



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAĞLARDA KISMİ DEŞARJ DAVRANIŞININ DÜZGÜN
OLMAYAN ELEKTRİK ALANDA İNCELENMESİ**

Alper AYDOĞAN

DANIŞMAN
Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı


İSTANBUL-2019

Bu çalışma 19.06.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ


Doç. Dr. Ayşe ERSOY YILMAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Cengiz POLAT UZUNOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi


Dr. Öğr. Üyesi Emrah DOKUR
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmî Gazete' de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 33689 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Teknolojinin her alanda çok hızlı ilerlediği günümüzde her gün yüzlerce yeni buluş ve keşif yapılmaktadır. Her buluş, her keşif ilk önce bir düşünce ile başlar. Bu buluşlar ve keşifler gözlem ve analiz ve birikim ile düşünceyi oluşturmaktadır. Bir düşünce ile başladığım bu yolda, beni her zaman doğru bir şekilde yönlendiren, her düştüğümde kaldıran, her çıkmaz yola girdiğimde doğru yolu göstererek, beni yönlendirerek motivasyonumu yüksek tutan, her zaman sabırlı olan, tecrübelerini aktarmaktan hiçbir zaman çekinmeyen çok değerli saygıdeğer hocam sayın Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ' a ve her zaman sorularıma cevap veren, çok kıymetli desteklerinden ötürü çok değerli hocam Sayın Arş. Gör. Fatih ATALAR' a, çalışmalarımnda her zaman destek olan Oğuz ÖNER' e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hayatımın her alanında, her anlamda bana destek olan, beni her zaman yüreklendiren, hep inanan, eşim Bahar BALCI AYDOĞAN' a teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca maddi manevi desteklerini hep hissettiğim babam İlyas AYDOĞAN' a ve annem Kibare AYDOĞAN' a' da teşekkürlerimi sunarım. Beni bu yolda yürürken her zaman destekleyen başta değerli yöneticilerim Güven KOCA, Cumhur GÖKÇELER ve çalışma arkadaşlarım Dilber MERAL ve Emre BALCI olmak üzere bütün çalışma arkadaşlarıma da çok teşekkür ederim.

Haziran 2019

Alper AYDOĞAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	3
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	9
3.1. DENEY KAZANI.....	12
3.2. KULLANILAN ELEKTROT TİPLERİ	12
3.3. KULLANILAN TRAFO YAĞI.....	13
3.4. ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	13
3.5. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ	13
3.5.1 Fourier Analizi.....	13
4. BULGULAR.....	16
4.1. ÖLÇÜM SONUÇLARI	16
4.1.1. 1. Elektrot Düzeni.....	16
4.1.2. 2. Elektrot Düzeni.....	23
4.1.3. 3. Elektrot Düzeni.....	29
4.1.4. 4. Elektrot Düzeni.....	36
4.1.5. 5. Elektrot Düzeni.....	42
4.1.6. 6. Elektrot Düzeni.....	46
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 3.1: Deney düzeneği	10
Şekil 3.2: Deney düzeneğine ait fotoğraf.....	11
Şekil 3.3: Elektrot düzeneğine ait fotoğraf (a) R= 6 cm küre elektrot üstten görünüş (b) R= 5 cm küre elektrot yandan görünüş (c) R= 2 cm küre elektrot üstten görünüş	12
Şekil 4.1: 1. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	17
Şekil 4.2: 1. Elektrot tipi:7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	18
Şekil 4.3: 1. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	19
Şekil 4.4: 1. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	20
Şekil 4.5: 1. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	21
Şekil 4.6: 1. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	22
Şekil 4.7: 2. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	23
Şekil 4.8: 2. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	24
Şekil 4.9: 2. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	25
Şekil 4.10: 2. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	26
Şekil 4.11: 2. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	27
Şekil 4.12: 2. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	28

Şekil 4.13: 3. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	30
Şekil 4.14: 3. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	31
Şekil 4.15: 3. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	32
Şekil 4.16: 3. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	33
Şekil 4.17: 3. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	34
Şekil 4.18: 3. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	35
Şekil 4.19: 4. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	36
Şekil 4.20: 4. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	37
Şekil 4.21: 4. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	38
Şekil 4.22: 4. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	39
Şekil 4.23: 4. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	40
Şekil 4.24: 4. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	41
Şekil 4.25: 5. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	42
Şekil 4.26: 5. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	43
Şekil 4.27: 5. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	44
Şekil 4.28: 5. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	45
Şekil 4.29: 6. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	47

Şekil 4.30: 6. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	48
Şekil 4.31: 6. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	49
Şekil 4.32: 6. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm.....	50



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1: 1. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	17
Tablo 4.2: 1. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	18
Tablo 4.3: 1. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	19
Tablo 4.4: 1. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	20
Tablo 4.5: 1. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	21
Tablo 4.6: 1. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	22
Tablo 4.7: 2. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	24
Tablo 4.8: 2. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	25
Tablo 4.9: 2. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	26
Tablo 4.10: 2. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	27
Tablo 4.11: 2. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	28
Tablo 4.12: 2. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	29
Tablo 4.13: 3. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	30
Tablo 4.14: 3. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	31
Tablo 4.15: 3. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	32

Tablo 4.16: 3. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	33
Tablo 4.17: 3. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	34
Tablo 4.18: 3. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	35
Tablo 4.19: 4. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	37
Tablo 4.20: 4. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	38
Tablo 4.21: 4. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	39
Tablo 4.22: 4. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	40
Tablo 4.23: 4. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	41
Tablo 4.24: 4. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	42
Tablo 4.25: 5. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	43
Tablo 4.26: 5. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	44
Tablo 4.27: 5. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	45
Tablo 4.28: 5. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	46
Tablo 4.29: 6. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	47
Tablo 4.30: 6. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	48
Tablo 4.31: 6. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri	49
Tablo 4.32: 6. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri.....	50

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

A	:Amper
kHz	:KiloHertz
kV	:KiloVolt
kVA	:KiloVoltAmper
kWh	:Kilowatt saat
mA	:MiliAmper
ms	:Milisaniye
MVA	:MegaVoltAmper
MΩ	:Mega Ohm
s	:Saniye
W	:Watt (güç birimi)
Ω	:Ohm (direnç birimi)

