik katsayısı
R	: Direnç
r	: Yarıçap
N	: Ark sayısı
I	: Akım
V	: Gerilim
ω	: Açısal hız
W	: Genişlik
t	: Kalınlık
t_c	: Zaman
τ	: Zaman
γ	: Yüzey iletkenliği
σ	: İletkenlik
q	: Isı

Kısaltmalar

IWAIS	: Uluslararası Yapıların Atmosferik Buzlanması Çalıştayı
ISH	: Uluslararası Yüksek Gerilim Mühendisliği Sempozyumu
ICHUE	: Uluslararası Yüksek Gerilim ve Uygulama Konferansı
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
NERC	: Ulusal Elektrik Güvenirliği Konseyi
CIGRE	: Uluslararası Büyük Elektrik Şebekeleri Konseyi
EYG	: Ekstra yüksek gerilim
UYG	: Ultra yüksek gerilim
ISP	: Buz tabakası iletkenliği ürünü
A.a	: Alternatif akım
D.a	: Doğru akım
SDD	: Tuz birikim yoğunluğu
MHÇ	: Medyan hacim çapı
ESDD	: Eşdeğer tuz birikintisi yoğunluğu
UV	: Ultraviyole

1. Giriş

İletim ve dağıtım hatlarında izolatörlerin elektriksel özellikleri, güç sistemlerinin güvenliğinde belirleyici bir rol oynamaktadır. Elektrik güç sistemleri buz yükü, rüzgar yükü vb. mekanik kuvvetlere dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Fakat kış koşullarında çeşitli iklimlerde elektrik yalıtımı için standartlara dayalı bir tasarım süreci yoktur. Dünyanın birçok yerinde havai elektrik hatları buzlanmadan etkilenmekte, bazen ciddi arızalara ve büyük sosyoekonomik sonuçları olan hasarlara yol açmaktadır.

İletim hatlarının buzlanması sorunu, izolatör yüzeyine düşen aşırı soğumuş su damlacıklarının neden olduğu yalıtkan yüzeyinin köprülenmesi nedeniyle 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 olabilir.

Kirlilik ile birlikte atmosferik buz birikmesi, soğuk iklim bölgelerinde izolatörlerin güvenilirliğinde önemli bir risk faktörü olarak tanımlanmıştır. Buz ve karla kaplı izolatörlerde meydana gelen atlamalar, bir dizi faktörün kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Elektrik alanları buzun yapısını, buz sarkıtının gelişiminin şeklini ve yönünü, sıvı suyun dağılımını ve buz yüzeyini parçalayan hava boşluklarının geometrisini değiştirir. Elektrik alan kuvveti ve gerilim polaritesinin yanı sıra rüzgârda atlama süreci üzerinde kanıtlanabilir etkilere sahiptir. İzolatörlerde buzlanmadan kaynaklanan atlama, hava sıcaklığındaki değişiklikler, buz türü ve buzun yapısı dâhil olmak üzere bazı çevresel ve meteorolojik koşullardan da etkilenmektedir. Donma ve erime işlemi sırasında yüzey kirliliğinin varlığı ve iyonların katıdan sıvı tabakalara geçtiği andaki durumları, en olumsuz koşullar altında normal çalışma geriliminde meydana gelebilecek izolatörlerin buzlanmasında da merkezi bir rol oynamaktadır.

Atmosferik buzlanma yaşayan çeşitli ülkelerde, kış dönemlerinde izolatörlerin atlaması ile ilgili arızaları içeren olaylar bildirilmiştir [1-2]. Bu raporlara göre, yağışların buzlanması sırasında ve buz veya kar birikmesinin ardından hava sıcaklığının 0 °C'nin üzerine çıkmasıyla, erime durumu ile birlikte atlama olaylarının sayısı artmaktadır. Uluslararası Yapıların Atmosferik Buzlanması Çalıştayı (IWAIS) gibi özel konferanslarda, 1982'den beri bu konuya ayrılmış oturumlar düzenlenmektedir. Panel oturumları ve sunumlar, ayrıca ISH (Uluslararası Yüksek Gerilim Mühendisliği Sempozyumu), ICHVE (Uluslararası Yüksek Gerilim ve Uygulama Konferansı) ve IEEE Elektrik Yalıtımı Konferansı vb. yüksek gerilim ve yalıtım konulu konferanslar da düzenli olarak gerçekleştirilmektedir. Soğuk iklim ortamlarında ekstra yüksek gerilim (EYG) havai hatlarının yaygın kullanımı ve ultra yüksek gerilim (UYG) mühendisliğinin zorlukları göz önüne alındığında, IEEE tarafından son zamanlarda buzlanmaya maruz kalan izolatörlerin test edilmesi, tasarlanması ve seçilmesine yönelik kılavuzlar önerilmiştir [3].

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, izolatörlerin özellikleri (izolatör tipi, eleman sayısı ve malzemesi), buzun özelliği (saçak uzunluğu, kalınlığı, buzlanma tipi, buzlanma açısı ve sıvının iletkenliği), uygulanan gerilimin türü ve şiddeti, izolatörün kirlilik derecesi, elektrik alanın buzlanma üzerine etkisi, izolatörün bulunduğu ortamın çevresel özellikleri (rüzgâr yönü, rüzgâr şiddeti ve hava basıncı) vb. büyüklükler parametre olarak kullanılmıştır. Gelişmekte olan teknoloji ile beraber izolatörlerde buzlanma görüntüleri makine öğrenmesine dayalı olarak elde edilip atlama tahminleri yapılmış, izolatör yüzeyinin silikon kauçuk vb. malzemeler ile kaplanması gibi farklı yöntemler denenmiş olmasına rağmen, izolatörlerde buzlanma olayı hala çözülmesi gereken bir problem olarak durmaktadır.

1.1. Literatür Özeti

Soğuk iklim bölgelerinde, atmosferik buzlanmanın neden olduğu izolatörlerde atlama olayı, güç sisteminin güvenliğini ciddi şekilde etkileyen istenmeyen bir olaydır. Kanada, Amerika Birleşik Devletleri, Japonya, Rusya, Norveç ve Çin gibi birçok ülkede iletim hatlarında şiddetli kar ve buzlanmalardan dolayı yoğun enerji kesintileri yaşanmıştır. Bu nedenle araştırmacılar, atmosferik buzlanma ve bu olayın elektrik hatlarına olan zararları üzerine birçok çalışma yapmış, tartışmış ve önerilerde bulunmuşlardır.

Buzla kaplı bir izolatörün çapının atlama gerilimine etkisini araştıran bir çalışmada, buzla kaplı izolatörlerin kritik atlama gerilimini tahmin etmek için matematiksel bir model önerilmiş ve deneysel çalışmalarla modelin doğruluğu desteklenmiştir. Bu çalışmaya göre, izolatör çapı arttıkça dayanma gerilimi azalmıştır. Bu azalma, izolatör buz tabakasının direncindeki azalmayı göstermektedir. Bir zincir izolatör dizisinin altındaki ark, bir mesnet izolatörün tepesindeki ark ile karşılaştırıldığında, arkın kendisi tarafından oluşturulan termal kaldırma kuvveti nedeniyle, arkın buz yüzeyi boyunca zincir izolatörün tepesine doğru yayılma olasılığı daha yüksektir. Bu nedenle, atlama sabitinin değerinin üstteki bir ark için, alttaki bir arkten daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır [4].

Kirlenmiş ve buzlu zincir izolatör dizisinin alternatif akım atlama gerilimi üzerine yapılan bir çalışmada, buzla kaplı bir izolatör dizisinin atlama performansının, buzlanma seviyesinin yanı sıra kirlilik seviyesiyle de ilgili olduğu gösterilmiştir. Buz tabakası iletkenliğinin ürünü olarak tanımlanan ISP ve kuru ark mesafesinin santimetresi başına buz tabakası ağırlığı, buzla kaplı bir izolatör dizisinin atlama gerilimi üzerindeki buz birikimlerinin ve kirleticilerin etkisini belirlemek amacıyla karakteristik bir parametre olarak alınmıştır. Buzla kaplı bir izolatör dizisinin atlama gerilimi, ISP karakteristik parametresinin artmasıyla azalmıştır. Bir izolatör dizisinin kirlenme atlama performansı gibi izolatör üzerindeki buz birikiminin direnç özelliği nedeniyle, buzla kaplı izolatörde atlama gerilimi, izolatör uzunluğunun artmasıyla doğrusal olarak artmıştır [5].

A.a. atlama gerilimi ile farklı buzlanma koşulları altında buzlu zincir izolatörlerin değişen konumlandırılması arasındaki ilişkiye dayalı çalışmada, izolatörler daha büyük çaplı bazı izolatörler ile bağlandığında, zincir izolatörün potansiyel dağılımının değiştiği gözlemlenmiştir. Daha büyük çaplı eteklere sahip her bir izolatör üzerindeki gerilim, her bir normal izolatörün geriliminden çok daha yüksek olmuş, ancak daha büyük çaplı eteklere sahip her bir izolatör üzerindeki en yüksek gerilim, dikey olarak asılı zincir izolatördeki yüksek gerilim iletkeni ile doğrudan bağlanan izolatörünkinden daha düşük olmuştur [6].

İzolatör buzlanma atlamalarının, hava sıcaklığındaki değişikliklerden, buz tipi ve yapısı dâhil olmak üzere diğer bazı çevresel ve meteorolojik koşullardan da etkilendiği göz önünde bulundurularak matematiksel modeller eşliğinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [3]. Bu çalışmalar sonucunda elektrik alanı, buz sarkıtlarının büyümesini ve morfolojisini etkilemiş, buz sarkıtlarının daha yüksek elektrik alanlarında, radyal olarak dışa doğru büyüme eğiliminde olduğu görülmüştür. Buzlanma atlamalarının ayrıntılı olarak incelenmesi, genellikle dağılmış bir direnç katmanı ile seri bir arkın Obenaus modelini izlediğini göstermiştir. Buzlanma koşulları için ark sabitleri ve kirlilik tabakası direnci oluşturulmuştur. Bir buz yüzeyindeki ark kökünün etkili yarıçapı, aslında çok noktalı bir temasın net gerilim düşüşünü temsil etmektedir. Arkın, bu ark kökü dışında havada buz yüzeyinin üzerinde aktığı belirtilmiştir.

500 kV ve 1000 kV'luk mesnet izolatörlerin elektriksel performansı üzerine bir laboratuvar çalışması gerçekleştirilmiştir. İzolatörlerin üzerine biriken soğutulmuş su damlacıklarının yapay olarak oluşturduğu buz, -10 °C hava sıcaklığı altında enerjilendirilmiştir. Atlama gerilimleri ve kaçak akım, buz erime rejimi sırasında kirliliği izolatörler üzerinde yapılan testlerle elde edilmiştir. Tuz birikimi yoğunluğunun (SDD) ve izolatörlerin ortalama çapının atlama performansına etkisi tartışılmış olup sonuçlar, SDD'nin artmasıyla atlama geriliminin azaldığını göstermektedir. Daha büyük bir izolatör çapı, buzlanma koşulu aynı olduğunda daha büyük bir buzlanma alanına karşılık gelir, bu da izolatörün yüzeyinde daha küçük bir dirençle sonuçlanmıştır. Bu nedenle sabit bir SDD'de ortalama çapın artmasıyla atlama gerilimi de azalmıştır. Ancak atlama öncesi kaçak akım daha büyük olup, bu durum ohm kanunu ile özdeşleştirilmiştir [7].

Buzlanma koşulları altında kompozit izolatörlerin elektriksel performansını incelemek amacıyla yapılan çalışmada, izolatörlerin atlama performansını etkileyen faktörleri bulmak için buzlanma koşullarında buzla kaplı, enerjili ve enerjisiz kompozit izolatörler üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda izolatörlerin, enerjili veya enerjisiz koşullar altında farklı şekilde buzlandıkları gözlemlenmiştir. Enerjisiz durumda, buz sarkıtları dikey olarak aşağı doğru büyümüş ve izolatörlerin etek aralıkları buzlanma ağır olduğunda 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. İzolatörler

üzerinde hafif, orta ve ağır düzeyde buz biriktirilmiştir. Kaçak akım yolu uzunluğunun fazla olduğu durumlarda daha iyi bir atlama performansının gerçekleştiği gözlemlenmiş, izolator etekleri arasındaki mesafenin az olduğu durumlarda atlama gerilimlerinin de daha küçük olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8].

Buzlu porselen, cam ve kompozit izolatorlerde; buz kalınlığı, kirlilik ve hava basıncı gibi çeşitli faktörlerin izolatorün atlama performansı üzerindeki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışmada, buz kalınlığının, kirliliğin ve basıncın artmasıyla üç tip izolatorün de atlama geriliminin azaldığı gösterilmiştir. Buz kalınlığının ve atmosfer basıncının buzlanma atlama gerilimine etkisi, kompozit izolator için porselen ve cam izolatöre göre daha belirgin olmuştur. Kirliliğin atlama gerilimi üzerindeki etkisini karakterize eden değerin, kompozit izolatorler için küçük olduğu, aynı şartlar altında buzla kaplı porselen ve cam izolatorler için ise daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır [9].

Atlama ark yoluna dayalı olarak, erime periyodu sırasında farklı etek aralıklarına sahip buzla kaplı kompozit izolatorlerin a.a. atlama gerilimlerini tahmin etmek için "çok arklı, çok buz tabakalı" matematiksel model önerilmiştir. Bu modeli doğrulamak için, farklı etek aralıklarına sahip dört çeşit 220 kV kompozit izolator, farklı buzlanma koşulları altında test edilmiştir. Birden fazla çapta değişen eteklere sahip buzla kaplı kompozit izolatorler için, her sarkıtın ucundaki ark deşarjı iki farklı yol boyunca ve ark yolları boyunca farklı konumlarda oluşturulabilmiştir ve bu durum farklı buzlanma dereceleri altındaki izolatorlerde farklılıklar göstermiştir. Bu farklılıklar, atlamının oluşmasını önemli ölçüde etkilemiş ve dolayısıyla buzla kaplı kompozit izolatorlerin atlama gerilimleri üzerinde etkiye sahip olmuştur [10].

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

Porselen ve cam izolatorlerde, buzlanma birikmesi, buz şekli, sıcaklık, rüzgâr vb. parametreler gözetilerek testler uygulanmıştır. Porselen ve cam izolatorlerin buzlanma şeklinin benzer olduğu sonucuna varılmıştır. İzolatorlerde rüzgârın estiği yönde daha çok buz birikmesi olmuştur. Rüzgâr hızı ne kadar büyükse su damlacıklarının çarpışması o kadar artacağından buz birikmesi de daha çok gerçekleşecektir. Sıcaklığın, havadaki aşırı soğumuş su damlacıklarının şekli ve izolatordeki yoğunlaşmalar üzerinde etkisi olduğu sonucuna ulaşılmıştır [12].

Son yıllarda izolatorlerdeki buzlanma durumu gelişen teknoloji ile birlikte makine öğrenmesine dayalı olarak görüntü izleme teknolojisiyle de incelenmiştir. Yapılan çalışma iki aşamalıdır. İlk olarak izolatorlerin 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 [13].

Alternatif akım atlama işlemi sırasında buzla kaplı izolatör dizilerinin yüzey deşarjlarının özelliklerinin çıkarılması ve sınıflandırılması üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Minimum atlama gerilimini ölçmek ve yüzey deşarjlarının atlama sürecini kaydetmek için yüksek hızlı bir video kamera kullanılarak buzlu izolatörler üzerinde atlama deneyleri yapılmıştır. Gri seviyeli birlikte oluşum matrisi yöntemi, atlama sürecinin farklı aşamalarını karakterize eden ark deşarj görüntü özelliklerini çıkarmak için kullanılmıştır [14].

1.2. Tezin Amacı

Elektrik iletim ve dağıtım hatlarının güvenilirliği ve sürekliliği oldukça önemli bir durumdur. Elektriksel atlama olayı hatların güvenilirliği ve sürekliliği açısından oldukça sık karşılaşılan bir problemdir. Elektriksel atlamanın en fazla meydana geldiği elemanlardan biri izolatörlerdir. İzolatörlerde atlama olayı; biriken kir, buz, buzun sıcaklığı, buzun yoğunluğu vb. çevresel sorunlara; izolatörlerin büyüklüğü, etek aralığı, etek çapı, zincir sayısı vb. mekaniksel durumlara ve uygulanan gerilimin türü, akım ve gerilim değeri vb. elektriksel olaylara bağlıdır. Özellikle rakımı çok yüksek olan yerlerde, kir yoğunluğunun fazla olduğu bölgelerde ve düşük sıcaklıklara maruz kalan bölgelerde arızalar oldukça fazla olmakta ve kırsal kesimlerde yoğun yağışlardan sonra birçok hat enerjisiz kalmaktadır. Arıza sonrası iletim hatlarının onarımı ve tahrip olan elemanların değiştirilmesi için oldukça büyük miktarlar harcanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, bir deney kabini içerisinde izolatör üzerinde buz biriktirip gerilim uygulayarak ortamın nem ve sıcaklık değerlerini kaydedip izolatör yüzeyindeki sızıntı akımlarının değişimlerini ve buzlanmadan dolayı meydana gelen izolatör arızalarını incelemek ve önleyici teknikler geliştirmektir.

1.3. Tezin Yapısı

Bu çalışmada; izolatörlerde buzlanma ve buzlanma modelleri hakkında bilgiler verilmiş, farklı izolatör çeşitleri buzlandırılıp gerilim uygulanarak sızıntı akımları, ortamın nem ve sıcaklık değerleri incelenerek buzlanmanın izolatör üzerine etkisi incelenmiştir.

Tezin ilk bölümünde izolatörlerde atlama ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiş, tezin amacı ve yapısı kısaca açıklanmıştır.

İkinci bölümde izolatörlerde buzlanma olayını yakından ilgilendiren buzun elektriksel özelliği, izolatörlerde farklı buzlanma türlerinin özellikleri, izolatörlerde buzlanma durumları için kritik koşullar, atmosferik buzlanma açısından izolatör seçimi ve elektrik alanının izolatörde buz birikimi üzerine etkisi vb. konular incelenmiştir.

Üçüncü bölümde buzlanma modellerini yakından ilgilendiren, buzlanma atlaması için ampirik modeller, yüksek gerilim izolatörlerinde atlama süreci ve buz kaplı izolatörler üzerinde atlama sürecinin matematiksel modellenmesi konuları ele alınmıştır

Dördüncü bölümde porselen, cam ve silikon izolatörlerin; buzsuz, hafif buzlu ve buzlu durumları için gerilim uygulanıp sızıntı akımlarının zamana göre grafikleri çizdirilmiştir. İzolatörlerin buzlu durumları için ortamın nem ve sıcaklık değerleri belirlenmiştir.

Son bölümde yapılan çalışmanın sonuçları değerlendirilmiş ve çalışmanın geliştirilmesine dair öneriler sunulmuştur.

2. İZOLATÖRLERDE BUZLANMA

İzolatörler, elektrik iletim ve dağıtım sisteminin en önemli elemanlarından biridir. İzolatörlerin performanslarının yüksek olması, güç sisteminin genel güvenliğini ve kararlılığını artırmaktadır. İzolatörlerdeki arızaların tespiti, bu tür sistemlerin kararsızlığına bağlı elektrik kesintilerini ve ekonomik kayıpları azaltabilmektedir. Ayrıca, iletim ve dağıtım hatlarının kentsel yerleşimleri içerdiği göz önüne alındığında, izolatörlerin olası arızalarının tespiti, sadece elektrik kesintilerini önlemek için değil, aynı zamanda bu tür yoğun alanlardaki kamu tehlikesi nedenlerinden dolayı da büyük önem taşımaktadır.

Buzlanma, elektrik iletim hatlarında iletkenler ve direklerde mekanik yükü arttırarak iletken kopmalarına, direk eğilme veya devrilmelerine neden olan ciddi bir tehdittir. İzolatörlerde buzlanma, izolatörün yalıtım özelliği azaltarak kısmi deşarjlara ve atlamalara neden olmaktadır.

Bu bölümde izolatörlerde buzlanma olayını yakından ilgilendiren buzun elektriksel özelliği, izolatörlerde farklı buzlanma türlerinin özellikleri, izolatörlerde buzlanma durumları için kritik koşullar, atmosferik buzlanma açısından izolatör seçimi ve elektrik alanının izolatörde buz birikimi üzerine etkisi vb. konular araştırılmıştır.

2.1. Buzun Elektriksel Özellikleri

Bir buz yüzeyi üzerindeki atlama işlemi, buz tabakasının birim uzunluğu başına direncin bir fonksiyonudur. Buz tabakası bir izolatörün sızıntı direncine paralel olarak oluşmaktadır. Buz yüzeyinin elektriksel iletkenliği izolatörünkinden çok daha yüksektir ve kaçak akımın, elektriksel deşarjın ve atlamalara dönüşebilen yerel arkların gelişmesi için ana yolu sağlamaktadır. Buz iletkenliği, donma noktası etrafındaki sıcaklığa, uygulanan suyun iyon içeriğine ve saf su kütle halinde donarken iletken iyonları buz yüzeyine zorlama eğiliminde olan kristalizasyon yoluyla saflaştırma işlemine oldukça duyarlıdır.

2.1.1. Buzun ve Buz Yüzeyinin İletkenliği

Buzun elektriksel iletkenliği, donma noktasının hemen altında önemli ölçüde değişmektedir. Vlaar, koaksiyel bir geometri kullanarak, 60 Hz'de, havasız buzda kapasitif bir akım ölçmüştür [15]. Çeşitli araştırmacılar için donma suyunda değişen iletkenlik ve iyon içeriğine sahip buzun sonuçları irdelenmiştir. Sıcaklık -15 °C'den 0 °C'ye yükseldikçe buz iletkenliği 7 kat artmıştır. Bu değişikliğin çoğu -2 °C ile 0 °C arasındaki dar sıcaklık aralığında meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 0 °C'deki buz örneklerinin iletkenliği, 20 °C'deki çözeltinin iletkenliğinin ortalama 187 katı daha düşük kalmıştır [15-17].

Buzun elektriksel iletkenliği bilgisi (σ_{buz}), kirlilik akış modellemesinde kullanılan buz tabakasının birim uzunluğu başına direncini ($R(x)$) hesaplamak için yeterli değildir [18]. L uzunluğunda ve W genişliğinde bir buz tabakası üzerindeki bir su filmi için, toplam direnç, kütle ve yüzey tabakalarının dirençlerinin paralel kombinasyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$R = \frac{L}{W} \left[\frac{1}{\sigma_{\text{buz}} t_{\text{buz}} + \sigma_{\text{su}} t_{\text{film}}} \right] \quad (2.1)$$

Burada; σ_{buz} buzun iletkenliği ($\mu\text{S/cm}$), t_{buz} buz tabakasının kalınlığı (cm), σ_{su} su yüzey filminin iletkenliği ($\mu\text{S/cm}$), t_{film} buz üzerindeki su yüzey filminin kalınlığı (cm) ve $\sigma_{\text{su}} * t_{\text{film}}$ terimi, normal olarak eşdeğer yüzey iletkenliği (γ_e) olarak tanımlanır. Tipik buz katmanları için bu terim, eşdeğer yığın iletkenliğidir ($\sigma_{\text{buz}} * t_{\text{buz}}$).

D.a. kullanılarak eriyen buzun direncinin ölçümleri, tipik olarak 10 dakikalık bir gevşeme süresi sabiti ve ayrıca güç frekansında görünen bir direnç olarak gösterilmektedir. Güç frekansı değeri hem d.a. hem de a.a. atlama için önemlidir. İnce üçgen bir buz numunesinin $R(x)$ direncinin ölçülen değerlerinden γ_e eşdeğer yüzey iletkenliği belirlenmiştir [19].

$$R(x) = \int_a^b \frac{3 \times 10^6}{2x\gamma_e} dx = \frac{1.5}{\gamma_e} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \times 10^6$$

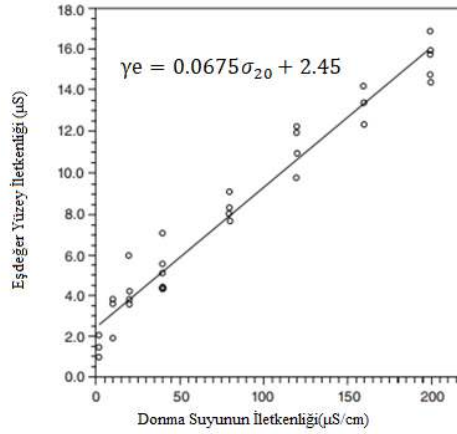
$$\gamma_e = \frac{1.5}{R(x)} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \times 10^6 \gamma_e = \frac{1.5}{R(x)} \ln \left(\frac{b}{a} \right) \times 10^6 \quad (2.2)$$

1-200 $\mu\text{S/cm}$ aralığında erimiş su iletkenliği σ_{20} 'den oluşan buz numuneleri üzerinde $R(x)$ 'i ölçmek için bir dizi test yapılmıştır. Bu değerlerin istenen eşdeğer yüzey iletkenliğine (γ_e) dönüştürülmesi, Şekil 2.1'de gösterilen ilişkiyi vermektedir. Burada; γ_e , eşdeğer yüzey iletkenliği (μS) ve σ_{20} , 20 °C'ye düzeltilmiş donma suyu iletkenliğidir ($\mu\text{S/cm}$).

Chisholm ve Farzaneh tarafından geliştirilen ISP modeli, Şekil 2.1'deki ilişkinin başlangıç noktasından geçtiğini varsaymaktadır [20]. 50 $\mu\text{S/cm}$ 'nin üzerinde dalgalanmalara neden olan pratik donma suyu iletkenliği aralığı için bu makul bir basitleştirmedir, ancak düşük σ_{20} değerleri için bazı sapmalar vardır.

$$\gamma_e = 0.0675\sigma_{20} + 2.45 \quad (2.3)$$

Burada; γ_e , eşdeğer yüzey iletkenliği (μS) ve σ_{20} , 20 °C'ye düzeltilmiş donma suyu iletkenliğidir ($\mu\text{S/cm}$).



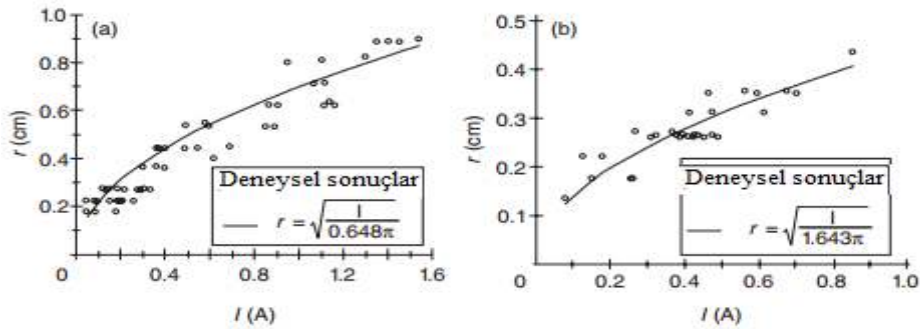
Şekil 2.1. Eşdeğer yüzey iletkenliği γ_e ve σ_{20} arasındaki ilişki [19]

İyi kontrol edilen bir geometride γ_e ve σ_{20} arasındaki ilişki, diğer geometrilerin birim uzunluk başına dirençlerinin hesaplanmasına uygulanabilmektedir. Tipik bir izolatörün etrafında oluşan yarım silindirik şeklindeki buzun $R(x)$ direnci [18, 21]

$$R(x) = \frac{1}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-X)}{D+2t} + \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (2.4)$$

şeklindedir. Burada; L , buzun yarım silindirisinin uzunluğu (kuru ark mesafesi) (cm), D , yalıtkanın çapı (cm), t , buz tabakasının kalınlığı (cm) ve r , buz yüzeyindeki ark kökünün yarıçapıdır. Ark kökü yarıçapı Tablo 2.1'de gösterildiği gibi polariteye göre değişir.

Burada verilen güç frekansı deneysel sonuçlarının ve matematiksel modellerin kombinasyonu ile izolatörlerde veya deneysel geometrilerde çok çeşitli buz şekilleri için $R(x)$ 'i hesaplamak mümkündür [18].



Şekil 2.2. (a) Buz-hava ara yüzünde pozitif ark için ark kökü yarıçapının ölçümleri (b) Buz tabakası içindeki ark [22]

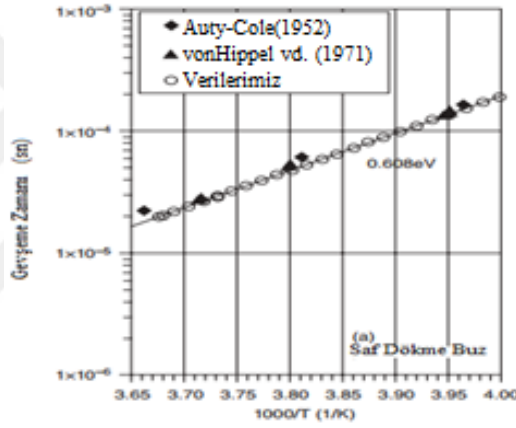
Şekil 2.2 (a)'da Buz-hava ara yüzünde pozitif ark için ark kökü yarıçapı ve (b)' de buz tabakası içindeki arkın yarıçapının akıma göre durumları verilmiştir.

Tablo 2.1. Kaçak akımın fonksiyonu olarak ark kökü yarıçapı [22]

Yarıçap	Pozitif Ark	Negatif Ark	Alternatif Ark
İç Ark	$r = 0.440\sqrt{I}$	$r = 0.425\sqrt{I}$	$r = 0.361\sqrt{I_m}$
N(7)	$r = 0.701\sqrt{I}$	$r = 0.714\sqrt{I}$	$r = 0.603\sqrt{I_m}$

2.1.2. Buzun Yüksek Frekans Davranışı

Bernal ve Fowler, tek tek su moleküllerinin dipol momentlerinin rastgele yönelimlere sahip olduğunu göstermiştir. Bu, altıgen kristal yapının su moleküllerinin bir elektrik alanında yeniden yönelme yeteneğini sınırlamadığı anlamına gelmektedir [23]. Fletcher'a göre, bu durum, -10 °C'de buzun düşük frekanslı dielektrik sabitinin 80.3 olmasına rağmen polikristalin dielektrik sabitinin 97-98 olduğunu açıklamaktadır [24].



Şekil 2.3. $1000 / (273 \text{ K}) = 3.65$ ve $1000 / (263 \text{ K}) = 3.80$ ile ters sıcaklığın fonksiyonu olarak buzun gevşeme süresi [25]

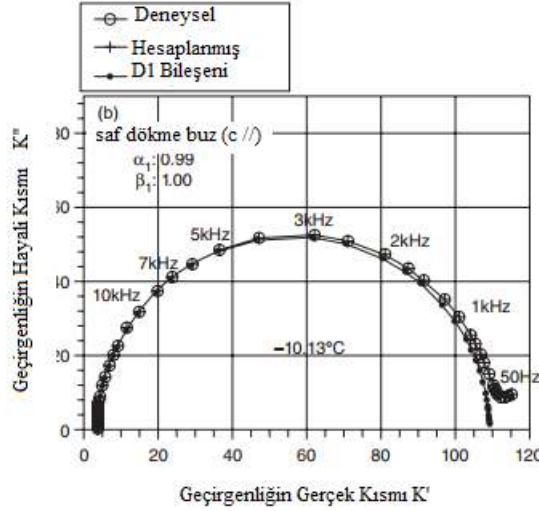
Dielektrik gevşeme süresi (τ) buzun yüksek frekans tepkisini etkiler. Şekil 2.3'te τ 'nin 0 °C'de 20 μ s'den -10 °C'de 60 μ s'ye değiştiği görülmektedir. Gevşeme süresi τ , 10 °C'de, 3 kHz'de maksimum dielektrik kayıplarına ve 100 kHz'de dielektrik sabitinde yaklaşık 3.2'lik ciddi bir azalmaya yol açmaktadır. Genellikle, kirli su, buz veya toprak gibi malzemeler için dielektrik verileri, aşağıdaki gibi tanımlanan karmaşık bir geçirgenlik (k^*) kullanılarak rapor edilir [25]:

$$k^* = k' - jk'' = k_\infty + \frac{\Delta k_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{a_1}} + \frac{\Delta k_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{a_2}} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (2.5)$$

Burada; k' ve k'' , geçirgenliğin gerçek ve hayali parçaları, j hayali birim, ϵ_0 , vakumun elektriksel geçirgenliği (8.854×10^{-12} F/m), ω açısal frekans ($2\pi f$), Δk_i kutupların dağılıma güçleri ve τ_i gevşeme zamanlarıdır.

Şekil 2.4, -10 ° C'deki buzun basit bir Debye-tipi tepkiye sahip olduğunu göstermektedir [25]. Debye - tipi yanıt için $a_i = 1$ ve Cole - Cole tipi için $0 < a_i < 1$ dir. Cole'un tepki grafiği, k' nü

k'' ne karşı çizerek, genellikle elektrokimya, biyoloji ve jeofizikte kullanılmaktadır [26]. Denklem 2.5'te buz numunesi önemli iletkenliğe σ sahip olduğunda, düşük frekansta kalan k'' değeri yükselir ve grafik daha az daireseldir. Kar ve kırağı ayrıca, 100 Hz'de önemli ölçüde daha düşük k' ve sıfır olmayan k değerlerine sahip daha karmaşık grafiklere sahiptir.



Şekil 2.4. -10 ° C'de saf buz kristalinin kompleks dielektrik tepkisi [25]

2.2. Buzlanma Türleri

Chisholm, kış koşullarında güç sistemi işletim sorunları üzerine yapılan bir araştırmada, Ulusal Elektrik Güvenilirliği Konseyi'ne (NERC) yıllık raporlarda yer alacak kadar ciddi olan 16 ayrı olay bildirmiştir [2]. Orta düzeyde önemli olaylardan biri 345 kV'luk bir istasyonda 650 MW yük kaybıyla birlikte hatta meydana gelen atlamalardan dolayı 180.000 müşterinin minimum 50-150 dakika etkilenmesidir.

CIGRE'nin araştırmasına göre, 18 ülkede, 35 kamu kuruluşu buz ve kar kaynaklı atlama sorunlarının meydana geldiğini bildirmiştir [27]. Buz ve kar atlama sorunları, EYG iletim seviyelerine özgü değildir. Şalt merkezlerinde 115 kV ve 230 kV'luk izolatorler kötü performans göstermiştir. Geleneksel olarak izolatorler uzun süreler boyunca küçük kaçak akımlar (5 - 20 mA) taşıdıklarından, donma ve sis olayları dağıtım hatlarında yaygın kutup akımlarına da yol açmıştır.

Buzlanma atlamalarının sınıflandırılması, fazdan toprağa arızalarla ilişkili olanların yanı sıra kamçılanma veya buz salınımı sırasında iletkenlerin fazdan faza çarpışmalarıyla (up-lift) ilişkili olanları içerir.

Kamçılanma, tüm açıklığın büyük genlikli atlama hareketidir ve neredeyse iletken sarkmasına eşit genliklere ulaşabilmektedir. Sulu kar sıçraması, büyük bir buz örtüsü bölümü düştüğünde iletken yüksekliğindeki ani bir artıştır ve bu faz iletkenleri için havai toprak

iletkenlerine göre daha erken gerçekleşmektedir. Örneğin 1981–1988 yıllarında, 200 kısa devre, buz veya kar olayları ile ilişkilendirilmiştir. Bunlardan yaklaşık 40'ı izolatör atlaması ile ilişkilendirilmiştir [28].

2.2.1. Çok Hafif Buzlanma

Çok hafif buzlanma altında, 132 kV izolatör performansı ile ilgili en eski raporlar Forrest tarafından verilmiştir [29]. Kirli bölgelerde sis koşulları altında, "sis kabarması" olarak nitelendirilen bir durum yaşanmaktadır. İzolatörlerde 1 mA'den daha az sabit kaçak akım değerleri gözlemlenmiş, ancak düzensiz aralıklarla kaçak akım aniden 100 mA'e kadar yükselmiştir. Orman, sis ve buz kombinasyonlarında ve yüksek rüzgârlar tarafından kirli izolatörlere eriyen karın geldiği durumlarda en kötü sis dalgalanmasının meydana geldiği görülmüştür. Buz tabakasının atlama veya ani buharlaşmasına yol açan hızlı akım birikimi ile dakikalar boyunca hareketsiz kaçak akımın özelliği, soğuk sis koşulları altında izolatör kirlilik yanıtının tekrar eden bir özelliğidir.

Jolly, buz sarkıtlarının önemli ölçüde büyümesi olmaksızın izolatörlerin tüm yüzeylerinde kirliliği stabilize eden ince buz tabakaları ile sis tipi atlama problemlerini ayrıntılı bir şekilde incelemiştir. Örneğin, 1962-63 kışında British National Grid'de, anormal derecede kuru bir sonbaharda, havadaki birikintiler izolatör yüzeylerine yapışmış, Ocak ayında arka arkaya birkaç gece boyunca donmuş sis molekülleri izolatör yüzeyinde kırağı oluşturmuştur. 25 Ocak 1963 akşamı, bir erime başlamış ve izolatör yüzeyinde iletken bir film oluşturmuştur. 130 atlama sonucunda toplam 23.000 MW'lık talepten 4 bin MW'lık yükün enerjisi kesilmiştir [30].

Tablo 2.2 ve 2.3'te verildiği gibi çok hafif, hafif, orta veya yoğun buzlanma açısından gruplandırılan birçok bireysel sorun raporu bulunmaktadır [25].

Tablo 2.2. Enerji verilmiş porselen izolatörlerde buz birleştirme şiddetinin sınıflandırılması [25]

Buz Birikme Seviyesi	Buz Yaklaşık Seviyesi t	Birikimi	Dönen Referans Seviyesi	Silindirdeki Buz	50 mm Etek Aralığı ile 300 mm Çaplı Mesnet İzolatör Üzerine Birikim	Standart Pin Tipi Zincir İzolatör (146 × 254 mm) Üzerine Birikim
Çok Hafif	< 2 mm		< 1 mm		Buz sarkıtları yok; tüm yüzeylerde ince iç katman	Buz sarkıtları yok, tüm yüzeylerde ince iç katman
Hafif	< 12 mm		< 6 mm		Buz sarkıtlarıyla kısmen köprülü	Buz sarkıtlarıyla kısmen köprülü
Orta	12 – 20 mm		6 – 10 mm		Buz sarkıtlarıyla tamamen köprülenmiş	Buz sarkıtlarıyla kısmen köprülü
Ağır	> 20 mm		> 10 mm		Buz sarkıtlarıyla tamamen köprülenmiş	Buz sarkıtlarıyla tamamen köprülenmiş

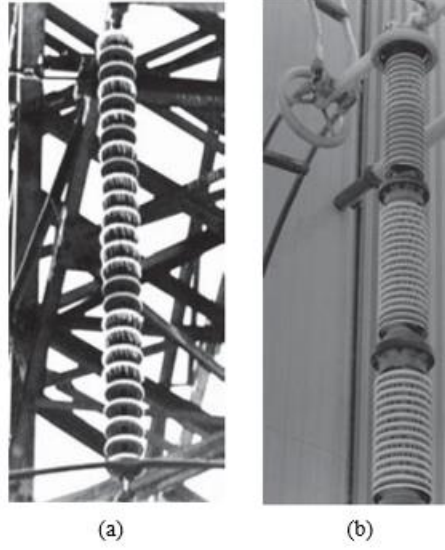
Tablo 2.3. Buzlanma koşullarında atlamalar ile tipik fayda deneyimi [25]

Yer, Tarih	Buz Tipi	Erime Fazı	Birikme Seviyesi	Yüzey Kirliliği	Ön Yükseklik	Sistem Gerilimi
Birleşik Krallık, 1962-1963	Kırağı	Evet	Çok hafif	Ağır	Düşük	275 kV
İtalya, Milan, 1964	Kış	-----	-----	Ağır	Düşük	145 kV
Ohio, ABD 1980-1983	Dondurucu yağmur	Evet	Ağır	-----	Düşük	345 ve 765 kV
Quebec, Kanada, 1981-1988	Dondurucu yağmur	Biraz	Ağır	Hafif	Düşük	Çoğunlukla 735 kV
Ontario, Kanada, 1986	Buz	Evet	Hafif	Orta	Düşük	Sadece 500 kV
Chicago, ABD 1986	Sis	Evet	Çok hafif	Ağır	Düşük	138 kV Kesici buşingi
Norveç, 1987	İnce kırağı buzu ve sis	Çoğunlukla Evet	Çok hafif	Ağır	Orta	300 kV
Yugoslavya, 1989	Kirlenmiş Buz / Sis	Evet	Ağır	Ağır	600 m	400 kV
Ontario, Kanada, 1989	Buz	Evet	Hafif	Ağır	Düşük	230 ve 500 kV
Norveç, 1993	İnce kırağı buzu ve sis	Evet	Çok hafif	Evet	Orta	300 ve 420 kV
Idaho, Abd, 1994	-----	Evet	-----	Evet	1400 m	345 kV
Ontario, Kanada, 1994	Buz	Evet	Hafif	Ağır	Düşük	115 ve 230 kV
Ontario, Kanada, 1997	Kirlenmiş Buz	Evet	Orta	-----	Düşük	230 kV yarı iletken sır izolatörleri
Çek Cumhuriyeti, 2002	Kirlenmiş Buz	-----	Ağır	Ağır	Düşük	110,220 ve 400 kV
Alberta, Kanada, 2006	Dondurucu sis	-2	Çok hafif	Yağmursuz uzun dönem	Orta	500 kV Hat
Çin 2000-2007	Yoğun buz	Evet	Ağır	-----	Yüksek	HVDC

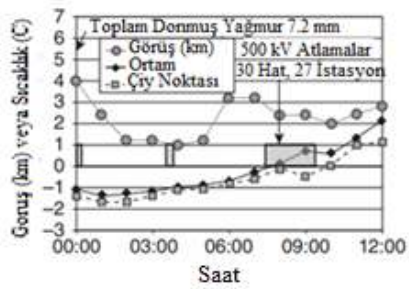
2.2.2. Hafif Buzlanma

Ontario Hydro ağında 57 atlama serisine yol açan duruma birçok çalışmada yer verilmiştir [31, 32]. 10 saatlik bir süre boyunca yaklaşık 7 mm yağmurla karışık kar birikmiştir. Bu, iletim hattı izolatörlerini buz sarkıtları ile köprülemek için yeterli değildir, ancak 500 kV'luk bir istasyondaki mesnet izolatörlerde buz köprülenmesi rapor edilmiştir. Bu olay sırasındaki tipik buz ve sis seviyeleri Şekil 2.5' te gösterilmiştir.

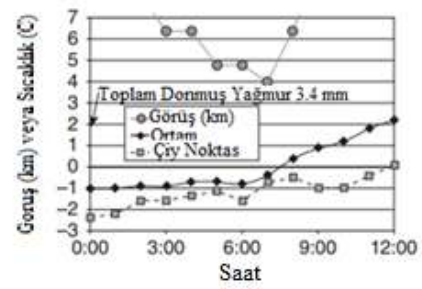
Farzaneh ve Melo tarafından yapılan analizde, eşit yoğunluktaki iki buz fırtınası hafif buz birikimi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 2.6, 10 Mart 1986 ve 13 Mart 1988'deki erime aşamalarının önemli özelliklerini göstermektedir [33]. Atlamaların çoğunun bağıl nemin doygunluğa yakın kaldığı ve 3 km'den daha az siste görüş mesafesiyle, sıcaklık donma noktasının üzerine çıkmasıyla meydana geldiği gösterilmiştir.