Kısaltmalar	Açıklama
A-F	:Genlik-Frekans (Amplitude- Frequency)
ASTM	:Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (American Society for Testing and Materials)
ATA	:Varış Süresi Analizi (Arrival Time Analysis)
CPWA	:Darbe Akımı Dalga Formu (Current Pulse Waveform Analysis)
DC	:Doğru Akım (Direct Current)
DFT	:Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
EMTP	:Elektromanyetik Geçici Durum Analiz Programı (Electromagnetic Transients Program)
FDS	:Frekans Domeni Spektroskopisi (Frequency Domain Spectroscopy)
FFT	:Hızlı Fouier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
HFCT	:Yüksek Frekans Akım Transformatörü (High-Frequency Current Transformer)
HFPT	:Yüksek frekanslı güç trafoları (High frequency power transform)
IEC	:Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (The International Electrotechnical Commission)
LEM	: Işık Etkisi Ölçümü (Light Effect Measurement, LEM)
PCB	:Poliklorlu Bifenil (Polychlorinated biphenyl)
PD	:Kısmi Deşarj (Partial Discharge)
PDC	:Polarizasyon Ve Depolarizasyon Akımı (Polarisation and Depolarisation Current)
PDIV	:Kısmi deşarj başlangıç gerilimleri(Partial Discharge Inception Voltage)
PRPD	:Faz Çözümlü Kısmi Boşalma (Phase-Resolved Partial Discharge)
RTTF	:Yükselme Süresi ve Aktarma Fonksiyonu (Rise-Time and Transfer Function)
RVM	: Yeniden Toparlanma Gerilimi Ölçümü (Recovery Voltage Measurement)
TDR	:Zaman Domeni Reflektometrisi (Time-Domain Reflectometry)
TS	:Türk Standartları
UHFD	:Ultra Yüksek Frekans Algılama (Ultra High Frequency Detection)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAĞLARDA KISMİ DEŞARJ DAVRANIŞININ DÜZGÜN OLMAYAN ELEKTRİK ALANDA İNCELENMESİ

Alper AYDOĞAN

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ

Türkiye’ de enerji tüketimi son 20 yıl baz alındığında 1998 yılı için 114,022 milyar kWh iken 2018’ de 303,3 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Dünya geneline bakıldığında da enerji talebinin her geçen yıl arttığı ve bu enerjinin iletim ve dağıtımında kullanılan devre kesici, kablo ve trafoların güçlerinin de giderek yükseldiği görülmektedir. Yüksek gerilim ekipmanlarında herhangi bir arıza durumunun önceden tespit edilmesi hayati önem arz eder. Kısmi deşarj bu arıza durumlarının türünü (erozyon, iz oluşumu, vb), yerini ve kullanılan yalıtkan malzemenin ömrünü kestirmede kullanılan önemli bileşenlerden biridir.

Bu çalışmada laboratuvar ortamında, mineral yağ içerisinde yarı-küre-sivri uçlu elektrottan oluşan bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Bakır ve çelik uçlu sivri elektrotlar ile farklı çaplarda yarı kürelerin kullanıldığı 6 adet farklı elektrot sistemi kullanılarak kısmi deşarj oluşumu için düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Deneylerde 5,4 kV ile 14,4 kV arasında 6 farklı gerilim seviyesinde oluşan kısmi deşarjlar 30 000 örnek/saniye ile ölçülüp kaydedilmiştir. Kısmi deşarj davranışının düzgün olmayan elektrik alanda elektrot tipi, elektrotlar arası açıklık, kullanılan gerilim seviyesi ile olan ilişkisi deneysel olarak ölçülerek analiz edilmiştir.

Haziran 2019, 75 sayfa.

Anahtar kelimeler: Kısmi Deşarj, Yüksek Gerilim, Düzgün Olmayan Elektrik Alan, Mineral Yağ, Harmonik

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF PARTIAL DISCHARGE BEHAVIOR OF OILS IN NON-UNIFORM ELECTRIC FIELD

Alper AYDOĞAN

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ

When the last 20 years is considered, energy consumption in Turkey increased from 114,022 billion kWh in 1998 to 303,3 billion kWh in 2018. When considered worldwide, it is seen that the energy demand increases with each passing year and the power of circuit breakers, cables and transformers used in the transmission and distribution of this energy increase gradually. It is of great importance to determine any fault in high voltage equipment in advance. Partial discharge is one of the important components used to estimate the type (erosion, tracking formation, etc.) and location of these faults and life of the insulating material used.

In this study, an experimental setup consisting of concentric-hemisphere electrode in mineral oil was prepared in laboratory environment. Non-uniform electric field was formed for partial discharge formation by using 6 different electrode systems using copper and steel tipped concentric electrodes and hemispheres of different diameters. In the experiments, partial discharges which occurred in 6 different voltage levels between 5,4 kV and 14,4 kV were measured and recorded with 30 000 samples/second. The relationship between the partial discharge behavior and the electrode type, the gap between the electrodes and the voltage level used in the non-uniform electric field was measured and analyzed experimentally.

June 2019, 75 pages.

Keywords: Partial Discharge, High voltage, Non-Uniform Electric Field, Mineral Oil, Harmonic.



1. GİRİŞ

Yüksek gerilim tekniğinde kullanılan güç trafoları, kabloları ve kesicileri için yalıtımın korunması hem kullanıcılar hem de hattın elektriksel güvenliği için olmazsa olmazdır. Yalıtkan sıvılar elektriksel yalıtkan olarak 1850'lerden beri yoğun olarak kullanılmaktadır. Mineral yağlar, halojenli yağlar (florlu ve klorlu yağlar), silikonlu yağlar ve günümüzde yaygın olarak kullanılan kompozit yağlar sıvı dielektriklerin önemli temsilcileridir. Sıvı dielektrikler elektriksel yalıtımı etkin olarak sağlayan oldukça ekonomik ve uygulaması kolay bir malzeme olsa da yapıları gereği safsızlıklara karşı oldukça hassastır. Özellikle yapı içerisinde yer alan kirleticilerden, katı parçacıklar [1, 2], gaz kabarcıkları [3] ve su ve su damlacıkları [5, 6] gibi malzemeler performansı oldukça düşürecektir [1-6]. Yağ dielektrik malzemelerin kullanım şartları, ortam koşulları ve ortalama ömürlerini kestirmede literatürde çok sayıda (Gaz Kromatografisi, Nem miktarı, vb.) deneysel yöntem mevcuttur. Bunların içerisinde elektriksel dayanımı ve dielektrik karakteristiklerini elde etmek için yapılan deneyler yalıtkanın kullanım amacını kestirmede belirleyici olmaktadır. Kısmi deşarj analizi, yalıtkan sıvının içinde bulunduğu ortamda elektriksel güvenilirliği tespit etmede sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Bu şekilde yalıtkan sıvı içerisindeki yabancı maddelerin durumu (boyutları, miktarı, türü vb.) hakkında bilgiler edinilebilir, güvenliği ve güvenilirliği ortaya konabilir.

Yağlarda delinme gerilim seviyesi yağın elektriğin geçişine dayanmadığı elektriksel boşalmanın (iletiminin) gerçekleştiği değerdir. Yağlarda delinmenin gerçekleşmesi için anahtar mekanizma yağın içinde bulunduğu yalıtım ortamının elektrik alanına bağlıdır. Bu elektrik alanına bağlı olarak gerçekleşen moleküler iyonlaşma ile hızlı elektronlar ve yavaş pozitif iyonlar oluşur. Oluşan hızlı elektronlar iyonizasyon bölgesinde pozitif elektrottan uzaklaştırılır ve net pozitif uzay yükü alanı hızlı gelişir. Yağdaki elektrik alan dağılımı, iyonlaşma sırasında, yağdaki pozitif yükün önündeki elektrik alanı artarken pozitif elektrodun önünde azalacağı şekilde modifiye edilir. Bu elektrodinamik işlemler, trafo yağının buharlaştıran ve sıcaklık artışı nedeniyle bir gaz fazı yaratan gelişen bir iyonize elektrik alan dalgasında neden olur. Yağın buharlaşması sonucu, yağda düşük yoğunluklu kanallar oluşur. Bu şerit kanallar elektrik alan gradyanının yüksek olduğu yağın bazı kısımlarında yer alan düşük yoğunluklu yapılardır [4].