Şekil 2.5. (a) Hat izolatörü (b) Mesnet izolatör (c) 500 kV'luk istasyonda sis koşulları [31, 32]



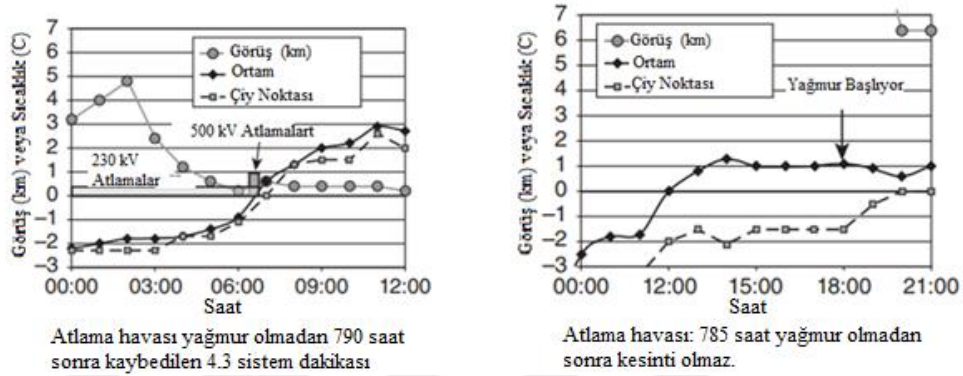
Atlama havası 500 kV sistem yağmur olmadan 390 saat sonra etkilenir.



Atlama olmayan hava koşulları yağmur olmadan 86 saat sonra kesinti olmaz

Şekil 2.6. Dondurucu yağmurdan sonra yaygın olarak 500 kV güç sistemi kesintilerine yol açan ve yol açmayan hava olaylarının karşılaştırılması [33]

10 Mart 1986'da sisin önemli bir rolü, buz sarkıtları tarafından tam olarak köprülenmemiş olan izolatörlerin tüm yüzeylerinde ince bir buz tabakasının birikmesi olarak belirlenmiştir. Bu, erime aşaması sırasında havayı doymuş halde tutmak için sis tarafından sağlanan nemle birleştiğinde, yüzey kirliliğinin kararlı bir şekilde ıslanmasına yol açmış ve dayanım mukavemetini a.a. geriliminin çok altındaki seviyelere indirmiştir. Şekil 2.7, sisten önce yağmura yol açan bir derecelik farkın, erime noktasında atlamaya neden olması ve olmaması durumlarını göstermektedir.



Şekil 2.7. Erime noktasında atlamaya neden olan ve olmayan hava olaylarının karşılaştırılması [33]

Yüksek bağıl nem ve 0 °C civarında görünür sis varlığı, hem 230 kV'luk hem de 500 kV'luk izolatörlerin hafif buzlanma koşullarında atlama duyarlılığına etki eden hava faktörleridir.

2.2.3. Orta Düzeyde Buzlanma

Akış sürecindeki sıcaklığın rolünü gösteren orta dereceli bir buz birikimi örneği, 1992'nin başlarında meydana gelmiştir. Bu tarihte Toronto Havalimanı'nda yer seviyesinde toplam 10 mm buz ölçülmüştür. Buz, daha yüksek rakımdaki 500 kV'luk izolatörlerde de birikmiş ve ± 1 °C ortam ve çiğlenme noktası sıcaklıklarında bir dizi hatta arızaya neden olmuştur. Ardından sıcaklık düşmüş, izolatör şeritlerinde buz sertleşmiş ve 4 gün boyunca bozulmadan kalmıştır. Bu durum Şekil 2.8'de görülmektedir. 4 gün sonra çiğ noktası ve ortam sıcaklıkları donma derecesinin üstüne çıktığında, iki ek hattan toprağa atlamalar oluşmuştur [25].



Şekil 2.8. Buzlanma olayı sırasında standart 500 kV izolatör dizisinde buz birikimi [25]

2.2.4. Ağır Buzlanma

İzolatörlerde 10 - 30 mm buz birikmesi, hem buzlanma döneminde hem de daha sonraki erime döneminde, 100 kV/m'nin çok altındaki elektrik gerilimlerinde atlamaya neden olabilir. 0.32 - 0.8 g/cm³ yoğunluğa sahip buz birikiminin, Kanada'nın Batı Kıyısı bölgelerinde ve Amerika Birleşik Devletlerinde kış mevsimlerinde bazı iletim hattı kesintilerine neden olduğu belirtilmiştir [16].

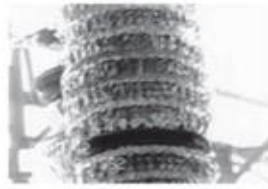
Watanabe, yatay izolatörlerde yoğun buz köprülenmesini fotoğraflamıştır [34]. Fotoğraf kalitesi düşük olmasına rağmen, buz sarkıtlarının oluşmadığı, sadece her diskin tepesinde ağır sırlı buz örtülerinin olduğu Şekil 2.9'da görülmektedir. Bu, Québec'teki 1998 buz fırtınası da dâhil olmak üzere bazı şiddetli buzlanma olaylarına benzer şekilde, -7 °C ile -10 °C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda oluşan sır buzunun bir özelliğidir.

Norveç şebeke şirketi, Statnett'deki soğuk çökeltme ve izolatör kirliliğinin kapak ve pin izolatörleri üzerindeki yıkıcı etkisinden bahsetmiştir. 8 Şubat 1987'de, güneybatı Norveç'te, sahilden yaklaşık 120 km uzaklıkta, 300 kV'luk bir hatta faz-toprak arızası meydana gelmiş, porselen yüzeylerde ark hasarı tespit edilen incelemelerin ardından toplam 106 izolatör elemanı değiştirilmiştir [35].



Şekil 2.9. İzolatör çifti üzerinde buz birikimi [34]

Gözlemler sonucunda, buz birikiminin, buz sarkıtları formu ve perde formu olmak üzere iki formu tanımlanmıştır. Şekil 2.10, 161 kV düşey mesnet ve 735 kV yatay dörtlü zincir izolatöründe görüldüğü haliyle yığılmanın perde şeklini göstermektedir. Birleşmenin perde formu, yedi olayda yalnızca bir kez gözlenmiş ve yaklaşık -1°C 'lik bir ortam sıcaklığında, zemin seviyesinde 30-40 mm'lik donmuş yağmur yağışından kaynaklanmıştır [36].



(a)



(b)

Şekil 2.10. Hydro - Québec izolatörlerinde buz birikmesi (a) 161 kV mesnet izolatör (b) 735 kV zincir izolatör [36]

2.3. İzolatörlerde Farklı Buzlanma Türlerinin Özellikleri

Atmosferik buzlanma, suyun çeşitli şekillerde donduğu ve açıkta kalan bir nesnenin yüzeyine yapıştığı durumdur. İzolatörlerde buzlanma ve atlama ile ilgili olaylar, atmosferik buzlanma süreci ve meteorolojik yönleri incelenmeden anlamlı bir şekilde açıklanamaz. Bu yüzden izolatör üzerinde gerçekleşen buzlanma türlerinin incelenmesi gereklidir. Bu bölümde izolatörlerin kuru ve ıslak büyüme buzlanma türleri incelenecektir.

2.3.1. İzolatörlerin Kuru Büyüme Buzlanması

İzolatörlerin kuru büyüme buzlanması genellikle düşük sıcaklık ve yüksek rüzgâr hızı koşullarında meydana gelmektedir. Düşük sıcaklık ve yüksek rüzgâr hızı, havadaki su damlacıklarının izolatörlerle çarpıştıktan sonra hızlı donmasını sağlamaktadır. Donmanın hızlı gerçekleşmesi su damlacıklarının birbirine bağlanarak su filmi oluşturmalarını engellemektedir [37]. Şekil 2.11’de izolatör yüzeyi donduktan sonra, çarpışan su damlacıklarının dağılmış buz parçacığı haline geldiği görülmektedir.



Şekil 2.11. İzolatör üzerinde kuru büyüme buzlanması [37]

Bu buzlanma tipinin temel özellikleri; opak beyaz buz, izolatörün rüzgâr tarafında kabarık bir şekilde birikir ve buzlanma yoğunluğu nispeten azdır. Buz yüzeyi kuru ve pürüzlü olup su filmi oluşmaz. Buzlanma hızı çarpışmaya ve damlacıkların yakalama verimliliğine bağlıdır, ancak donma verimliliği ile ilgisi yoktur. Buz, su damlacıklarının çarpışmasının tersi yönde büyümektedir.

2.3.2. İzolatörlerin Islak Büyüme Buzlanması

İzolatörlerin ıslak büyüme buzlanması genellikle sıcaklık $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yakın olduğunda, havadaki sıvı su içeriği yoğun olduğunda ve rüzgâr hızı büyük olmadığında meydana gelmektedir. Su damlacıklarının tümü izolatör yüzeyine çarptıktan hemen sonra donmaz, bu nedenle donmamış damlacıklardan izolatör yüzeyinde bir su filmi oluşur. Şekil 2.12. (a) 'da gösterildiği gibi su filmi kalınlığı ince ise rüzgâr kuvveti ve yüzey geriliminin etkisi altında, su filmi akamaz veya çok yavaş akar [37]. Su filmi izolatör eteklerinin kenarından dışarı akmadan önce tamamen donabilir, bunun sonucunda izolatör eteklerinin kenarında büyüyen buz sarkıtları olmaz. Su filminin varlığı buz yüzeyini pürüzsüz hale getirir ve izolatörün rüzgâra bakan tarafında, yarı saydam bir yelpaze şeklinde birikir.

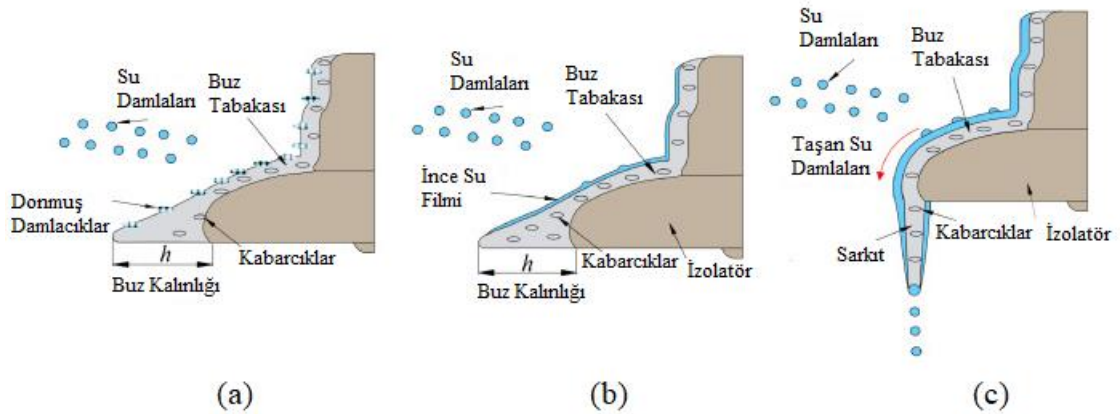


Şekil 2.12. İzolatör üzerinde ıslak büyüme buzlanması [37]

Şekil 2.13. (b)'de görülen izolatörde, su filmi oldukça kalınsa ve su filminin donma hızı kalınlığının büyüme oranından daha fazla ise izolatör üzerindeki buzlanma, buz sarkıtlarıyla birlikte ıslak büyüyen buzlanmaya dönüşür. İzolatör yüzeyine çarpışan aşırı su damlacıkları bir anda donarak buza dönüşmemektedir. Yerçekimi etkisi altında su film kalınlığı belirli bir değere ulaştıktan sonra, izolatör eteklerinden aşağı doğru akar ve buz sarkıtlarının büyümesi gerçekleşir.

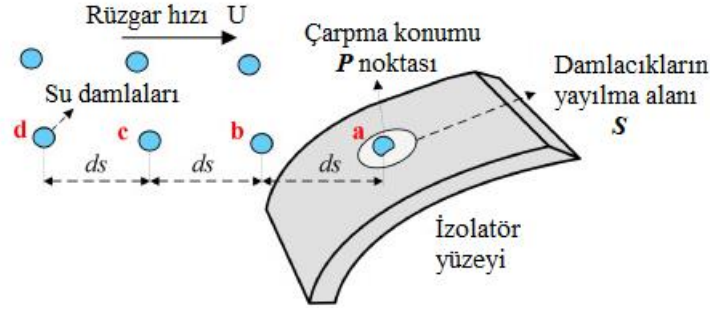
2.3.3. İzolatörlerin Kuru ve Islak Büyüme Buzlanmasının Parametrelendirilmesi

İki farklı buzlanma türünü ayırt etmenin temelinde su damlacıklarının donma sırasında su filmlerine dönüşüp dönüşmediği yer almaktadır. Yani su filminin varlığı, izolatörlerde buzlanmanın gelişme şeklini belirlemektedir. Şekil 2.13.'te izolatör üzerindeki kuru ve ıslak buzlanmanın şekli yer almaktadır.



Şekil 2.13. İzolatör üzerinde farklı buzlanma türleri (a) Kuru büyüme buzlanması (b) Sarkıtsız ıslak büyüme buzlanması (c) Sarkıtlı ıslak büyüme buzlanması [37]

Su filminin varlığı, aşırı soğutulmuş su damlacıklarının donma hızına ve su damlacıklarının çarpışma zaman aralığına bağlıdır [37].



Şekil 2.14. İzolatör üzerindeki su damlacıklarının çarpışması [37]

Şekil 2.14.'te gösterildiği gibi hava akımı ile hareket eden soğumuş su damlacıklarının a, b, c ve d noktalarında havada eşit olarak dağıldığı, su damlacıklarının P noktasında izolatörle çarpıştığı varsayılmaktadır [37]. Buna göre b damlacığı izolatör yüzeyine gelmeden önce a damlacığı tamamen buza dönüşebiliyorsa P noktasındaki buzlanma kuru büyüme aksi halde ıslak büyümedir.

İzolator üzerindeki su damlacıklarının çarpışma hızı ve donma hızı buzlanma gelişme tipini belirlemektedir. Buna göre, a'daki su damlasının donma süresinin t ve b noktasındaki su damlacığının P noktası ile çarpışması için gereken zaman aralığının Δ_t olduğu varsayıldığında, P noktasındaki kuru ve ıslak büyüme buzlanmasının kritik durumu denklem 2.6'da ifade edilmiştir [37].

$$\begin{cases} t \leq \Delta_t \rightarrow \text{Kuru Büyüme} \\ t > \Delta_t \rightarrow \text{Islak Büyüme} \end{cases} \quad (2.6)$$

2.4. İzolatörlerde Buzlanma Durumları İçin Kritik Koşullar

İzolatorlar üzerinde kuru ve ıslak buzlanmanın kritik koşullarını elde etmek için aşırı soğutulmuş su damlacıklarının havada çarpışması ve donma süreci modellenmiş ve analiz edilmiştir [37]. Bu modellenmenin gerçekleşmesi için 3 varsayım yapılmıştır. İlk olarak su damlacıklarının havadaki dağılımının tek tip ve aynı olması gerekmektedir. İkinci olarak su damlacıklarının hareketinin hava akımı üzerinde etkisi olmamalıdır. Son olarak havadaki su damlacıkları hareket, çarpışma ve donma sürecinde kırılmayacak ve kaynaşmayacaktır.

2.4.1. Su Damlacıklarının Donma Süresi

Çapı MHÇ (Medyan hacim çapı) olan bir su damlasının donma süresinin t olduğu varsayılmıştır. Buzlanma işlemi sırasında su damlacıkları küçük olduğundan, damlacıkların donma

ve çarpışma kinetik enerjisi q_m tarafından salınan gizli ısı q_f , esas olarak konveksiyon ısı transferi, buharlaşma ve ısı iletimi olmak üzere üç işlemle alınır. Bu nedenle buzlanmanın enerji dengesi denklem 2.7'deki gibi ifade edilebilir [38].

$$q_c + q_e + q_k + q_w = q_m + q_f \quad (2.7)$$

Burada; q_c konvektif ısı transferi ile kaybedilen ısı, q_e buharlaşan su tarafından alınan ısı, q_k ısı iletimi, q_w aşırı soğutulmuş su damlacıklarının izolatör yüzeyindeki buzlanma sıcaklığına kadar ısıtılmasındaki ısı kaybıdır.

2.7'deki denklemin sol tarafındaki her bir terimin hesabı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$q_c = S_{damla} \cdot h_c (T_w - T) \cdot t \quad (2.8)$$

$$q_e = S_{damla} \cdot X [e(T_w) - e(T)] \cdot t = S_{damla} 0.61121 \exp \left(\frac{18.678 - \frac{T}{234.5}}{257.14 + T} \right) [e(T_w) - e(T)] \quad (2.9)$$

$$q_k = k \cdot S_{damla} \frac{\delta T}{\delta n} \cdot t = 2 \sqrt{\frac{k_i \cdot c_i \cdot t}{\pi}} (T_w - T) S_{damla} \quad (2.10)$$

$$q_w = m_0 \cdot C_w (T_w - T) = \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{MVD}{2} \right)^3 \cdot \rho_w \right] \cdot C_w (T_w - T) \quad (2.11)$$

Burada; S_{damla} izolatör ile çarpışan su damlacıkları, h_c konvektif ısı transfer katsayısı, T_w ve T sırasıyla buz tabakasının (su filmi) ve ortam sıcaklığının sabit sıcaklıkları, K , X buharlaşma veya süblimasyon katsayısı, $C_w = 4.2 \times 10^3 \text{ J / (kg } ^\circ\text{C)}$, $c_i = 2.09 \times 10^3$, sırasıyla su ve buz özgül ısı, $\delta T / \delta n$ normal ısı iletimi yönündeki sıcaklık gradyanı, $e(T)$ buz tabakasının veya su filminin yüzeyindeki doymuş buhar basıncı, $k_i = 2.22 \text{ W/(m.K)}$ buz tabakasının termal iletkenliği, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ su damlacıklarının yoğunluğu, m_0 bir su damlasının kütlesidir.

2.7'deki denklemin sağ tarafındaki su damlacığının kinetik enerjisi q_m ve salınan gizli ısı q_f aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$q_f = m_0 \cdot L_f = \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{MVD}{2} \right)^3 \cdot \rho_w \right] \cdot L_f \quad (2.12)$$

$$q_m = \frac{1}{2} m_0 \cdot V_0^2 = \frac{1}{2} \left[\frac{4}{3} \pi \left(\frac{MVD}{2} \right)^3 \cdot \rho_w \right] \cdot V_0^2 \quad (2.13)$$

Burada, $L_f = 3.35 \times 10^5 \text{ J/kg}$ buz füzyonunun gizli ısı ve V_0 damlacıkların hızıdır.

Denklem (2.8) ile (2.13)'e kadar olan denklemler (2.7)'de yerine yazılırsa su damlasının donma süresi t hakkında ikinci derecen bir denklem elde edilmiş olur.

$$(h_c(T_w - T) + X[e(T_w) - e(T)]) \cdot t + 2\sqrt{\frac{k_i \cdot c_i \cdot t}{\pi}}(T_w - T) = m_0(\frac{1}{2}V_0^2 + L_f - C_w(T_w - T))/S_{damla} \quad (2.14)$$

Denklem (2.14)'deki katsayılar sırasıyla X, Y ve Z ile temsil edilirse su damlacıklarının donma süresi denklem (2.15)'deki gibi ifade edilmiş olur.

$$X \cdot t + Y \cdot t^{0.5} = Z \Rightarrow t = \frac{2XZ + Y^2 \pm \sqrt{(2XZ + Y^2)^2 - 4X^2Z^2}}{2X^2} \quad (2.15)$$

2.4.2. Su Damlacıklarının Çarpışma Aralığı Süresi

İzolatörler üzerinde kuru ve ıslak büyüme buzlanmasının kritik durumuna göre, donma süresinin yanı sıra, su damlacıklarının çarpışma aralığı süresi Δ_t de hesaplanmalıdır. Çarpışma aralığı süresi, birinci su damlasının çarpışmasından sonra ikinci su damlacığının aynı konumla tekrar çarpışması için gereken süreyi ifade etmektedir. MHÇ çapındaki su damlacıklarının havada düzgün bir şekilde dağıldığı, havanın sıvı su içeriğinin w ve rüzgâr hızının U olduğu varsayılarak, birim hacimdeki su damlacıklarının sayısı denklem (2.16)'daki gibi ifade edilir [37]:

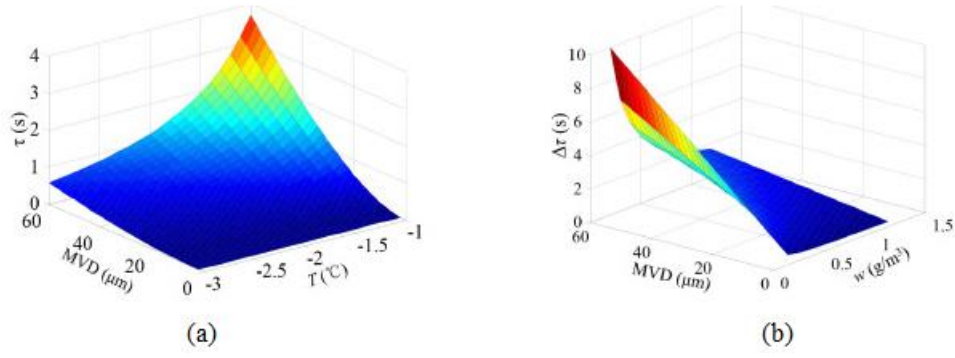
$$n = \frac{w}{\frac{4}{3}\pi(\frac{MVD}{2})^3 \rho_w} \quad (2.16)$$

Tek bir damlacık S_{damla} 'nın difüzyon bölgesinde çarpışan damlacıkların sayısı $S_{damla} \times n \times U$ olarak gösterilebilir ve su damlacıklarının çarpışma aralığı süresi denklem 2.17'deki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta_t = \frac{1}{2\pi(\frac{MVD}{2})^2 \cdot n \cdot U} \quad (2.17)$$

Şekil 2.15 (a)'da gösterildiği gibi damlacıkların donma süresi t , su damlacığının MHÇ boyutundan, çevre sıcaklığı ve esas olarak rüzgâr hızı tarafından belirlenen konvektif ısı transfer katsayısından etkilenmektedir [37]. Katsayı sabitse, sıcaklığın artması ve MHÇ'nin artması bir damlanın donma süresini uzatmaktadır. Genel olarak, MHÇ 40 μm 'den az ve çevre sıcaklığı -1 °C'den düşük olduğunda, damlacık donma süresi $t < 1$ s ile nispeten hızlıdır. Sıcaklığın damlacıkların çarpışma aralığı süresi Δ_t üzerinde hiçbir etkisi yoktur, etki eden faktörler rüzgâr hızı U , havadaki sıvı su içeriği w ve MVD'dir.

Denklem (2.17)'ye göre U ne kadar büyükse, su damlası çarpışma hızı o kadar hızlı ve Δ_t o kadar kısadır.



Şekil 2.15. (a) Su damlacıklarının donma süresi, (b) Su damlacıklarının çarpışma aralığı süresi [37]

Şekil 2.15 (b)' de w ve MHÇ'nin Δt_c üzerindeki etkileri gösterilmiştir. MHÇ'nin artmasıyla birim hava hacmindeki su damlası sayısı azalır, bunun sonucunda su damlacıkları arasındaki mesafe artar ve damlacıkların çarpışma aralığı süresi de artar. MHÇ sabit olduğunda, w 'nin azalması su damlacıklarının sayısını da azaltacak ve böylece Δt_c 'yi artıracaktır.

2.4.3. İzolatörler Üzerindeki Damlacıkların Yerel Donma Verimliliği

Donma süresi ile çarpışma aralığı süresi karşılaştırılarak, izolatör üzerindeki tek çarpışma konumunun buzlanma tipi elde edilebilir. Fakat havadaki damlacıkların her zaman tekdüze olarak dağıldığı ve tüm izolatör yüzeyinde çarpışma aralığı süresinin aynı olduğu varsayımlarının yapılması gereklidir. Aslında, hava sürüklenme kuvvetinin etkisi nedeniyle izolatörle çarpışan damlacıklar eşit olmayan bir şekilde dağılır ve izolatör üzerinde farklı konumlarda çarpışma katsayıları farklıdır. Bu nedenle donma süresi ile çarpışma süresi arasındaki ilişki izolatör üzerinde yerel donma verimi (β_v) olarak nitelendirilmiştir [37].



Şekil 2.16. İzolatörün j birimi üzerinde kütle ve enerji dengesinin şematik gösterimi [37]

Yerel donma verimliliği β_v , donmuş su miktarının birim zamanda izolator üzerinde farklı konumlarda elde edilen su miktarına oranını karakterize etmektedir. Şekil 2.16'da gösterildiği gibi izolator yüzeyinin küçük bir alan birimi j alınarak, bu birim j 'de elde edilen su miktarı, çarpışma damlacıkları M_0 kütlesi ve akan su kütlesi $M_{ic} - M_{cik}$ olarak belirlenmiştir. Su filmi ince olduğunda kuru ve ıslak büyüme buzlanmasının kritik koşulu altında yavaşça akmayacağından, M_{ic} ve M_{cik} göz ardı edilebilir. Bu durumda M_0 yerel çarpışma verimliliği β_y olarak hesaplanır.

Denklem (2.7)'ye benzer olan her birim enerji dengesi denkleminin tekrar çözülmesiyle, β_v denklem (2.18)'de elde edilebilir [39]:

$$Q_c + Q_e + Q_w + Q_{cik} + Q_r + Q_k = Q_v + Q_m + Q_f + Q_{ic} \quad (2.18)$$

Burada; denklem (2.18)'in solunda bulunan Q_c konvektif ısı transferi ile kaybedilen ısı, Q_e buharlaşan su tarafından alınan ısı, Q_w ortam sıcaklığında bulunan çarpışma damlacıklarını su filmi sıcaklığına ısıtmak için izolator yüzeyi tarafından tüketilen ısı, Q_{cik} taşan su tarafından yayılan ısı, Q_r uzun dalga radyasyonu tarafından kaybedilen ısı ve Q_k ısı iletimidir. Denklemin sağında bulunan Q_v izolator üzerinde hava sürtünmesi tarafından üretilen ısı, Q_m damlacıkların kinetik enerjisinden dönüştürülen termal enerji, Q_f donma sırasında çıkan gizli ısı miktarı ve Q_{ic} giriş suyundan gelen enerjidir. Kuru ve ıslak büyüme buzlanmasının kritik koşulu altında ilk olarak su filmi nispeten incedir ve zor akar. Bu durumda Q_{cik} ve Q_{ic} 'in her ikisi de sıfırdır. İkinci olarak Q_k ve Q_v küçüktür ve göz ardı edilebilir. Denklem (2.18) basite indirgenecek olursa [40]:

$$Q_c + Q_e + Q_w + Q_r = Q_m + Q_f \quad (2.19)$$

$$Q_c = S_j \cdot h_c (T_w - T) \quad (2.20)$$

$$Q_e = S_j \cdot X [e(T_w) - e(T)] \quad (2.21)$$

$$Q_w = S_j \cdot M_0 \cdot C_w (T_w - T) = S_j \cdot \beta_y U_w C_w (T_w - T) \quad (2.22)$$

$$Q_r = 4\epsilon\sigma_R T^3 S_j \cdot (T_w - T) \quad (2.23)$$

$$Q_m = \frac{1}{2} S_j \cdot \beta_y w U^3 \quad (2.24)$$

$$Q_f = m_f \cdot L_f = \beta_v \cdot M_0 L_f \quad (2.25)$$

Burada; S_j , j biriminin alanı, σ_R Boltzmann sabiti ve m_f suyun donma kütlesidir. (2.20) ile (2.25)'e kadar olan denklemler, denklem (2.19)'da yerine yazılırsa j birimindeki su damlacıklarının donma verimi β_v denklem (2.26)'daki gibi ifade edilebilir:

$$\beta_v = \begin{cases} \frac{(S_j \cdot h_c + 4 \varepsilon \sigma_R T^3 + \beta_y U_w C_w) \cdot (T_w - T) + S_j \cdot X [e(T_w) - e(T)] - 0.5 \cdot S_j \beta_y w U^3}{M_0 L_f} & M_0 > 0 \\ 0, & M_0 = 0 \end{cases}$$

(2.26)

2.5. Atmosferik Buzlanma Açısından İzolatör Seçimi

Buzlanma, elektrik güç sistemi güvenliğini olumsuz etkilemektedir. Buzlanmanın neden olduğu önemli sorunlardan biri izolatörlerin yalıtım yeteneğinin azalmasıdır. Bundan dolayı izolatör seçimi önemli bir yer tutmaktadır. Buzlanmaya göre izolatör seçimi yapılırken; buz oluşumunun rüzgâr yönü ile ilişkisi, donan yağmurun elektriksel iletkenliği, izolatör yüzeyinde eriyen buzun su iletkenliği ve donma koşulları altında enerji verilmiş izolatör yüzeyi boyunca kaçak akım gibi parametreler önemli yer tutmaktadır. Bu parametrelere ek olarak olasılık veya başarısızlık riski değerlendirmesi yapmak faydalı olabilir. Böyle bir amaç için deterministik ve olasılıksal yaklaşıma dayalı genel durumlar mevcuttur. Deterministik yaklaşım daha sık kullanılmasına rağmen karmaşık olup olasılıksal yaklaşım daha fazla bilgi vermektedir.

2.5.1. Deterministik Yaklaşım

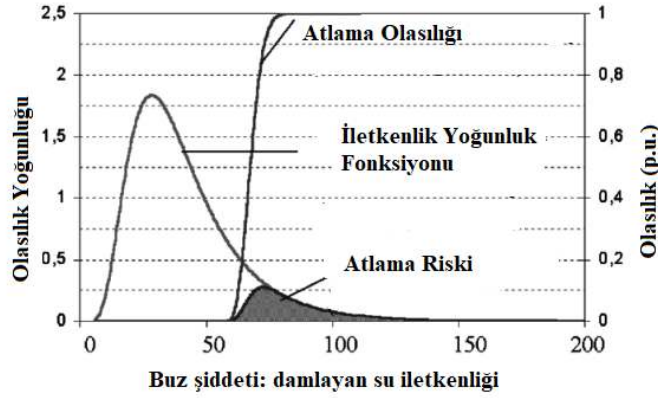
Deterministik yöntem, birçok elektriksel ve mekanik bileşenin, aygıtın ve sistemin tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bileşenler daha sonra malzeme seçimine ve boyutlandırmaya göre tasarlanmaktadır [41]. Bu yaklaşımı yaparken izolatörü zorlayabilecek kesin bir maksimum buz iletkenliği olduğu, izolatör mukavemetinin minimum su iletkenliği altında atlama durumunun mümkün olmadığı varsayılmaktadır. Buz kalınlığı, elektriksel iletkenlik veya kuru ark mesafesinin metre başına buz ağırlığı gibi parametreler bu yaklaşımda kullanılabilir. Bu durumda izolatör eteklerinin buz sarkıtları tarafından köprülenme seviyesinin %100 olduğu varsayılır.

Deterministik yaklaşımda aşağıdaki sorunlar mevcuttur:

- Buz şiddeti, izolatör dayanma gerilimi ve köprülenme derecesi gibi değerler olasılıksal değerlerdir.
- Seçilecek güvenlik marjı kişinin kararına bağlıdır, bu da istatistiksel bir önem taşımamaktadır.
- Yalnızca bir izolatör üzerinde bu yaklaşım uygulanır. Bu durumda trafo merkezlerinde birçok izolatörün olduğu düşünüldüğünde genel olarak bir kanıya varılamamaktadır.

2.5.2. Olasılıksal Yaklaşım

Olasılıksal yaklaşımda ana parametreler, ortalama değer ve dağılımlar olarak tanımlanan istatistiksel değişkenler olarak kabul edilir. Bu durum parametrelerin sabit olduğu varsayılan deterministik yöntemle farklılık göstermektedir.



Şekil 2.17. Olasılıksal yaklaşıma dayalı tasarım için illüstrasyon [41]

İzolatörlerin istatistiksel boyutlandırılması, belirli bir performans gereksinimini yerine getirmek için uygulanan gerilime göre bir izolatörün dielektrik dayanımının seçilmesini gerektirmektedir [41]. Bu durumda atlama gerilimi de değerlendirilerek izolatör seçimi yapılmaktadır. Atlama gerilimi hesaplanırken Şekil 2.17 göz önüne alınarak aşağıdaki yol izlenir:

- İzolatörün maksimum çalışma gerilimine karşılık gelen sabit genlikli bir gerilimle enerjilendiği varsayılmaktadır.
- Damlayan suyun iletkenliğinin değişimi, γ alan şiddeti açısından ifade edilen $f(\gamma)$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ile temsil edilmektedir.
- Kümülatif dağılım fonksiyonu $P(\gamma)$, yalıtımın mukavemetini yani damlayan suyun iletkenliğini tanımlamak için kullanılan aynı γ alan şiddeti ölçüsünün bir fonksiyonu olarak atlama olasılığını tanımlamaktadır.

Bir dizi izolatör için denklem (2.27)'deki gibi toplam risk hesaplanır. F ve P fonksiyonlarının çarpımı, izolatörün belirli bir bölgedeki atlaması için olasılık yoğunluğunu verir ve bu eğrinin altındaki alan atlama riskini ifade eder.

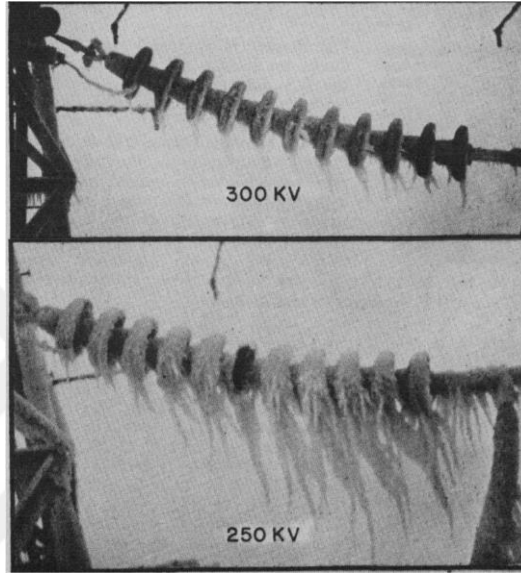
Aynı koşullara maruz kalan m paralel yalıtım noktalarının atlama olasılığı P_m 'dir.

$$P_m = 1 - (1 - P_1)^m \quad (2.27)$$

Burada; P_1 , tek bir yalıtım noktasının atlama olasılığıdır.

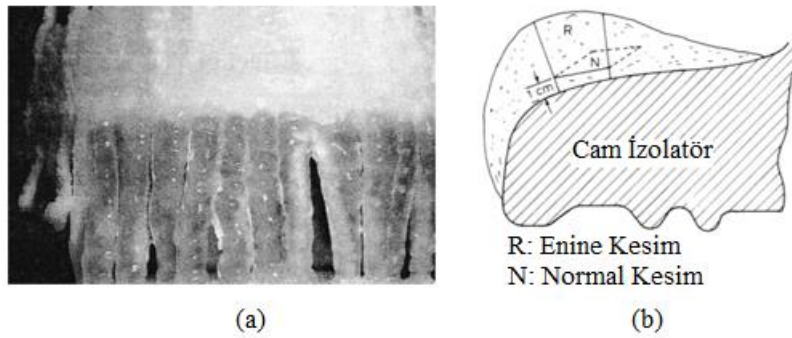
2.6. Elektrik Alanın İzolatör Buz Birikimi Üzerine Etkisi

Gerilim ve polarite izolatörlerin yüzeyindeki buz birikimini ve eteklerin çevresindeki buz sarkıtı oluşumunu etkilemektedir. Normal hat geriliminde enerji verilen izolatörler üzerinde buzlanma testleri yapıldığında dikkat edilen iki önemli değişiklik olmaktadır. İlk etki, Şekil 2.18’de gösterildiği gibi uzun buz sarkıtlarının radyal bir şekilde dışa doğru büyümesine yönelik bir eğilimdir [3]. Gerilim polaritesi ayrıca ıslak buzun yoğunluğunu ve dokusunu da etkilemektedir.



Şekil 2.18. 238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ uygulanan su iletkenliği ile doğru akımın buzun birikmesine etkisi [3]

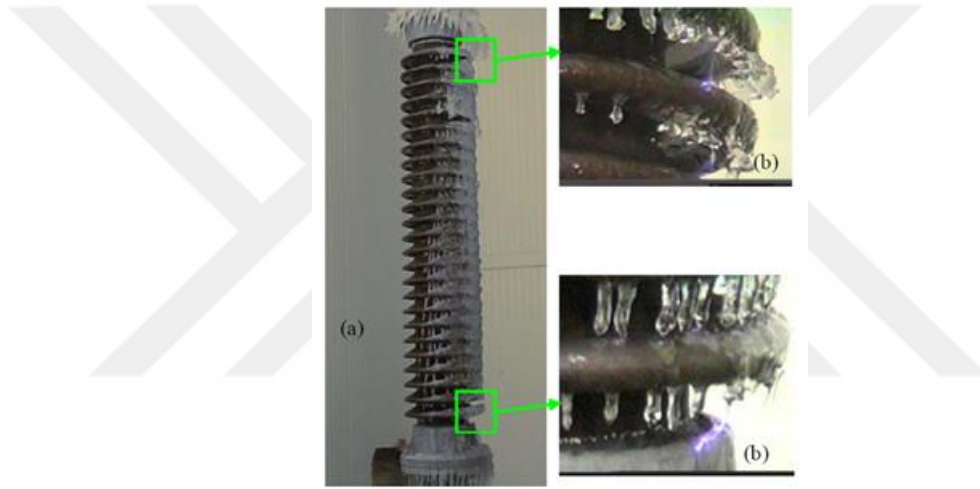
İzolatörlere enerjili ve enerjisiz durumda, 15 kV altında, -10 C’de su damlacıkları püskürtülerek, yaklaşık 5.3 g/m²s buz yoğunluğu elde edilmiştir [3]. Buzun yoğunluğu, hava kabarcığı özellikleri ve tane dokusu, Şekil 2.19’da gösterildiği gibi disklerin üst yüzeyinde biriken tortulardan hazırlanan ince kesitlerde incelenmiştir.



Şekil 2.19. (a) İzolatör diskinde buz ve buz saçığı oluşumunun görünümü (b) Yoğunluk ve mikroskobik inceleme için kullanılan ince kesitler [3]

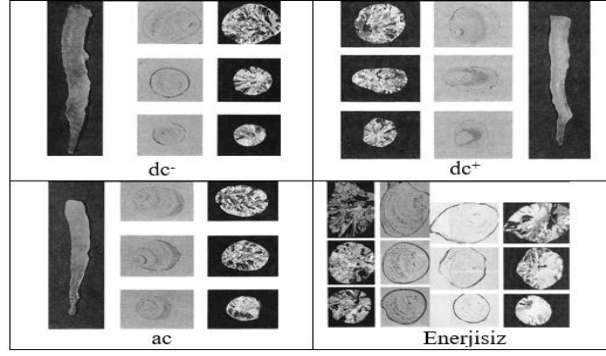
Test büyüme koşulları altında elde edilen sonuçlar, a.a., d.a.⁻ ve d.a.⁺ uygulanan gerilimler için ölçülen buz yoğunluğunun yaklaşık 0.86 g/cm³ olduğunu göstermiştir. Disk başına 1.5 saat boyunca biriken buz ve buz sarkıtlarının ağırlığının a.a., d.a.⁻ ve d.a.⁺ altında yaklaşık olarak aynı (≈ 1.47 kg/disk) ve enerji verilmeyen koşullarda yaklaşık %10 daha yüksek olduğu kaydedilmiştir. Bu fark kısmideşarjların ve kaçak akımın ısıtma etkisinden kaynaklanmaktadır. Hava kabarcığı özelliklerinin ve tane dokusunun mikroskopik gözleminde gerilim ve polaritenin hiçbir etkisi gözlenmemiştir.

Özellikle EYG sınıfı mesnet izolatörler üzerinde gözlenen elektrik alanının ikinci etkisi, tipik olarak ilk önce metal donanımın yakınında oluşan çoklu hava boşluklarının ortaya çıkmasıdır. Bu etki Şekil 2.20’de gösterildiği gibi hem d.a. hem de a.a. için mevcuttur [42].



Şekil 2.20. Enerjili bir mesnet izolatör üzerindeki buz sarkıtları (a) Hava boşluklu buz kaplı izolatör (b) Buzsuz bölgelerde koronadeşarjlarının başlangıcı [42]

Şekil 2.21’de, enerjili ve enerjisiz koşullarda a.a. ve d.a. altında izolatör yüzeyinde büyüyen buz sarkıtlarının üst, orta ve alt bölümlerinin polarize ışık altında gözlemlenen ince kesitli mikro yapıları gösterilmiştir [3]. İnce kesitlerde görüldüğü gibi çekirdeğin ortasındaki mikro boşluklar ve kristal özelliklerin her ikisi de buz sarkıtının içindeki içi boş tüpte sıkışan suyun tipik bir örneğidir. Buz sarkıtının içindeki su kolonunun ark gelişiminde ve izolatör atlama geriliminin azalmasında rol oynaması mümkün görülmektedir.

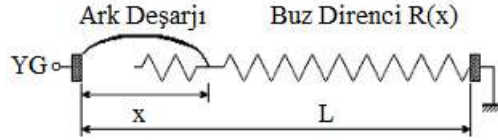


Şekil 2.21. Buz sarkıtlarının üst, orta ve alt bölümlerinde kabarcık özelliği ve tane dokusu ile enerjilenmiş ve enerjisiz koşullar altında yetiştirilen buz saçağı örneği [3]

Şekil 2.21’de elektrik alan ve gerilim polaritesinin izolator eteklerinden aşağıya doğru saçak büyümesi üzerindeki etkileri de görülmektedir. Buz sarkıtlarının ince film kesitlerinden görüldüğü üzere polaritenin, buz sarkıt uçlarındaki su damlalarının çapının uzaması ve azaltılması üzerinde bir etkisi olduğu sonucuna varılmıştır.

3. BUZLANMA MODELLERİ

Matematiksel modellerin kullanılması, buzla kaplı izolatorlerin kritik atlama gerilimlerini tahmin etmenin yollarından biridir.



Şekil 3.1. Bir buz yüzeyinde atlama modeli [41]

Şekil 3.1’de gösterilen model buzla kaplı izolator yüzeylerindeki atlamayı analiz etmek için kullanılabilir. A.a. koşullarında, elektrotlar üzerindeki gerilim düşümleri ihmal edilebilir ve ark düşümüne dâhil edilebilir. Bu nedenle, bu işlemin a.a. altındaki durumu denklem 3.1’deki gibi ifade edilir [41]:

$$V_m = AxI_m^{-n} + V_e + I_m R(x) \quad (3.1)$$

Burada; V_m (V) ve I_m (A), uygulanan gerilim ve kaçak akımın tepe değerleri, A ve n ark sabitleri, V_e (V) ark elektrot düşümü, x (cm) arkın uzunluğu ve $R(x)$ (Ω) buzun ark tarafından köprülenmeyen kısmının direncidir.

$$V_m = \frac{kx}{I_m^b} \quad (3.2)$$

Burada; k ve b yeniden ateşleme sabitleridir.

Denklem (3.1) ve denklem (3.2)’de ark sabitleri, ark yeniden atlama sabitleri ve artık direnç belirlenirse, buzla kaplı izolatorlerin kritik atlama gerilimini hesaplamak için kullanılabilir.