Yağ dielektriklerin delinme dayanımını modellemede sonlu elemanlar yöntemi yine en sık kullanılan metot olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada mineral yağ içerisinde yarı küre ve sivri uçlu iğne elektrolar kullanılmak sureti ile düzgün olmayan bir elektrik alan yaratılmıştır. Çalışmada farklı yarıçapta bakır malzemedan yapılmış yarı küre elektrotlar ile bakır ve çelikten yapılmış sivri uçlu çubuk elektrotlar kullanılmıştır. Bu elektrotların arasındaki mesafe ve uygulanan gerilimin değeri değiştirilmek sureti ile oluşan kısmi deşarjlar ölçülmüştür. Toprak elektrot ucundan toplanan kaçak akımların davranışları harmoniklerinin analiz edilmesi sureti ile frekans domeninde incelenmiştir.

Çalışmanın ilk bölümünde çalışmanın amacı, belirlenen yöntem ve literatürdeki yeri tanıtılmıştır.

İkinci bölümünde kısmi deşarjın ve delinme geriliminin tanıtılması, temel prensiplerinin aktarılması ile deneyde kullanılan trafo yağının elektriksel kısmi deşarj için önemi vurgulanmıştır.

Üçüncü bölüme geçildiğinde kullanılan malzemelerin ve yöntemin tanıtımı yapılmış ve deney setinin hazırlanma aşamaları anlatılmıştır.

Bulgular bölümü olan dördüncü bölümde deney sonuçlarının birbirleri ve kendi içinde analizi yapılmış ve karşılaştırılmıştır. Ölçülen akım ve gerilim değerlerine göre harmonikler hesaplanmıştır. Son bölüm olan tartışma ve sonuç bölümünde ise deney bulgularının analizi yapılarak literatürde bulunan yeri belirtilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

Kısmi deşarj (PD) katı, sıvı ve gaz yalıtkan ortamlarda gerçekleşebilir. Genellikle gaz habbeciklerde başlarlar veya katı yalıtkanların içerisindeki boşluk veya sıvı yalıtkanların içerisindeki habbeciklerde gözlenirler. Katı yalıtkanlarda iz oluşumuna ve bozulmalara sebebiyet verirler. Kısmi deşarj bir yalıtkan izolasyon malzemesi ile iletken elektrot arasında oluşan fakat henüz gözlenmeyen kısa devre durumunun açıklanmasında kullanılır. Kısmi deşarj nedeni ile izolasyon sisteminde hatalar, kusurlar, belirsizlik ve süreksizlikler oluşabilir. Elektriksel kısmi deşarj IEC 60270 standardındaki tanımı esas alındığında oluşan elektrik deşarjının iletkene bitişik ya da belirli aralıkla ayrık olması durumuna göre mevcut izolasyonu kısmen aşarak oluşmaktadır [7]. Aynı zamanda yüksek elektrik alan sonucu yalıtkan ve kompozitlerde duvar olan boşluklarda kısmi delinme olarak da tanımlanmaktadır [8].

Kısmi deşarj teorisini incelediğimizde, düzgün ya da düzgün olmayan elektrik alanların elektriksel ark denilen olayın oluşum özelliklerinin ve darbe dalga ile yayılımı ve de zayıflamasını içermektedir. Bu durumun frekans tepkisinin doğru bir şekilde kalibre edilmiş olarak analiz edilmesi ve yorumlanması çok önemlidir. [9].

Delinme gerilimi bir yalıtkan malzemenin elektriksel olarak iletken hale gelmesine neden olan minimum gerilim seviyesidir. Deneysel olarak bir yalıtkanın iki elektrot arasına konulması ile oluşturulan bir sisteme yüksek gerilim uygulanması sonucu yalıtkan malzeme için deşarjlar oluşur. Gerilim belli bir seviyeye ulaştığında ise yalıtkan malzemede tam deşarj oluşur. Uygulanan bu gerilime delinme gerilimi denir.

Kısmi deşarjın daha iyi anlaşılması için kurulan deney ortamının sonunda analizi ve yorumlanması da çok önemlidir. Gowri ve arkadaşları güç transformatörleri üzerinde yaptıkları teorik çalışmada bir güç trafosunu sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS' de modellemiştir. Yaptıkları çalışmada 1 mm, 2 mm ve 3 mm boyutlarında tasarladıkları küre biçimli partiküllerin 100 MVA gücündeki trafodaki delinme dayanımına etkisini ortaya koymaya çalışmışlardır. Kirlenici partikül malzemesi olarak alüminyum ve bakır malzemeler modellenmiş ve bunların sargılar boyunca davranışı elde edilmiştir. Yapılan modelleme sonucunda alüminyum partiküllerin sargı boyunca hareket edebildikleri ortaya konmuştur. Buna karşın bakır partiküllerin yoğunluğunun daha fazla olması nedeni ile dibe çöktüğü görülmüştür. Her iki

durumda da küre şeklindeki bakır veya alüminyum partiküllerin kısmi deşarj oluşumunu değiştirmediğini belirtmişlerdir [10].

Transformatörlerde kısmi deşarjın tespit edilmesinde yaygın olarak 3 yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki kısmi deşarj sırasında yağın buharlaşması ile ortaya çıkan gazların toplanıp analiz edildiği gaz kromatografisi yöntemidir. Bu yöntem kimyasal bir yöntem olarak da anılmaktadır. Toplanan gazlardan yağın durumu, çamurlaşma başlangıcı olup olmadığı içerisindeki nem miktarı ve diğer kirlilikler ortaya konulmaktadır. Bir diğer elektriksel olmayan ölçme yöntemleri ultrasonik metot ve ışık etkisi ölçümü (Light Effect Measurement, LEM) yöntemleridir. Bir diğeri elektriksel testlerdir; elektriksel darbe algılama yöntemi, UHF algılama yöntemidir. Bu yöntemde yağ içerisine kademeli olarak gerilim arttırılarak delinme dayanımı tespit edilmekte, ilerleyen süreçte yağın durumu yeniden ortaya konulmak istendiğinde tekrar gerilim uygulanarak toplanan kısmi deşarj akımları ile yağın durumu hakkında fikir edinilmesi hedeflenir. Son yöntem ise özellikle son yıllarda yoğun olarak çalışılan Çok Yüksek Frekans Algılama (Ultra High Frequency Detection- UHFD) tekniğidir. Burada yağa uygulanan gerilim sonrası elde edilen kısmi deşarj ile toplanan farklı frekans bileşenleri değerlendirilerek yağın durumu hakkında bilgi edinilmektedir [11,13].

Chen ve arkadaşları yağ emdirilmiş kâğıt yalıtkanlı trafolarda kısmi deşarj davranışını deneysel olarak değerlendirmiştir. Çalışmada yağ emdirilmiş kâğıt yalıtkanlar için standart kusurlar olarak tanımlanan yüzeysel deşarj, kavite deşarjı ve korona deşarjı davranışı üç farklı zaman diliminde başlangıç, orta ve sonuç kısımları ayrı ayrı bölünerek değerlendirilmiştir. Yüzeysel deşarjlar için çubuk-düzlem elektrot sistemi, kavite deşarjlar için küre düzlem elektrot sistemi ve korona deşarjı için iğne-düzlem elektrot sisteminden yararlanmışlardır. Kısmi deşarj değerlerinin yanı sıra çözünmüş gazlar Hidrojen (H_2), Karbonmonoksit (CO), Karbondioksit (CO_2), Metan (CH_4), Etilen (C_2H_4), Etan (C_2H_6) ve Asetilen (C_2H_2) toplanmıştır. Bu değerler arasında kanonik korelasyon istatistik olarak ortaya konmuştur. Chen ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu deneysel çalışma ile Etilen (C_2H_4) gazının miktarının her 3 tip kısmi deşarjın oluşumunda da belirleyici olduğu ortaya konmuştur. Yüzeysel deşarjın temsilcisi olarak Etilen (C_2H_4) ve Etan (C_2H_6), kavite deşarjı için Etilen (C_2H_4) ve Asetilen (C_2H_2) gazlarının belirleyici olduklarını ölçmüştürler. Yine bu çalışmada korona oluşumunda oluşan gazların diğer deşarjlarda toplanan gazlardan daha az gaz çıkışı olduğu raporlanmıştır [11]. Simetrik elektrot sistemlerinde kısmi deşarj hatasının tespitinde ölçülen kısmi deşarjın sivrilikleri ve tepe

sayısının belirleyici olduğu fakat asimetrik elektrot sistemlerinde kısmi deşarjın basıklığının (ortalama değerinin) daha belirleyici olduğu vurgulanmıştır [12].

Güç transformatörlerinde kısmi deşarjın tespiti için çok sayıda yöntem literatürde yer almaktadır. Xu ve arkadaşları kısmi deşarjı ölçebilmek için trafonun üst kısmında buşingin üzerine bir kısmi deşarj kuplörü yerleştirmiştir. Yapılan bu deneysel çalışma elektromanyetik geçici analiz programı (Electromagnetic Transients Program, EMTP) programında simüle edilerek güvenilirliği ortaya konmuştur. Deneyler 110 kV değerinde bir trafo üzerinde yapılmıştır. Yalıtkan yağ içerisindeki yüzen metaller deneysel olarak yerleştirilen kuplör üzerinden değerlendirilmiştir. Yağ içerisinde yüzen metal üste yerleştirilen sensör, yüksek frekanslı akım trafosu yöntemi (high-frequency current transformer, HFCT), darbe akımı dalga formu yöntemi (current pulse waveform analysis, CPWA) ve ultra yüksek frekans yöntemi (ultra-high frequency, UHF) ile değerlendirilmiştir. Deneysel verilerin farklı 4 yöntem ile karşılaştırıldığı çalışmada önerilen sensörün verimliliği ortaya konmuş ve sensörün bir UHF yükselticisi ile kullanılmasının daha uygun olacağı vurgulanmıştır [13].

Uluslararası kabul görmüş, sıvı dielektriklerde kısmi deşarjların tespitinde kullanılan standart yöntem IEC 61294 numaralı kısmi deşarjların başlangıç gerilimlerinin tanımlanması- test prosedürü (Determination of the Partial Discharge Inception Voltage, PDIV – Test Procedure) isimli 1993 'de yayınlamış test standardıdır. Amerikan Test ve Malzeme Kurumu' nun (American Society for Testing and Materials, ASTM) özellikle bu konuda tanımlanmış bir standardı yoktur. Yalıtkan sıvılarda delinme gerilimi ise IEC 60156 test standardı ile ölçülmektedir. 2016 yılında Calcara ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada bu yöntemin yeterliliğini değerlendirmiş ve mevcut standardın revize edilmesi ya da yeni bir standardın yazılması gerekliliğini önermişlerdir [14].

Kısmi Deşarjın tespiti sırasında kullanılan yöntemlerden dielektrik yalıtım sıvıları için gelişimini inceleyen L. Calcara ve arkadaşları [14] elektrik şebeke frekansında bulunan arıza gerilimini içeren IEC 60156 standardı ve kısmi deşarjın başlangıç geriliminin bulunmasında kullanılan IEC 61294TR standardının su ve katı süspansiyon gibi kirletici maddelerin varlığın gösteren test amaçlı prosedürler olduğunu belirterek IEC 61294TR standardının yenilendiğinde dielektrik sıvılarda PD ölçümlerindeki ilgili teknolojinin gelişimine katkıda bulunmuşlardır. Sistem olarak kısmi deşarjın başlangıç voltajlarını (PDIV) ve artan gerilim değerlerinde PD genliğinin ve faz ilişkilerinin tespit edilebilmesi için farklı gerilim değeri seviyelerinde de kısmi

deşarj patlamalarının da elde edilmesi gerektiğini belirtmişler ve yeni uluslararası standartlar (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu , American Society for Testing and Materials, ASTM) hazırlanırken dikkate alınması gereken dielektrik sıvılarda kısmideşarj ölçümlerindeki son teknolojiler gösterilmiştir [14].

Yüksek gerilim elektrik sistemlerinde kullanılan farklı yalıtkan malzemelerin bozulma davranışını analiz ederken en sık kullanılan yöntem kısmideşarjların izlenmesi, değerlerinin takip edilmesidir. Kısmideşarj tespit edildiğinde ilk olarak gerçekleşen bozulma tipinin hangi tür olduğunun ve nerede gerçekleştiğinin oluşandeşarjların zarar verip veremeyeceğinin bilinmesi gereklidir. Uygulanan test geriliminin, referans sinyaline göre atımların üretildiği zamanın, anı, genlik ve tekrarlama oranları, elektriksel bozunma türlerinin veya uygulanan gürültü kaynaklarının türünün doğası ile ilgilidir. Bu yapılan ölçümler ile elde edilen faz-çözümlü kısmi boşalma (Phase-Resolved Partial Discharge, PRPD) paternini analiz ederek, bir kısmideşarj bozulma işleminde yer alan izolasyon kusurunun tipini belirlemek mümkündür [15, 16]. Benzeri şekilde kısmideşarjların karakteristik paternlerinin incelenmesi ile başka gürültü kaynaklarının da tespit edilebilmesinin mümkün olduğu pek çok farklı çalışma ile ortaya konmuştur [17, 18]. Kısmideşarjların dalga formlarının karakterize edilmesinde belli başlı kullanılan matematiksel modellerde orijinal kısmideşarj sinyali (simetrik PD darbe sinyali ve Asimetrik PD darbe sinyali) ile bunları toplamada kullanılan yüksek frekanslı akım trafosu sensörlerinin davranışı değerlendirilmelidir [19, 20, 21]. Alvarez ve arkadaşları, dağıtım sistemlerinde kablolarda, farklı kısmideşarjların ve gürültü kaynaklarının tanımlanması için buradan toplanan sinyallerin dalga formlarını matematiksel olarak değerlendirip sınıflamıştır. Yaptıkları çalışmada darbe kaynaklarını tanımlayarak, çeşitli kısmideşarj davranışlarının varlığında ortak PD kaynaklarını (korona, yüzeysel boşalmalar ve iç boşalmalar) başarılı bir şekilde ölçen sonuçlar elde etmişlerdir [22].