Yarı silindirik buz tabakası ile kaplanmış bir izolator dizisinde direnç denklem (3.3)’deki gibi hesaplanır:

$$R(x) = \frac{1}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2d} + \ln \left(\frac{D+2d}{4r} \right) \right] \quad (3.3)$$

Burada; L ve D sırasıyla izolator dizisinin ark uzunluğu ve çapı, d buz tabakasının kalınlığı, r ark kök yarıçapı, γ_e buz tabakasının yüzey iletkenliğidir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\gamma_e = 0.0675\sigma + 2.45 \quad (3.4)$$

Bu bölümde, buzlanma modellerini yakından ilgilendiren, buzlanma atlaması için ampirik modeller, yüksek gerilim izolatörlerinde atlama süreci ve buz kaplı izolatör üzerinde atlama sürecinin matematiksel modellenmesi vb. konular incelenmiştir.

3.1. Buzlanma Atlaması için Ampirik Modeller

Çok hafif buzlanma olması durumundaki izolatör davranışı, kirlenmiş izolatörüne oldukça benzerdir. Sızıntı mesafesi boyunca atlama eğimi, 1-10 m aralığındaki izolatörler için nispeten sabittir ve bu gradyan, eşdeğer tuz birikintisi yoğunluğunun (ESDD) doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Bu izolatörün sızıntı mesafesinin yüzey iletkenliğinin, sis kalınlığından veya buz birikmesinden bağımsız olarak ESDD'nin bir fonksiyonu olduğu bir modelin kullanılmasına yol açmaktadır [25].

Orta ila yoğun buzlanma aralığında, izolatör atlaması esas olarak kuru ark mesafesi boyunca meydana gelir. Bu durumda, yüzey kirliliğinin bir miktar katkısı ile artırılan suyun iletkenliği ve birikme kalınlığı atlama gerilimini etkilemektedir. Birleştirici bir kavram olarak, buzlanma gerilimi ürünü olarak adlandırılan buz iletkenliği ve buz ağırlığı, sonuçların deneysel enterpolasyonunu sağlamakta ve çoklu arkların varlığında matematiksel modellemenin zorluğunu azaltmaktadır. Çok hafif seviyelerde buz birikimi veya sızıntı mesafesini tam olarak köprülemeyen hafif seviyeler için buz tabakası iletkenliği, önceden kirlenmiş izolatörlerdeki buz ağırlığından nispeten bağımsızdır. Soğuk sis koşullarında buz ağırlığının katman iletkenliği üzerindeki etkisi, belirli bir nedenle ihmal edilebilir düzeydedir.

Yüksek çözünürlüğe sahip iyonların çoğu (tuz, sülfatlar, nitrat) kirlenmiş izolatör yüzeyinde zaten mevcuttur. Tablo 3.1'de gösterildiği gibi nadiren 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 'yi geçen sisin σ_{20} 'sini büyük ölçüde aşan iletkenliğe sahip yüzey suyuna yol açmaktadır.

Tablo 3.1. Sis ve ön kirlenmenin yüzey iletkenliğine göreceli katkıları [25]

Tipik Sis veya Soğuk - Sis Katmanı			Tipik Kirlilik Katmanı		
Kalınlık (cm)	σ_{20} İletkenlik ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Yüzey İletkenliği γ_s (μS)	ESDD (mg/cm^2)	Yüzey İletkenliği γ_s (μS)	Toplam Yüzey İletkenliği γ_s (μS)
0.01	300	3	0.05	91	94
			0.2	364	367
0.05	300	15	0.05	91	106
			0.2	364	379

Buz silindiri üzerindeki hesaplanmış atlama modeline yakından uyan ampirik model denklem (3.5)'deki gibidir:

$$E_{50} = 14.68 \left(\frac{ESDD}{1 \text{ mg/cm}^2} \right)^{-0.358} \quad (3.5)$$

Burada E_{50} , atlama gerilimidir (kV/m).

Kritik a.a. atlama pin tipi izolatör ve soğuk sis testlerine dayanan mesnet izolatörler için önerilen ampirik ifadeler sırasıyla [43],

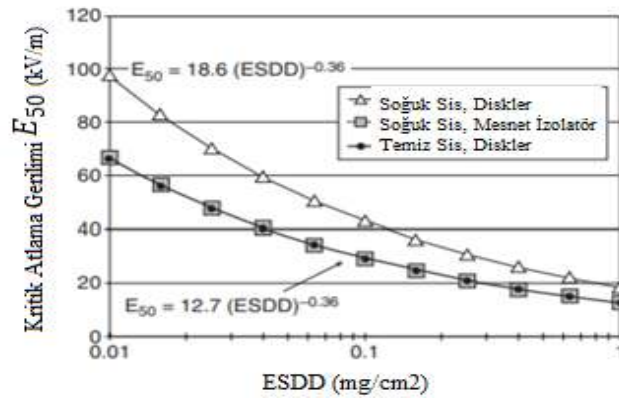
$$\text{Pin tipi : } E_{50} = 18.6(ESDD)^{-0.36} \quad (3.6)$$

$$\text{Mesnet tip : } E_{50} = 12.7(ESDD)^{-0.36} \quad (3.7)$$

Standart zincir izolatörler için rapor edilen atlama sonuçları arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılabilir [44]. Disklerin temiz sis atlama ifadesi şöyledir:

$$\text{Pin tipi : } E_{50} = 12.7(ESDD)^{-0.36} \quad (3.8)$$

Şekil 3.2, zincir izolatörler için temiz sis koşullarının soğuk sis koşullarından daha şiddetli olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.2. Temiz sis ve soğuk sis atlama gerilimlerinin karşılaştırılması [25]

Kirlenme atlamalarında, Obenaus modelinde kirlenmiş tabakanın direncinin yüzey arkının yayılmasında veya sönmesinde rolü esastır. Aynı şekilde, buz, kar veya soğuk sis tabakasının direnci, bir arkın başlatıldıktan sonra donma koşullarında yeniden alev alıp almayacağını belirlemede önemli bir faktördür. Bu direnç düşükse ark akımı daha yüksek olacaktır. D.a. altında ark, aynı elektrik gerilimi için yüzey boyunca daha fazla yayılacaktır.

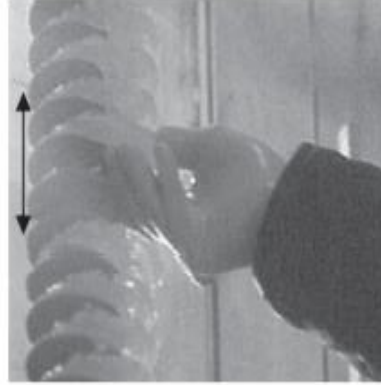
Buz tabakasının direnci ile buzu oluşturmak için kullanılan suyun iletkenliği arasında net bir ilişki vardır. Bu etkinin belki de en önemli kanıtı, hat izolatörleri üzerindeki atlama gerilimindeki düşüştür. Damıtılmış sudan ve 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenliğe sahip sudan oluşan buzla cam zincir izolatörler test edilmiştir. İlk duruma göre ikincisinde atlama geriliminde % 66 azalma bildirilmiştir [45].

Homojen bir birikinti için, buzun ve ön kirlenmenin iletkenliğinin tüm etkilerini buzlanma adı verilen tek bir değerde bir araya getirmek için birim uzunluk başına buz ağırlığı (m), buz birikmesinden eriyen suyun iletkenliği (σ_{20}) ile çarpılabilir. Gerilim ürünü (ISP):

$$\text{ISP} = \sigma_{\text{Erimiş Su}} \cdot w = \sigma_{\text{Erimiş Su}} \cdot \rho \cdot A \quad (3.9)$$

Burada; σ_{20} , atmosferik buz birikiminden eriyen suyun elektriksel iletkenliği ($\mu\text{S}/\text{cm}$), w, birikmenin ağırlığı (gram), ρ , kar için 0,3, buz için 0,9 olan yığılma yoğunluğu ve A, kuru ark mesafesi başına yığılma hacmi (v) ile verilen yığılmanın enine kesitidir.

Birim uzunluk başına w olan buzlanma gerilmesi ürünüde kütlenin kullanımının, atlama performansının iyi bir ampirik öngörücüsü olduğu kanıtlanmıştır [46]. Bu, çökeltinin ortalama buz kesitini hesaplama ihtiyacını ortadan kaldırır. 500 kV'luk silikon izolatör üzerindeki buz birikiminden ISP elde etmek için tipik bir örnekleme işlemi Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Silikon izolatör üzerindeki buzlanma [25]

254 mm çaplı porselen zincir izolatörler ile 300 mm çaplı mesnet izolatörler arasındaki ilişkiler Tablo 3.2'de verilmiştir [46, 47].

Tablo 3.2. 254 mm izolatör zincirlerinde buz birikimi veya 300 mm çapında tek tip atkı profilli mesnet izolatör üzerinde referans silindir üzerindeki buz birikimi arasındaki ilişki [46, 47]

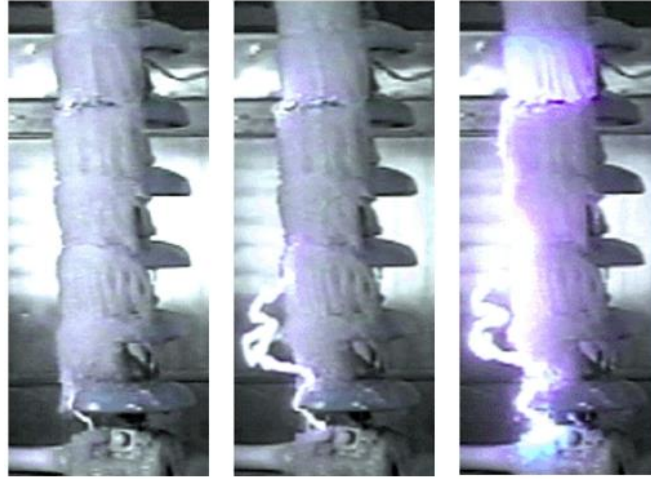
Dönen Referans Silindirinde Buz Oluşturma (mm)	146 mm x 254 mm Standart İzolatör Zinciri		50 mm etekten oluşan 300 mm mesnet izolatör
	Buz Ağırlığı (g/cm)	Tanım	Buz Ağırlığı (g/cm)
5	16	Buz Başlığı	20
10	32	Buz sarkıtları oluşmaya başlar	40
15	48	Kısmi köprülenme	60
20	64	%80 köprülenme	80
25	80	Maksimum köprülenme	100

Genel olarak, ISP yöntemi, belirli bir izolatörün atlama mukavemetini hesaplamak için kesin bir yöntem olmaktan ziyade, belirli tasarım amaçları için test verilerini enterpole etmenin, sızıntı veya kuru ark mesafesini ayarlamanın iyi bir yolu olarak önerilebilir. ISP yaklaşımının yalıtım koordinasyon sürecindeki spesifik rolü, belirli bir izolatör kuru ark mesafesi için atlamaya neden olacak iletkenlik (σ_{20}) ve birikme ağırlığı (w) kombinasyonlarının ortak olasılığının değerlendirilmesidir.

3.2. Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Atlama Süreci

Buzla kaplı izolatörler üzerinde atlama olayını, çevresel ve meteorolojik koşullardan özellikle sıcaklık, buzlanma hızı, uygulanan suyun elektriksel iletkenliği ve önceden var olan yüzey kirliliği gibi birkaç farklı durum etkilemektedir. Uygulanan elektrik alan gerilimi ve polaritesi, kısmi deşarj aktivitesi, buz ve saçak yüzeyleri boyunca kaçak akım, su damlası uzaması ve rüzgâr, atlama sürecini etkileyen diğer parametrelerdir [48].

Şekil 3.4, buzla kaplı bir izolatör dizisi boyunca ark oluşumu ve yayılma sürecini göstermektedir.

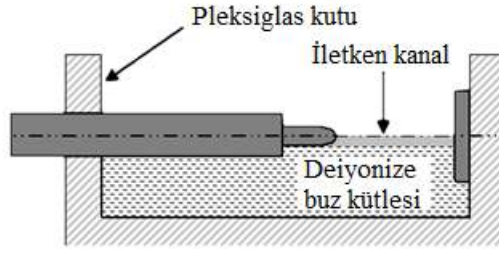


Şekil 3.4. Ark oluşumu ve yayılma süreci [25]

Buz birikmesi sırasında uygulanan sudan izolator yüzeyindeki su tabakasındaki iyonların reddedilmesiyle buz üzerinde oldukça iletken bir tabaka oluşmaktadır. Hava sıcaklığı veya güneşin yoğunluğu ile yükselen kaçak akım ve deşarj faaliyetlerinden kaynaklanan ısı girdileri, yavaş bir erime fazı sırasında önemli miktarda iyon kaybı olmaksızın su filmini yüksek düzeyde iletken tutabilmektedir. Bu yüksek iletkenlik yüzeyinin varlığı ile izolatore uygulanan gerilimin çoğu hava boşluklarında görünür. Uygulanan gerilimin izolator dizisinin kritik atlama değerinden daha düşük olması durumunda, ark aktiviteleri atlama arkına dönüşmemektedir. Ancak daha yüksek gerilimler için, hava boşlukları boyunca görünen mor ark beyaz bir arka dönüşebilir ve buz yüzeyi boyunca yayılarak tam bir atlama arkıyla sonuçlanabilir. Beyaz arkın uzunluğu, Şekil 3.4'de gösterildiği gibi izolatorün kuru ark mesafesinin üçte ikisine ulaştığında genellikle bir atlama arkı oluşturmaktadır [3].

3.2.1. Buz Yüzeyinde Deşarjın Başlaması ve Yayılması

Şekil 3.4'deki atlama süreci, kısmi deşarjlar ile başlamaktadır. Özellikle, ark başlangıcı ve yayılımı Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, yıldırım darbe gerilimi altında buz kütesine yarı batık bir çubuk-düzlem arasındaki bir buz yüzeyinde incelenmiştir [3]. Buzlanmaya maruz kalan izolatorlerin tasarımı için genel olarak ilgi çekici olan temel araştırmalar, buz yüzeyindeki deşarj başlangıcını daha iyi anlamayı ve buzun yayılan deşarj ile nasıl etkileşime girdiğini belirlemeyi mümkün kılmıştır. Ayrıca, buzun tipi ve yüzey özellikleri (iletkenlik), çevreleyen hava sıcaklığı, ark mesafesi, gerilim özellikleri (polarite), elektrot şekli ve buz yüzeyinde deşarj başlangıcını ve yayılmasını etkileyen eksen yönelimi gibi bir dizi parametre araştırılmaktadır.



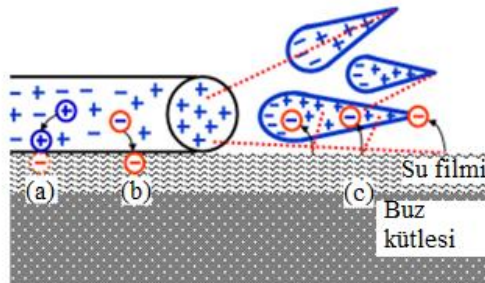
Şekil 3.5. Test edilen buz modelinin dikey kesimi [49]

Yeterli elektrotlar arası mesafeye sahip elektrotlara belirli bir kritik değerin üzerindeki bir elektrik alanı uygulandığında, serbest elektronlar tarafından buz yüzeyinde birdeşarj başlatılabilir. Deneysel araştırmalara dayanarak [49], Şekil 3.5'te donma suyu iletkenliğinin σ ($\mu\text{S}/\text{cm}$) fonksiyonu olarak buz yüzeyindekideşarj başlangıç alanı E (kV/cm)'yi tahmin etmek için denklem 3.10 türetilmiştir.

$$E = A \cdot e^{-B\sigma} = (a \cdot \ln(r) + \beta) \cdot e^{-B\sigma} \quad (3.10)$$

Burada A (kV/cm) ve B ($\text{cm}/\mu\text{S}$) sabittir, r (cm) elektrot yarıçapları ve d (cm) elektrotlar arası mesafedir.

İlk buz yükü oluştuktan sonra,deşarj yayılımı buz yüzeyi boyunca daha fazla yeni buz yükü gelişimine katkı sağlamaktadır. Bir buz yüzeyindedeşarj yayılımında yer alan olası mekanizmalardan biri, ilk buz yüküdeşarj kanalının başına yakın fotoiyonizasyon da dahil olmak üzere çeşitli mekanizmalara bağlı olarak elektronların buz yüzeyinden salınmasıdır [49]. Yerel elektrik alan kuvvetine bağlı olarak,deşarj kanalı katoda ulaşana ve buz yüzeyinde bir bozulma meydana gelene kadar benzer şekilde birden fazla yeni buz yükü meydana gelebilir. Elektrik alanı zayıfsa,deşarj yayılımı durur ve alan yükü yayılır. Bir buz yüzeyindedeşarj yayılımı hakkında daha iyi fikir veren bir taslak Şekil 3.6'da sunulmuştur.



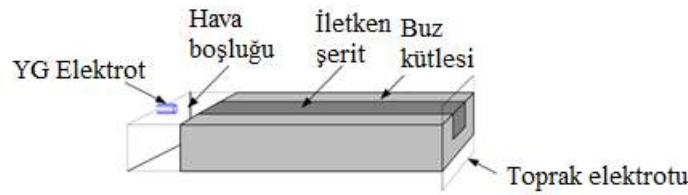
Şekil 3.6. Buz yüzeyi üzerinde yayılandeşarj iyonizasyonuna ve bağlanmaya katkıda bulunan temel işlemler: (a) Elektrostatik kuvvetler tarafından pozitif iyon yakalama (b) Yüzey tuzaklarında elektron yakalama (c) Çarpışma iyonizasyonuna katkıda bulunan fotoelektron ekstraksiyonu [50]

Buz yüzeyi özellikleri Şekil 3.6'da gösterilen “su filmi” tabakası tarafından belirlenir. Bu tabaka $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar düşük sıcaklıklarda devam eder ve tuz katkılarına duyarlıdır. Katılaşma işlemi sırasında buz yüzeyindeki safsızlıkların reddedilmesinden kaynaklanan sıvı tabakanın yüksek iletkenliği ve sıvıdaki moleküllerin daha yüksek hareketliliği nedeniyle, deşarj gelişimi çok daha hızlı hale gelmektedir.

Erime, yüzey iletkenliğini artırarak ara yüzey serbest enerjisini azaltma eğilimindedir. Bu durum, aynı zamanda bir buz yüzeyinin mekanik bozulmasının yüzey bölgesinde birçok kusura neden olduğunu ve elektriksel olarak hareketli iyon durumu ürettiği için yüzey iletimini arttırdığını desteklemektedir. Bu nedenle buz kütlesinin büyümesi ve deşarj yayılımı, iyonlaşma katsayısının artırılmasıyla kontrol edilebilmektedir. Çünkü böyle bir tabakadaki moleküller daha hareketlidir ve elektriksel olarak aktif kusurlar daha fazladır. Artan buz yüzeyi iletkenliği de çok daha hızlı bir deşarj gelişimine neden olabilmektedir.

3.2.2. Buz Yüzeyi Üzerinde Ark Yayılımının Özellikleri

Şekil 3.7, 140 x 15 x 5 cm buzlu pleksiglas kalıptan oluşan basitleştirilmiş bir buz geometrisini göstermektedir. Buz deiyonize sudan yapılmıştır. Buz yüzeyi boyunca yaklaşık 5 cm genişliğinde ve 3 cm derinliğinde dar bir bant yapılmış ve iletken bir buz bandı elde etmek için soğuk bir odada dondurulmadan önce, önceden belirlenmiş iletkenliğe sahip su ile doldurulmuştur. İletken bant oluşturulduktan sonra, YG elektrotu 6 cm hava boşluğu ile konumlandırılmış ve modelin uzak ucu düz bir metal yüzey kullanılarak topraklanmıştır [51].

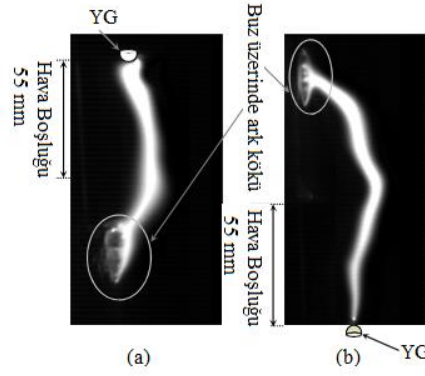


Şekil 3.7. Basitleştirilmiş geometri buz modeli [51]

Modeller, ultra yüksek hızlı bir kameranın önüne dikey olarak hem yukarı hem de aşağı doğru ark yönlerinde yerleştirilmiştir. Deneysel olarak ark kaldırma kuvveti, gerilim düşümü ve akımla ilgili ark sabitleri üzerinde bir miktar etki uygulanmaktadır. Buz yüzeyinde yayılan deşarjın ucundaki ultraviyole (UV) ışığı gözlemlemek için kameranın önüne bir görüntü yoğunlaştırıcı yerleştirilmiştir. Hava sıcaklığı, buz yüzeyinde bir su filmi tutmak için donma noktasının üzerinde kalacak şekilde ayarlanmıştır. Gerilim, daha sonra hava boşluğu boyunca ince filamentli menekşe

kısmi deşarjlar görülene kadar arttırılmıştır. Deşarjlar, buz yüzeyi üzerinde yayılmaya devam etmeden önce, her atlamadan sonra hava boşluğu boyunca yeniden ortaya çıkmaktadır. Erken aşamalarda, deşarj ucu deşarj kanalına kıyasla daha fazla UV ışığı yayarak her atlamadan sonra deşarj uzunluğu yavaşça artmaktadır. Bunun nedeni muhtemelen kanal iyonizasyonunun çoğunlukla termal iyonizasyon tarafından yönetildiği, görünür bölgede ışık yayan buna karşın deşarjın ucundaki iyonizasyonun çarpışma iyonizasyonu olduğu gerçeğidir [52].

Buz yüzeyinde deşarjın yayılması sırasında kaçak akım sürekli olarak artmaktadır. Yaklaşık 20 mA değerine ulaştığında, ince filamentli menekşe kısmi deşarjlar, üst (a) ve alt (b) hava boşluğu pozisyonları için pozitif bir ark (d.a.⁺) için Şekil 3.8'de gösterildiği gibi aniden parlak beyaz bir arka dönüşür. Ark yarıçapı büyük ölçüde kaçak akıma değil aynı zamanda sıcaklık, nem ve basınç dâhil çevresel koşullara da bağlıdır. Beyaz arkın merkezi çekirdeği çevreleyen örtüye kıyasla çok parlaktır [3].



Şekil 3.8. Üst (a) ve alt (b) hava boşluğu konumlarına karşılık gelen ark kanalı [51]

Yüksek hızlı UV kamera gözlemleri, arkın buz yüzeyi ile tam temas halinde yayılmadığını ve sadece ark ayağının buz yüzeyi ile temas halinde olduğunu göstermektedir. Temas yüzeyinin şekli dallanmış görünür, her dal ark kanalı akımının bir kısmını buz yüzeyine taşımaktadır. Sonuçlar ayrıca arkın hava boşluğu boyunca başlatıldığını ve buz yüzeyinde hareketli yayıldığını göstermektedir.

3.2.3. Buz Yüzeyinde Ark Yayılma Hızı

Ark yayılma işlemi üç aşamada tamamlanmaktadır. İlk aşama, hava boşluğu boyunca arkın, izolatör kuru ark mesafesinin yaklaşık %40'ına kadar buz üzerinde yavaşça yayılmaya başladığı andan itibaren başlamaktadır. İkinci aşamada ark çok daha yüksek bir hızla kuru ark mesafesinin %80'ine kadar yayılmaya devam etmektedir. Üçüncü aşama, ark hızı yayılımının maksimum değerine ulaştığı son atlamaya karşılık gelmektedir [53].

Ark yayılma hızının bir aşamadan diğerine su iletkenliğinin bir fonksiyonu olarak artması, buz yüzeyindeki kaçak akımın artması nedeniyle ark kanalına sağlanan enerjideki artıştan kaynaklanmaktadır. Sızıntı akımındaki artış, artan buz erimesinden kaynaklanır, bu da daha yüksek ark yayılma hızına neden olmaktadır. Ayrıca, uygulanan su iletkenliği yükseldikçe kaçak akım da artar, bu da yine daha yüksek ark yayılma hızına neden olmaktadır.

3.2.4. Atlama İçin Ark Gelişimi

Buzla kaplı izolatörler üzerindeki a.a. atlama olayı, yüzer arklar (bir izolatör dizisinin altındaki bir faz iletkeninden enerji verilmesi) için gerekli atlama katsayılarının yanı sıra yukarıdan enerji verilmiş bir mesnet izolatörde aşağı doğru hareket eden arklar da dâhil olmak üzere geniş çapta çalışılmıştır [21]. Ek iyileştirmeler arasında, hava boşlukları boyunca birden fazla ark kökünde gerilim düşümünün etkisi ve arkın kendisinin dinamik davranışı yer almaktadır. Bazı yönlerden, d.a. da arkın atlama durumu a.a. dan daha basittir. Çünkü atlama meydana gelmez, ancak d.a. ark akımının buz tabakası sıcaklığı, kimyası ve sonuçta ortaya çıkan yüzey tabakası iletkenliği ile etkileşimi, fiziğin birkaç dalını içerir. D.a. atlama için tipik model denklem 3.11'deki gibi ilişkilendirilmektedir [25].

$$\frac{V}{x} = A I^{-n} \quad (3.11)$$

Burada A ve n ark katsayıları, I akım, V gerilim ve x ise atlama aralığıdır. Ark katsayıları ayrıca arkın sabit olup olmadığına veya buz yüzeyi boyunca hareket edip etmediğine de bağlıdır.

3.2.5. İzolatör Atlama Geriliminin Tahmini

Tam buzlu izolatörlerin atlama gerilimini tahmin etmek için en basit model, buz ağırlığının (w) ve erimiş buzun iletkenliğinin (σ_{20}) çarpımının buz tabakasının etkin direncini tanımladığını varsaymaktadır [25]. ($w \cdot \sigma_{20}$) buzlanma gerilim ürünü (ISP) olarak adlandırılmaktadır. Kritik atlama gerilimi E_{50} , denklem (3.12)'deki gibi verilir:

$$E_{50 \text{ ac}} = 396(ISP)^{-0.19} \quad (3.12)$$

Bu ifade, normal hat gerilimi altında buz birikmesi ve bir erime fazı sırasında a.a. atlama için geçerlidir. Hat gerilimi olmadan oluşturulmuş bir buz tabakası üzerinde çoklu d.a. atlamalarında kullanılan testler için, kritik atlama gerilimi denklem (3.13)'teki gibi verilir [54]:

$$E_{50 \text{ dc}} = 1174(ISP)^{-0.26} \quad (3.13)$$

(3.12) ve (3.13)'deki denklemler $10^3 < ISP < 10^5$ aralığında birçok deneysel sonucu tanımlamaktadır.

Dağıtılmış dirençli katmana sahip seri halinde bir arkın Obenaus modeli, buzlanma atlama sürecinin temel modellenmesi için başarılı olmuştur [19]. Atlama modeli, ark boyunca gerilim düşümünü ve kalan buz tabakasındaki akım akışından kaynaklanan gerilim düşümünü denklem (3.14)'deki gibi toplamaktadır.

$$V_m = A \cdot x \cdot I_m^{-n} + I_m R(x) \quad (3.14)$$

Burada V_m (V) uygulanan gerilimin tepe değeri, x (cm) toplam ark uzunluğudur. A ve n türetilen ark sabiti olup $R(x)$, Denklem (3.15)'teki buz tabakasının artık direncidir [19].

$$R(x) = \frac{1}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (3.15)$$

Burada L , buzun yarım silindirin kuru ark mesafesi boyunca olan uzunluğu (cm), D izolatörün çapı (cm), γ_e buz tabakasının eşdeğer yüzey iletkenliği (μS), t buz tabakasının kalınlığı ve r etkin ark kökü yarıçapıdır.

Denklem (3.15)'deki etkin ark kökü yarıçapı, normal olarak, akımın karekökü ile sabit olarak alınır. $r = 0.7\sqrt{I}$ değerleri d.a. ark akımları I (A) için geçerlidir ve $r = 0.6\sqrt{I_{pk}}$ a.a. için geçerlidir.

3.3. Buz Kaplı İzolatör Üzerinde Atlama Sürecinin Matematiksel Modellenmesi

Genel olarak, ağır buz katmanları üzerindeki elektriksel atlama süreci, d.a. atlama için Obenaus yaklaşımına uyarlanarak ve bu modelin a.a. ark yeniden ateşleme koşulları için modifikasyonları dikkate alınarak iyi bir şekilde tanımlanabilmektedir [55]. Bu başarılı adaptasyon, ark sabitleri, yüzey iletkenliği ve yeniden ateşlenme koşullarının doğrudan laboratuvar ölçümlerine dayanmaktadır ve bu da kirli yüzeylerde atlama için bulunanlardan sistematik olarak farklı değerlere yol açmaktadır.

Matematiksel modelin hem ağır buz tabakaları için hem de izolatörün tüm sızıntı mesafesi boyunca çok ince bir tabaka olması durumunda kullanılabileceği ortaya çıkmıştır. Bu durum tam ölçekli test verileri ile de doğrulanmıştır. Bununla birlikte, hafif buzlanma koşulları için buz tabakasındaki hava boşluklarının işlenmesi ile ilgili hala bazı sorular ve bu durumlar için doğrulamayı destekleyecek çok az atlama testi verisi vardır.

Birden fazla ark kökünün katkısı daha sonra çoklu ark modeli kullanılarak değerlendirilmiştir.

- Çok hafif buzlanma, $t < 1$ mm, sızıntı mesafesi kullanılarak. Bu durumda buz tabakası iletkenliğine önceden var olan ESDD hâkimdir ve eşdeğer su tabakası tipik olarak 1 mm kalınlığındadır. Tek bir ark, hızlı bir atlama sürecini başlatır. Ark yolu, sızıntı mesafesinden daha kısadır.

- $1 \leq t \leq 6$ mm olan hafif buzlanma, serideki ark sayısının serideki disk sayısına yaklaşılabileceği durumlar. 5 mm buzla, beyaz bir ark başladığında, yaklaşık 3 saniye içinde atlama olur. Ark yolu, sızıntı mesafesinden daha kısadır.

- $6 \leq t \leq 10$ mm ile orta düzeyde buzlanma. Burada kısmi buz köprüleme, hafif buzlanma durumuna kıyasla ark sayısını azaltır. Genellikle, beyaz bir ark ile atlama için geçen süre 10 s aralığına çıkar. Ark yolu, kuru ark mesafesini takip eder.

- Ark sayısının minimuma ulaştığı $t > 10$ mm ağır buzlanma. Beyaz arkla atlama süresi genellikle 30 saniyeyi aşar. Ark yolu, kuru ark mesafesini takip eder.

3.3.1. Buzla Kaplı İzolatörlerin DA Atlama Modeli

Buzla kaplı izolatörler için matematiksel model, dağıtılmış bir kirlilik tabakası ile seri olarak bir hava boşluğunun varlığına dayanmaktadır. Uygulanan sabit d.a. için, toplam besleme gerilimi üç bileşenin toplamıdır [56].

$$V = V_e + A \cdot K_p x \cdot I^{-n} + IR(x) \quad (3.16)$$

Burada; V_e elektrot 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 d.a. akımı (I) ve V d.a. (V) gerilimidir.

x küçük bir değerden $x = L$ değerine kadar değiştiğinden, denklem (3.16)'nın çözümü, bir dizi U şekilli eğriye dönüşür. L , toplam kaçak sızma yolu uzunluğudur (cm) ve orta ve yoğun buz için kuru ark mesafesine yaklaşık olarak eşittir ve soğuk sis koşulları gibi çok hafif buzlanma durumlarında kaçak mesafesine eşittir. Geleneksel olarak, tek tip bir kirlilik katmanının direnci $R(x) = r_p (L - x)$ (Ω /cm) olarak verilir. Neumärker, bunu kullanarak sıfıra eşit x 'e göre Denklem (3.16)'nın türevini almış ve kritik ark uzunluğunu elde etmiştir [57].

$$X_c = \frac{L}{n+1} \quad (3.17)$$

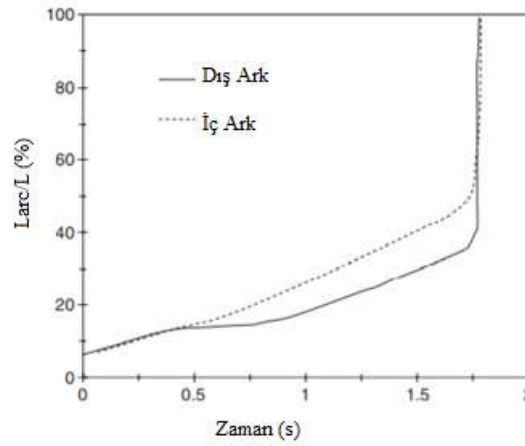
Düzgün kirlilik katmanı ile arkın X_c konumuna ulaşması için yeterli gerilim varsa, kaçak mesafesinin geri kalanında atlama işlemini tamamlamak için fazlasıyla yeterli potansiyel vardır. Tipik olarak, n değeri yaklaşık 0.5'dir. Böylece, toplam kaçak sızma yolu uzunluğu X_c değerinin yaklaşık üçte ikisi kadardır.

Denklem (3.16)'yı I 'ya göre farklılaştırarak ve sıfıra eşitleyerek, atlamada kritik akım I_c ve kritik gerilim V_c 'yi oluşturmak da mümkündür:

$$I_c = \left(\frac{A}{r_p} \right)^{1/(n+1)} \quad (3.18)$$

$$V_c = L \cdot A^{1/(n+1)} \cdot r_p^{n/(n+1)} \quad (3.19)$$

İletken buzun $t = 5$ mm olan düz bir yüzeyinde arkın, iletkenliğe ve buz sıcaklığına bağlı olarak ya buz - hava arayüzü boyunca ya da buzun içinde yayıldığı bulunmuştur [22]. Şekil 3.9'daki d.a. arkı, iki ana aşamada 280 mm'lik mesafe boyunca yayılmaktadır.



Şekil 3.9. Yayılma işlemi, σ_{20} ile buz yüzeyinde 27 kV'da ark [25]

Eşitlik (3.16)'daki K_p , buzla kaplı izolatörlerde d.a. atlama üzerindeki ark yollarının gözlemlerine dayalı olarak d.a. atlama modeline dâhil edilmiştir [56]. K_p katsayısı, d.a. için 1,2 ile 1,4 arasında değişir ve tam köprülü buzlanmanın matematiksel modellemesi için ortalama değer 1,3 olarak önerilmiştir. Çok hafif buzlanma koşulları altında atlama durumunda, K_p kabaca kuru arkın sızıntı mesafesine oranına eşittir.

D.a. atlama hesaplamasının son adımı, arka seri buz tabakasının direncinin değerlendirilmesidir. Bu ifade için iki terim vardır. Birincisi, D çapına, L uzunluğuna ve d kalınlığına sahip bir yarım silindir ile tarif edilen köprüsüz buz tabakasının direnci [19], diğeri denklem (3.20)'de tanımlanan, r yarıçaplı her bir ark kökünün yarı küresel temasına bağlı olarak N ark köklerinin seri direncidir.

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + N \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (3.20)$$

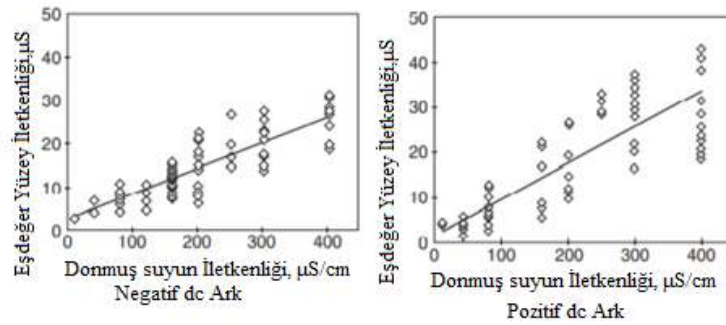
Burada; $R(x)$ x konumundan diğerine sızıntı yolu boyunca direnç (Ω), γ_e eşdeğer yüzey iletkenliği (μS), L ark yolunun uzunluğu (cm), x ark kökünün sızıntı yolu boyunca pozisyonu (cm), D izolatör çapı (cm), t buz kalınlığı (cm), N buz yüzeyindeki toplam ark kökü sayısı ve r ark kökü yarıçapıdır (cm).

Yüzey iletkenliği γ_e değeri d.a. için incelenmiş ve 0 - 300 $\mu S/cm$ aralığında polarite ve uygulanan su iletkenliği σ_{20} ile aşağıdaki gibi değiştiği bulunmuştur [56].

$$\gamma_e = 0.0599\sigma_{20} + 2.59 \quad dc^- \quad (3.21)$$

$$\gamma_e = 0.082\sigma_{20} + 1.79 \quad dc^+ \quad (3.22)$$

Katsayılar, iletkenliği 300 $\mu S/cm$ olan su için yaklaşık 0,6 - 0,8 mm'lik bir “yarı-su” tabakası kalınlığını ifade eder. $\sigma_{20} < 1 \mu S/cm$ olan iyonize olmayan su için bile elektrik deşarjının ve havaya maruz kalmanın kimyasal etkileri, sıfır olmayan bir yüzey iletkenliği düzeyi sağlamak için birleşmektedir (Şekil 3.10). $L < 1$ m olan d.a. arkları için, tek buz tabakasının hat ucuna yakın bir ark kökü ve diğeri toprak ucuna yakın olan iki ark kökü ($N = 2$) vardır [56].



Şekil 3.10. D.a. için γ_e buz yüzeyi iletkenliği dc^- ve dc^+ koşulları [56]

Buz yüzeyi $R(x)$ boyunca kirlilik direnci sabit olmadığından, Neumärker [57] tarafından Denklem (3.19)'da önerilen analitik çözüm artık geçerli değildir. Denklem (3.20)'deki tek tip olmayan direnç $R(x)$ kullanılarak denklem (3.16)'yı çözmek için sayısal bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bu, aşağıdaki işlemle yapılır:

- Gerilim polaritesi için V_e , γ_e , A ve n değerleri sabittir.
- L uzunluğundaki buz yüzeyi boyunca her x değeri için, yaklaşık 0.01 A'lık bir deneme akımı varsayılır.
- Deneme akımına karşılık gelen ark kökü yarıçapı hesaplanır.
- Denklem (3.20)'deki $R(x)$ değeri, deneme yarıçapı kullanılarak hesaplanır.
- Denklem (3.16)'daki gerilim, her x değeri için hesaplanır.
- Her x değeri için deneme akımı I , belirli bir x değeri için V en aza indirilene kadar değiştirilir.

- Birleştirilmiş $V(x)$ değerlerinin en yüksek kritik atlama gerilimi V_c 'dir.

3.3.2. Kirlenmenin Buzla Kaplı İzolatörler Üzerindeki Etkisi

Yüksek gerilim d.a. izolatörleri üzerindeki ön kirlenme seviyeleri, negatif polariteye kıyasla hat ucunda pozitif polariteye sahip izolatörlerde daha yüksek olabilir. Fark en az % 20'dir ve endüstriyel kirliliğin düşük olduğu alanlarda, 2 veya 3 faktörüne ulaşabilir. Bu, buzlanma koşullarında d.a.⁺ ve d.a.⁻ atlama geriliminin hesaplanmasına yalıtkan yüzey ön kirlenmenin nasıl dâhil edileceği sorusuna yol açmaktadır.

İzolatörlerin üzerinde yarım silindir buz oluştuğunda, tortu rüzgâr yönünde oluşur ve tipik disklerin veya polimer izolatörlerin alt yüzeyinin büyük bir kısmı ile temas etmez. Tipik dökülmeden etekten eteğe ayrılma ve yoğun donma yağmuruna neden olan 45° geliş açısı için, izolatörlerin üst yüzeyindeki iyonların yaklaşık % 20'si buz tabakasına göç edecektir. Bu ağır buzlanma durumunda, buzun üstteki eteğinin korunma ile ilgili olarak tam üst yüzeye kısmi temas fonksiyonunu temsil etmek için bir F fraksiyonu tanımlanmıştır. Yoğun buzlanma için F fraksiyonu, damlama suyu yoluyla kirlilik kaybının etkilerini de hesaba katar.

Ön kirlenmenin yüzey kirliliğine olan ek katkısı, ESDD'nin uygulanan su iletkenliğine (σ_{20}) katkısı değerlendirilerek ve bu birleşik değer denklem (3.16) ve (3.17)'de kullanılarak basitçe modellenebilir. Bu, IEEE Standardı 4 'teki ifadeyi kullanarak S_a tuzluluğunun bir fonksiyonu olarak iletkenliğin çözülmesini içerir [25].

İzolatörde biriken ağır buz tabakasına giren ve burada tutulan tuz miktarı,

$$m = F \cdot ESDD \cdot A_{üst} \quad (3.23)$$

dir. Burada; F, izolatör yüzeyinden buz tabakasına kirlilik faktörü, ESDD, eşdeğer tuz birikintisi yoğunluğu, $A_{üst}$, yalıtkan yüzeylerin toplam alanı ve m, eşdeğer tuz ağırlığıdır.

İzolatör ile temas halindeki buz hacmi, izolatörün tam olarak köprülenmiş olup olmamasına bağlı olarak birikme kalınlığı t, izolatör çapı D ve kuru ark veya sızıntı mesafesi L ile verilir. Su hacmi ise,

$$V_{su} = 0.9 \cdot \frac{\pi}{4} (D + 2t)^2 \cdot D^2 \cdot L \quad (3.24)$$

ile verilir.

Soğuk sis koşullarında üretilenler gibi, tüm sızıntı mesafesi boyunca çok hafif buzlanma olması durumunda, F'nin mesnet izolatörler için 0.4 olduğu ve daha az maruziyete sahip disk izolatörleri için yaklaşık 0.15'e düştüğü dikkate alınmalıdır. Bu durumda, izolatörlerin toplam üst ve alt yüzey alanı ($A_{üst}$) kullanılarak tuz kütlesi (m) belirlenir.

$$m = F \cdot ESDD \cdot A_{üst} \quad (3.25)$$

Yüzey iletkenliği γ_e 'yi hesaplamak için denklem (3.21) ve (3.22)'de kullanılan σ_{20} 'nin toplam değeri, doğal yağış iletkenliği σ_{n20} 'nin ve ESDD'den ek katkı σ_{p20} 'nin toplamı olacaktır:

$$\sigma_{20} = \sigma_{n20} + \sigma_{p20} \quad (3.26)$$

Kirlenmiş izolatörler için d.a.+ atlama geriliminin temiz izolatörler için d.a.- atlama geriliminin oldukça üzerinde kaldığı tahmin edilmektedir.

3.3.3. Buzla Kaplı İzolatörlerin AA Atlama Modeli

Denklem (3.16)'daki d.a. koşullarını a.a. koşullarına uyarlayan ark modeline uymak için gereken birkaç değişiklik vardır. Elektrot gerilim düşümü V_e terimi d.a. için a.a. için olduğundan daha küçüktür ve etkisi doğrudan diğer terimlerin hesaplanmasında düşünülebilir. A.a. dalgasının tepe noktasında atlama oluşma eğiliminde olduğundan, analizde max gerilim ve max akımın tepe değerleri kullanılır. Yeniden alevlenme katsayısı da dâhil olmak üzere güncellenmiş denklem şu hale gelir:

$$V_m = AK_p x. I_m^n + I_m R(x) \quad (3.27)$$

Burada; V_m , uygulanan a.a. gerilimin tepe değeri (V), I_m a.a. akımının tepe değeri (I), A ve n ark sabitleridir.