Yüksek gerilim yalıtım sistemlerinde elektriksel ekipmanların ömür süresi, bunlarda kullanılan yalıtkan malzemelerin yalıtım dayanımı ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle yağlı güç trafolarında yalıtkan yağın performansının ortaya konmasında invaziv olmayan bir yöntem olarak frekans domeni spektroskopisinin (Frequency Domain Spectroscopy, FDS) çıkarılması oldukça popüler ve yaygın bir yöntemdir. Yağlı trafolarda son on yılda dielektrik spektroskopisinin çıkarılmasında üç majör kategori yer almaktadır. Bunlardan iki tanesi zaman domeninde ve bir tanesi frekans domenindedir. Zaman domeni spektroskopi yöntemleri polarizasyon ve depolarizasyon akımıdır (Polarisation and Depolarisation, PDC) [23-26]. Yeniden toparlanma

gerilimi ölçümü (Recovery Voltage Measurement, RVM) [27, 28] ve frekans domeni yöntemi olarak en sık kullanılan frekans domeni spektroskopisi öne çıkar. [23, 29-31].

Pradhan ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada farklı başlangıç eğimlerine sahip yedi üçgen dalga uyarma gerilimi, sinüzoidal olmayan uyarımlar olarak seçilmiştir. Laboratuvarda önceden belirlenmiş nem içeriği olan numuneler deneysel amaçlarla hazırlanmıştır. Karşılaştırmalı bir çalışma için hem sinüzoidal hem de sinüzoidal olmayan uyarma gerilimleri, hazırlanan test numunelerine kontrollü çevre koşullarında uygulanmış ve karşılık gelen dielektrik tepki akımları ölçülmüştür. Uyarma voltajlarından ve karşılık gelen tepki akımlarından, her bir uyarma voltajı için her numunenin dielektrik dağılım faktörü hesaplanmıştır. Minimum dielektrik dağılım faktöründen, her bir uyarma için her numunenin kâğıt nemi içeriği hesaplanmıştır. Sinüzoidal olmayan uyarma kullanımının, her numunenin kâğıt nemini öngörmeye sinüzoidal uyarma durumundan daha az hataya yol açtığı gözlenmiştir. Ayrıca örneklere uygulanan sinüzoidal olmayan uyarımlar arasında, belirli bir eğime sahip üçgen uyarma kullanımının, kâğıt nemi içeriği ile ilgili daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Aynı çalışmada dielektrik kayıp faktörü sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan uyarma gerilimleri için farklı frekans değerlerinde ölçülmüştür. En düşük kayıp faktörü değeri 4,64 Hz değerinde %1 kâğıt nem oranına sahip 1 numaralı örnekte olduğu ölçülmüştür. Kayıp faktörünün frekansa bağımlılığı değerlendirildiğinde belirleyici olanın aslında kağıttaki nem oranı olduğu da yapılan çalışmada ve elde edilen grafiklerden görülmektedir. %2 Nem oranı için iki numaralı örnekte en düşük kayıp faktörü 10 Hz' de, %3 nem oranı için 21, 52 Hz civarında olduğu ölçülmüştür. Tüm ölçümlerde kayıp faktörünün en fazla 70,90 V tepe değerine sahip üçgen gerilim seviyesinde olduğu gözlenmiştir. Bu değerinde hata miktarı da en az olarak ölçülmüştür [32].

Günümüzde özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olarak kullanımı, bunların dağıtım sistemine entegrasyonu için kullanılan katı hal transformatörlerine olan ilgiyi arttırmıştır. Yüksek frekanslı güç trafoları (High Frequency Power Transformer, HFPT) 5-40 kHz seviyelerine kadar uygulama olanağı ile burada anahtar bileşen olarak karşımıza çıkmaktadır [36, 37, 38]. Bu şekilde yüksek frekanslı gerilim uygulamalarında yalıtkanın hızlıca yaşlanması ve yalıtkanın erkenden bozulmasına sıkça rastlanır. Dalgalanma ve aşırı gerilimlerin olduğu yüksek gerilim sistemlerinde veya alçak gerilim şebekelerinde elektriksel performansın kötüleşmesinin ana sebebi kısmi deşarjlar olarak kabul edilir. Bu nedenle yalıtkan ömrünün doğru kestirilebilmesi için kısmi deşarj davranışının net bir şekilde ortaya konması

gerekir. Böylece farklı frekanslardaki gerilimler kullanılarak yapılan testler ile yalıtkanın erken bozulma mekanizmalarının anlaşılması mümkün olabilecektir [39, 40]. 50 Hz ile 1000 Hz frekansları arasında yapılan çalışmalarda frekans arttıkça kısmi deşarjın azaldığı ve bunun nedeninin de yüksek frekans altındaki minimum başlangıç alan değerine oldukça yakın bir alan değerinde kısmi deşarjın başlaması olduğu raporlanmıştır [41, 42]. Fakat yapılan başka deneysel çalışmalarda kısmi deşarjın frekansla arttığı ve bunun sebebinin de gerilim polaritesinde ters andaki artan ters elektrik alanı nedeni ile ilgili olduğu belirtilmiştir [43]. Yine yapılan deneysel çalışmalarda kısmi deşarj seviyesi ve kısmi deşarj sıklığının 0,1 Hz. ile 300 Hz arasında monoton bir davranışa sahip olmadığı belirtilmiştir [44]. Tao Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada kısmi deşarj ve alan boşalmalarının frekans bağımlılığını hem teorik hem de deneysel olarak analiz etmişlerdir. Çalışmada poliimid filmler farklı frekanslarda 5-30 kHz arasında gerilimlere maruz bırakılmış ve yaşlandırılan örneklerden toplanan verileri değerlendirmişlerdir [45]. Kısmi deşarj başlangıcının (Partial Discharge Inception Voltage, PDIV), uygulanan gerilimin frekans değerinden bağımsız değiştiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada kısmi deşarjın erozyon oluşumunda ve gelişmesinin de etkin rol oynadığı gözlenmiştir [45].