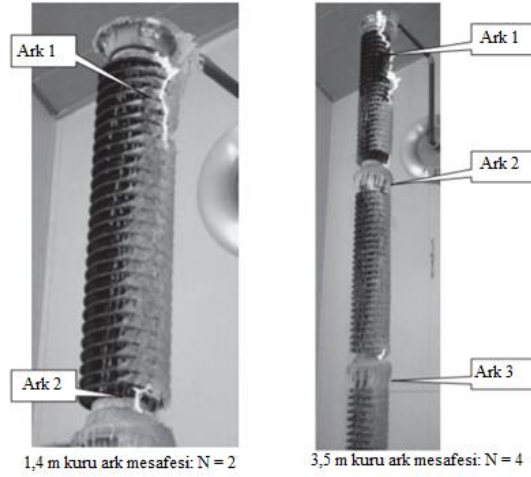
$$\gamma_e = 0.0675\sigma_{20} + 2.45 \quad (3.28)$$

Denklem (3.28), R (x) 'i hesaplamak için ark köklerinin sayısı N ve ark kök yarıçapı r ile birlikte kullanılır:

$$R(x) = \frac{10^6}{2\pi\gamma_e} \left[\frac{4(L-x)}{D+2t} + (N' + N'') \ln \left(\frac{D+2t}{4r} \right) \right] \quad (3.29)$$

Burada: R (x), 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).

Şekil 3.11'deki 3500 mm kuru ark mesafeli mesnet izolatörde üç boşluk vardır. Sadece buz yüzeylerinde oluşan ark kökleri, buz yüzeyi boyunca, artık buz tabakasının direncini etkileyen, homojen olmayan bir akım dağılımına neden olacaktır. Farzaneh ve Zhang, buz boşluklarını seri olarak çoğaltarak ve ardından sonuçları, buz yüzeyinde tek bir köke sahip arkların sayısını (N) ve iki köklü arkların sayısını (N'') açıklayarak çoklu ark modelini geliştirmiştir [21]. Toplam ark sayısı $N = N' + N''$ şeklindedir.



Şekil 3.11. Buzlanma koşullarında mesnet izolatorlerde tipik arklar ve hava boşlukları [21]

Çoklu ark modeli aşağıdaki örneklerde kullanılmıştır:

- Birden fazla ark ile köprülenecek boşluğun olduğu kısmi buz köprülenmesi durumlarında.
- HV ve EHV yalıtımı durumunda, hava boşluklarının sayısı kuru ark mesafesi ile artma eğiliminde olduğunda.
- Destek izolator etekleri veya sızıntı genişleticiler gibi izolator aksesuarları kullanılarak kasıtlı olarak ek hava boşlukları eklendiğinde.

Bu matematiksel modelin buz yüzeyine önerilen uyarlaması [19], bir ark yeniden ateşleme koşulunun, buz yüzeyi boyunca ark kökünün her konumunda karşılanması gerektiğidir. Bu gereklilik denklem (3.30) ile ifade edilir:

$$V_m \geq \frac{k \cdot K_{px}}{I_m^b} \quad (3.30)$$

Arkın, güç frekansındaki gerilimin bir sonraki yarı döngüsünde yeniden yanmaya yetecek kadar termal enerji tuttuğu kritik durum,

$$V_m = \frac{k \cdot K_{px}}{I_m^b} \quad (3.31)$$

Burada; k ve b, ark yeniden ateşleme 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 ark yeniden atlama süreci, normalde kirli yüzeyler için kullanılanlardan farklı katsayılarla sahiptir. Örneğin, $k = 800$, $b = 0.5$ veya $k = 716$, $b = 0.526$ [25]. 20 °C'de kirli yüzeyler için bu değerler, 0 ° C'de buz yüzeyinden üçte bir daha düşüktür. Buz yüzeylerindeki ark yayılma hızı ayrıca kirli yüzeylerde gözlenenden biraz daha yavaştır ve bu, buzlu yüzeylerdeki ark yeniden atlama işleminin neden kirli yüzeylerde bulunanlardan farklı katsayılarla sahip olduğunu açıklamada sıcaklığa alternatif bir faktör olabilmektedir.

4. UYGULAMA

4.1. Deney Düzeneği

Yapılan çalışmada, öncelikle izolatörler şekil 4.1'deki kabin içerisinde buzlandırılmaktadır. Buzlanma durumu, zolatör yüzeyinde biriken buz kalınlığına göre hafif buzlanma ve buzlanma olarak belirlenmektedir.



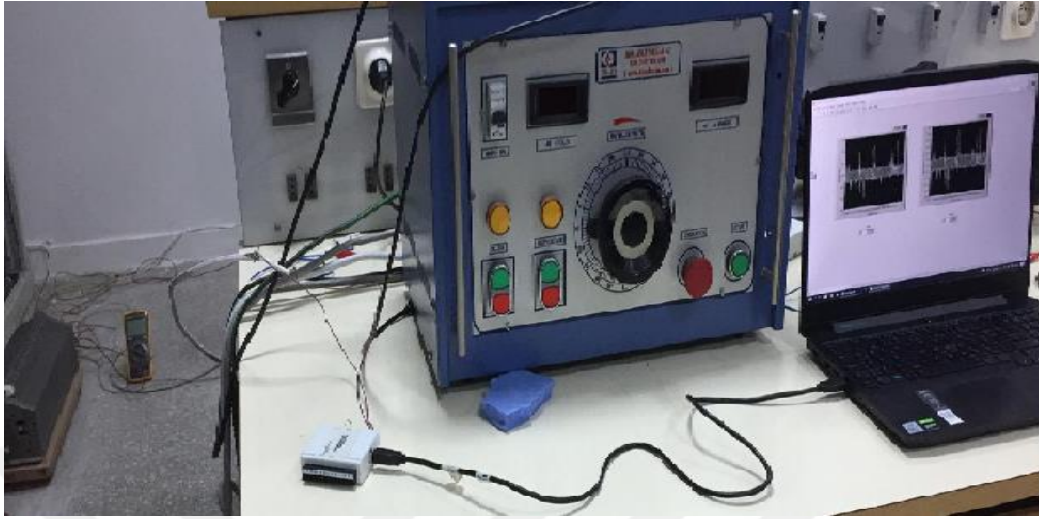
şekil 4.1. Buzlandırma kabini

İzolatör buzlandırıldıktan sonra şekil 4.2'de görüldüğü gibi izolatöre yüksek alternatif gerilim üretici vasıtasıyla sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanmıştır.



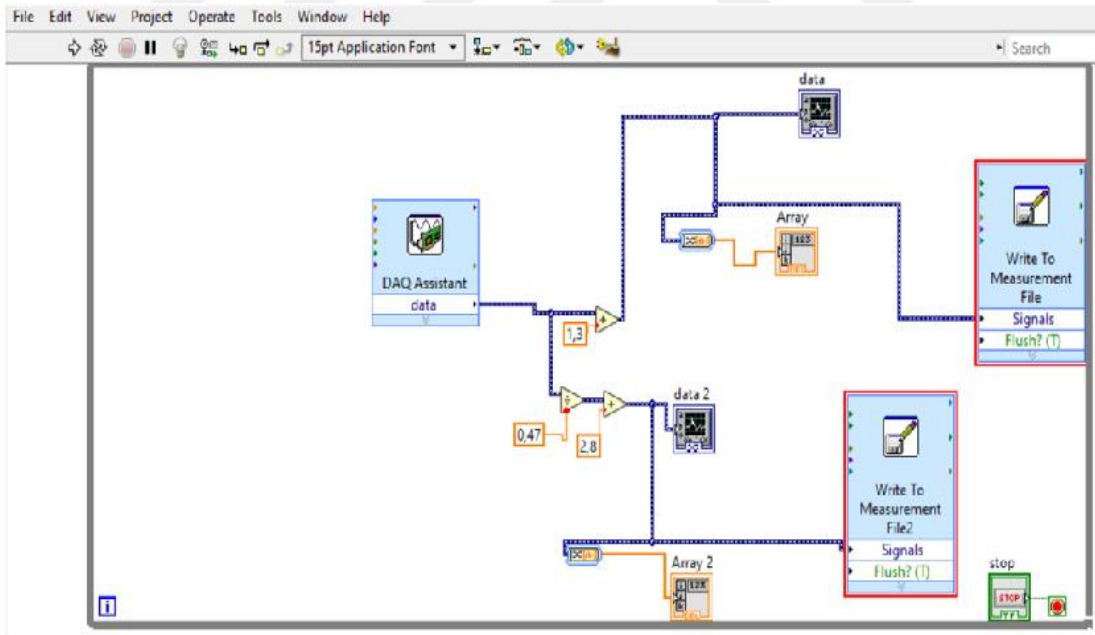
şekil 4.2. Gerilim bölücü ve yüksek gerilim transformatörü

Veri toplama ünitesi yardımıyla, gerilim bölücünün çıkışına bağlanan direnç üzerindeki gerilim değeri ölçülerek labview programı kullanılarak sızıntı akımları elde edilmiştir (Şekil 4.3).



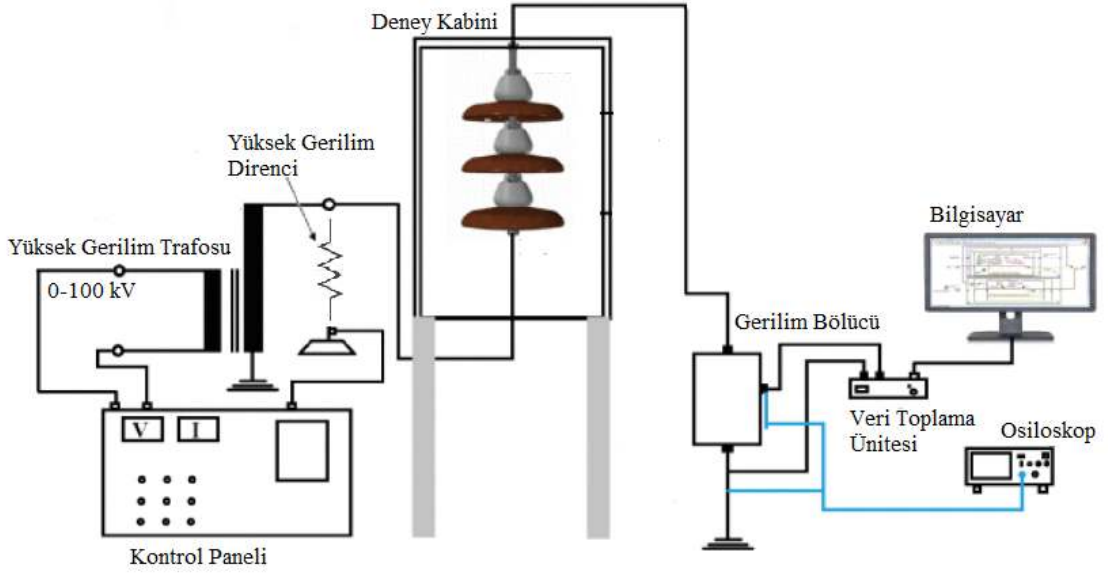
Şekil 4.3. Kontrol paneli ve veri toplama ünitesi

Labview programı ara yüzünde hazırlanan bağlantı şeması Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Labview programı

Deney düzeneği Şekil 4.5'te görüldüğü gibidir.



Şekil 4.5. Deney şeması

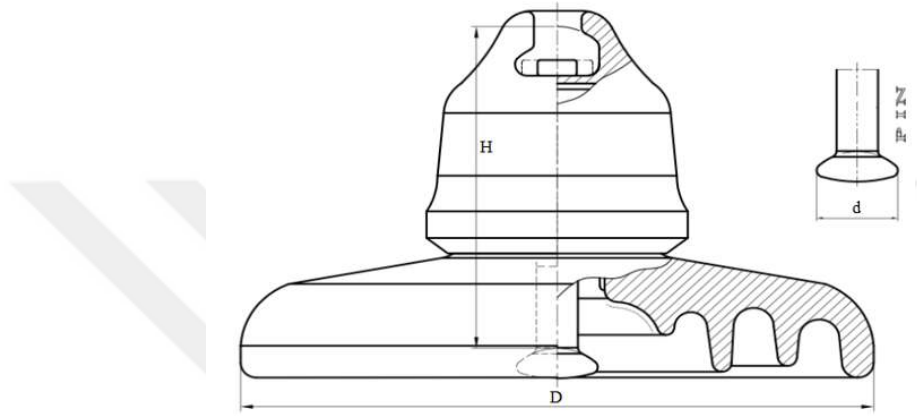
İzolatör üzerindeki buz eriyene kadar 15 dakika aralıklarla gerilim uygulanmasına devam edilmiş ve her 15 dakikada bir Şekil 4.6'da görülen nem ve sıcaklık ölçer vasıtasıyla değerler kaydedilmiştir.



Şekil 4.6. Nem ve sıcaklık ölçer

4.2. Deneylerde Kullanılan İzolatörler

Bu bölümde, deneylerde kullanılan porselen, cam ve silikon izolatörlere ait kesitler ve karakteristik değerler verilmiştir. Porselen ve cam izolatöre ilişkin kesit Şekil 4.7’de verilmiştir. Deneylerde kullanılan cam ve porselen izolatörün bir elemanına ait karakteristik değerler tablo 4.1’de görülmektedir.

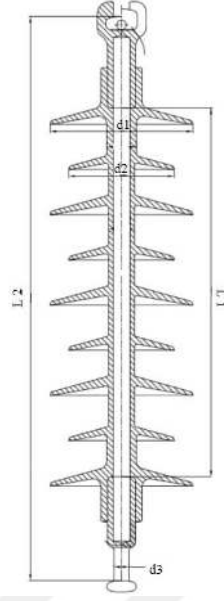


Şekil 4.7. Porselen ve cam izolatör kesiti

Tablo 4.1. Porselen ve cam izolatöre ait karakteristik değerler

İzolatör Çeşidi	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

Silikon izolatöre ait kesit Şekil 4.8’de verilmiştir. Deneylerde kullanılan silikon izolatöre ait büyüklükler Tablo 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.8. Silikon izolatöre ait kesit

Tablo 4.2. Silikon izolatöre ait karakteristik değerler

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

4.3. Tek Elemanlı Porselen Zincir İzolatörde Buzlanma

Tek elemanlı porselen zincir izolatörde buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için sızıntı akımları incelenmiştir.

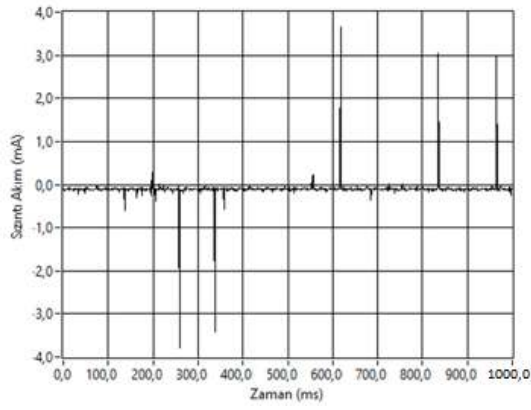
4.3.1. Buzsuz Durum

İzolator buzlandırılmadan Şekil 4.9'daki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

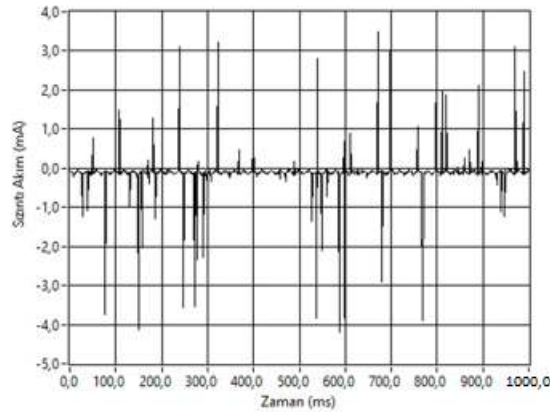


Şekil 4.9. Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör

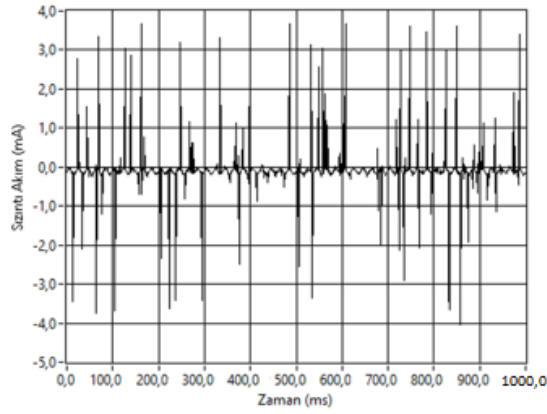
Şekil 4.10 - 4.13'te, buzsu tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



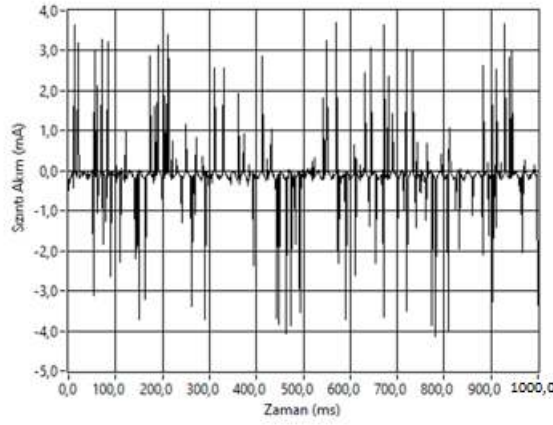
Şekil 4.10. Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.11. Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.12. Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolator için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.13. Buzsuz tek elemanlı porselen zincir izolator için 20 kV’da sızıntı akımları

Tek elemanlı porselen zincir izolatorlerde buzlu durumda sızıntı akımı 4 mA’i geçmezken uygulanan gerilim değeri arttıkça sızıntı akımlarının sıklığının arttığı gözlenmiştir.

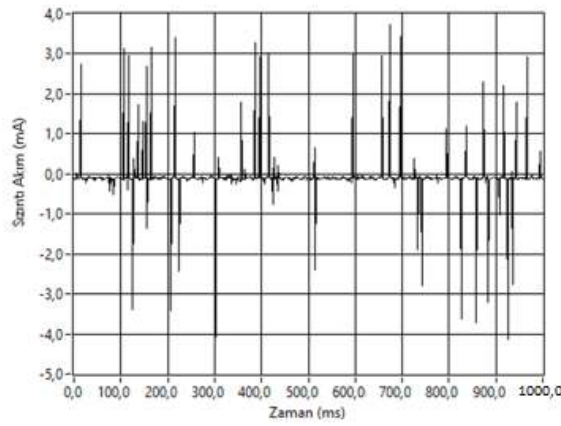
4.3.2. Hafif Buzlanma

İzolator hafif buzlandırılarak Şekil 4.14’teki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

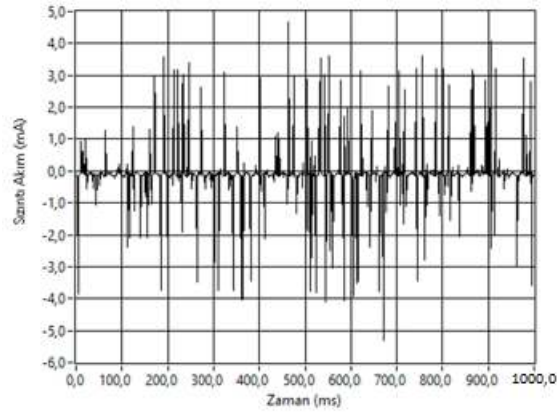


Şekil 4.14. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör

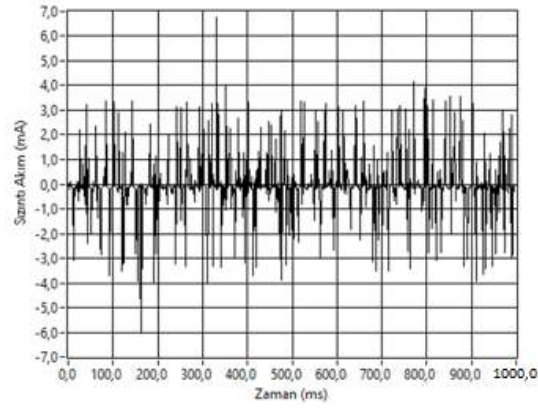
Şekil 4.15 - 4.18’de, hafif buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



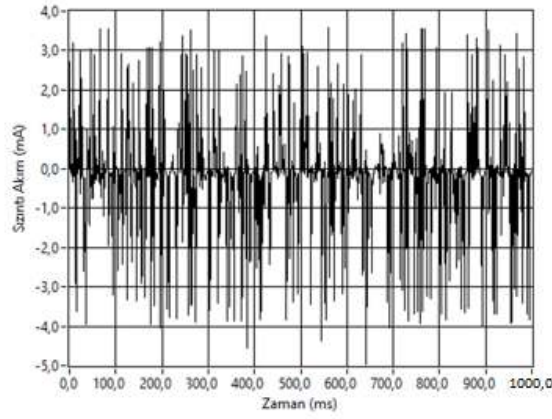
Şekil 4.15. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.16. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

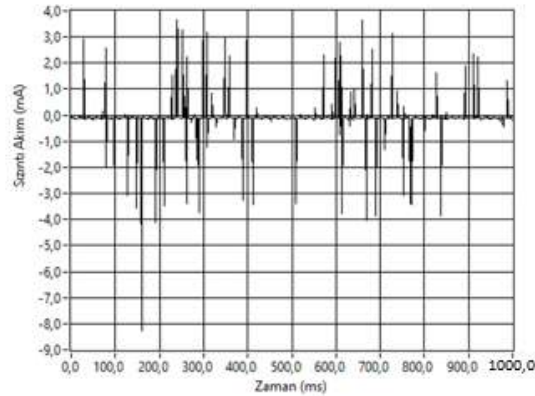


Şekil 4.17. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

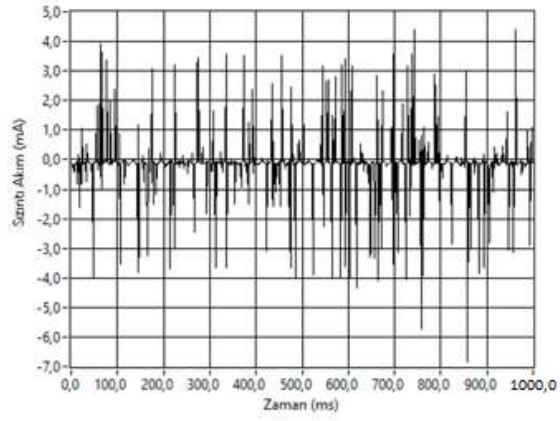


Şekil 4.18. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

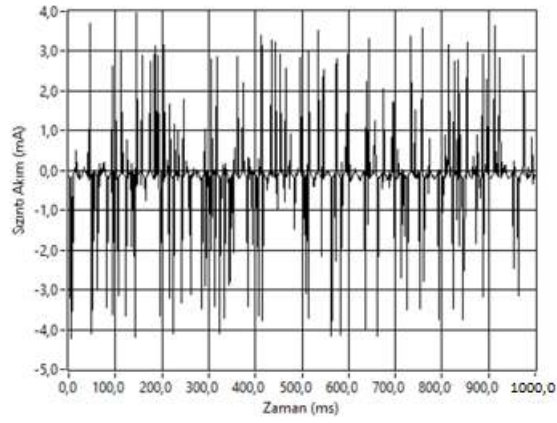
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.19 - 4.22’de verilmiştir.



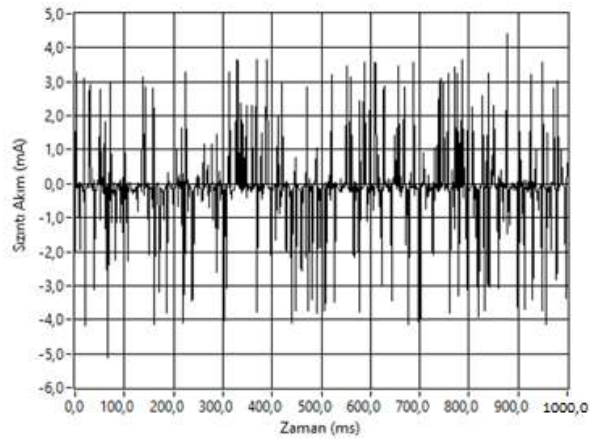
Şekil 4.19. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.20. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.21. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.22. Hafif buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Tek elemanlı porselen zincir izolatörde, aynı gerilim değerinde, hafif buzlanma durumunda buzsuz duruma göre izolatör yüzeyi üzerindeki sızıntı akımlarının sıklığının arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, hafif buzlanma durumunda 15 dakika sonra gerilim uygulandığında ilk duruma göre yine sızıntı akımlarının sıklığının daha fazla olduğu belirlenmiştir.

4.3.3. Buzlanma

İzolatör buzlandırılarak Şekil 4.23'teki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.



Şekil 4.23. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör

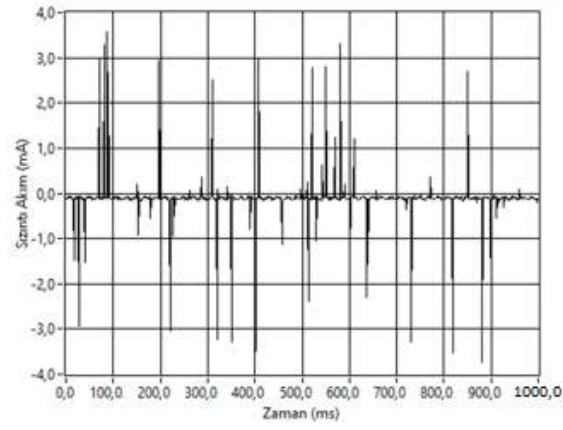
Buzlandırılan izolatör için zamana bağlı olarak ölçülen, ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Tek elemanlı porselen zincir izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

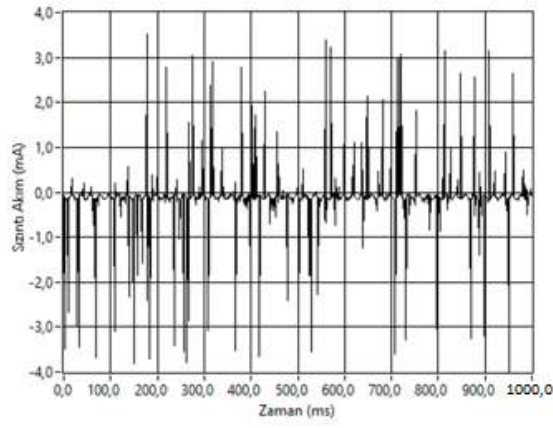
Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	37	21.6
15	43	20.2
30	47	20
45	50	19.8

Tek elemanlı porselen zincir izolatörün buzlanma durumunda 15'er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile beraber ortamın nem değeri yükselmiş sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

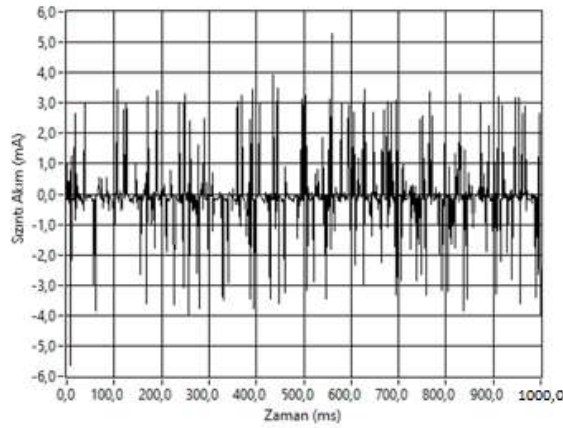
Şekil 4.24 - 4.27'de, buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



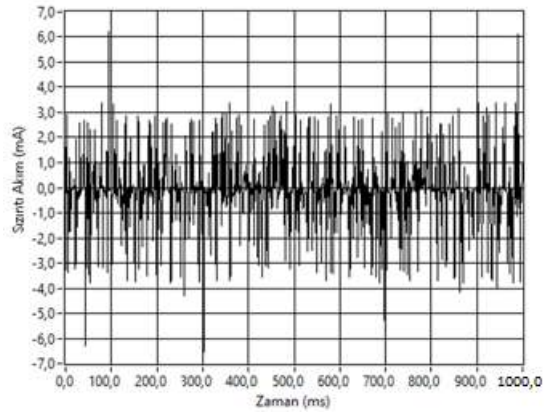
Şekil 4.24. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.25. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

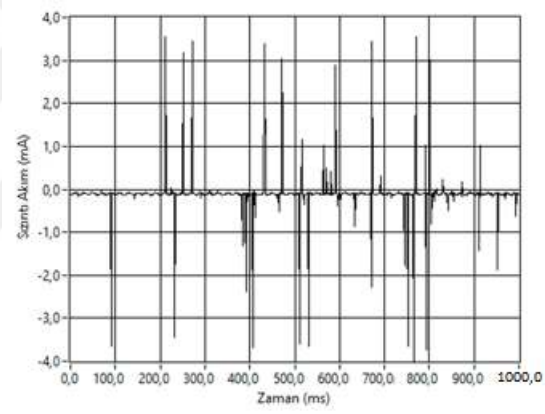


Şekil 4.26. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

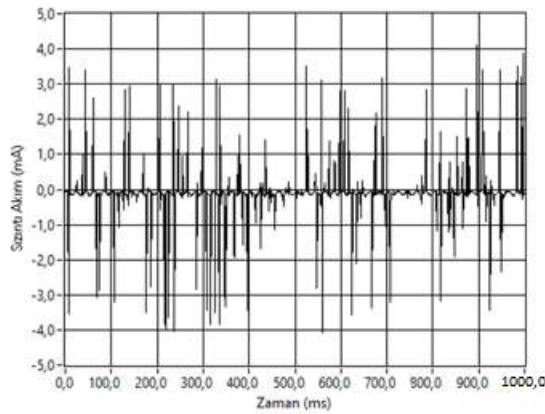


Şekil 4.27. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolator için 20 kV’da sızıntı akıları

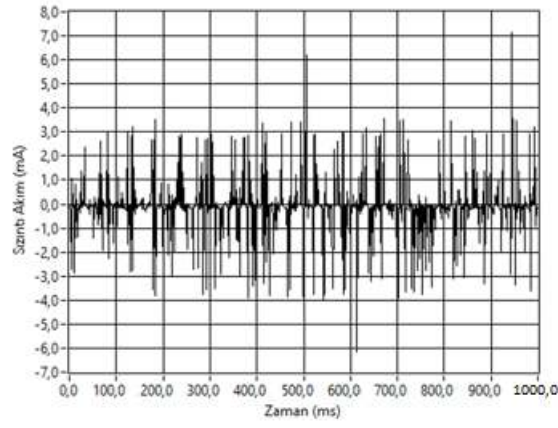
İzolator askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.28 - 4.31’de verilmiştir.



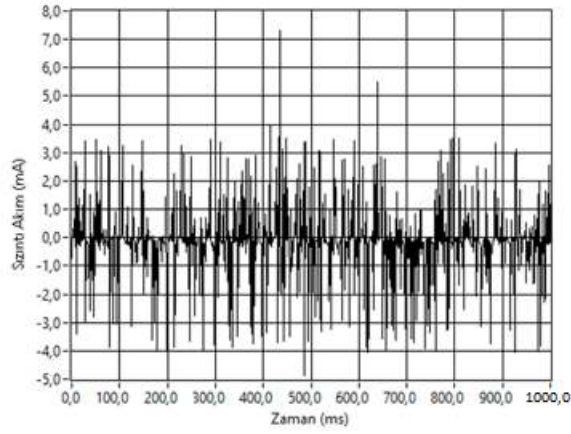
Şekil 4.28. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolator için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.29. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolator için 10 kV’da sızıntı akımları

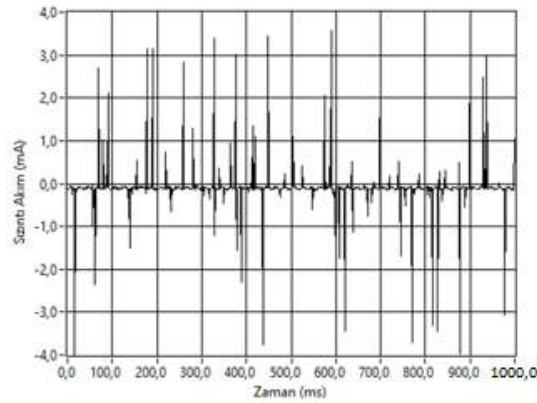


Şekil 4.30. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

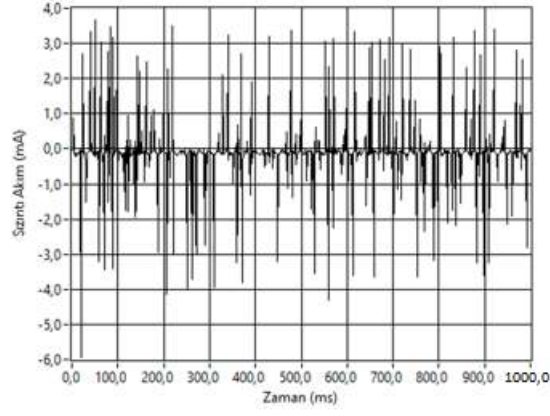


Şekil 4.31. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20kV’da sızıntı akımları

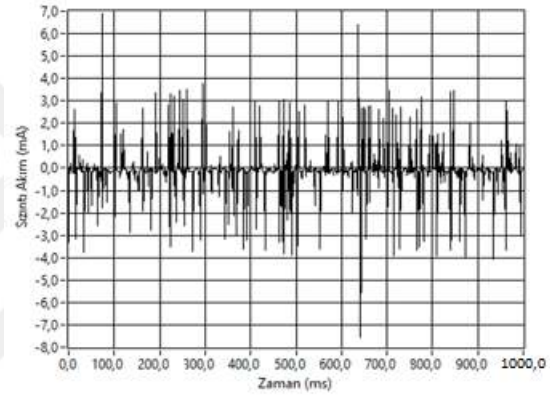
İzolatör askıda 30 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.32 - 4.35’te verilmiştir.



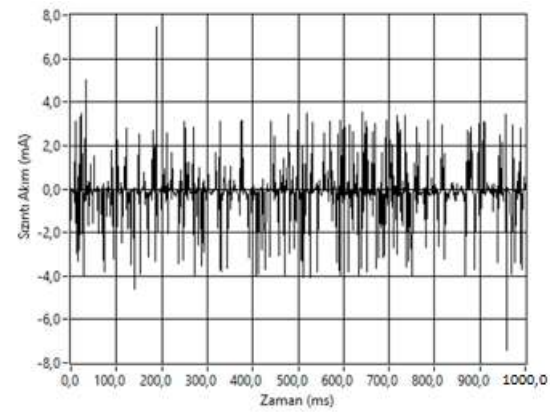
Şekil 4.32. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.33. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

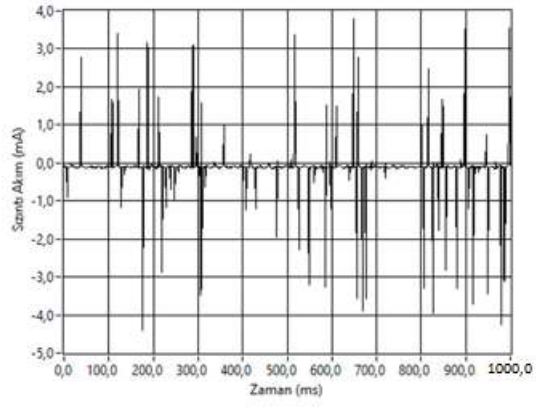


Şekil 4.34. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

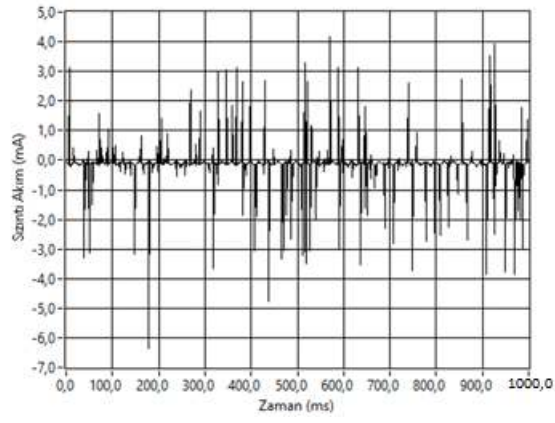


Şekil 4.35. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

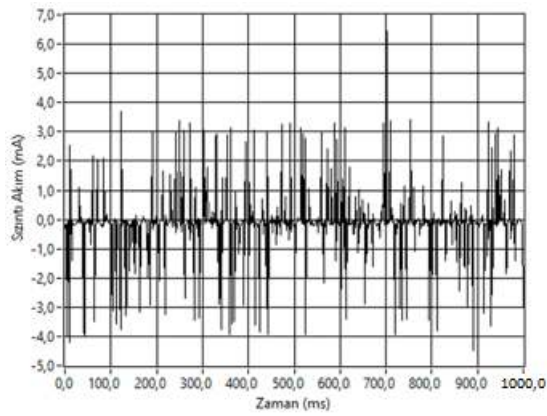
İzolatör askıda 45 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.36 - 4.39’da verilmiştir.



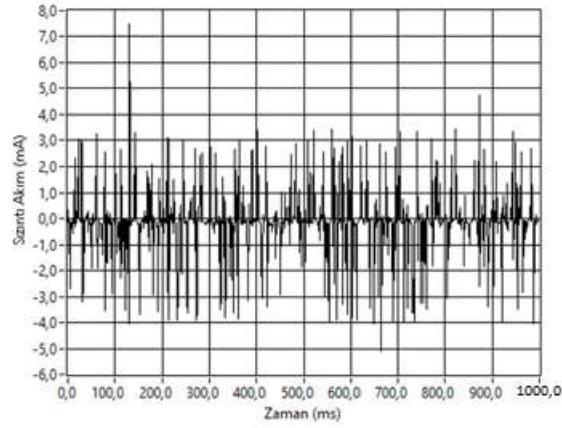
Şekil 4.36. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.37. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.38. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.39. Buzlu tek elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Tek elemanlı porselen zincir izolatörlerde buzlanma durumunda izolatöre beklemeden gerilim uygulandığında sızıntı akımı kısmen hafif buzlanmaya benzerlik gösterse de buzsuz duruma göre akım sıklığı artmaktadır. Bu durum denklem 2.1’den de görüleceği üzere 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 genliği yaklaşık olarak 8 mA’i bulmaktadır. Bekleme süresi arttıkça buzun erimesi ile beraber sızıntı akımı sıklığı genel olarak artmaktadır.

4.4. Cam İzolatörde Buzlanma

Cam izolatörde buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için sızıntı akımları incelenmiştir.

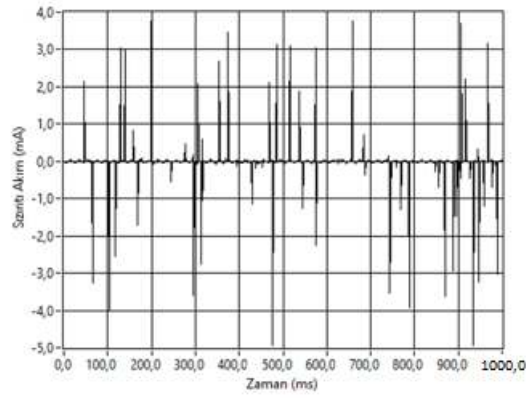
4.4.1. Buzsuz Durum

İzolatör buzlandırılmadan Şekil 4.40’daki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

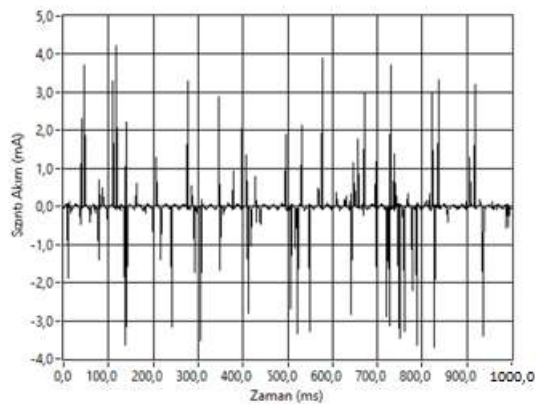


Şekil 4.40. Buzsuz cam izolatör

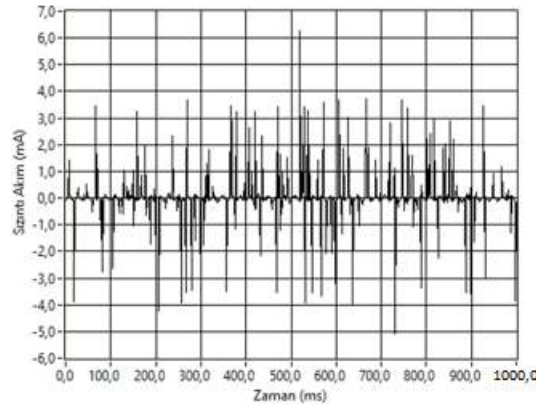
Şekil 4.41 - 4.44'te, buzsu cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



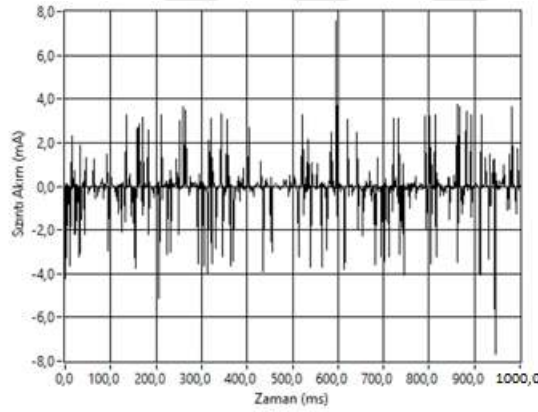
Şekil 4.41. Buzsuz cam izolatörün 5 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.42. Buzsuz cam izolatörün 10 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.43. Buzsuz cam izolatörün 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.44. Buzsuz cam izolatörün 20 kV’da sızıntı akımları

Cam izolatörlerde, buzlu durumda, sızıntı akımı, uygulanan gerilimin genliğinin artmasıyla 4 ile 8 mA arasında değişiklik göstermektedir. Denklem 3.1’den görüleceği üzere uygulanan gerilimin artması akımın tepe değerini arttırmaktadır. Tek elemanlı porselen izolatörün buzlu durumuna kıyasla değişiklik daha fazladır. Uygulanan gerilimin genlik değeri arttıkça sızıntı akımı da artmaktadır.