Yüksek gerilim ve orta gerilim güç kablolarında kısmi deşarjın ölçümü ve yerinin tespiti yalıtım sisteminin kontrolü için çok faydalı bir araç olarak görülmektedir. Bojie Sheng ve arkadaşları kısmi deşarj izleme sistemlerinde kullanım için kısmi deşarj darbesinin yükselme süresi ve aktarma fonksiyonuna (Rise-Time and Transfer Function, RTTF) dayanan yeni bir kısmi deşarj tekniği üzerine çalışmışlardır. Bu yöntem diğer bilinen yöntem olan, zaman domeni reflektometrisi (Time-Domain Reflectometry, TDR), faz farkı, varış Süresi analizi (Arrival Time Analysis, ATA) ve genlik-frekans (Amplitude-Frequency, AF) haritalaması ile karşılaştırarak analiz edilmiştir. Bu yöntemde kısmi deşarj darbesinin yükselme süresi ve ölçüm noktasına ulaşmadan önce bir kısmi deşarj darbesinin yayıldığı kablo uzunluğu bir fonksiyon olarak alınarak analiz yapılmıştır. [46]

3. MALZEME VE YÖNTEM

Yalıtkan yağlar olarak da bilinen sıvı dielektrikler yüksek gerilim iletim ve dağıtım hatları da dahil olmak üzere hemen her bileşende kullanılmaktadır. Bu bileşenlerden transformatörlerde, yüksek gerilim güç kesicilerinde, yüksek gerilim kondansatörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Sıvı dielektrikler yüksek gerilim devre kesicilerinde ark oluşmasını engellemek, kompozit dielektriklerdeki boşlukları doldurmak, ince kâğıt yalıtkanların yalıtkanlığının artması için kağıtlara emdirilerek soğutma amaçlı da kullanılabilir. Sağladıkları katkıların yanında fiyat açısından oldukça ucuz olan ve bu nedenle fiyat performansı yüksek olan, mineral yağlar olarak da bilinen sıvı dielektrikler elektrik enerji endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Sıvı dielektrikler olarak bilinen ve endüstride kullanılan yağ çeşitleri oldukça fazladır. Çeşitli olarak reçineli, klorlu, silikonlu, florürlü yağlar bulunmaktadır. Kullanım amacına ve kullanım yerine göre yağların seçimi değişiklik göstermektedir.

Mineral yağlar, ham petrolün rafinasyon yöntemi sonucu elde edilmektedir. Mineral yağlar naftanik hidrokarbonlardan, parafinik ve aromatik hidrokarbonlardan oluşmaktadır. Aromatik hidrokarbonlar C_nH_{2n-6} şeklinde gösterilen doymamış hidrokarbonlardır.

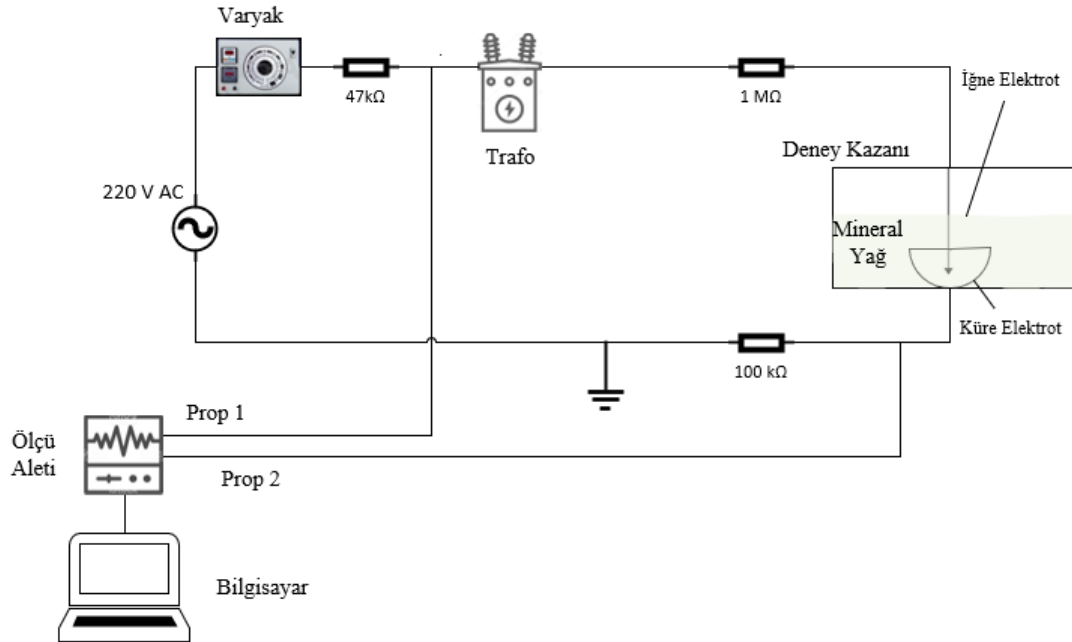
Klorlu yağlar iki aromatik hidrokarbon, benzen ve difenilin klorine edilmesi ile elde edilen klorlu aromatik bileşiklerdir. Bunlar askarel veya kısaca poliklorlu bifenildir (Polychlorinated biphenyl, PCB). Yüksek yanma noktasına ve mükemmel elektriksel özelliklere sahiptirler. Son dönemde çevreye olan zararlı etkileri nedeni ile kullanımını sınırlandırılmıştır.

Silikon yağlar PCB' lere alternatif olarak sunulmuştur. Buna karşın PCB' lere göre oldukça pahalıdır. Moleküler yapısında ana zincir silikon ve oksijen ve organik grupların yan zincirlerinden oluşmaktadır. Silikon yağların kayıp faktörlerinin değişimi frekans ve sıcaklıktan bağımsızdır. 150 derecedeki uzun süreli termal kararlılıkları dikkate değerdir. Silikon yağlar pek çok kimyasala karşı dirençlidir. Çok yüksek sıcaklıklarda dahi oksitlenmeye karşı dayanıklıdır. Ark sırasındaki termal zorlanmalarda ana zincirde oluşan iletken olmayan silikon dioksit (Kuvartz) oluşumu dikkate değer bir özelliğidir. En büyük dezavantajı yüksek su tutma ve zayıf gaz absorpsiyonuna sahip olmalarıdır [52].