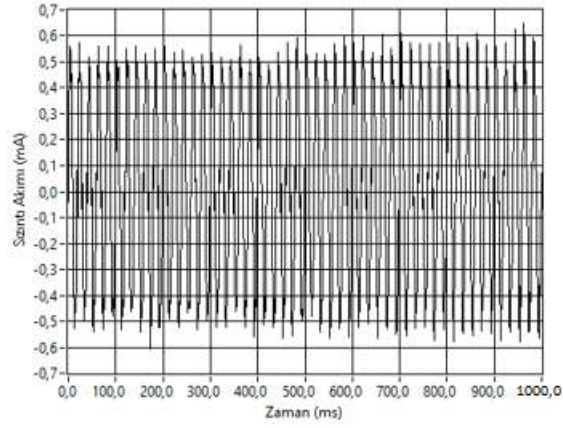
4.4.2. Hafif Buzlanma

İzolatör hafif buzlandırılarak Şekil 4.45’teki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

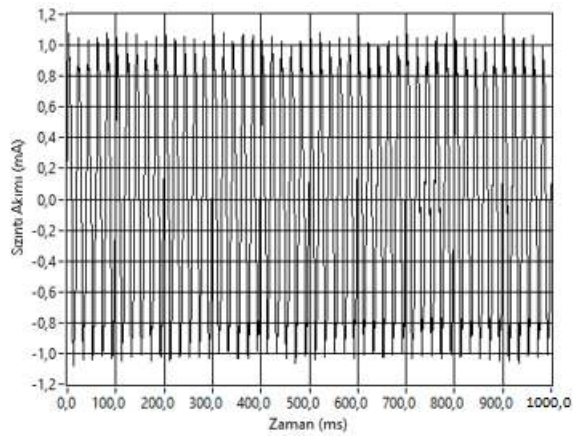


Şekil 4.45. Hafif buzlu cam izolatör

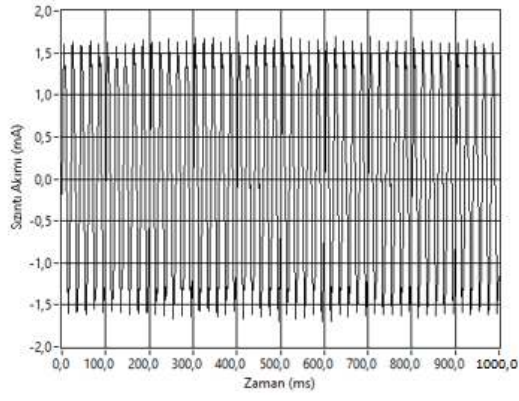
Şekil 4.46 - 4.49’da, hafif buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



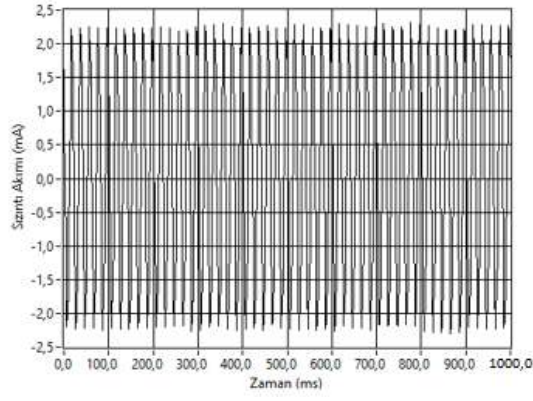
Şekil 4.46. Hafif buzlu cam izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.47. Hafif buzlu cam izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

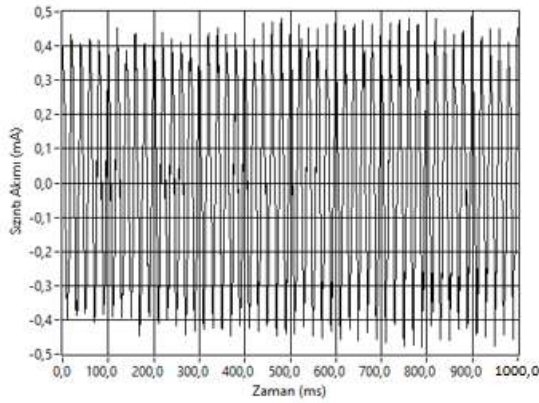


Şekil 4.48. Hafif buzlu cam izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları

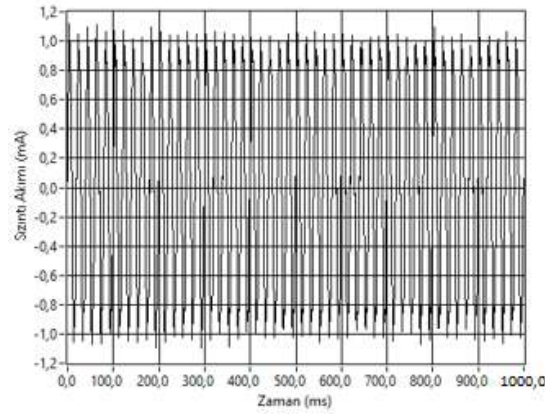


Şekil 4.49. Hafif buzlu cam izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları

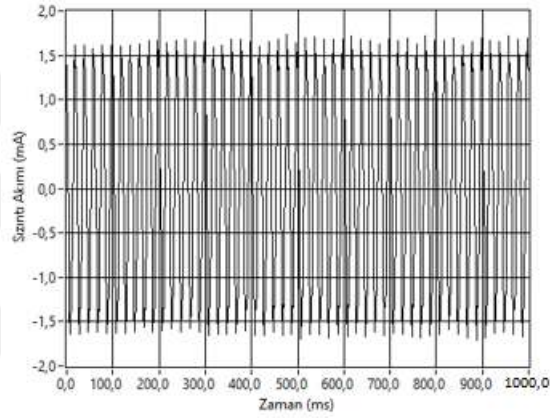
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.50 - 4.53'te verilmiştir.



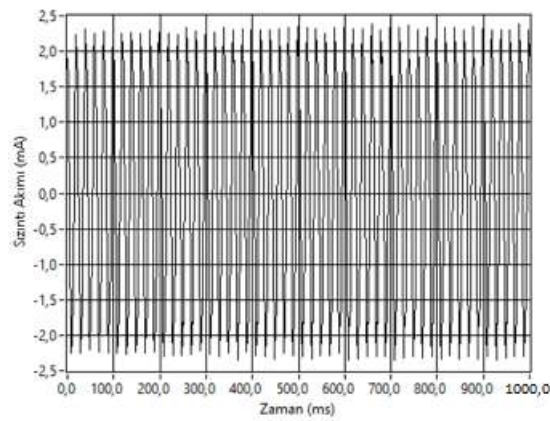
Şekil 4.50. Hafif buzlu cam izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.51. Hafif buzlu cam izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.52. Hafif buzlu cam izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.53. Hafif buzlu cam izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Cam izolatörde, aynı gerilim değerinde, hafif buzlanma durumunda buzsuz duruma göre izolatör yüzeyi üzerindeki sızıntı akımlarının sıklığının arttığı gözlenmiştir. Bu durum, denklem

3.15'te yer alan buzun direncinin buz tabakasının kalınlığı ile ters orantılı olmasına bağlanabilir. Buz tabakasının kalınlığının artması direnci azaltacak, direncin azalması ile birlikte sızıntı akımı da artacaktır.

Hafif buzlanma durumunda, 15 dakika sonra gerilim uygulandığında, ilk duruma göre sızıntı akımlarının genliğinde tek elemanlı porselen zincir izolatörün hafif buzlanma durumuna göre çok büyük farklar yoktur. Tek elemanlı porselen zincir izolatörün hafif buzlu durumuyla kıyaslandığında cam izolatörün sızıntı akımlarının sıklığının daha fazla olduğu belirlenmiştir.

4.4.3. Buzlanma

İzolatör buzlandırılarak Şekil 4.54'teki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.



Şekil 4.54. Buzlu cam izolatör

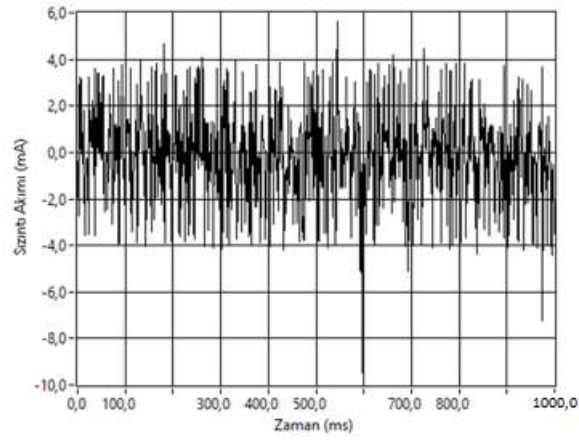
Buzlandırılan cam izolatör için, zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir

Tablo 4.4. Cam izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

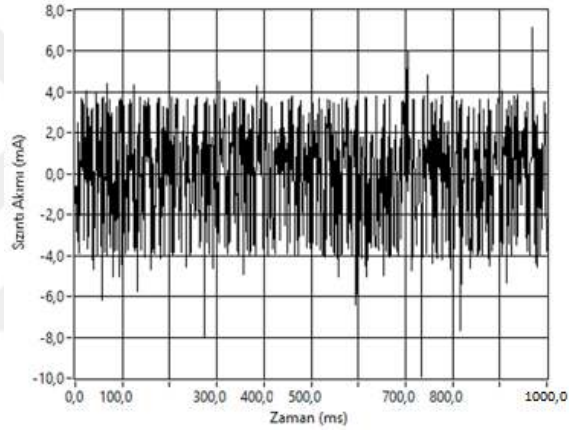
Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	41.5	21.5
15	46.4	21.3

Cam izolatörün buzlanma durumunda 15'er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile birlikte ortamın nem değeri yükselmiş, sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

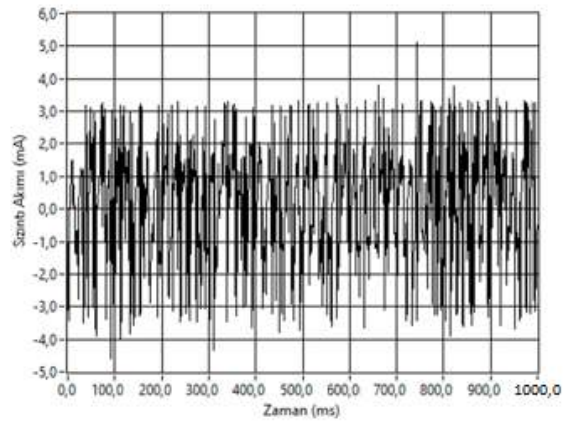
Şekil 4.55 - 4.58'de, buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



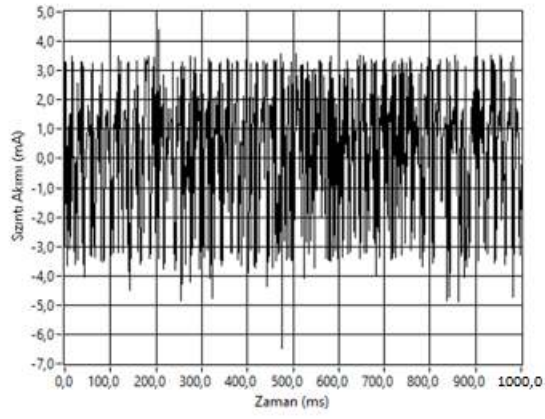
Şekil 4.55. Buzlu cam izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.56. Buzlu cam izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

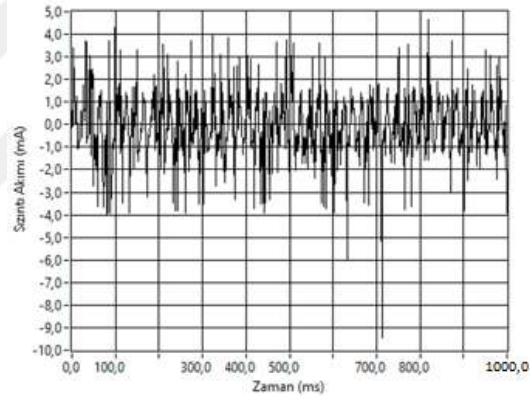


Şekil 4.57. Buzlu cam izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

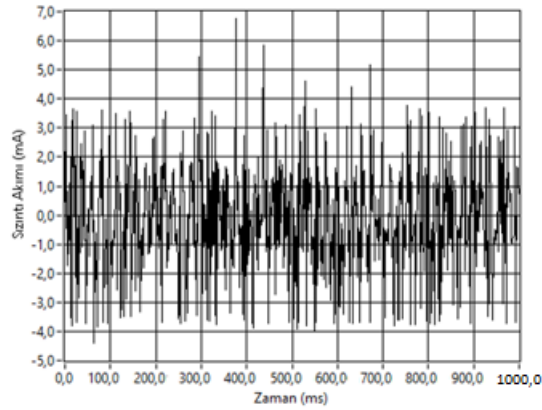


Şekil 4.58. Buzlu cam izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

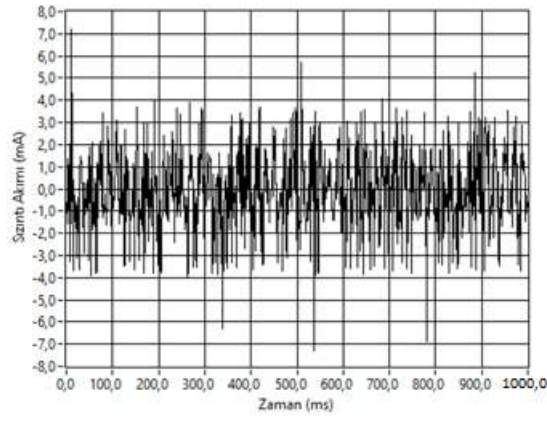
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.59 - 4.63’te verilmiştir.



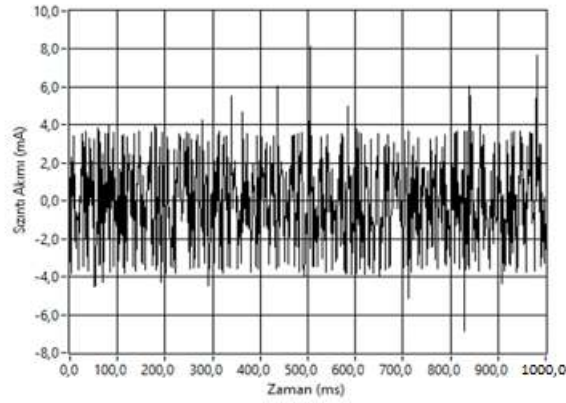
Şekil 4.59. Buzlu cam izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.60. Buzlu cam izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



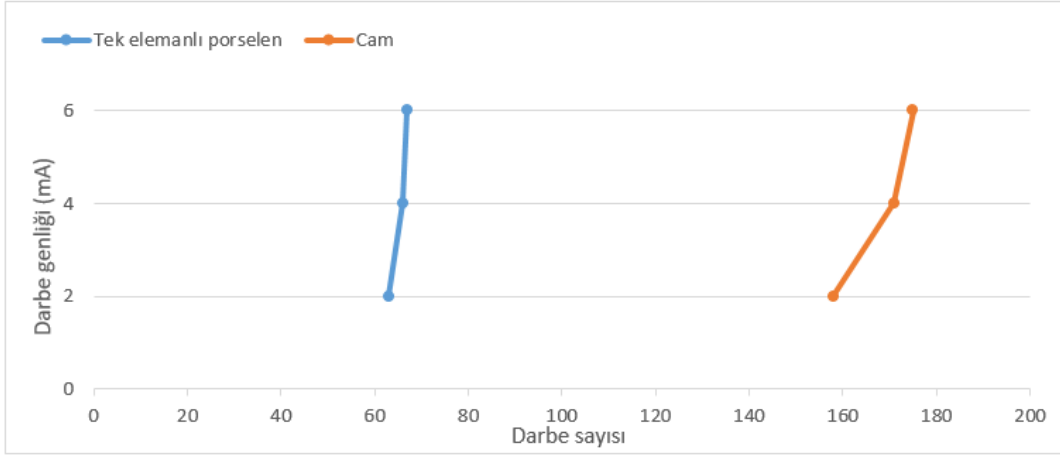
Şekil 4.61. Buzlu cam izolator için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.62. Buzlu cam izolator için 20 kV’da sızıntı akımları

Cam izolatörde buzlanma durumunda, izolatöre beklemeden ve 15 dakika beklendikten sonra gerilim uygulandığında, yüzeysel sızıntı akımı buzsuz durum ve hafif buzlanmaya göre daha belirgindir. Buzlanma durumunda 20 kV’da sızıntı akımı genliği yaklaşık olarak 8 mA’i bulmaktadır. Tek elemanlı porselen zincir izolatöre göre buzlanma durumundaki sızıntı akımı daha belirgindir.

Tek elemanlı porselen izolator ve cam izolatorün 20 kV’da, saniyedeki darbe sayılarının karşılaştırılması Şekil 4.63’te yer almaktadır.



Şekil 4.63. Tek elemanlı porselen izolator ve cam izolatorün darbe sayılarının karşılaştırılması

Tek elemanlı porselen izolatorde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA’de 63, 4 mA’de 66 ve 6 mA’de 67 olurken cam izolatorde, saniyedeki darbe sayısı, 2 mA’de 158, 4 mA’de 171 ve 6 mA’de 175 olmuştur. Cam izolatorde, tek elemanlı porselen izolatore göre daha fazla darbe oluşmuştur.

4.5. İki Elemanlı Porselen Zincir İzolatör

İki elemanlı porselen zincir izolatorde buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için sızıntı akımları incelenmiştir.

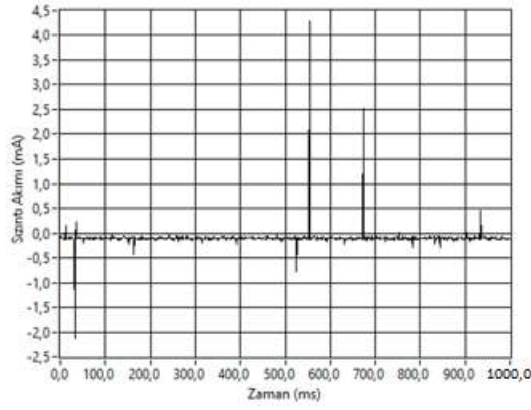
4.5.1. Buzsuz Durum

İzolator buzlandırılmadan Şekil 4.64’teki gibi askıya alınmıştır. İzolatore gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

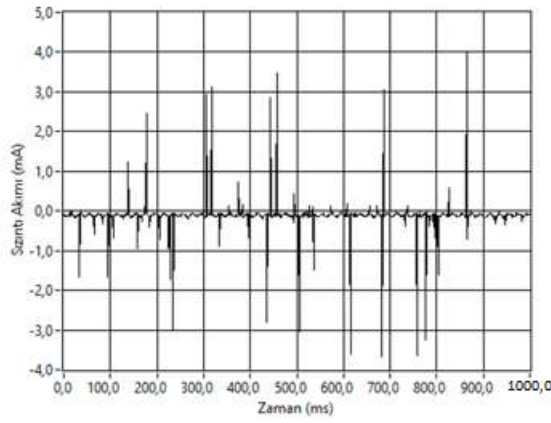


Şekil 4.64. Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolator

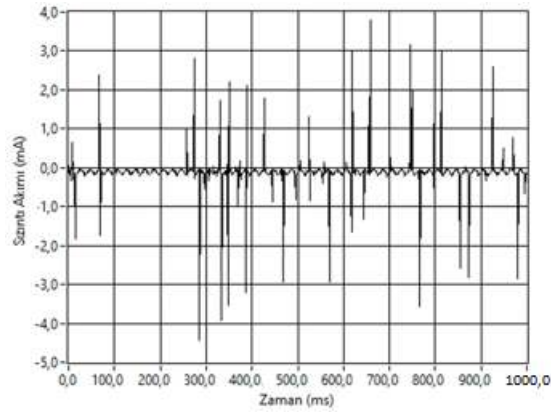
Şekil 4.65 - 4.68’de, buzsuz iki elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



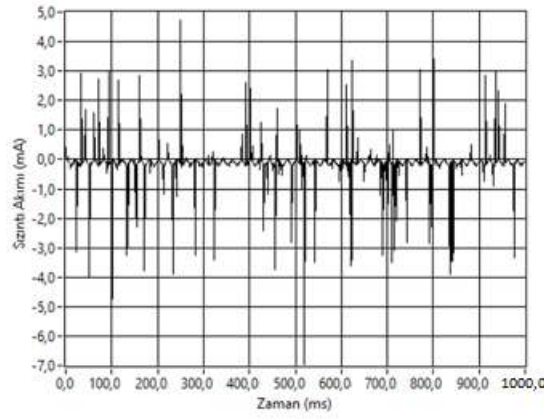
Şekil 4.65. Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.66. Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.67. Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.68. Buzsuz iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

İki elemanlı porselen zincir izolatörde buzlu durumda, sızıntı akımı 5 mA’i geçmezken uygulanan gerilim değeri arttıkça sızıntı akımlarının sıklığının arttığı gözlenmiştir. Tek elemanlı porselen zincir izolatörle kıyaslandığında sızıntı akımının sıklığının daha az olduğu belirlenmiştir.

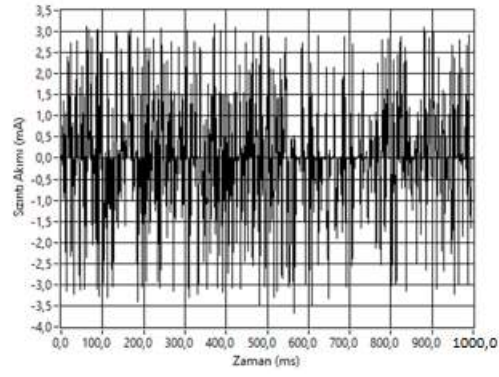
4.5.2. Hafif Buzlanma

İzolatör hafif buzlandırılarak Şekil 4.69’daki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

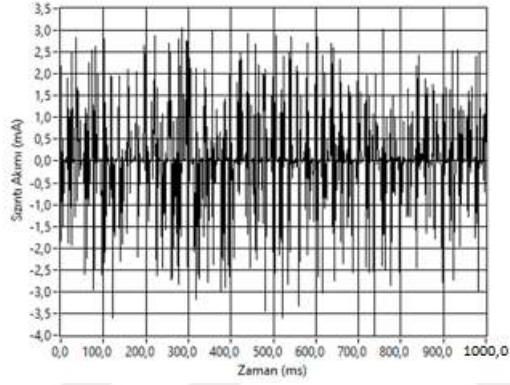


Şekil 4.69. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör

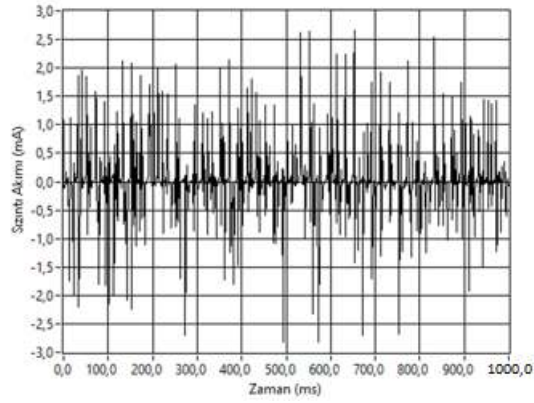
Şekil 4.70 - 4.73’te, hafif buzlandırılmış iki elemanlı porselen zincir izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



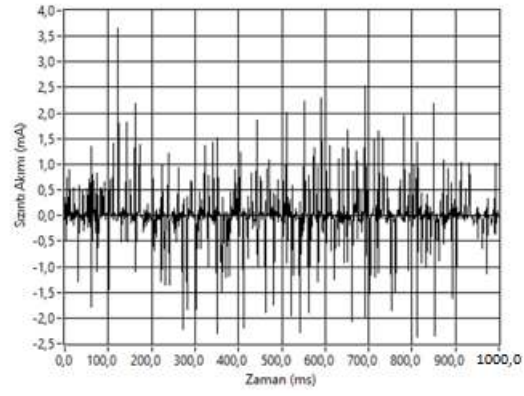
Şekil 4.70. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.71. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

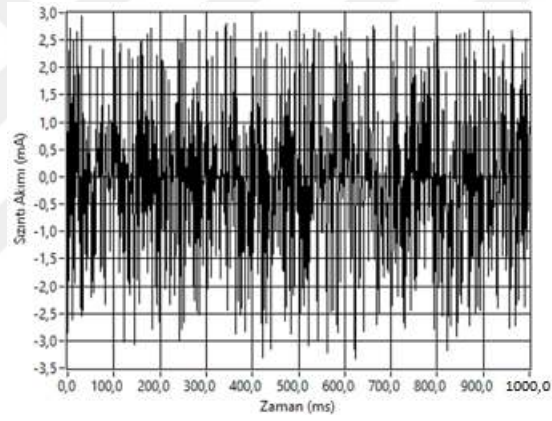


Şekil 4.72. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

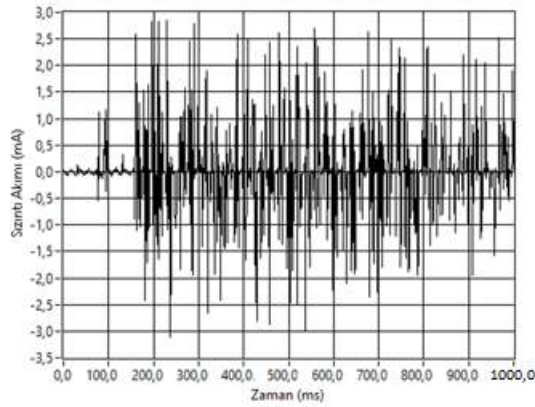


Şekil 4.73. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

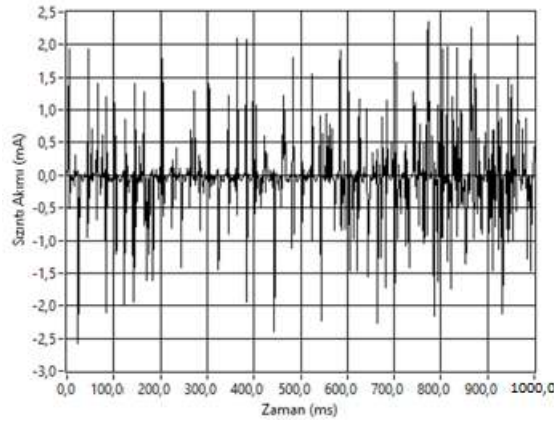
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.74 - 4.77’de verilmiştir.



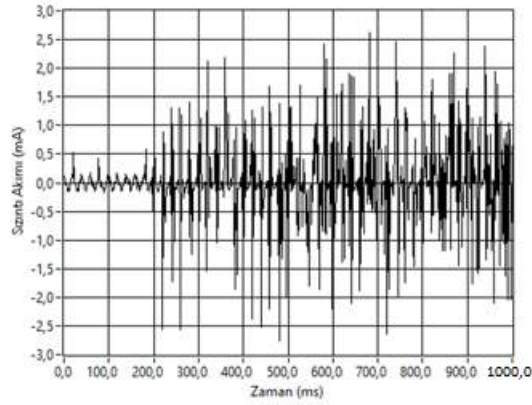
Şekil 4.74. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.75. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.76. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.77. Hafif buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV'da sızıntı akımları

İki elemanlı porselen zincir izolatörde, aynı gerilim değerinde, hafif buzlanma durumunda buzsuz duruma göre izolatör yüzeyi üzerindeki sızıntı akımlarının sıklığının arttığı gözlenmiştir. Hafif buzlanma durumunda 15 dakika sonra gerilim uygulandığında, ilk duruma göre sızıntı akımlarının sıklığının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, hafif buzlanma durumunda, iki elemanlı porselen zincir izolatörde, sızıntı akımlarının genlik değerlerinin tek elemanlı porselen zincir izolatöre göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

4.5.3. Buzlanma

İzolatör buzlandırılarak Şekil 4.78'deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.



Şekil 4.78. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör

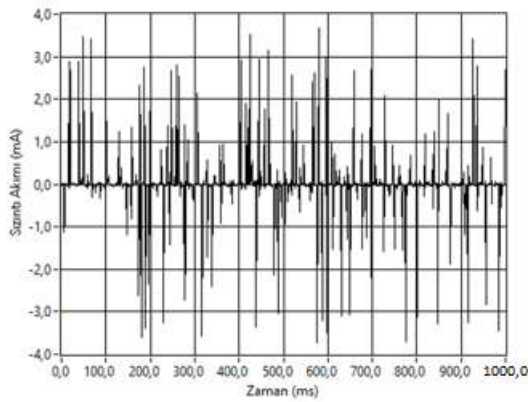
Buzlandırılan iki elemanlı porselen izolatör için zamana bağlı olarak ölçülen ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. İki elemanlı porselen izolatör için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

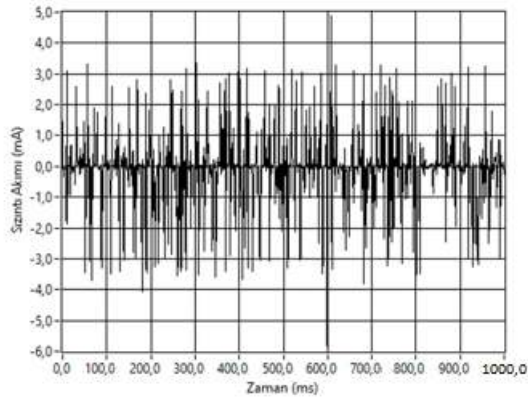
Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	41.8	24.8
15	43.8	23.6

İki elemanlı porselen zincir izolatörün buzlanma durumunda 15’er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile beraber ortamın nem değeri yükselmiş sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

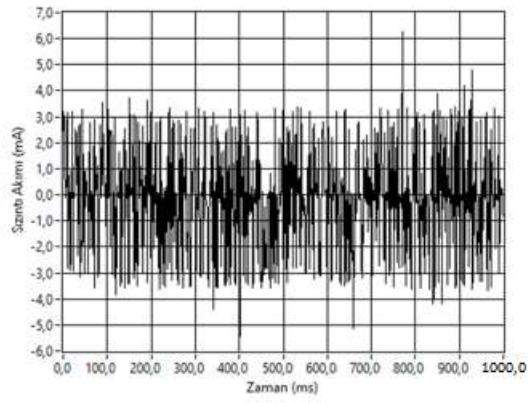
Şekil 4.79 - 4.82’de, buzlandırılmış iki elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



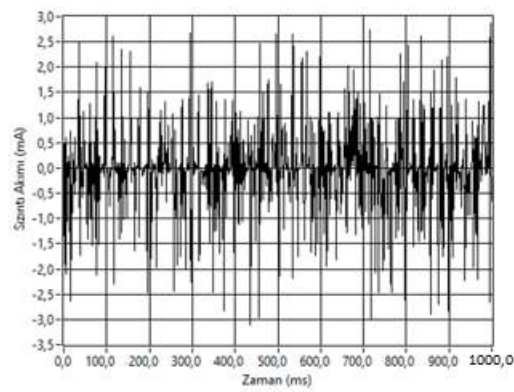
Şekil 4.79. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.80. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

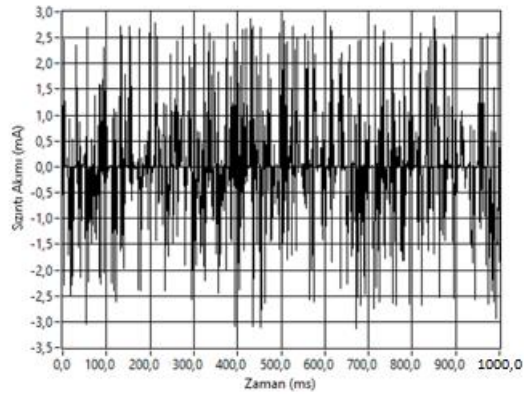


Şekil 4.81. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

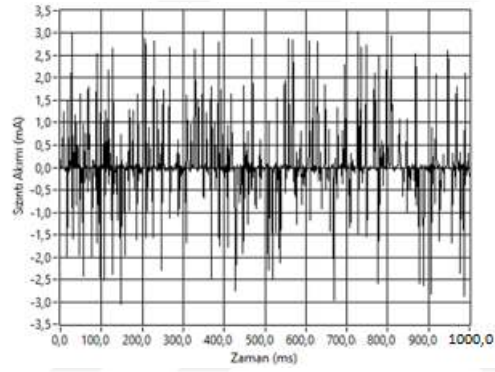


Şekil 4.82. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

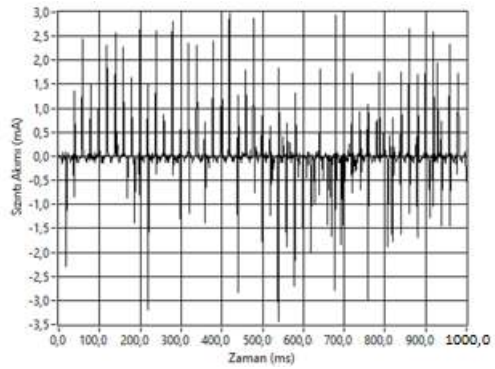
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.83 - 4.86’da verilmiştir.



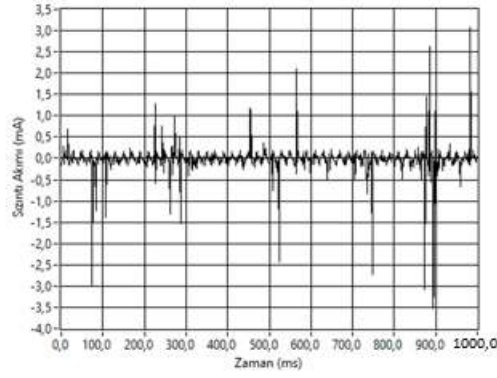
Şekil 4.83. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.84. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.85. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.86. Buzlu iki elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

İki elemanlı porselen zincir izolatörde buzlanma durumunda, izolatöre beklemeden gerilim uygulandığında sızıntı akımı hafif buzlanmaya göre benzerlik gösterse de buzsuz duruma göre akım sıklığı artmaktadır. Buzlanma durumunda sızıntı akımının genliği yaklaşık olarak 3 mA’i bulmaktadır. Bu değer tek elemanlı porselen zincir izolatöre kıyasla daha azdır.

4.6. Üç Elemanlı Porselen Zincir İzolatör

Üç elemanlı porselen zincir izolatörde buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için sızıntı akımları incelenmiştir.

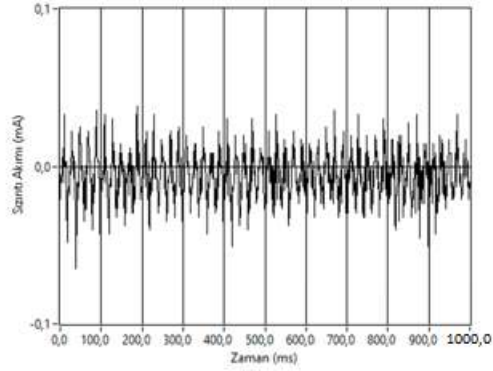
4.6.1. Buzsuz Durum

İzolatör buzlandırılmadan Şekil 4.87’deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

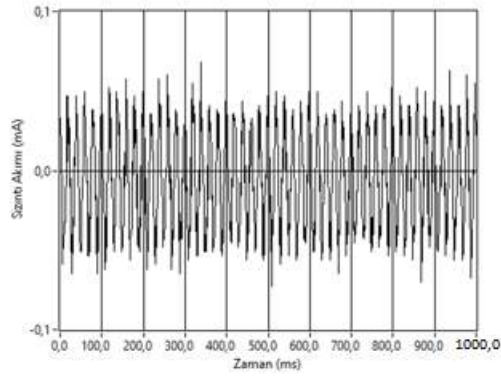


Şekil 4.87. Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör

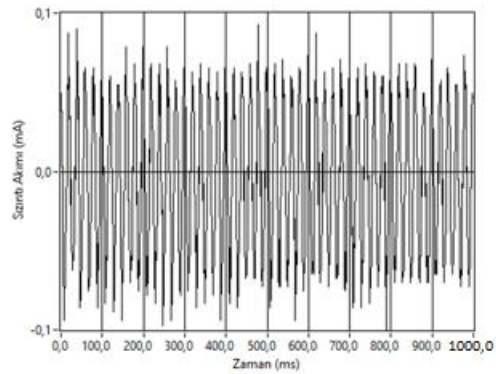
Şekil 4.88 - 4.91’de, buzsuz üç elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



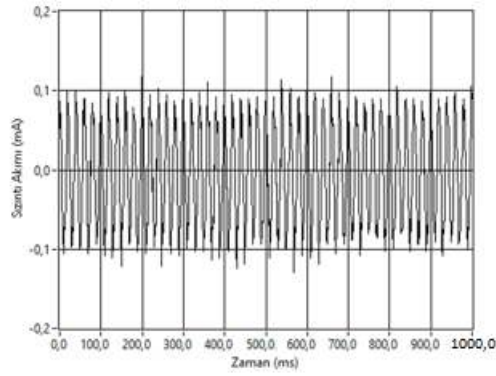
Şekil 4.88. Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.89. Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.90. Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.91. Buzsuz üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Üç elemanlı porselen zincir izolatörde, buzlu durumda sızıntı akımı 0.1 mA’i pek geçmemektedir. Tek ve iki elemanlı porselen zincir izolatörle kıyaslandığında sızıntı akımı genliğinin en az olduğu değerler, üç elemanlı porselen zincir izolatör için elde edilen değerlerdir.

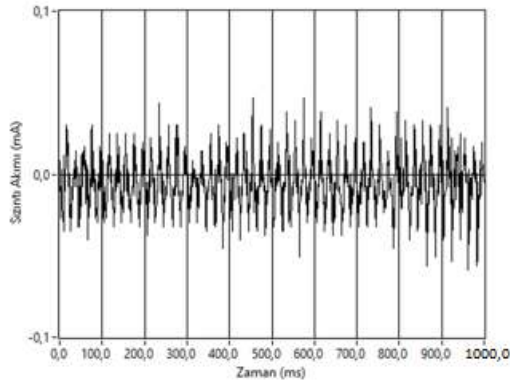
4.6.2. Hafif Buzlanma

İzolatör hafif buzlandırılarak Şekil 4.92’deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

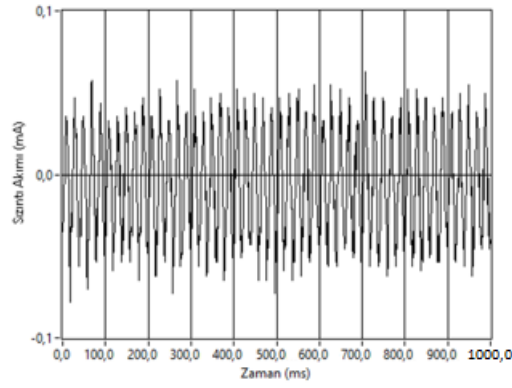


Şekil 4.92. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör

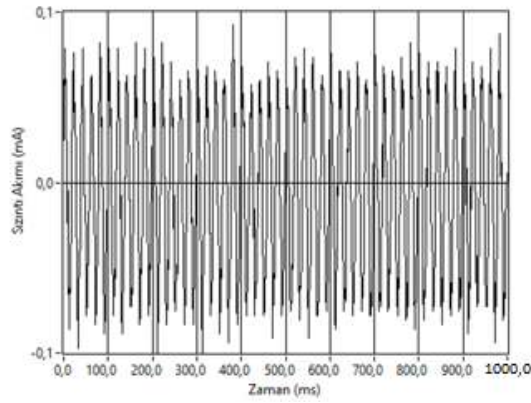
Şekil 4.93 - 4.96’da, hafif buzlandırılmış üç elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



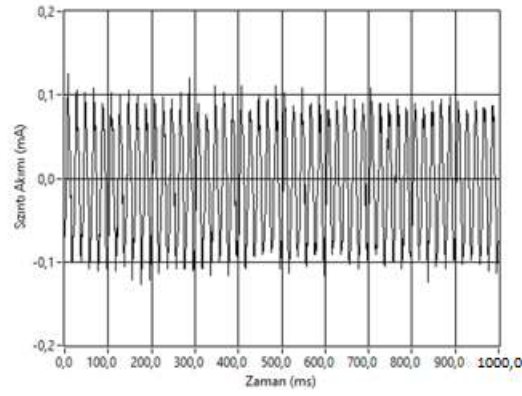
Şekil 4.93. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.94. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

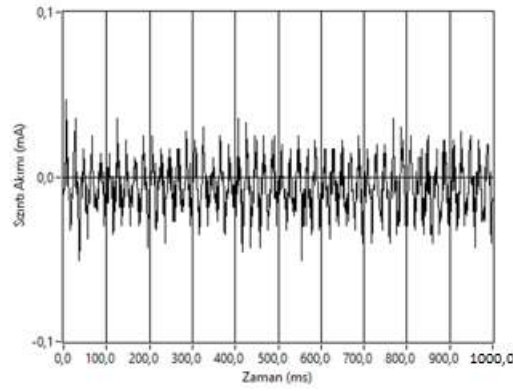


Şekil 4.95. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

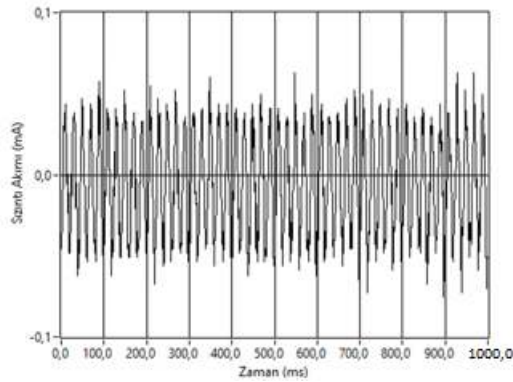


Şekil 4.96. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

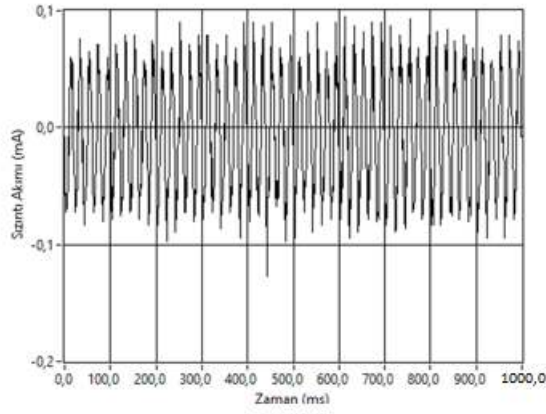
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.97 - 4.100’de verilmiştir.



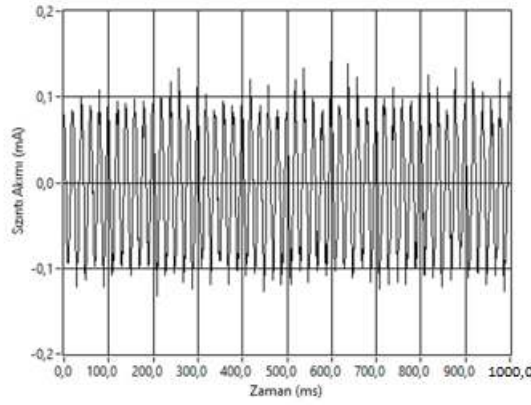
Şekil 4.97. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.98. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.99. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.100. Hafif buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Üç elemanlı porselen izolatörlerde, hafif buzlanma durumundaki sızıntı akımları hemen hemen buzsuz durumdaki sızıntı akımları ile aynıdır. Bu durum, eleman sayısının dolayısıyla izolatörün kaçak sızma yolu uzunluğunun artmasının izolatör sızıntı akımları üzerinde etkili olduğunu göstermektedir.

4.6.3. Buzlanma

İzolatör buzlandırılarak Şekil 4.101’deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.



Şekil 4.101. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolator

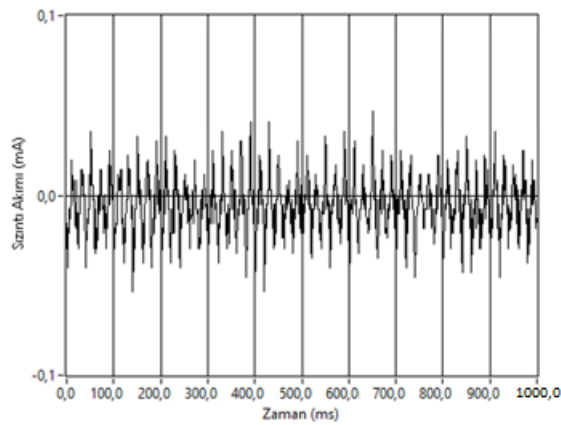
Buzlandırılan izolator için zamana bağlı olarak ölçülen ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Üç elemanlı porselen izolator için zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

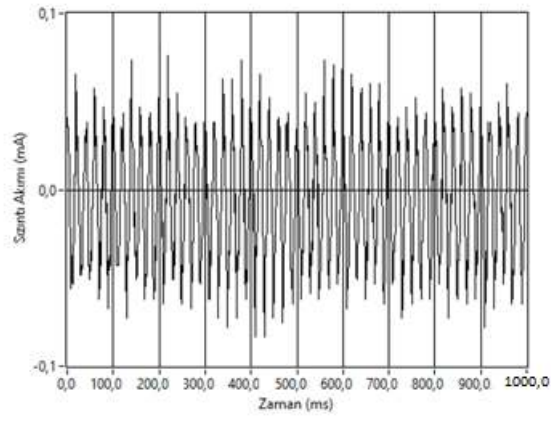
Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	39.4	25.7
15	45	25

Üç elemanlı porselen zincir izolatorün buzlanma durumunda, 15’er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile birlikte ortamın nem değeri yükselmiş, sıcaklık değeri ise kısmen düşmüştür.

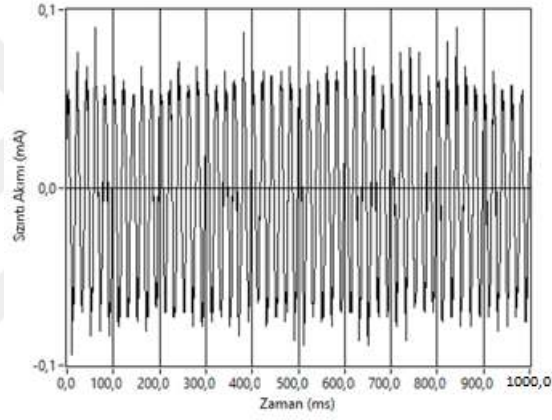
Şekil 4.102 - 4.105’te, buzlandırılmış üç elemanlı porselen zincir izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



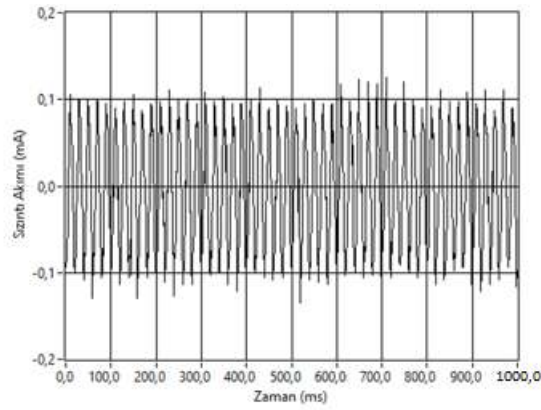
Şekil 4.102. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolator için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.103. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

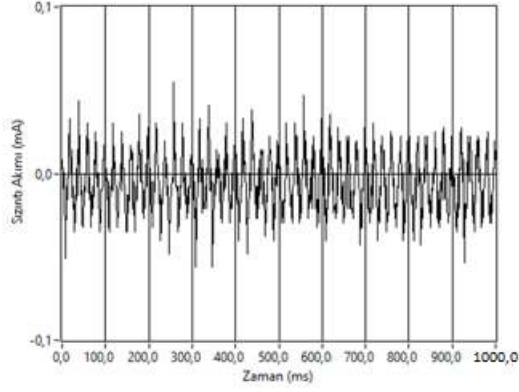


Şekil 4.104. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

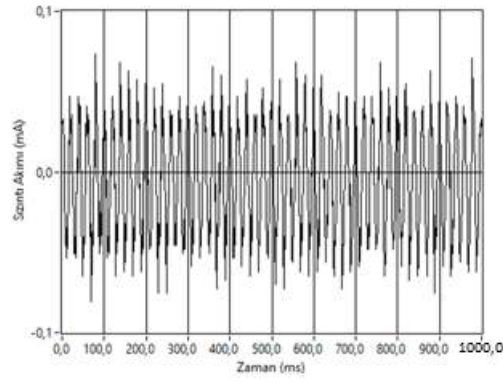


Şekil 4.105. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

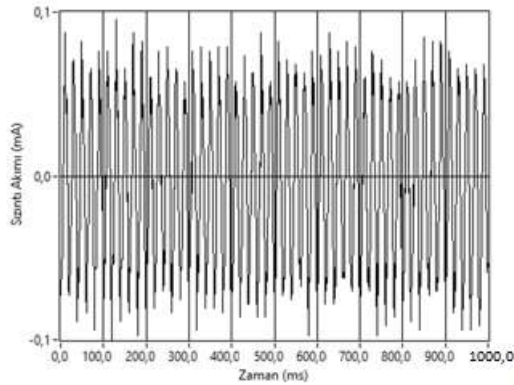
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.106 - 4.109’da verilmiştir.



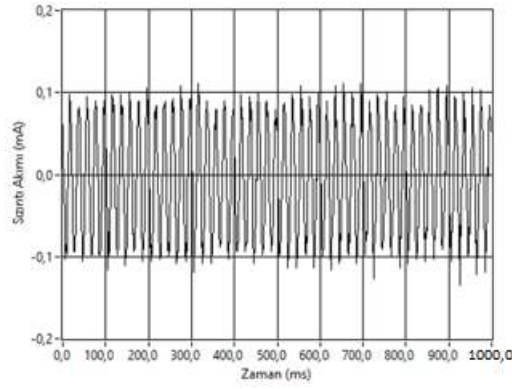
Şekil 4.106. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.107. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.108. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.109. Buzlu üç elemanlı porselen zincir izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Üç elemanlı porselen zincir izolatörde buzlanma durumunda sızıntı akımı, 5 kV’da yok denecek kadar az olmasına rağmen, gerilim değeri arttıkça sızıntı akımının sıklığı artmakta, ancak genliği çok büyümektedir. Üç elemanlı porselen zincir izolatörde sızıntı akımları, tek ve iki elemanlı porselen zincir izolatöre göre oldukça azalmaktadır..

4.7. Silikon İzolatörde Buzlanma

Silikon izolatörde buzsuz, hafif buzlanma ve buzlanma durumları için sızıntı akımları incelenmiştir.

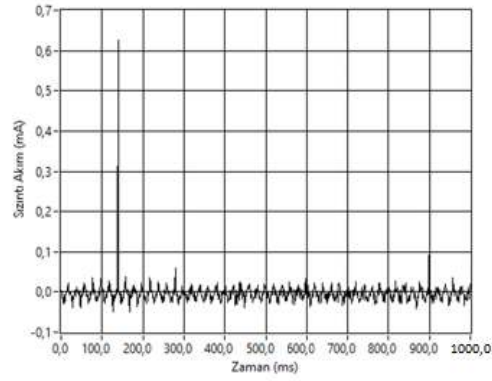
4.7.1. Buzsuz Durum

İzolatör buzlandırılmadan şekil 4.110’deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

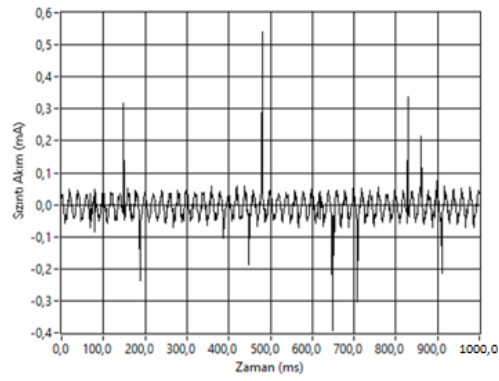


Şekil 4.110. Buzsuz silikon izolatör

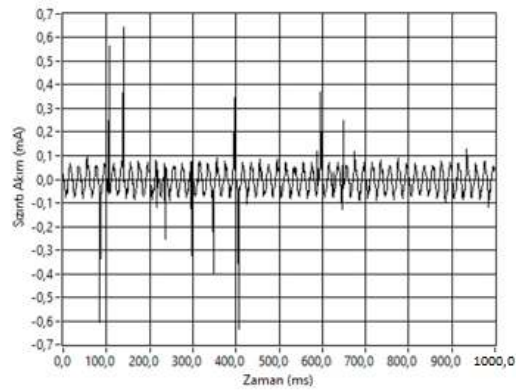
Şekil 4.111 - 4.114'te, buzsuz silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



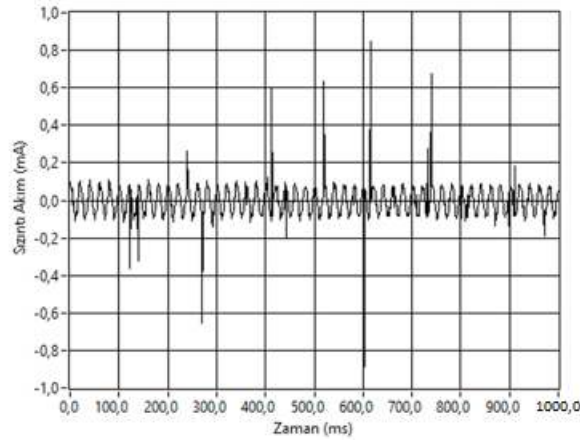
Şekil 4.111. Buzsuz silikon izolatör için 5 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.112. Buzsuz silikon izolatör için 10 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.113. Buzsuz silikon izolatör için 15 kV'da sızıntı akımları



Şekil 4.114. Buzsuz silikon izolator için 20 kV’da sızıntı akımı

Silikon izolatorlerde buzlu durumda sızıntı akımı 1 mA’i geçmemiştir. Tek elemanlı porselen zincir izolator ve cam izolatorün buzlu durumuna kıyasla sızıntı akımı oldukça azdır. Bunun nedeni, silikon izolatorün kaçak sızma yolu uzunluğunun porselen ve cam izolatöre oranla oldukça fazla olmasıdır.

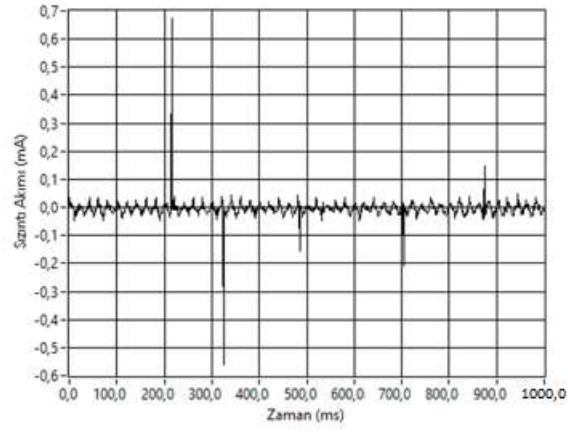
4.7.2. Hafif Buzlanma

İzolator hafif buzlandırılarak Şekil 4.115’teki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.

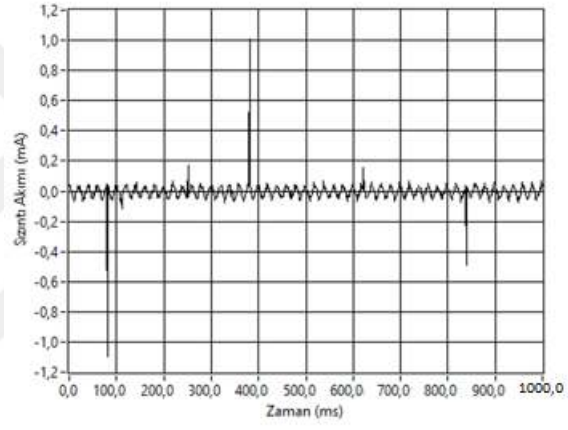


Şekil 4.115. Hafif buzlu silikon izolator

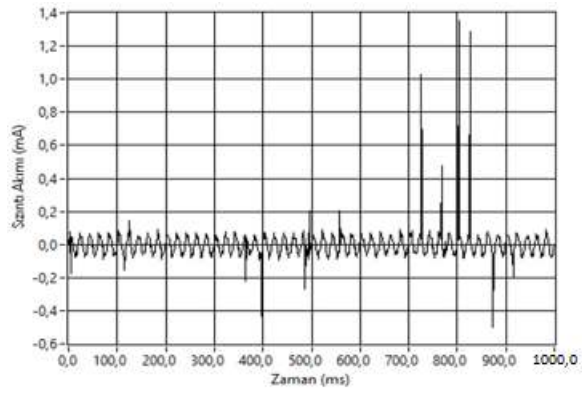
Şekil 4.116 - 4.119’da, hafif buzlandırılmış silikon izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



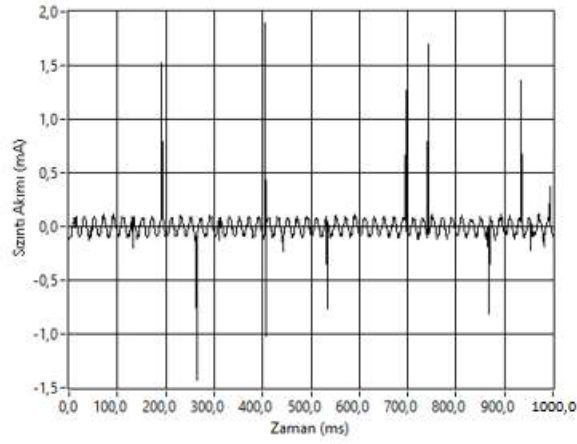
Şekil 4.116. Hafif buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.117. Hafif buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

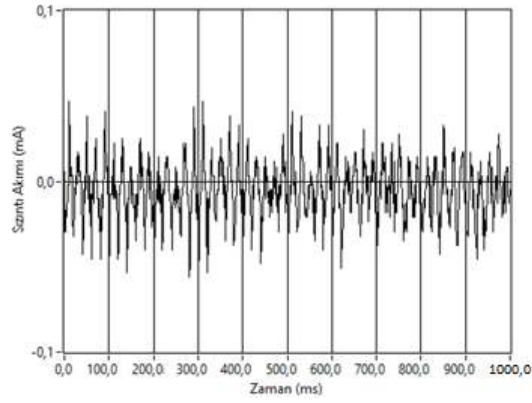


Şekil 4.118. Hafif buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

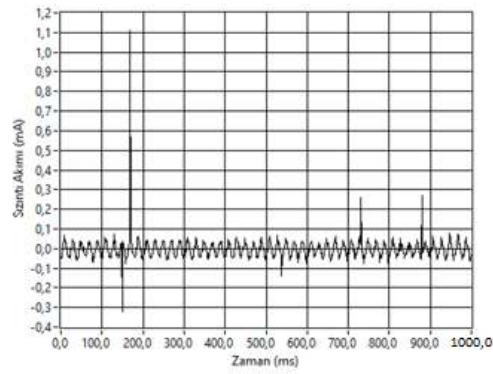


Şekil 4.119. Hafif buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

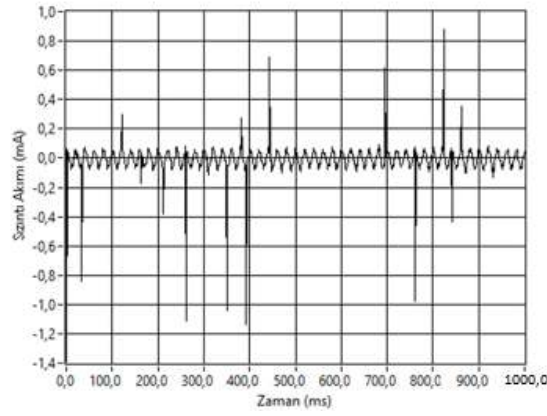
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.120 - 4.123’te verilmiştir.



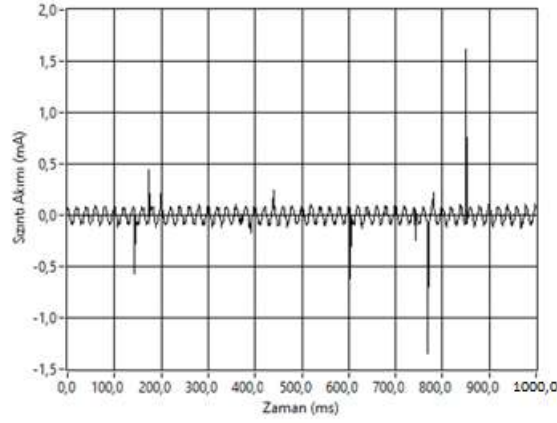
Şekil 4.120. Hafif buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.121. Hafif buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.122. Hafif buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.123. Hafif buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Silikon izolatörde hafif buzlanma durumunda sızıntı akımı 2 mA’i geçmemiştir. Hafif buzlu durumda sızıntı akımının genliğinin buzsuz duruma göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Tek elemanlı porselen zincir izolatör ve cam izolatörün hafif buzlu durumuna kıyasla sızıntı akımı oldukça azdır.

4.7.3. Buzlanma

İzolatör buzlandırılarak Şekil 4.124’deki gibi askıya alınmıştır. İzolatöre gerilim uygulanıp sızıntı akımları elde edilmiştir.



Şekil 4.124. Buzlu silikon izolatör

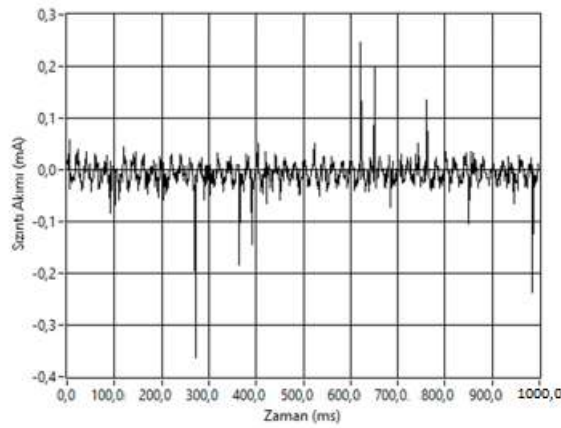
Tablo 4.7. Silikon izolatörün zamana bağlı olarak ortam nem ve sıcaklık değerleri

Zaman (dk)	Nem (%)	Sıcaklık (C)
0	43	22.8
15	45.7	22.7
30	48	22.5

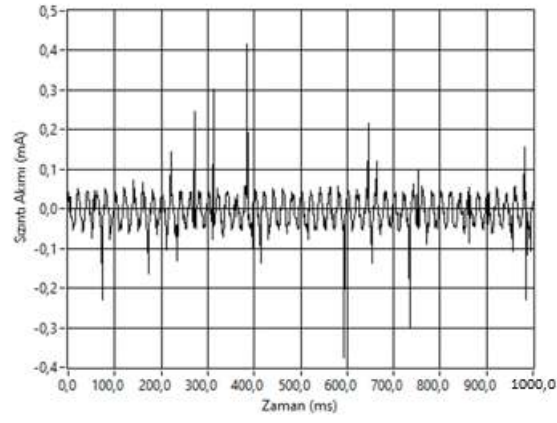
Buzlandırılan silikon izolatör için zamana bağlı olarak ölçülen ortam nem ve sıcaklık değerleri Tablo 4.7’de verilmiştir.

Silikon izolatörün buzlanma durumunda 15’er dakikalık periyotlarda buzun erimesi ile beraber ortamın nem değeri yükselmiş, sıcaklık değeri kısmen düşmüştür.

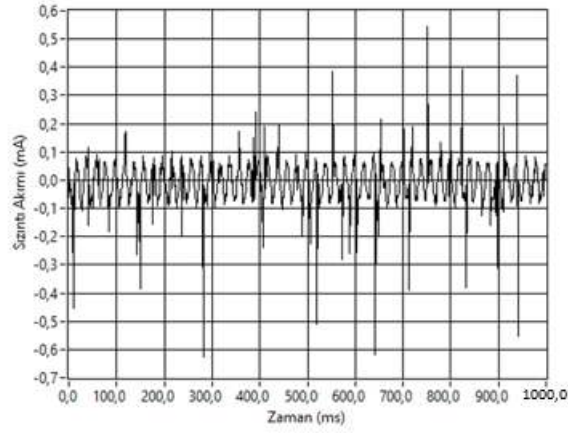
Şekil 4.125 - 4.128’de, buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



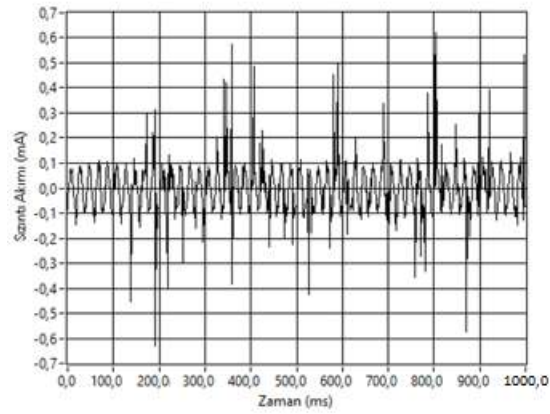
Şekil 4.125. Buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.126. Buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

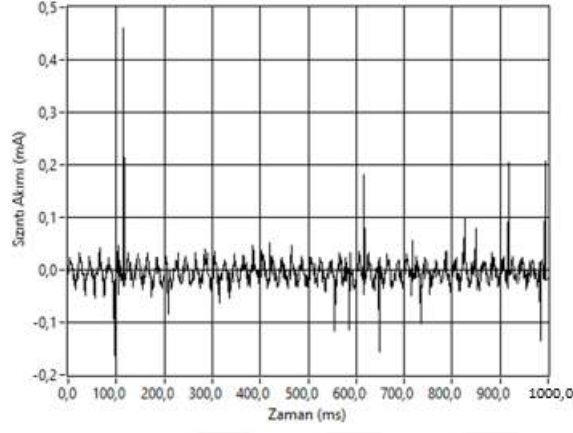


Şekil 4.127. Buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

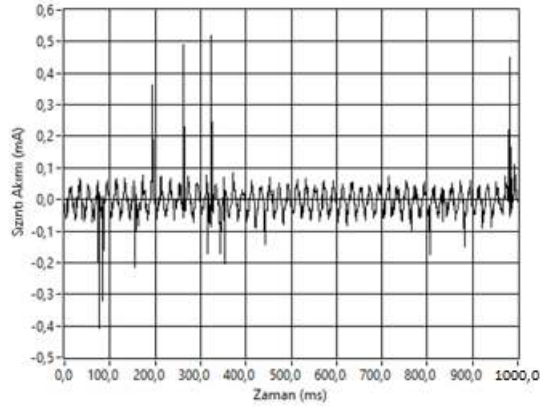


Şekil 4.128. Buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

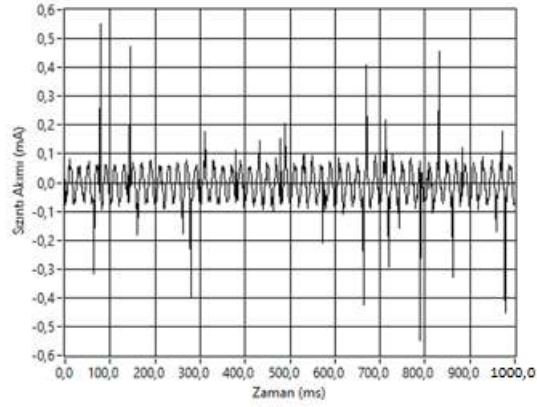
İzolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.129 - 4.132’de verilmiştir.



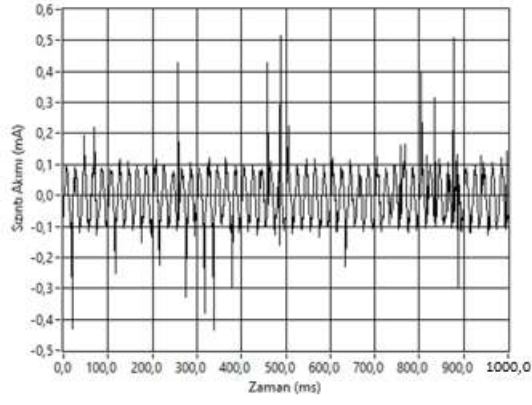
Şekil 4.129. Buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.130. Buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları

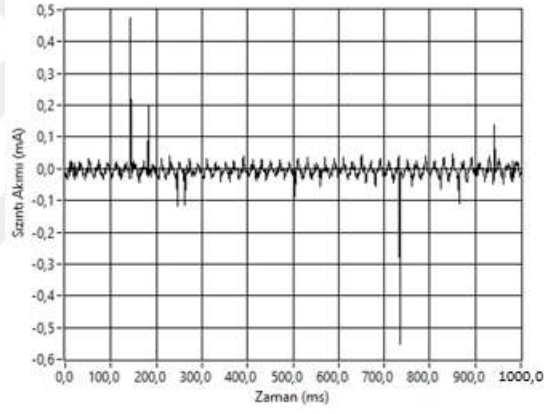


Şekil 4.131. Buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları

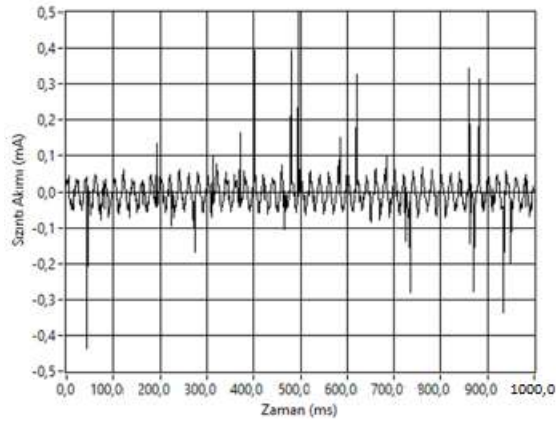


Şekil 4.132. Buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

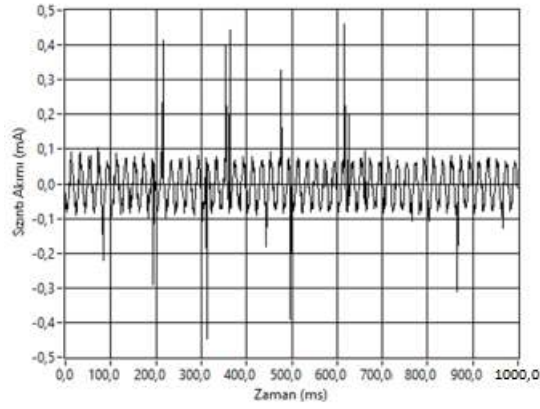
İzolator askıda 30 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda, 5, 10, 15 ve 20 kV gerilim uygulanarak ölçülen sızıntı akımları Şekil 4.133 - 4.136’da verilmiştir.



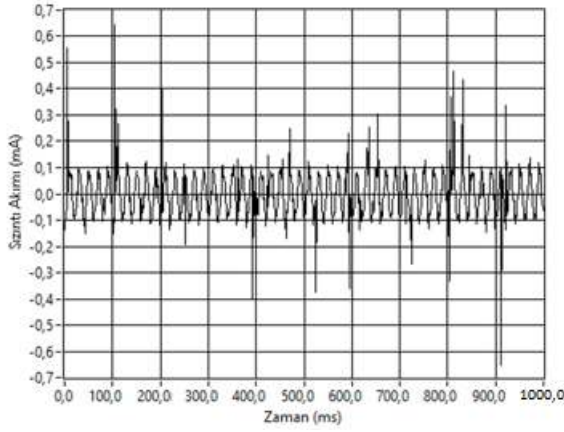
Şekil 4.133. Buzlu silikon izolatör için 5 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.134. Buzlu silikon izolatör için 10 kV’da sızıntı akımları



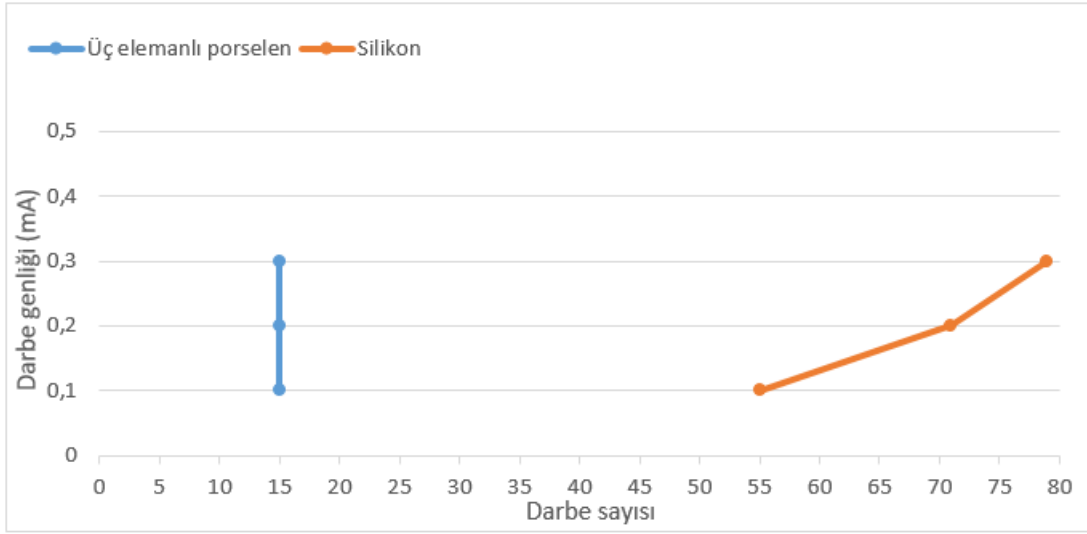
Şekil 4.135. Buzlu silikon izolatör için 15 kV’da sızıntı akımları



Şekil 4.136. Buzlu silikon izolatör için 20 kV’da sızıntı akımları

Silikon izolatörde buzlu durumda buzun yüzeye tutunmasından dolayı erime durumu daha geç gerçekleşmektedir. Tek elemanlı porselen zincir izolatör ve cam izolatöre kıyasla buzlu durumda sızıntı akımları daha azdır.

Üç elemanlı porselen ve silikon izolatörün 20 kV’da, saniyedeki darbe sayılarının karşılaştırılması Şekil 4.137’de yer almaktadır.



Şekil 4.137. Üç elemanlı porselen ve silikon izolatörün darbe sayılarının karşılaştırılması

Üç elemanlı porselen izolatörde, saniyedeki darbe sayısı, 0,1 0,2 ve 0,3 mA’de aynı (15) iken, silikon izolatörde saniyedeki darbe sayısı, 0,1 mA’de 55, 0,2 mA’de 71 ve 0,3 mA’de 79 olmuştur. Silikon izolatörde, üç elemanlı porselen izolatöre göre daha fazla darbe oluşmuştur.

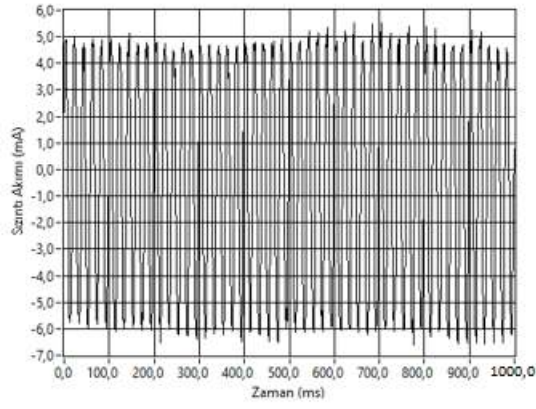
4.8. Sıvı İletkenliğinin Buzlanmış İzolatör Üzerine Etkisi

Su içerisine tuz katılarak 1000, 2000, 3000 ve 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Porselen, cam ve silikon izolatör üzerine püskürtülen sıvı buzlandırılarak gerilim uygulanmış ve sızıntı akımları ölçülmüştür.

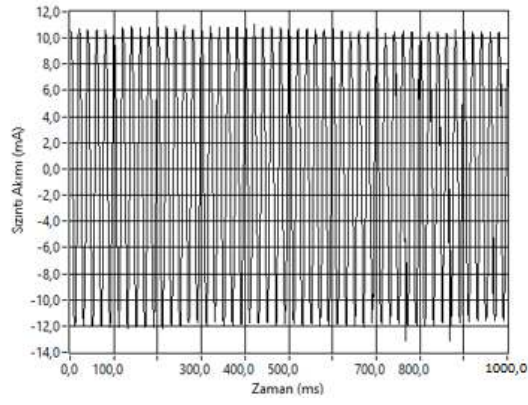
4.8.1. Porselen İzolatör

Porselen izolatörde sıvı iletkenliği 1000, 2000, 3000 ve 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ olarak belirlenmiş ve buzlandırılmıştır. Buz eriyene kadar 15 dakikalık periyotlarla, 5, 10, 15 ve 20 kV’luk gerilimler uygulanmıştır.

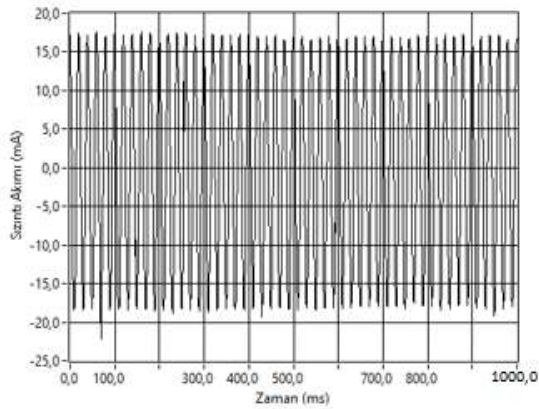
Şekil 4.138 - 4.141’de, 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



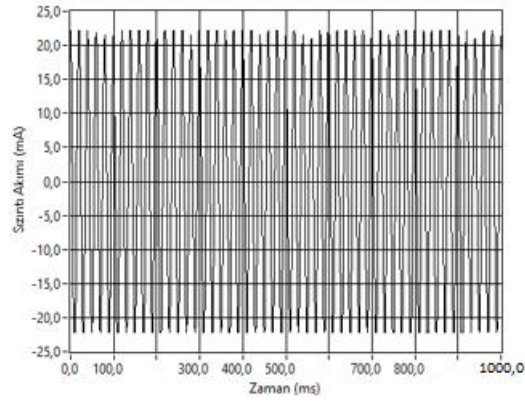
Şekil 4.138. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.139. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

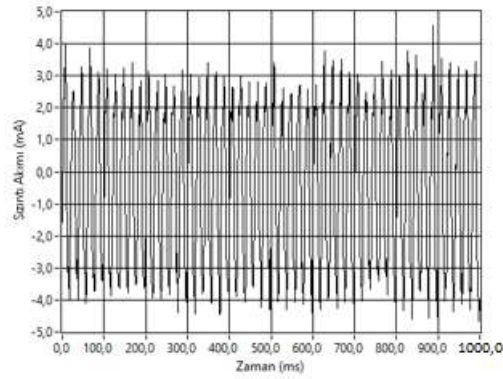


Şekil 4.140. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

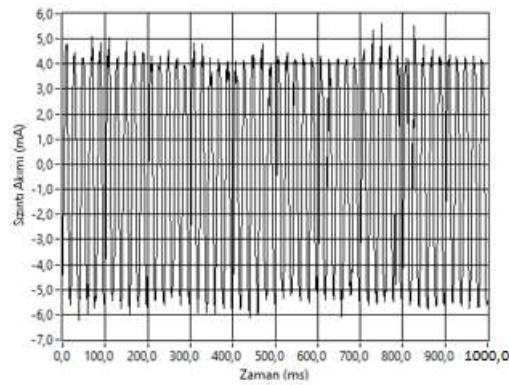


Şekil 4.141. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

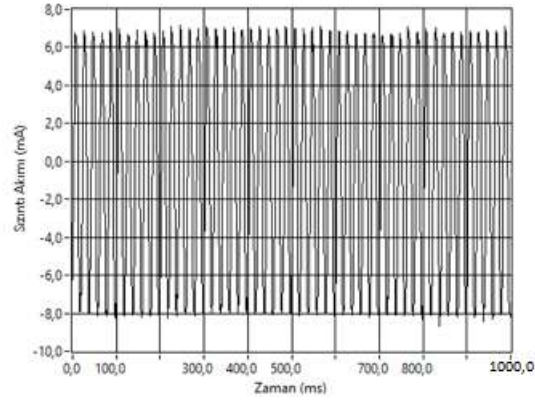
Şekil 4.142 - 4.145'te, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



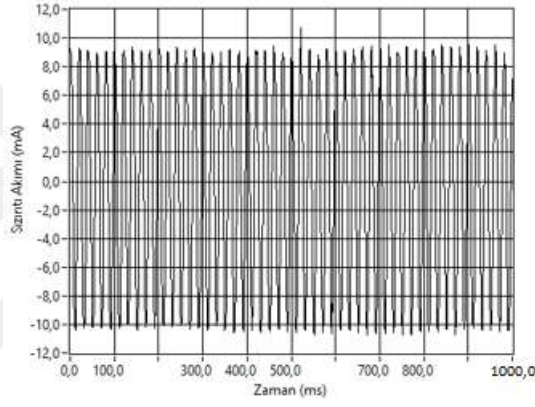
Şekil 4.142. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.143. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

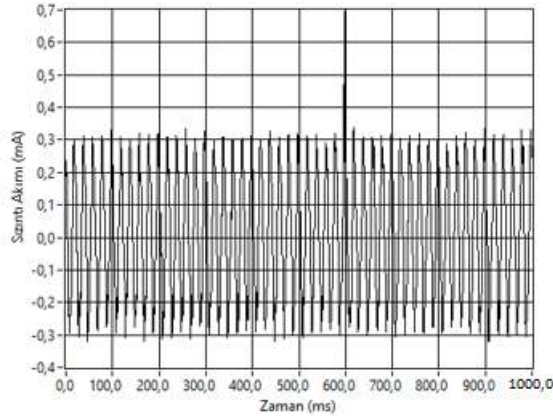


Şekil 4.144. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 15 kV için sızıntı akımları

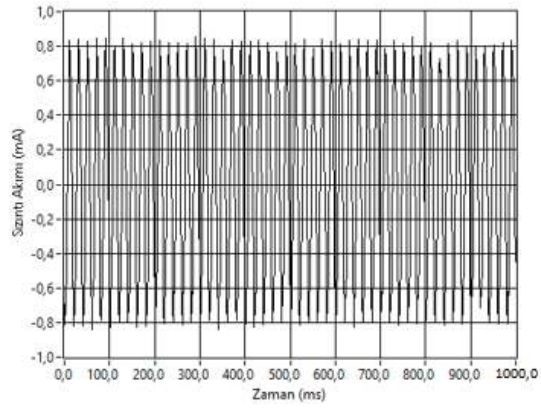


Şekil 4.145. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları

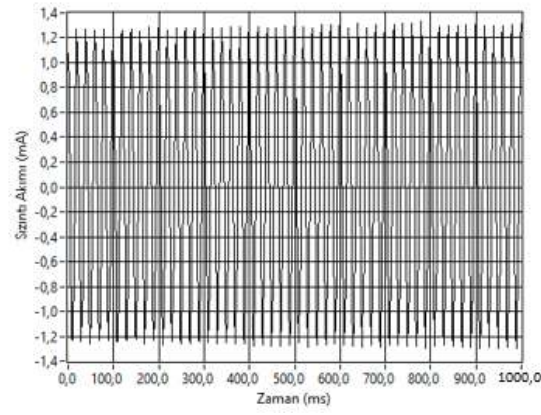
Şekil 4.146 - 4.149’da, 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolâtör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



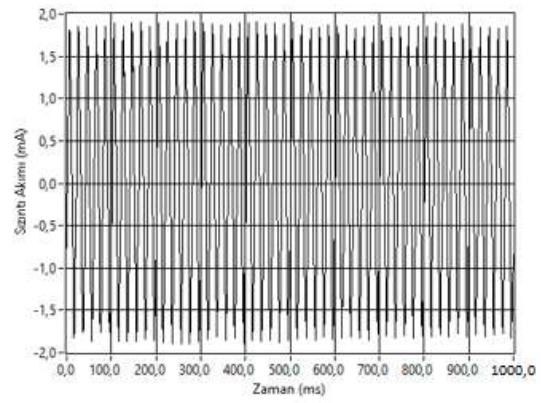
Şekil 4.146. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.147. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

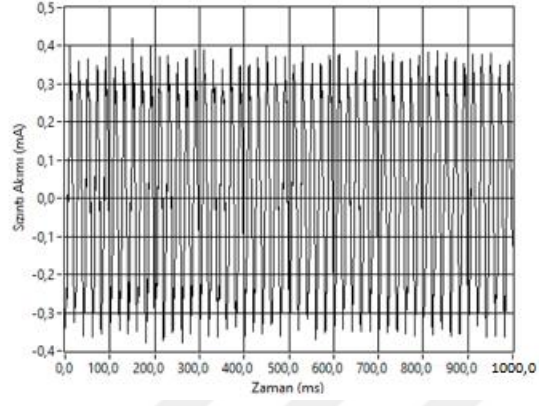


Şekil 4.148. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

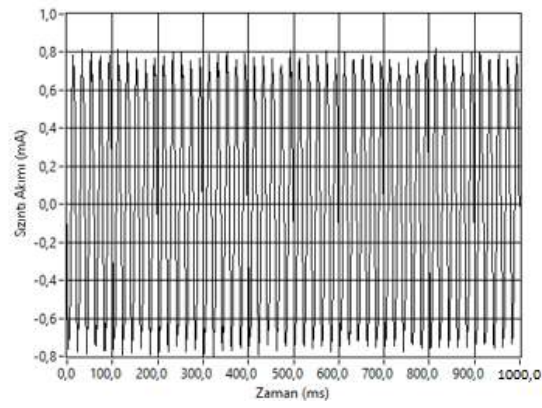


Şekil 4.149. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

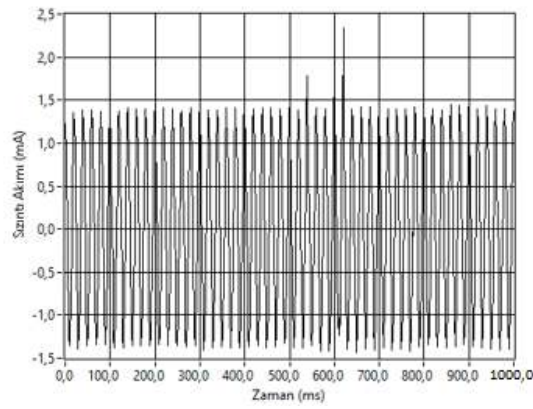
Şekil 4.150 - 4.153'te, izolator askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



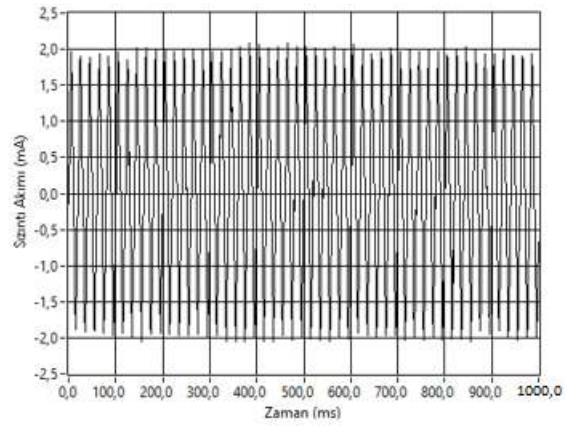
Şekil 4.150. Tek elemanlı porselen izolatorde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.151. Tek elemanlı porselen izolatorde, 10 kV için sızıntı akımları