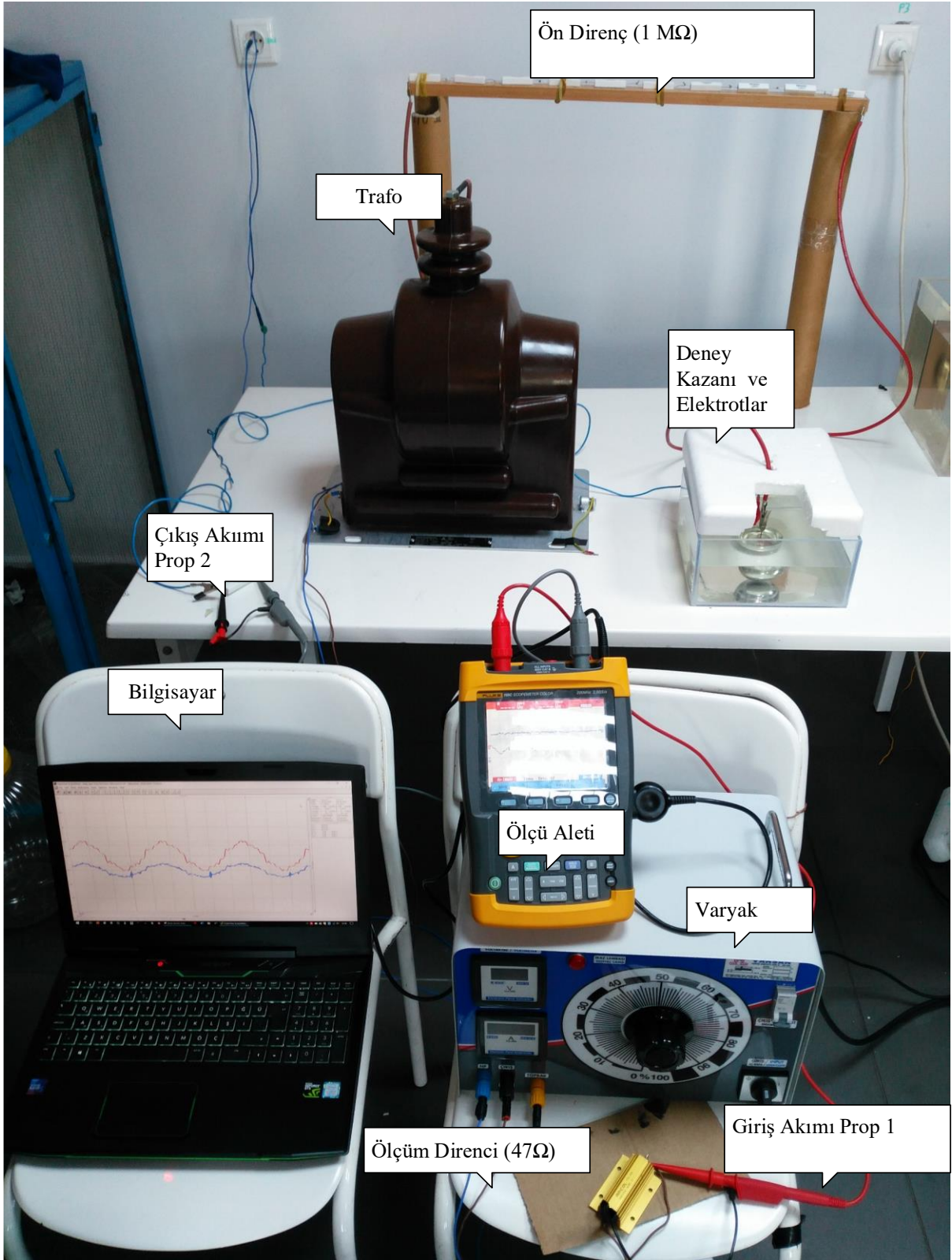
Basit bir fiziksel sistemde örneğin toprak üzerindeki tek bir elektrotta ya da toprağın hemen üzerindeki iki paralel elektrotta veya eşit çaplı kürelerin olduğu iki elektrotlu bir sistemde iki sonlu uzunlukta paralel düzlemde, koaksiyel silindirlere veya konsantrik kürelerde analitik

olarak bir alan dağılımı hesabı yapılabilir. Fakat birçok yüksek gerilim uygulamasında fiziksel sistemler bundan daha karmaşık ve zordur. Bu durumlarda farklı sayısal yöntemler uygulanarak da elektrik alan hesaplaması yapılabilir. Bu yöntemler, sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi, montecarlo yöntemi, moment yöntemi, görüntüleme yöntemi, yük simülasyonu yöntemi, yüzey deşarj yöntem ve bunların kombinasyonu olarak karşımıza çıkar [47-52].

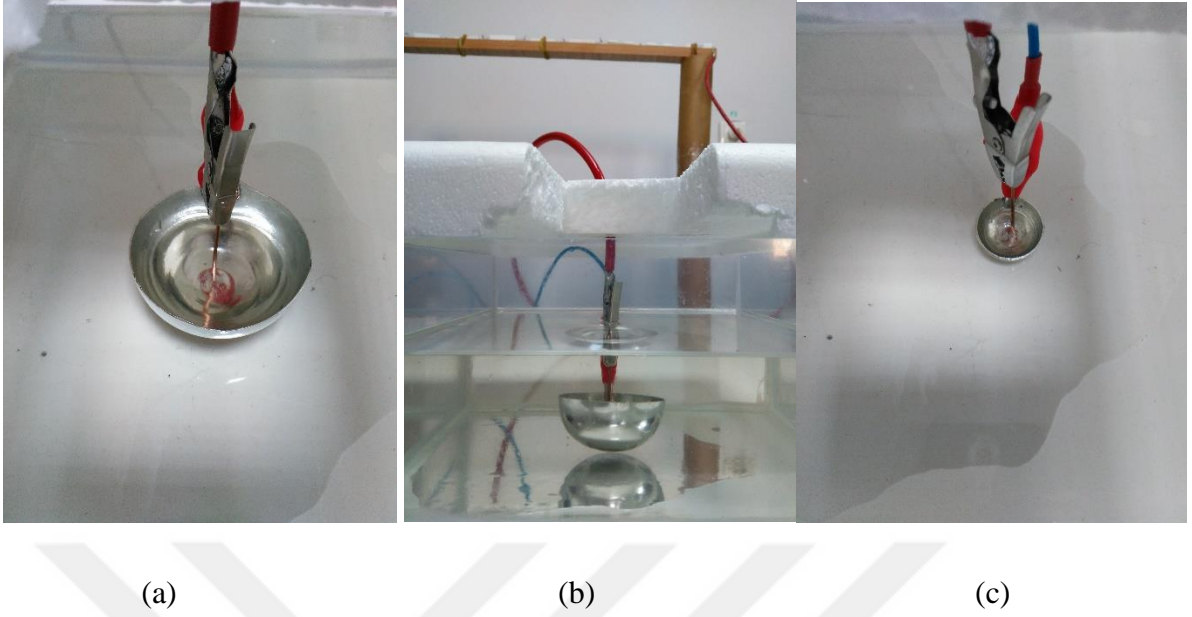
Yapılan tez çalışması için farklı elektrot tipleri için kısmi deşarj davranışının analiz edilmesi için trafo yağı içerisinde düzgün olmayan elektrik alan asimetrik elektrotlarla oluşturulmuştur. Deney düzeneği kurulurken TS EN 60270/A1 Kablolar-Yüksek gerilim deney teknikleri-Kısmi boşalma ölçmeleri ve TS 2051, Elektriksel Kısmi Boşalmaların Ölçülmesi test standartlarından yararlanılmıştır [33, 34]. Deney düzeneğinde gerilim seviyesinin ayarlanması için 5kVA gücünde bir monofaze varyak kullanılmıştır. Testlerde yüksek gerilim kaynağı olarak bir ölçü trafosu olan gerilim trafosu kullanılmıştır. Kullanılan trafonun gücü 1.5 kVA ve dönüştürme oranı 220 V/ 40 kV' dir. Trafonun yüksek gerilim çıkışından sonra 1 M Ω seviyesinde toplamda 110W gücünde taş direnç kullanılmıştır. Varyak çıkışında ise 47 Ω 25W gücünde alüminyum direnç kullanılmıştır. Deney düzeneğine ait şematik gösterim Şekil 3.1' de, bu düzeneğe ait fotoğraf Şekil 3.2.' de ve elektrot düzeneğine ait fotoğraf ise Şekil 3.3.' de verilmiştir.