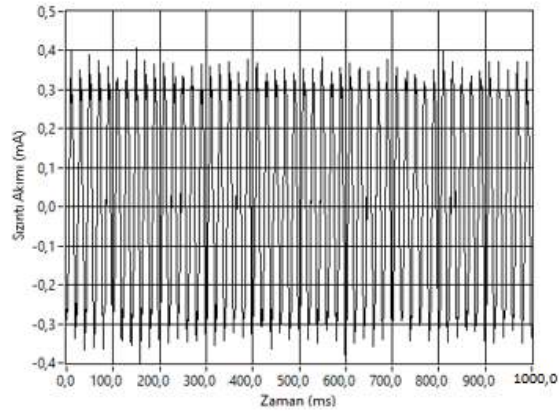


Şekil 4.152. Tek elemanlı porselen izolatorde, 15 kV için sızıntı akımları

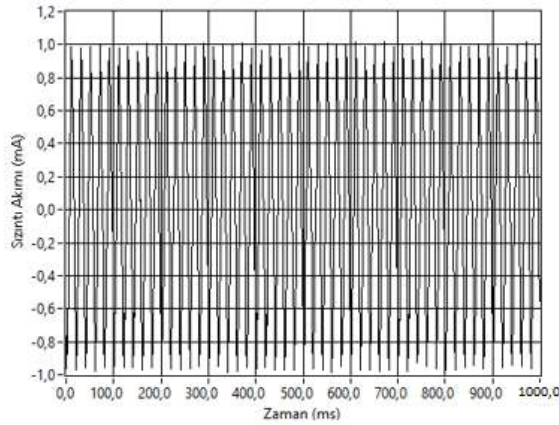


Şekil 4.153. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

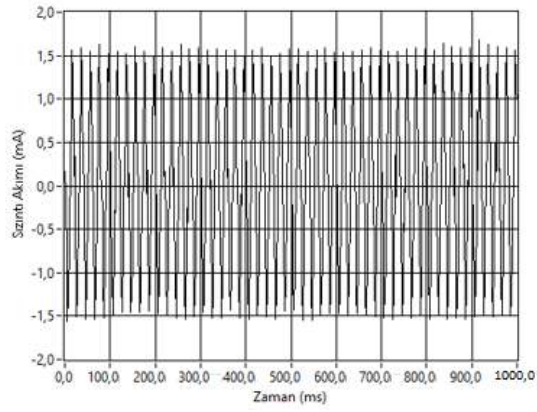
Şekil 4.154 - 4.157’de, 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



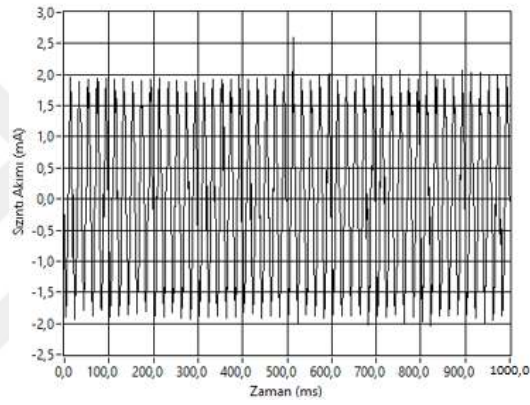
Şekil 4.154. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.155. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

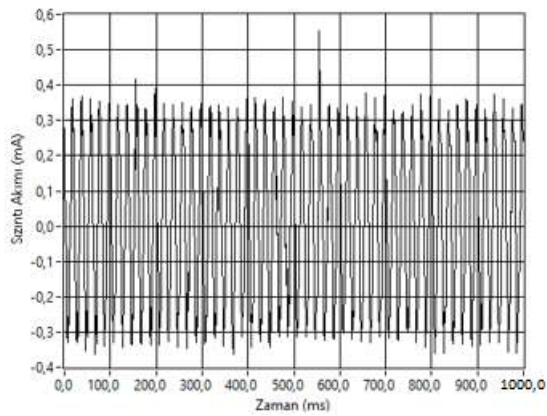


Şekil 4.156. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

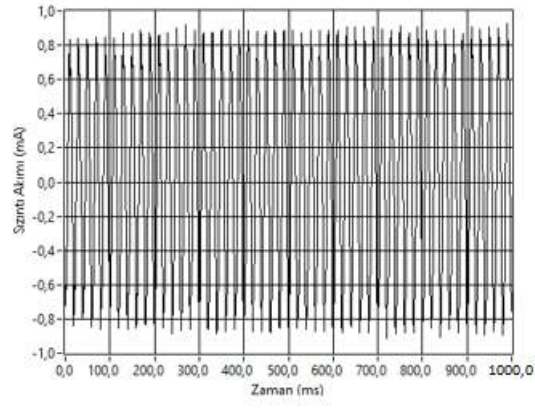


Şekil 4.157. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

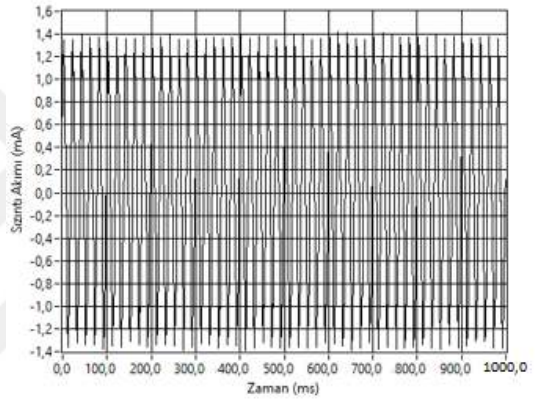
Şekil 4.158 - 4.161’de, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir



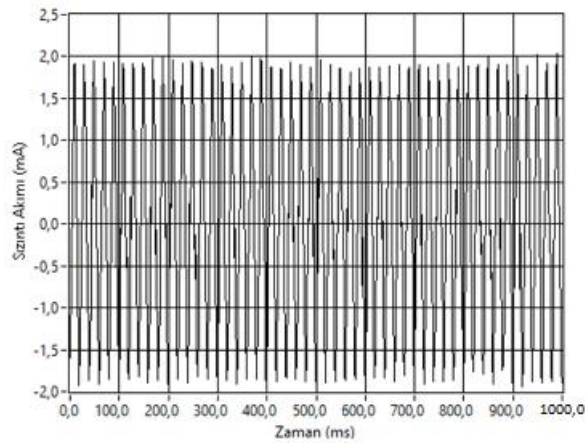
Şekil 4.158. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.159. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

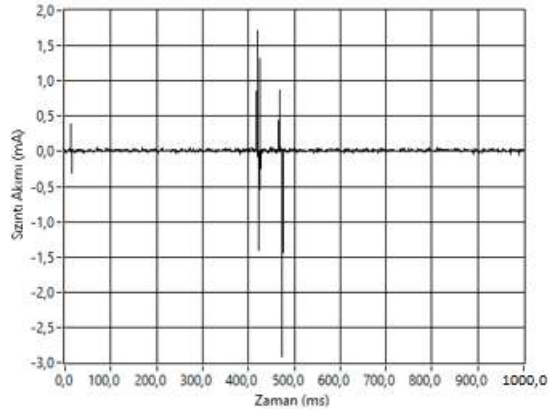


Şekil 4.160. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

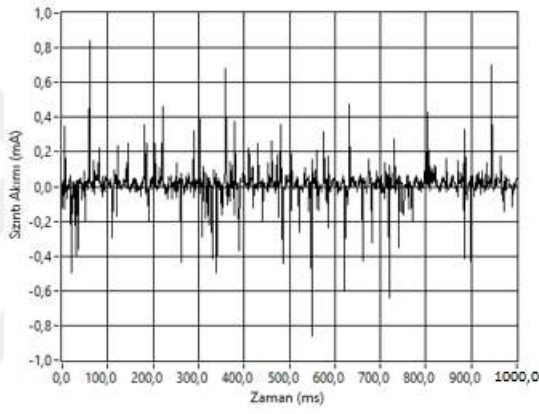


Şekil 4.161. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

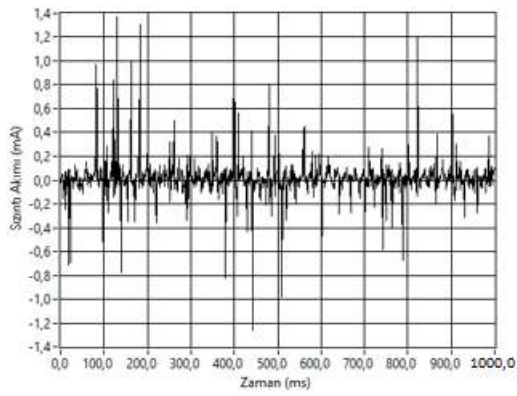
Şekil 4.162 - 4.165'te, 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



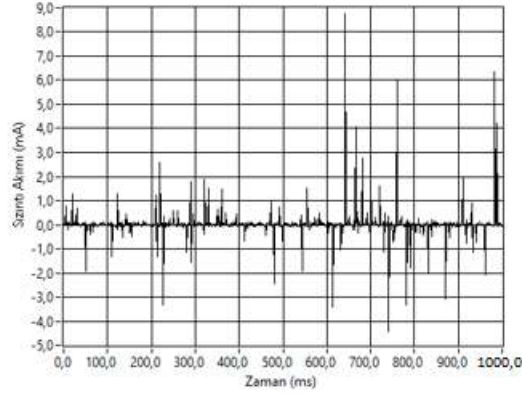
Şekil 4.162. Tek elemanlı porselen izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.163. Tek elemanlı porselen izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

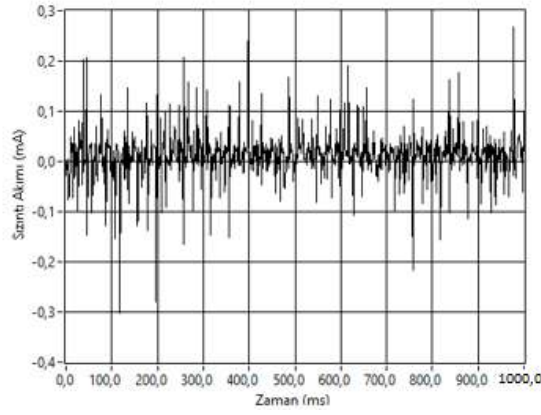


Şekil 4.164. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

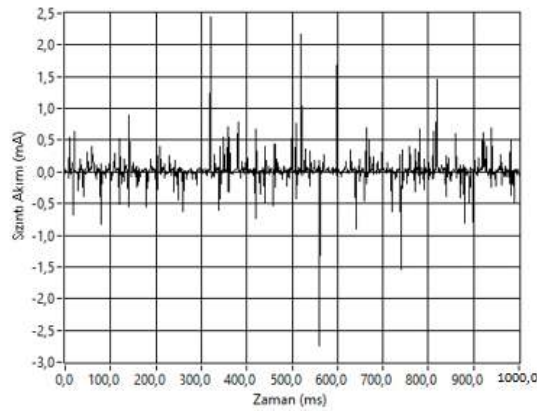


Şekil 4.165. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 20 kV için sızıntı akımları

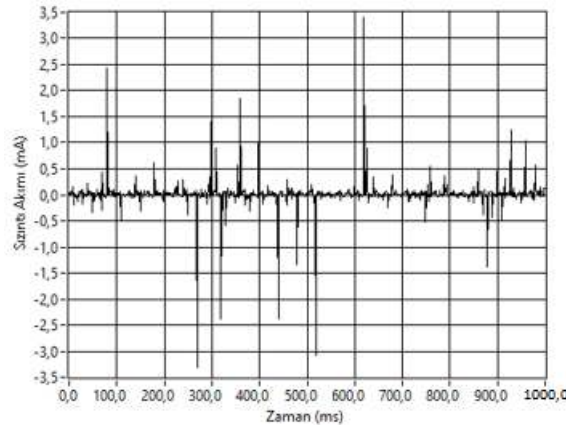
Şekil 4.166 - 4.169’da, izolâtör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış tek elemanlı porselen izolâtör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir



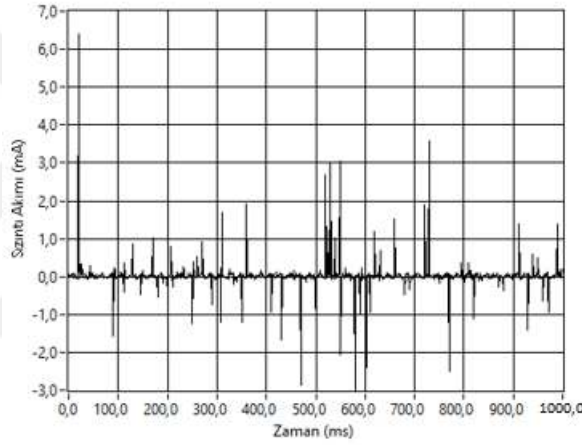
Şekil 4.166. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.167. Tek elemanlı porselen izolâtörde, 10 kV için sızıntı akımları



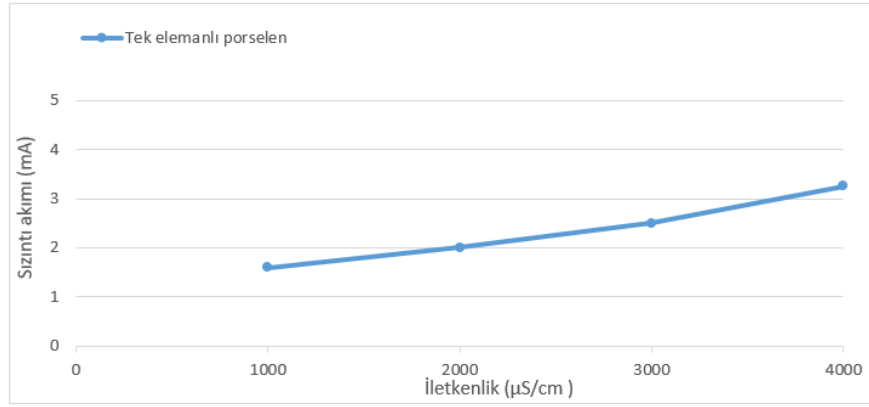
Şekil 4.168. Tek elemanlı porselen izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.169. Tek elemanlı porselen izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

Tek elemanlı porselen izolatörde sıvı iletkenliği ile beraber kısmen sızıntı akımları artmaktadır. Bu durum denklem 3.15'te de görüldüğü gibi direncin yüzey iletkenliği ile ters orantılı olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzey iletkenliğinin artması buzun direncini azaltacak, direncin azalmasıyla da sızıntı akımı artacaktır. Sıvı iletkenliği $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 'ye sahip olduğunda uygulanan gerilimin artırılması ile birlikte grafiklerdeki anlık sıçramalardan da görüleceği üzere izolatör yüzeyinde kısmi arklar oluşmuş ve bu arkların uzunluğu düşük iletkenlik durumlarına göre daha fazla olmuştur.

Tek elemanlı porselen izolatörün sızıntı akımlarının iletkenlikle ilişkisi Şekil 4.170'te gösterilmiştir.



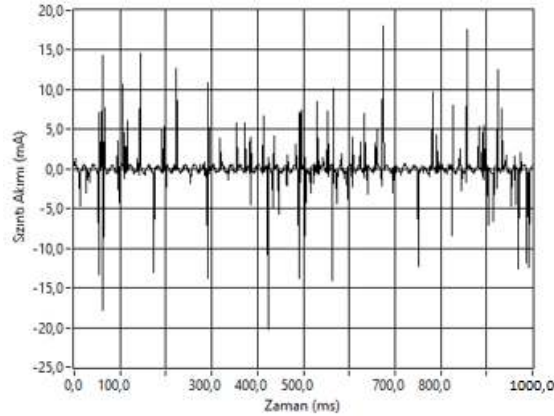
Şekil 4.170. Tek elemanlı porselen izolatorün iletkenlik ve sızıntı akımı arasındaki ilişki

Tek elemanlı porselen izolatörde iletkenliğin artmasıyla sızıntı akımının genliği artmaktadır.

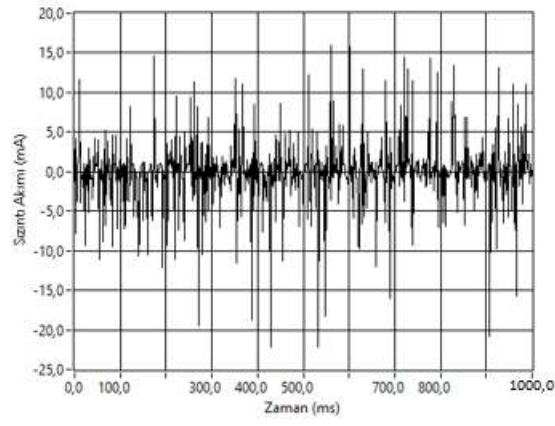
4.8.2. Cam İzolatör

Cam izolatörde sıvı iletkenliği 1000, 2000, 3000 ve 4000 $\mu\text{S/cm}$ olarak belirlenmiş ve buzlandırılmıştır. Buz eriyene kadar 15 dakikalık periyotlarla, 5, 10, 15 ve 20 kV'lık gerilimler uygulanmıştır.

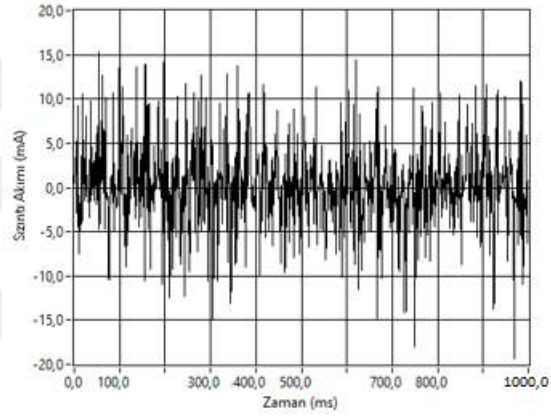
Şekil 4.171 - 4.174'te, 1000 $\mu\text{S/cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



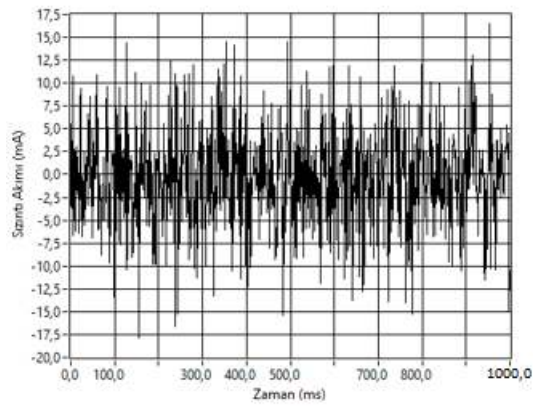
Şekil 4.171. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.172. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

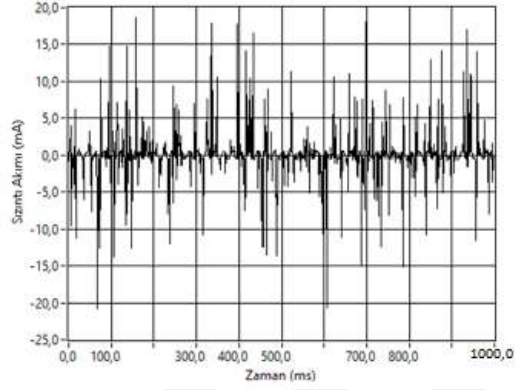


Şekil 4.173. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

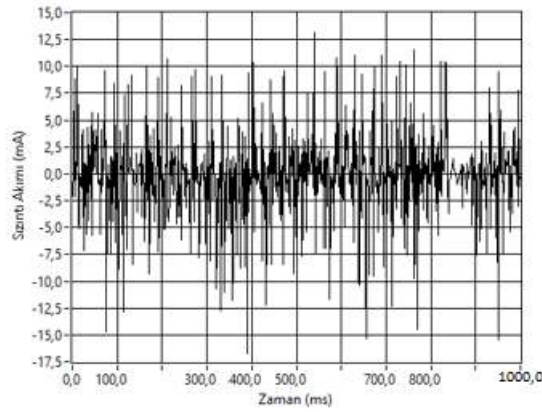


Şekil 4.174. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

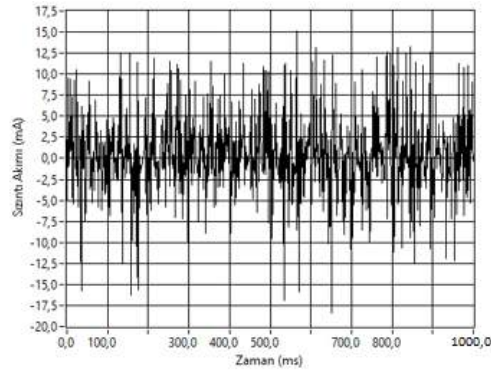
Şekil 4.175 - 4.178’de, izolator askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



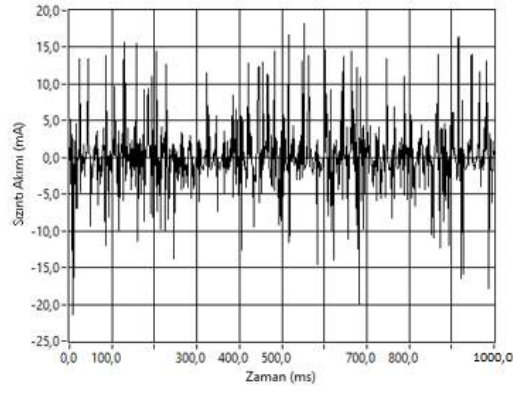
Şekil 4.175. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.176. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

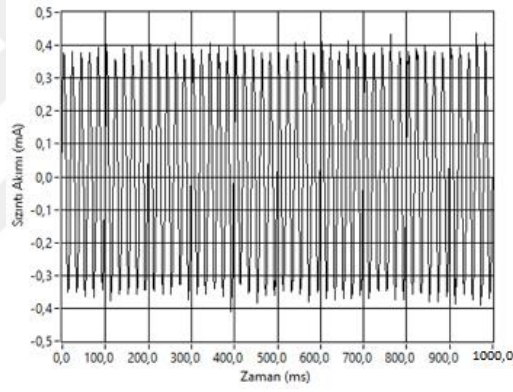


Şekil 4.177. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

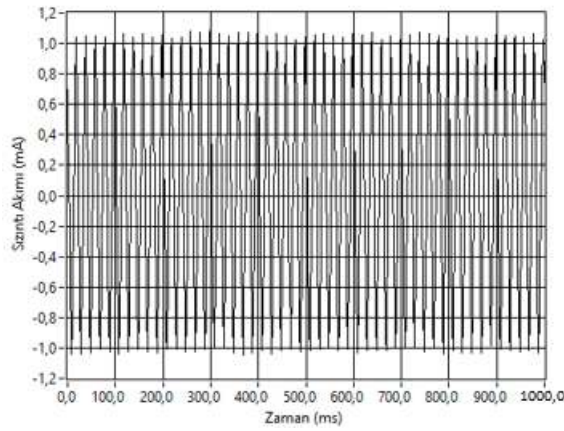


Şekil 4.178. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

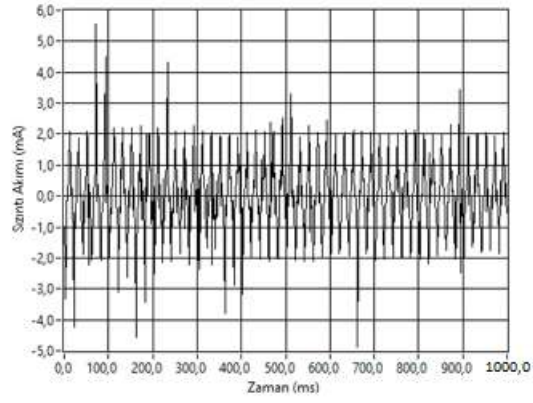
Şekil 4.179 - 4.182’de, 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



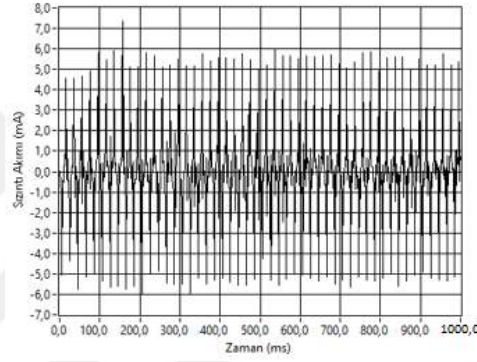
Şekil 4.179. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.180. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

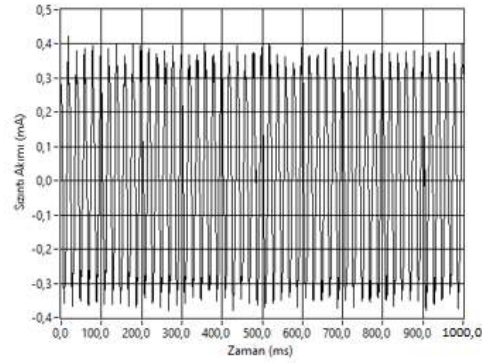


Şekil 4.181. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

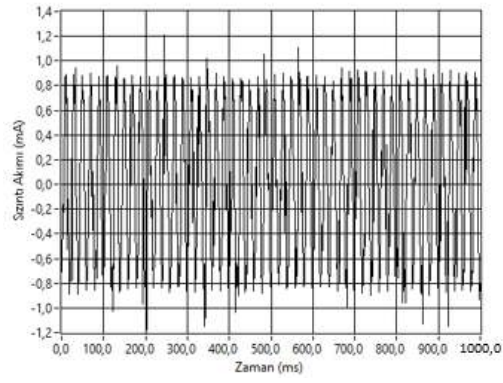


Şekil 4.182. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

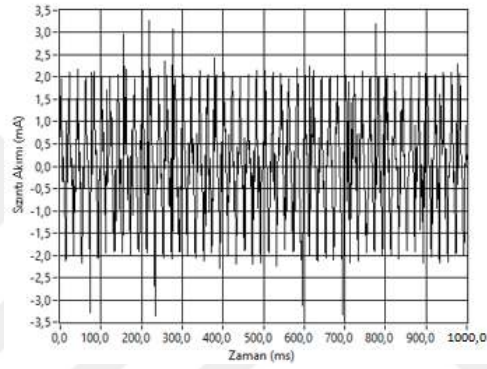
Şekil 4.183 - 4.186’da, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



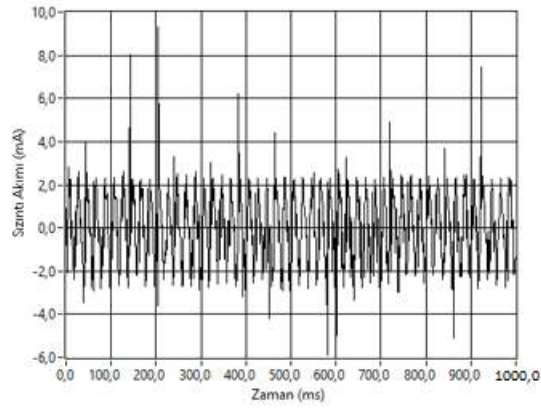
Şekil 4.183. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.184. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

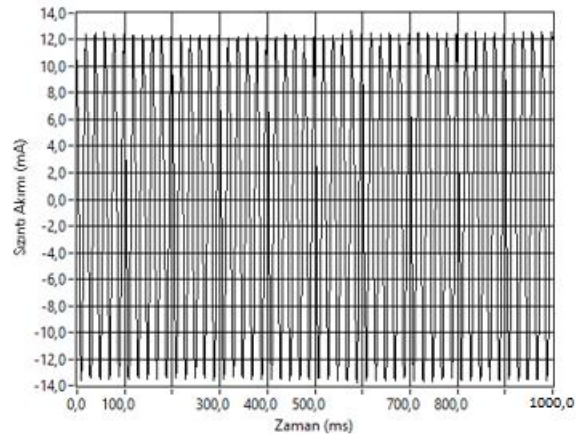


Şekil 4.185. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

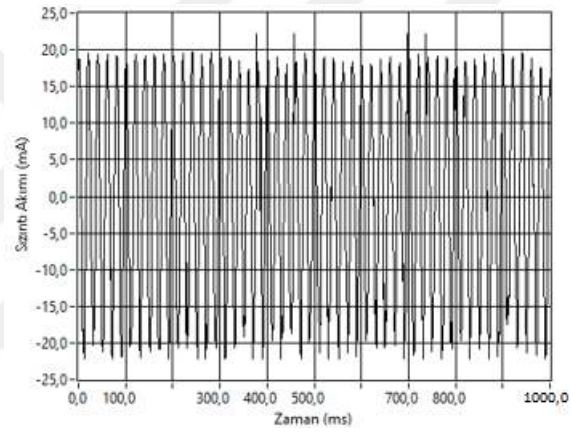


Şekil 4.186. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

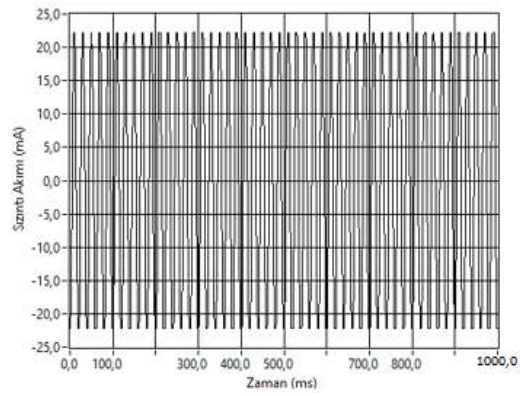
Şekil 4.187 - 4.190'da, $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



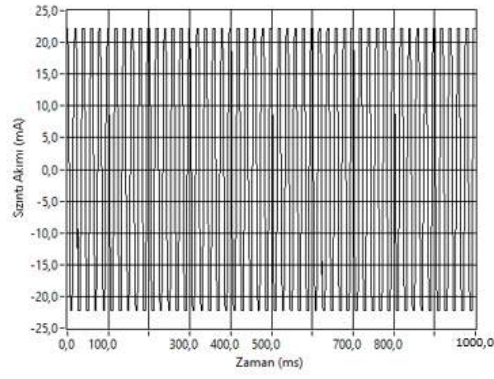
Şekil 4.187. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.188. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

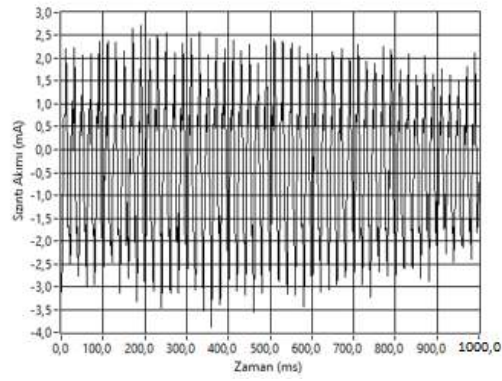


Şekil 4.189. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

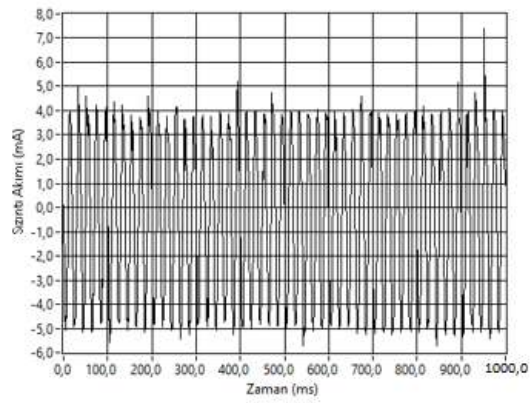


Şekil 4.190. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

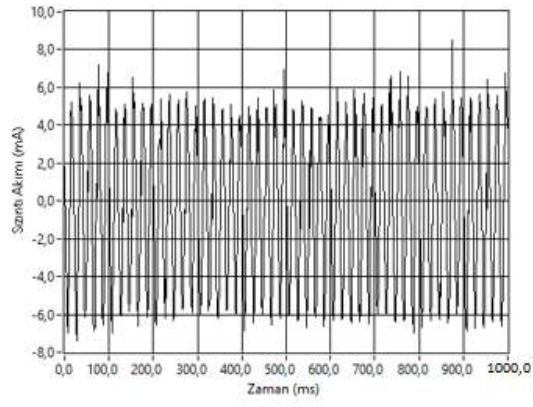
Şekil 4.191 - 4.194'te, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



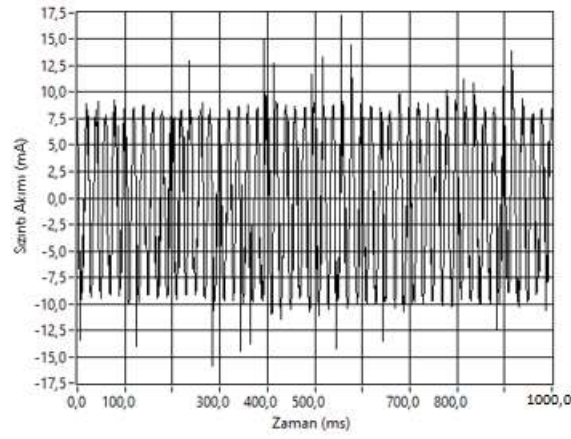
Şekil 4.191. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.192. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

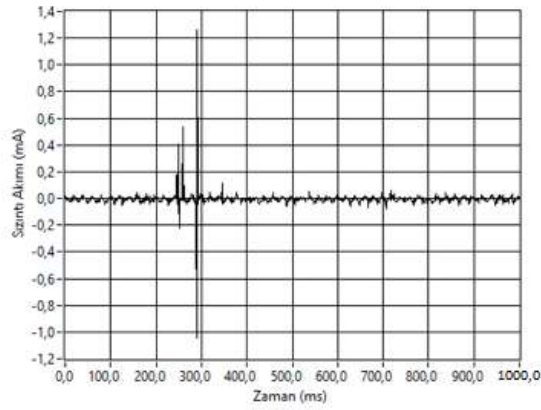


Şekil 4.193. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

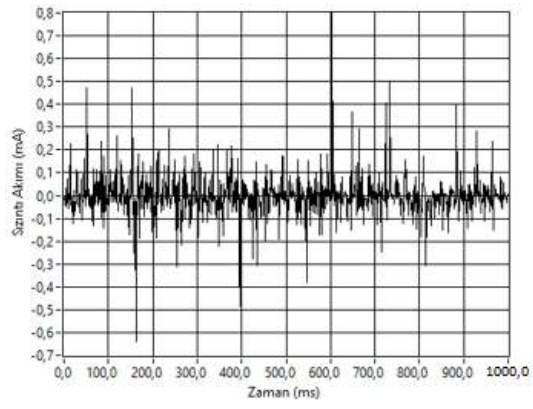


Şekil 4.194. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

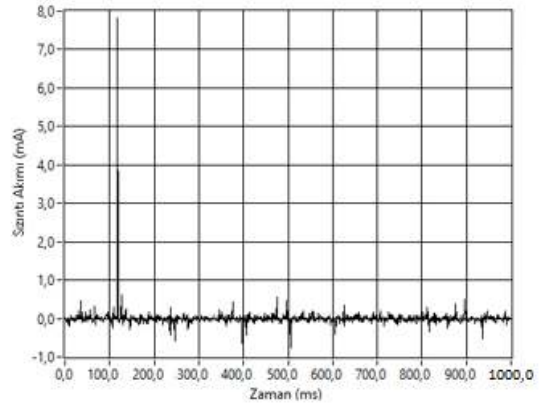
Şekil 4.195 - 4.198’de, 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



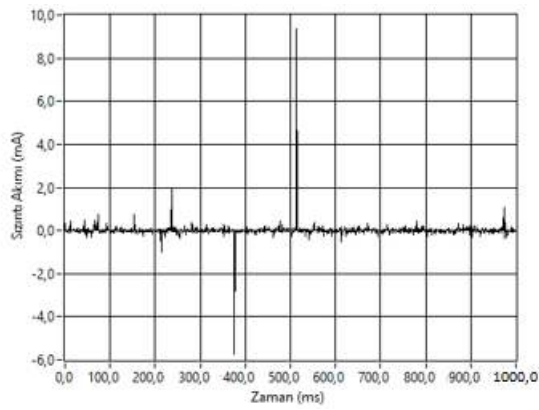
Şekil 4.195. Cam izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.196. Cam izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

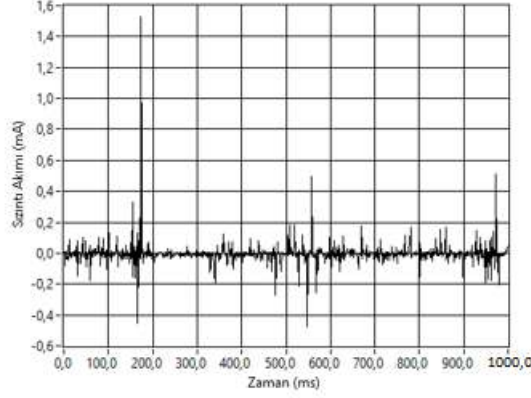


Şekil 4.197. Cam izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

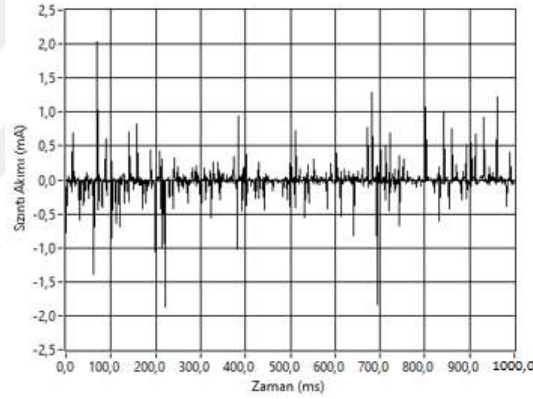


Şekil 4.198. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

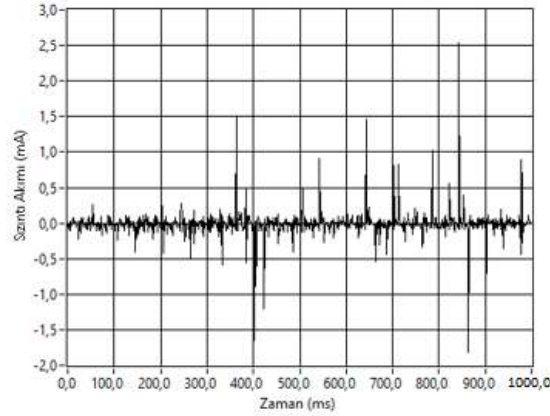
Şekil 4.199 - 4.202’de, izolator askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış cam izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



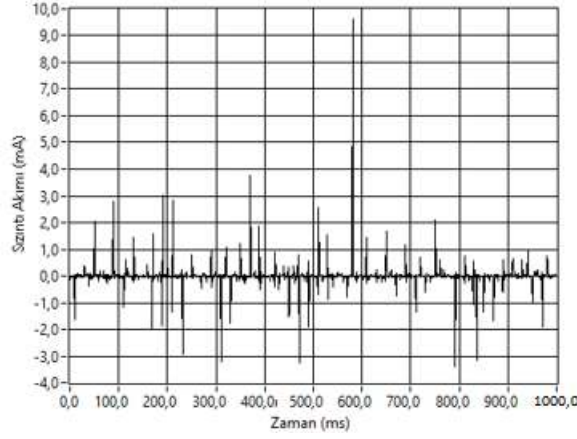
Şekil 4.199. Cam izolatorde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.200. Cam izolatorde, 10 kV için sızıntı akımları



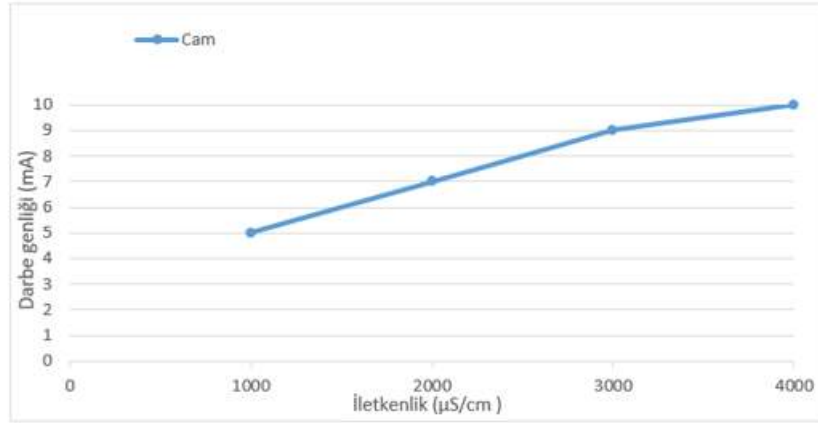
Şekil 4.201. Cam izolatorde, 15 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.202. Cam izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

Cam izolatörde sızıntı akımları zaman zaman 25 mA seviyelerine yaklaşmıştır. Sıvı iletkenliğinin artırılması ile birlikte izolatör yüzeyinde arklar oluşmuştur. Tek elemanlı porselen izolatöre göre iletkenliğin ve uygulanan gerilimin artırılmasına karşı cam izolatör daha hassastır.

Cam izolatörün sızıntı akımlarının iletkenlikle ilişkisi Şekil 4.203'te gösterilmiştir.



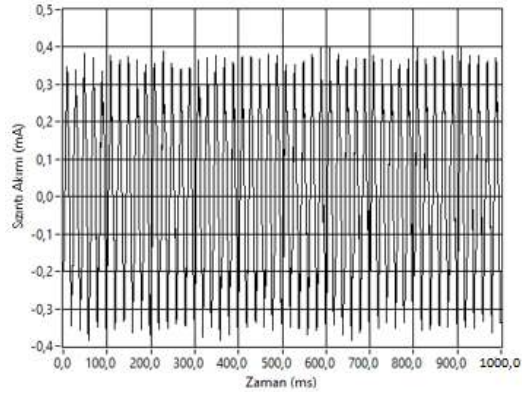
Şekil 4.203. Cam izolatörün iletkenlik ve sızıntı akımı arasındaki ilişki

Cam izolatörde iletkenliğin artmasıyla sızıntı akımının genliği artmaktadır. Sızıntı akımının iletkenlikle artışı porselen izolatöre göre daha fazladır.

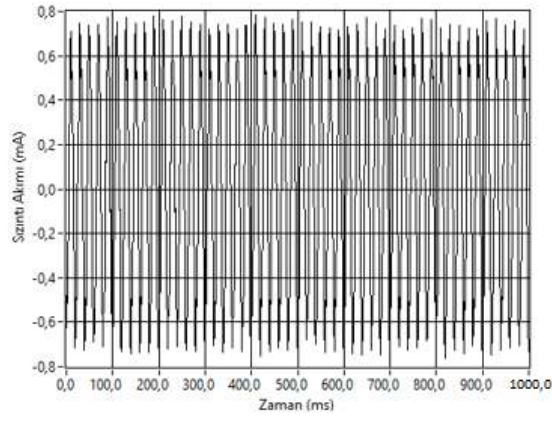
4.8.3. Silikon İzolatör

Silikon izolatörde sıvı iletkenliği 1000, 2000, 3000 ve 4000 $\mu\text{S/cm}$ olarak belirlenmiş ve buzlandırılmıştır. Buz eriyene kadar 15 dakikalık periyotlarla 5, 10, 15 ve 20 kV'lık gerilimler uygulanmıştır.

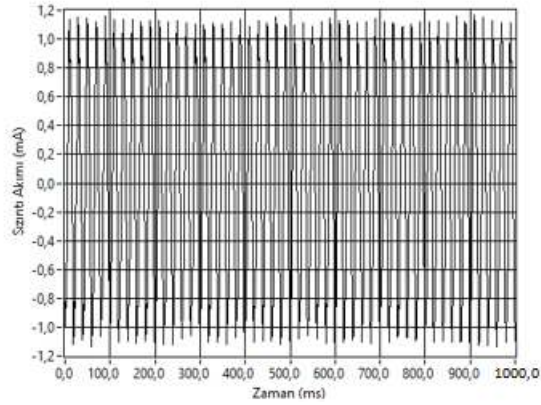
Şekil 4.204 - 4.207’de, 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



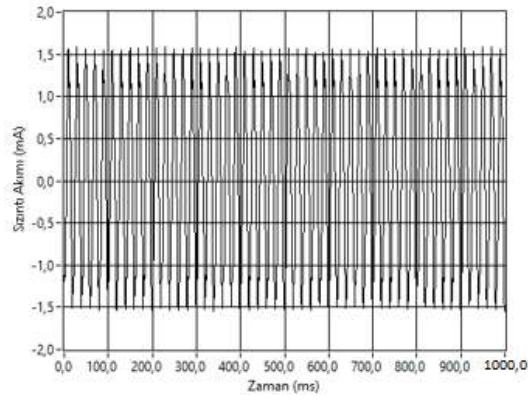
Şekil 4.204. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.205. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

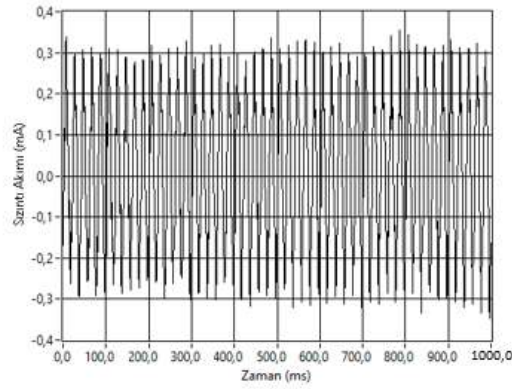


Şekil 4.206. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

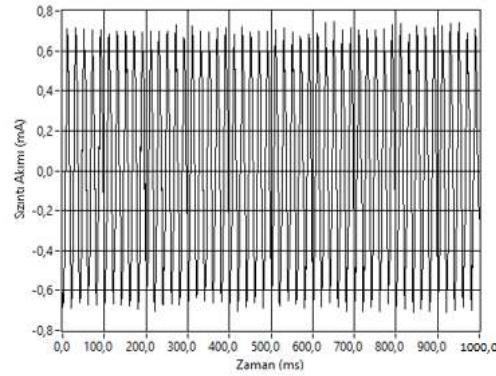


Şekil 4.207. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

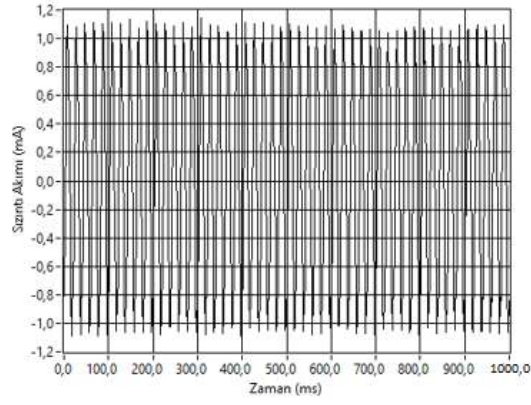
Şekil 4.208 - 4.211’de, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



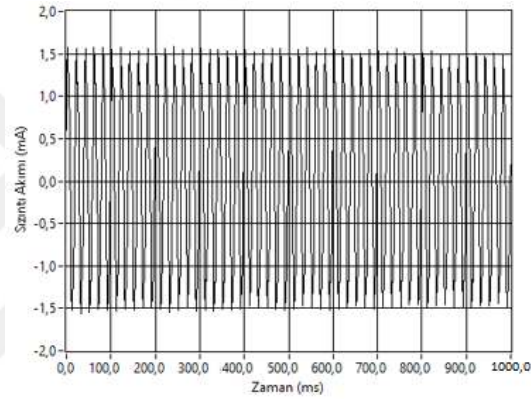
Şekil 4.208. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.209. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

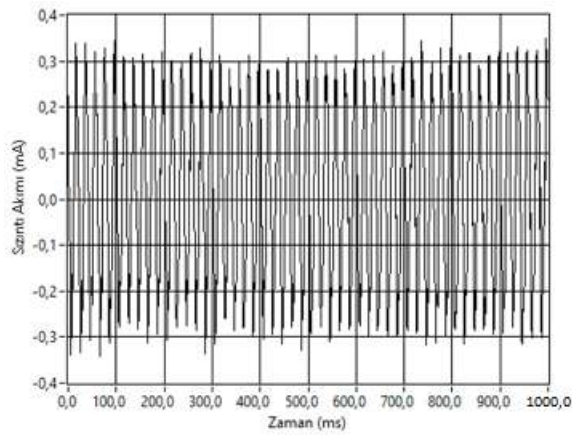


Şekil 4.210. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

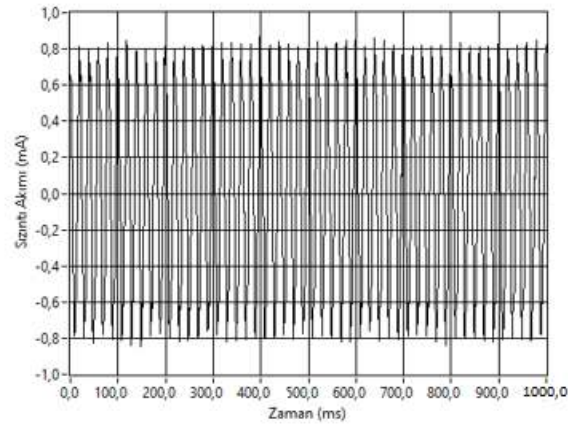


Şekil 4.211. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

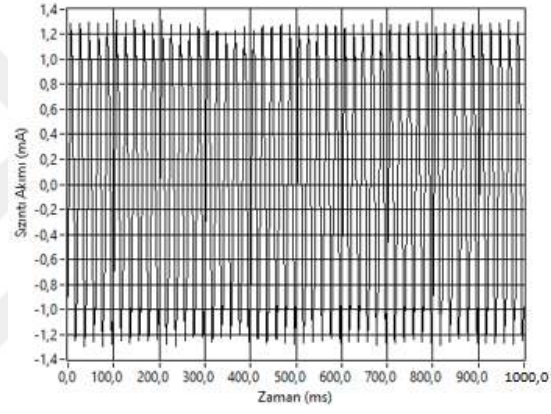
Şekil 4.212 - 4.215'te, $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



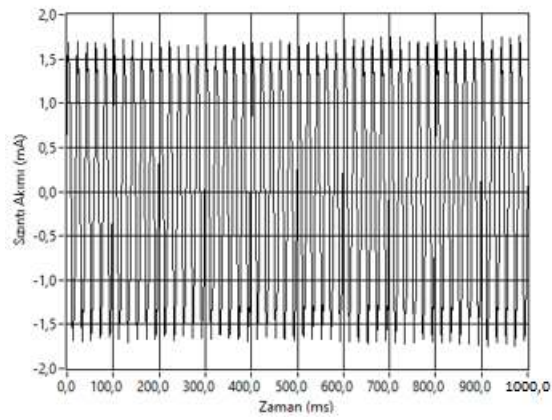
Şekil 4.212. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.213. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

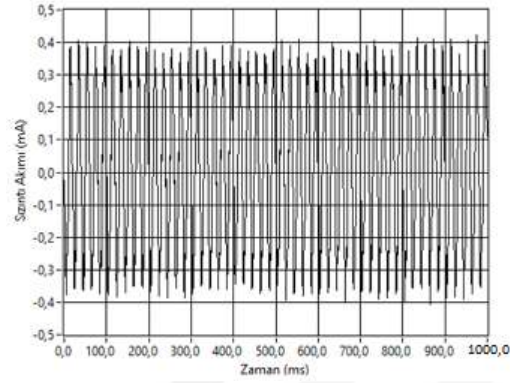


Şekil 4.214. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

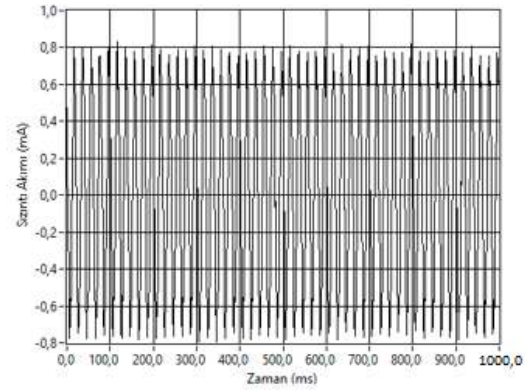


Şekil 4.215. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

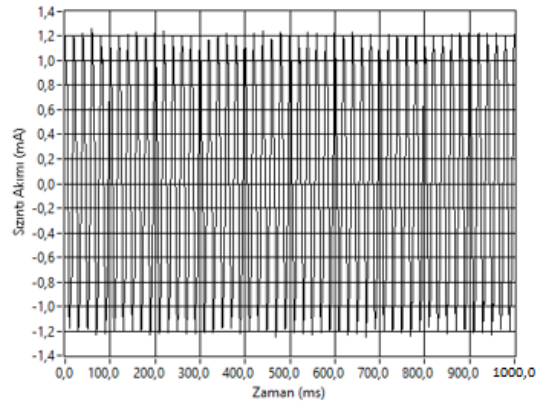
Şekil 4.216 - 4.219’da, izolator askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolator yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



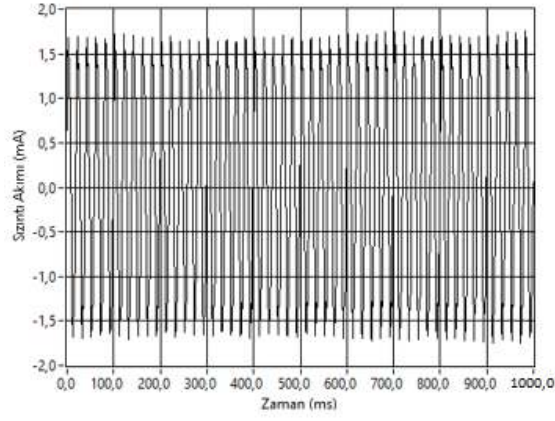
Şekil 4.216. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.217. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

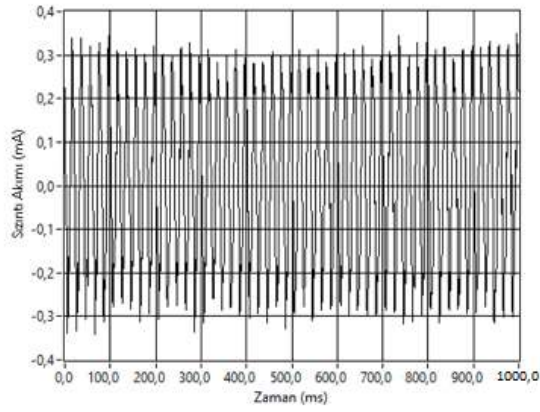


Şekil 4.218. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

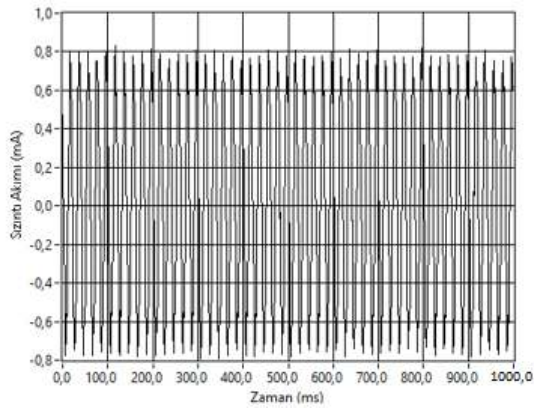


Şekil 4.219. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

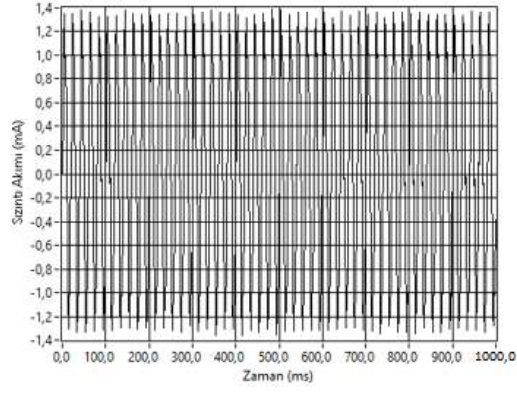
Şekil 4.220 - 4.223'te, 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



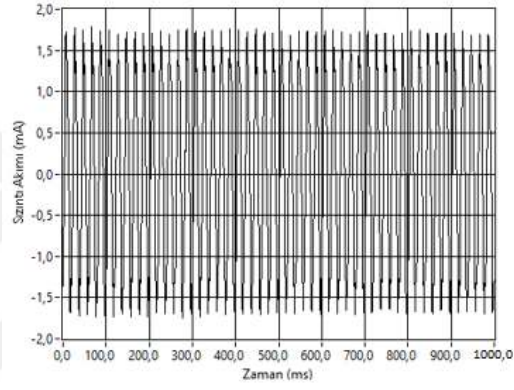
Şekil 4.220. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.221. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

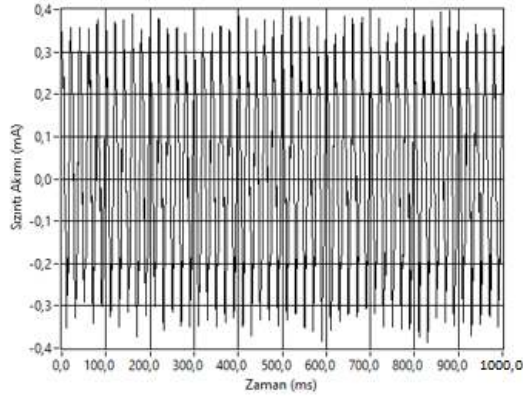


Şekil 4.222. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

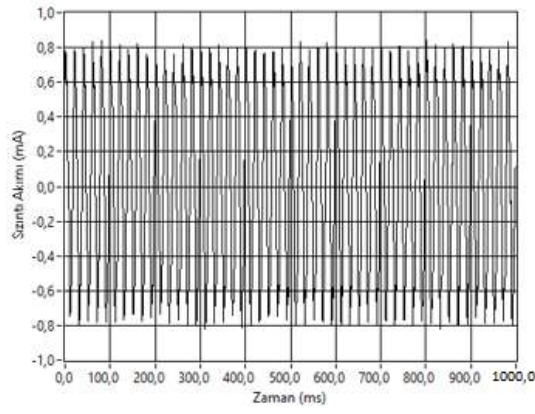


Şekil 4.223. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

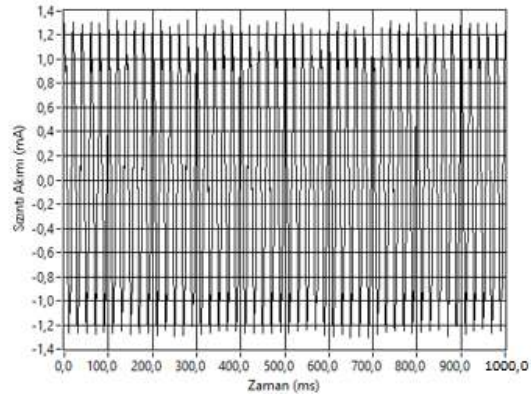
Şekil 4.224 - 4.227’de, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



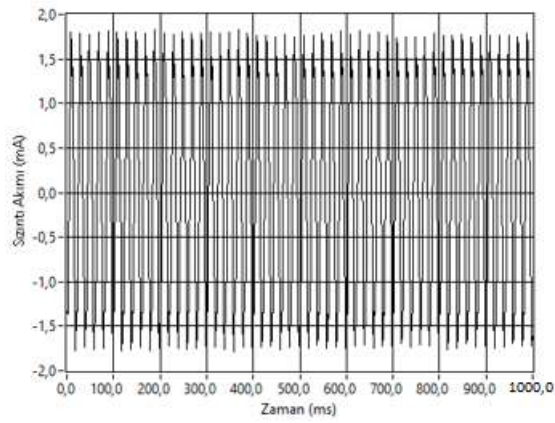
Şekil 4.224. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.225. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

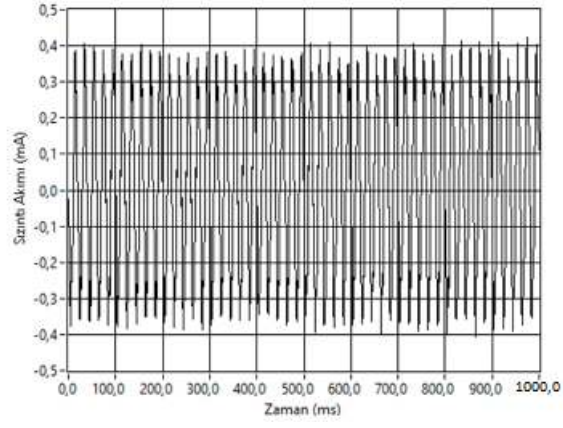


Şekil 4.226. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

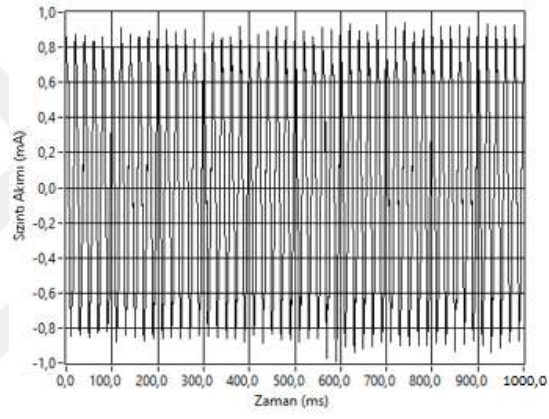


Şekil 4.227. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

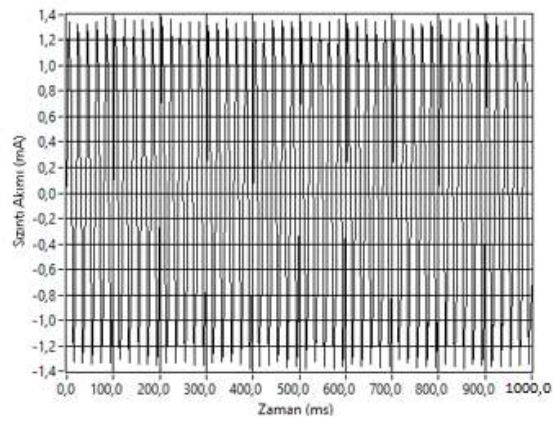
Şekil 4.228 - 4.231’de, 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



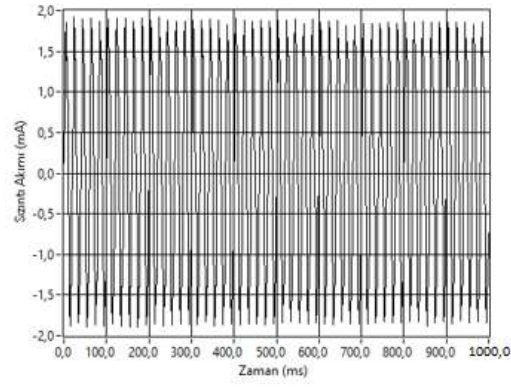
Şekil 4.228. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.229. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları

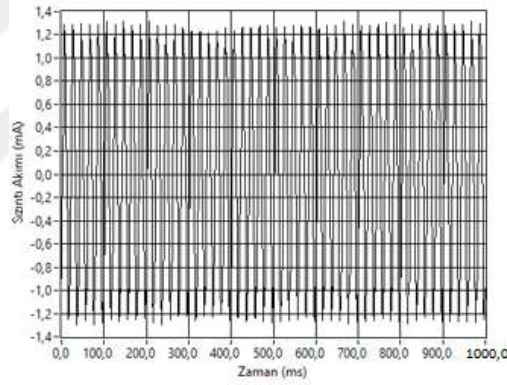


Şekil 4.230. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları

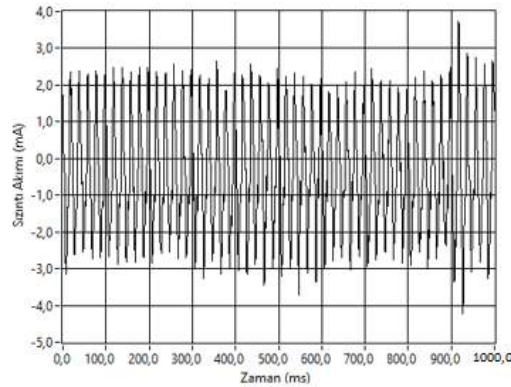


Şekil 4.231. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

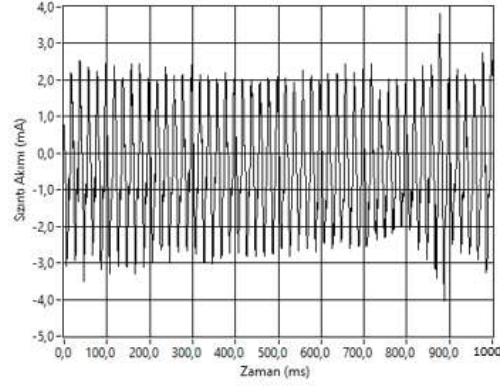
Şekil 4.232 - 4.235'te, izolatör askıda 15 dakika bekletildikten sonra buz erime durumunda $4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik için buzlandırılmış silikon izolatör yüzeyinden ölçülen sızıntı akımları gösterilmiştir.



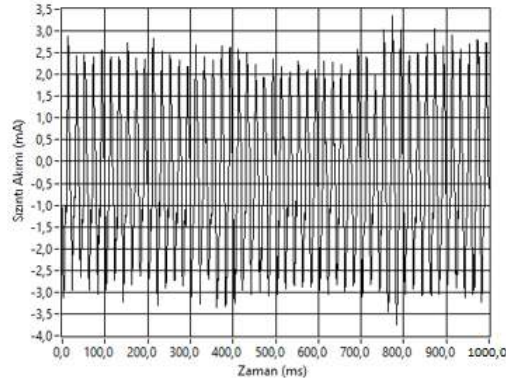
Şekil 4.232. Silikon izolatörde, 5 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.233. Silikon izolatörde, 10 kV için sızıntı akımları



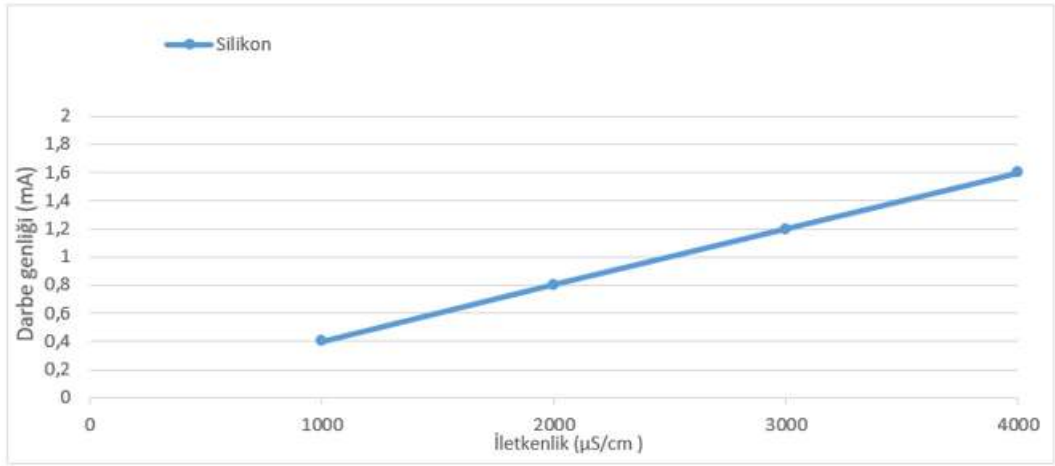
Şekil 4.234. Silikon izolatörde, 15 kV için sızıntı akımları



Şekil 4.235. Silikon izolatörde, 20 kV için sızıntı akımları

Silikon izolatörde sızıntı akımları 4 mA’i geçmemiştir. Genel olarak sızıntı akımı, 5 kV’da 0.4 mA, 10 kV’da 0.8 mA, 15 kV’da 1.2 mA ve 20 kV’da 2 mA seviyelerini geçmezken, 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ iletkenlik değerinde izolator yüzeyinde buzun erimeye başladığı anda ise 4 mA seviyesine yaklaşmıştır. Tek elemanlı cam ve porselen izolatöre göre sıvı iletkenliğinden en az etkilenen izolator silikon izolatördür. Ancak deneylerde kullanılan silikon izolatörün kaçak sızma yolu uzunluğu cam ve porselen izolatöre göre çok daha fazla olduğu için cam ve porselen izolatörü kendi aralarında karşılaştırmak daha doğru olacaktır.

Silikon izolatörün sızıntı akımlarının iletkenlikle ilişkisi Şekil 4.236’da gösterilmiştir.



Şekil 4.236. Silikon izolatörün iletkenliği ve sızıntı akımı arasındaki ilişki

Silikon izolatörde iletkenliğin artmasıyla sızıntı akımının genliği artmaktadır. Sızıntı akımının iletkenlikle artışı porselen ve cam izolatöre göre daha azdır.

4.9. Tartışma

İletim ve dağıtım hatlarının en temel elemanlarından biri izolatörlerdir. İzolatörler direk ile iletim hattı arasındaki yalıtımı sağlayan elemanlardır. İzolatörlerin yalıtım özelliği, zaman zaman kirlenme ve buzlanma gibi nedenlerden dolayı azalmaktadır. Bu durumda izolatörlerde arklar meydana gelmekte ve birçok arızalar oluşmaktadır. Bu durum, tüketiciyi enerjisiz kalabileceği, üreticiyi ise onarım bedeli ödemek zorunda olacağı için ciddi oranda etkilemektedir.

İzolatör yüzeyinde biriken buzun iletkenliği uygulanan gerilim ile beraber izolatörün yalıtım özelliğini ciddi şekilde etkilemektedir. Çeşitli araştırmacılar için donma suyunda değişen iletkenlik ve iyon içeriğine sahip buzun sonuçları irdelenmiştir. Sıcaklık -15 °C'den 0 °C'ye yükseldikçe buz iletkenliği 7 kat artmıştır. Bu değişikliğin çoğu -2 °C ile 0 °C arasındaki dar sıcaklık aralığında meydana gelmiştir. Bununla birlikte, 0 °C'deki buz örneklerinin iletkenliği, 20 °C'deki çözeltinin iletkenliğinin ortalama 187 katı daha düşük kalmıştır [15-17]. Bu çalışmada da izolatör kabinde buzlandırıldıktan hemen sonra gerilim uygulanmış, buzun sıcaklığındaki değişim ile uygulanan gerilim arasındaki farkı görebilmek için 15 dakika sonra tekrar gerilim uygulanmıştır. Bu durumda izolatör yüzeyindeki sızma akımlarının önceki duruma göre kısmen daha fazla olduğu ve izolatörün yalıtım özelliğini etkilediği sonucuna varılmıştır.

İzolatör yüzeyinde biriken buzun kalınlığı izolatör yalıtımında önemli bir etkidir. Yapılan çalışmalarda izolatörde buz birikimi çok hafif (< 2 mm), hafif (< 12 mm), orta (12 - 20 mm) ve ağır (>20 mm) olarak ayrılmış ve birçok ülkede atlama olayları rapor edilmiştir [25]. Bu çalışmada

izolatörler hafif buzlanma ve buzlanma durumları için incelenmiştir.. Buzlanma durumunda hafif buzlanmaya göre sızıntı akımının genliği ve sıklığı daha fazla olmuştur.

Kirlenmiş ve buzlu zincir izolatör dizisinin alternatif akım atlama gerilimi üzerine yapılan çalışmalar mevcuttur [5]. Buzla kaplı bir izolatör dizisinin atlama performansının, buzlanma seviyesinin yanı sıra kirlilik seviyesiyle de ilgili olduğu gösterilmiştir. Buzla kaplı bir izolatörün kirlenmesini temsil etmek için esas olarak iki yöntem vardır. Biri katı tabaka yöntemi, diğeri ise donma suyunun iletkenliğini değiştirmektir. Katı tabaka yönteminde, yalıtkanın buz birikmesinden önceki kirlilik durumu kullanılırken, donma suyunun iletkenliğini değiştirme durumunda izolatörün buz birikmesi sırasındaki kirlilik durumu kullanılabilir. Bu çalışmada, donma suyunun iletkenliği değiştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. İletkenliğin artması ile birlikte sızma akımlarının genliğinin ve sıklığının arttığı gözlenmiştir.

Buzlu porselen, cam ve kompozit izolatörlerde; buz kalınlığı, kirlilik ve hava basıncı gibi çeşitli faktörlerin izolatörün atlama performansı üzerindeki etkilerini inceleyen deneysel bir çalışmada, buz kalınlığının, kirliliğin ve basıncın artmasıyla üç tip izolatörün de atlama geriliminin azaldığı gösterilmiştir [9]. Bu çalışmada laboratuvar koşulları uygun olmadığından hava basıncı üzerine herhangi bir çalışma gerçekleştirilmemiş olsa da porselen, cam ve silikon izolatörler için buz kalınlığı ve kirliliğin sızıntı akımları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Buz kalınlığının artmasıyla birlikte uygulanan gerilimin de yükselmesine karşı en hassas olan cam izolatör olmuştur. Üç izolatör içerisinde en az etkilenen izolatör ise silikon izolatördür. Ayrıca porselen izolatörde zincir sayısının artmasıyla birlikte sızıntı akımlarının sıklığının ve genliğinin azaldığı gözlenmiştir.

İzolatörlerde buzlanma olayı ve bununla birlikte atlama olayına karşı etkili olan rüzgâr, hava basıncı, kirlilik, sıcaklık, nem vb. çevresel olayların simüle edildiği birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar daha çok atlamanın meydana geldiği gerilim değerine odaklanmış ve izolatörlerde atlama olayı tamamen çözülememiştir. Bu çalışmada, nem, kirlilik ve sıcaklık gibi çevresel etkenler göz önünde bulundurarak, çok kısa zaman aralıkları için sızıntı akımları detaylı bir şekilde incelenmiş ve daha fazla veri elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

İzolatörler yüzeyinden akan sızıntı akımları; buz kalınlığı, buzun yoğunluğu, ortamın sıcaklığı, ortamın nemi vb. çevresel faktörlere ve izolatörlerin büyüklüğü, etek aralığı, etek çapı, zincir sayısı ve izolatörün yapıldığı malzeme gibi mekaniksel durumlara bağlıdır.

İzolatöre uygulanan gerilimin genliği arttıkça sızıntı akımının genliği artmaktadır. Aynı zamanda sızıntı akımının genliği buzun birikme oranına da bağlıdır. Buz kalınlığı arttığında ve buzun erimeye başladığı andan su haline 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 ve cam izolatörlerde, eleman sayısı yani zincir uzunluğu arttıkça sızıntı akımının sıklığı azalmaktadır. Porselen, cam ve silikon izolatörlerin yüzeylerinde buzun en erken olgunlaşması ve en geç erimesi silikon izolatörde olmaktadır. Ayrıca, zincir izolatörlerde eleman sayısı arttıkça sızıntı akımının genliği de azalmaktadır. Buz, sıvı durumuna geçmeye başladığında uygulanan gerilimin genliği arttıkça ark sayısı da artmaktadır.

İzolatörlerde buzlanma olayının atlama üzerine etkisinde sıvı iletkenliği de önemli bir parametredir. Sıvı iletkenliğinin artması, buzlanan izolatör yüzeyinin yalıtkanlık özelliğinin yitirilmesinde oldukça etkilidir. Porselen ve cam izolatörde, sızıntı akımlarının sıvı iletkenliğine duyarlılığı karşılaştırıldığında cam izolatörün porselene göre daha fazla etkilendiği sonucuna varılmıştır.

İzolatörlerin tasarımı gerçekleştirilirken bulunduğu bölgenin iklim şartlarına göre buzlanma seviyesi, sıcaklık, nem ve kirlilik düzeyi göz önüne alınarak, etek çapı, etek aralığı, etek sayısı, yapıldığı malzeme vb. mekaniksel özelliklerin dikkate alınması kirlenme ve 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. Ancak oluşacak olan olumsuz koşulların etkilerini minimize etmek mümkündür. İzolatörlerde buzlanma olayının etkisini azaltmak için gelecekteki çalışmalarda, sinyal işleme veya görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Erken uyarı sistemi ile izolatörlere zamanında müdahale edilerek arızaların oluşmasını engellenebilir. Böylece enerji kesintileri ve onarımlar azaltılarak ekonomiye katkı sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Farzaneh, M., and Kiernicki, J. (1995). Flashover problems caused by ice build up on insulators, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 11, no. 2, pp. 5–17, doi: 10.1109/57.372510.
- [2] Chisholm, W. A. (1997). North American operating experience: Insulator flashovers in cold conditions, in *Proc. CIGRE Study Committee 33 Colloq.*, pp. 1–4.
- [3] Farzaneh, M. (2013). Insulator icing flashover, in *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 1–15, doi: 10.1109/CEIDP.2013.6748324.
- [4] Farzaneh, M., Zhang, J., and Volat, C. (2006). Effect of insulator diameter on AC flashover voltage of an ice-covered insulator string, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 2, pp. 264–271, doi: 10.1109/TDEI.2006.1624271.
- [5] Jiang, X., Wang, S., Zhang, Z., Xie, S., and Wang, Y. (2007). Study on AC Flashover Performance and Discharge Process of Polluted and Iced IEC Standard Suspension Insulator String, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 472–480, doi: 10.1109/TPWRD.2006.876705.
- [6] Zhang, Z., Jiang, X., Sun, C., Hu, J., Huang, H., and Gao, D. W. (2012). Influence of insulator string positioning on AC icing flashover performance, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 19, no. 4, pp. 1335–1343, doi: 10.1109/TDEI.2012.6260009.
- [7] Xu, Z., Xu, T., Yao, T., Li, X., Li, J., Chen, J., ... & Jia, R. (2014). Flashover performance of UHV amp;EHV post insulators under icing conditions, in *2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, pp. 295–298, doi: 10.1109/CEIDP.2014.6995754.
- [8] Yin, F., Jiang, X., & Farzaneh, M. (2014). Electrical performance of composite insulators under icing conditions, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 6, pp. 2584–2593, doi: 10.1109/TDEI.2014.004571.
- [9] Jiang, X., Xiang, Z., Zhang, Z., Hu, J., Hu, Q., and Shu, L. (2014). Comparison on ac icing flashover performance of porcelain, glass, and composite insulators, *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 100, pp. 1–7, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.12.010>.
- [10] Shu, L., Wang, S., Jiang, X., Hu, Q., Liang, J., Yin, P., & Chen, J. (2014). Modeling of AC flashover on ice-covered composite insulators with different shed configurations, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 6, pp. 2642–2651, doi: 10.1109/TDEI.2014.004685.
- [11] Porkar, B., & Farzaneh, M. (2017). Ac Flashover Performance of a Horizontal Insulator String Under Heavy Icing Conditions.
- [12] Tian, L., Zhang, Z., Jiang, X., Shu, L., Hu, J., & Qin, H. (2018). Study on the Icing Accretion Characterization of Porcelain and Glass Insulator, in *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, pp. 1–4, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8642201.
- [13] Zhu, Y., Zhou, R., Zhang, Y., Dong, X., & Huang, X. (2021). Review on flashover risk prediction method of iced insulator based on icing monitoring technology, *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 185, p. 103252, doi: <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103252>.
- [14] Liu, Y., Li, Q., Du, B., & Farzaneh, M. (2021). Feature extraction and classification of surface discharges on an ice-covered insulator string during AC flashover using gray-level co-occurrence matrix, *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 2542, doi: 10.1038/s41598-021-82254-9.
- [15] Vlaar, J. (1991). Thermal and electrical properties of icicles, *Univ. Waterloo 2B Honours Phys. Report, SN*, vol. 88104434.
- [16] Khalifa, M. M., & Morris, R. M. (1967). Performance of Line Insulators Under Rime Ice, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-86, no. 6, pp. 692–698, doi: 10.1109/TPAS.1967.291880.
- [17] Chen, X. (2000). *Modeling of electrical arc on polluted ice surfaces*. École Polytechnique de Montréal.
- [18] Wilkins, R. (1969). Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface-pollution films, in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 116, no. 3, pp. 457–465.
- [19] Farzaneh, M., Zhang, J., & Chen, X. (1997). Modeling of the AC arc discharge on ice surfaces, *IEEE*

- Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 325–338, doi: 10.1109/61.568256.
- [20] Chisholm, W. A. (1999). Une nouvelle mesure pour evaluer le comportement electrique des isolateurs recouverts de glace.
 - [21] Farzaneh, M., & Zhang, J. (2007). A Multi-Arc Model for Predicting AC Critical Flashover Voltage of Ice-covered Insulators, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 6, pp. 1401–1409, doi: 10.1109/TDEI.2007.4401222.
 - [22] Zhang, J., & Farzaneh, M. (2000). Propagation of ac and dc arcs on ice surfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 2, pp. 269–276, doi: 10.1109/94.841820.
 - [23] Bernal, J. D., & Fowler, R. H. (1933). A theory of water and ionic solution, with particular reference to hydrogen and hydroxyl ions, *J. Chem. Phys.*, vol. 1, no. 8, pp. 515–548.
 - [24] Fletcher, N. H. (1970). The Chemical Physics of Ice, Cambridge Univ, Press. Cambridge, Engl., p. 111.
 - [25] Farzaneh, M., & Chisholm, W. A. (2009). *Insulators for icing and polluted environments*, vol. 47. John Wiley & Sons.
 - [26] Cole, K. S., & Cole, R. H. (1941). Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics, *J. Chem. Phys.*, vol. 9, no. 4, pp. 341–351.
 - [27] Yoshida, S., & Naito, K. (2005). Survey of electrical and mechanical failures of insulators caused by ice and/or snow, in *CIGRE WG B*, vol. 2, pp. 22–26.
 - [28] Drapeau, J. F. (1989). État de l'Art Concernant les Essais et le Comportement sous Glace des Isolateurs, *Rapp. Sci. Hydro-Québec, No. IREQ-4490*, pp. 1–46.
 - [29] Forrest, J. S. (1936). The electrical characteristics of 132-kV line insulators under various weather conditions, *J. Inst. Electr. Eng.*, vol. 79, no. 478, pp. 401–415.
 - [30] Jolly, D. C. (1972). Contamination flashover theory and insulator design, *J. Franklin Inst.*, vol. 294, no. 6, pp. 483–500, doi: [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(72\)90099-3](https://doi.org/10.1016/0016-0032(72)90099-3).
 - [31] Gorski, R. A. (1986). Meteorological Summary-March 10, 1986,-Multiple Outages on the Southern Ontario (Central Region) 500kV System, *Ontario-Hydro, Met. Rep.*, no. 80604–1, pp. 1–40.
 - [32] Boyer, A. E., & Meale, J. R. (1988, March). Insulation flashover under icing conditions on the Ontario-Hydro 500 kV transmission line system, in *CEA Spring Meeting*, pp. 1–20.
 - [33] Farzaneh, M., & Melo, O. T. (1990). Properties and effect of freezing rain and winter fog on outline insulators, *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 1, pp. 33–46, doi: [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(90\)90016-P](https://doi.org/10.1016/0165-232X(90)90016-P).
 - [34] Watanabe, Y. (1978). Flashover Tests of Insulators Covered with Ice or Snow, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-97, no. 5, pp. 1788–1794, doi: 10.1109/TPAS.1978.354672.
 - [35] Fikke, S. M., Hanssen, J. E., & Rolfseng, L. (1993). Long range transported pollutants and conductivity of atmospheric ice on insulators, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 3, pp. 1311–1321, doi: 10.1109/61.252657.
 - [36] Farzaneh, M., & Drapeau, J. F. (1995). AC flashover performance of insulators covered with artificial ice, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 10, no. 2, pp. 1038–1051, doi: 10.1109/61.400824.
 - [37] Han, X., & Jiang, X. (2021). Analysis of critical condition for dry and wet growth icing on insulators, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 192, p. 107006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.107006>.
 - [38] Khederzadeh, M., & Sidhu, T. S. (2005). Impact of TCSC on the protection of transmission lines, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 80–87, doi: 10.1109/TPWRD.2005.858798.
 - [39] Shu, L., Liang, J., Hu, Q., Jiang, X., Ren, X., & Qiu, G. (2017). Study on small wind turbine icing and its performance, *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 134, pp. 11–19.
 - [40] Makkonen, L. (1988). “A Model of Ice Growth,” *J. Glaciol.*, vol. 34, no. 116, pp. 64–70, doi: 10.3189/S0022143000009072.
 - [41] Farzaneh, M., Baker, T., Bernstorff, A., Burnham, J. T., Carreira, T., Cherney, E., ... & Zhang, J. (2005). Selection of station insulators with respect to ice and snow-part II: methods of selection and

- options for mitigation, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 271–277, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839728.
- [42] Yu, D., Farzaneh, M., Zhang, J., Shu, L., Sima, W., & Sun, C. (2007). Effects of Space Charge on the Discharge Process in an Icicle/Iced-Plate Electrode System under Positive DC Voltage, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 6, pp. 1427–1435, doi: 10.1109/TDEI.2007.4401225.
 - [43] Chisholm, W. A. (2007). Insulator Leakage Distance Dimensioning in Areas of Winter Contamination using Cold-fog Test Results, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 14, no. 6, pp. 1455–1461, doi: 10.1109/TDEI.2007.4401228.
 - [44] Baker, A. C., Farzaneh, M., Gorur, R. S., Gubanski, S. M., Hill, R. J., Karady, G. G., & Schneider, H. M. (2009). Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 3, pp. 1633–1641, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2024666.
 - [45] Vuckovic, Z., & Zdravkovic, Z. (1990, October). Effect of polluted snow and ice accretion on high voltage transmission line insulators, *In 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*.
 - [46] Farzaneh, M., Baker, T., Bernstorf, A., Burnham, J. T., Carreira, T., Cherney, E., ... & Zhang, J. (2005). Selection of station insulators with respect to ice and snow-part I: technical context and environmental exposure, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 264–270, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839731.
 - [47] Farzaneh, M., & Kiernicki, J. (1997). Flashover performance of IEEE standard insulators under ice conditions, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 4, pp. 1602–1613, doi: 10.1109/61.634180.
 - [48] Farzaneh, M. (2000). Ice accretions on high-voltage conductors and insulators and related phenomena, *Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 358, no. 1776, pp. 2971–3005.
 - [49] Farzaneh, M., & Fofana, I. (2004). Experimental study and analysis of corona discharge parameters on an ice surface, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 5, p. 721.
 - [50] Farzaneh, M., Fofana, I., Ndiaye, I., & Srivastava, K. D. (2006). Experimental studies of ice surface discharge inception and development, *Int. J. power & energy Syst.*, vol. 26, no. 1, p. 34.
 - [51] Farokhi, S., Farzaneh, M., & Fofana, I. (2008). Study of Ultraviolet Emission and Visible Discharge along an Ice Surface, in *2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 654–657, doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772814.
 - [52] Farokhi, S., Farzaneh, M., & Fofana, I. (2010). Experimental investigation of the process of Arc propagation over an ice surface, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 2, pp. 458–464, doi: 10.1109/TDEI.2010.5448101.
 - [53] Taheri, S., Farzaneh, M., & Fofana, I. (2013). Equivalent surface conductivity of ice accumulated on insulators during development of AC and DC flashovers arcs, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, no. 5, pp. 1789–1798, doi: 10.1109/TDEI.2013.6633710.
 - [54] Jiang, X., Chen, L., Zhang, Z., Sun, C., & Hu, J. (2009). Equivalence of Influence of Pollution Simulating Methods on DC Flashover Stress of Ice-Covered Insulators, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2113–2120, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2032329.
 - [55] Rizk, F. A. (1981). Mathematical models for pollution flashover, *Electra*, vol. 78, no. 5, pp. 71–103.
 - [56] Farzaneh, M., Zhang, J., Chaarani, R., & Fikke, S. M. (2000). Critical conditions of AC arc propagation on ice surfaces, in *Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.00CH37075)*, pp. 211–215, doi: 10.1109/ELINSL.2000.845491.
 - [57] Neumarker, G. (1959). Verschmutzungszustand und kriechweg, *Monatsber. D. Deut. Akad. Wiss., Berlin*, vol. 1, pp. 352–359.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Buğracan ÖZKÜÇÜK

████████████████████

114

■■■■■■■■■■

11/11/2016

██████████

114

114

© 2006 The Authors

██████████

[REDACTED]

© 2006 The Authors

© 2006 The Authors

114

© 2006 The Authors

11

5

© 2006 The Authors

5

██████████

1

██████████

7

██████████

5

_____)