Şekil 3.1: Deney düzeneği



Şekil 3.2: Deney düzeneğine ait fotoğraf



Şekil 3.3: Elektrot düzeneğine ait fotoğraf (a) $R= 6$ cm Küre elektrot üstten görünüş (b) $R= 5$ cm Küre elektrot yandan görünüş (c) $R= 2$ cm küre elektrot üstten görünüş

3.1. DENEY KAZANI

Testlerde kullanılan kabın boyutları kare seçilmiş olup, 25 cm bir kenar uzunluğu ve 10 cm yüksekliğinde 25x25x10 cm ve 0,2 cm kalınlığında olmak üzere sızdırmaz pleksiglas malzemeden yapılmıştır. Kullanılan kap 6,25 litredir.

3.2. KULLANILAN ELEKTROT TİPLERİ

Deneyleerde 6 farklı elektrot tipi kullanılmıştır. Bunlar sırasıyla;

1. tip elektrot için: 6 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu bakır elektrot.
2. tip elektrot için: 6 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu çelik elektrot.
3. tip elektrot için: 5 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu bakır elektrot.
4. tip elektrot için: 5 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu çelik elektrot.
5. tip elektrot için: 2 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu bakır elektrot.
6. tip elektrot için: 2 cm çapında yarım küre ve 0,1 mikron iğne uçlu çelik elektrot.

3.3. KULLANILAN TRAF0 YAĞI

Bu çalışmada kullanılan trafo yağı mineral yağ olarak seçilmiş olup mineral yağlar diğer yağlara göre fiyat olarak daha ekonomik olmaları, aynı zamanda ısıtma ve soğutma kapasitelerinin yüksek olmaları nedeni ile tercih edilmiştir.

Mineral yağların elektriksel olan donanım sistemlerinin daha uzun süre ile kullanılması başlıca kullanılma sebepleri arasında gelmektedir. Kullanılan yağın dielektrik sabiti 2,2' dir.

3.4. ÖLÇÜM SİSTEMİ

Ölçümler için Fluke marka İki CAT IV Sınıfı Fluke ScopeMeter 199C serisi osiloskop kullanılmıştır. 200 MHz bant genişliğinde 2.5 GS/s (giga sample/ saniye) rnekleme hızına sahiptir. lm sisteminden alınan datalar FlukeView® SW160 for MultiFunction Counter arayüz yazılımı ile alınıp Matlab programında işlenmiştir.

3.5. VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.5.1 Fourier Analizi

Harmonik bileşenlerden faydalanarak yüksek gerilim, orta gerilim ve alçak gerilim elektrik ve elektronik sistemlerin arızasının bulunabilirliği sık olarak kullanılabilen yöntemlerden biridir. Bu konuda örnek verecek olursak harmonik bileşenlerin kullanıldığı alanlardan olan asenkron motorlarda bulunan rulman arızalarındaki tespit iyi bir örnek teşkil etmektedir [35].

İletim hatlarını incelediğimizde, dış etmenler, hava koşulları, öngörülemeyen problemler enerji iletilirken bozulmalara neden olur. Bu da sinüzoidal olmayan işaretlerin oluşmasına fırsat verir. Aynı şekilde dağıtım hatlarında da aynı problemlere rastlamak mümkündür.

Joseph Fourier 1800' l yıllarda bulmuş olduğu kendi adını taşıyan teori ile bu konuya bir zm getirmiştir. Sinüzoidal olmayan periyodik hareketleri dalgaların genlik ve frekanslarının farklı birçok sinüzoidal olan dalganın toplamından oluştuğunu bulmuştur. Fourier' in teorisi ilk olarak ısı iletimi teorisi üzerine yoğunlaşsa da bugün elektrik alanında karışık eşitlikleri zmekte kullanılmaktadır. Fourier serilerini kullanarak sinüzoidal olmayan bir dalgayı, genlik frekansları olan sinüzoidal dalgalara ayırabiliriz. Ayrıca Fourier dönüşümü ile temel bir fonksiyonu farklı frekanslardaki sinüs fonksiyonlarının toplamı şeklinde de ifade edebiliriz.

Fourier dönüşümüne baktığımızda bir $f(t)$ fonksiyonuna ait Fourier dönüşümü:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

Eşitliği ile tanımlanmaktadır. $F(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü ise,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{-j\omega t} dt \quad (3.2)$$

biçiminde tanımlanır. Bu iki eşitlik olan (3.1) ve (3.2) eşitlikleri, Fourier dönüşüm çifti olarak isimlendirilmektedir. Bu iki eşitliğin kullanım noktasına baktığımızda, frekans ya da zaman domenindeki $(-\infty, \infty)$ aralığında bulunan bir fonksiyonun sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için ters domende kullanıldığı görülmektedir. Hızlı Fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) ve ayrık Fourier dönüşümü (Discrete Fourier Transform, DFT) ise periyodik sinüzoidal olmayan bir dalga şeklinin frekans spektrumunun analiz edilmesinde kullanılmaktadır.

Her periyot için n adet örnekleme alındığında, ilk eşitlikteki frekans domeni fonksiyonu (3.1) ve ikinci eşitlikte bulunan zaman domeni fonksiyonu (3.2) kullanılarak periyodik örneklenmiş fonksiyonlar olduğunda bu ifadeler ayrık Fourier dönüşümü denilmektedir.

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T)e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.3)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega)e^{-j2\pi kn/N} \quad (3.4)$$

(3.3) eşitliğine bakıldığında $k, n = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$ olarak verilmektedir.

Ayrık Fourier dönüşümü, örnekleme zaman fonksiyonu şeklinde elde edilebilen ölçüm bilgisi olarak alındığından harmonik ölçümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır.

Ayrık Fourier dönüşümünü kolaylaştırmak için hızlı Fourier dönüşümü kullanılmaktadır.

$$W = e^{-2j\pi/N} \quad (3.5)$$

Tanımı yapıldığında $[W^{kn}]$ matrisindeki elemanların benzerliğinden faydalanılmaktadır.

Bu netice devamında işlem sayısı $(N \cdot \log_2(N))$ seviyesine kadar gerilemektedir.

İletim ve dağıtım hatlarında Sinüzoidal olmayan akımın anlık akım değerinin Fourier serisine açtığımızda elde edilen eşitlik aşağıda (3.5)' de görülmektedir.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (3.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte DC terimleri ihmal edilmiştir. Zaman domeninde i_n n. dereceden harmonik akımın anlık değeridir. I_n ise n. dereceden harmonik akımın etkin değeridir. ω_1 Temel frekansa ait açısız frekanstır. δ_n ise n. harmonik akımın faz açısıdır.

Bir güç sisteminde hatalara neden olan harmonik bozulmaları değerlendirirsek aşağıdaki (3.7) ifadesindeki gibi;

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.7)$$

n. mertebeden harmonik için karşılık gelen akım, harmonik distorsiyonu şeklinde ifade edilir.

4. BULGULAR

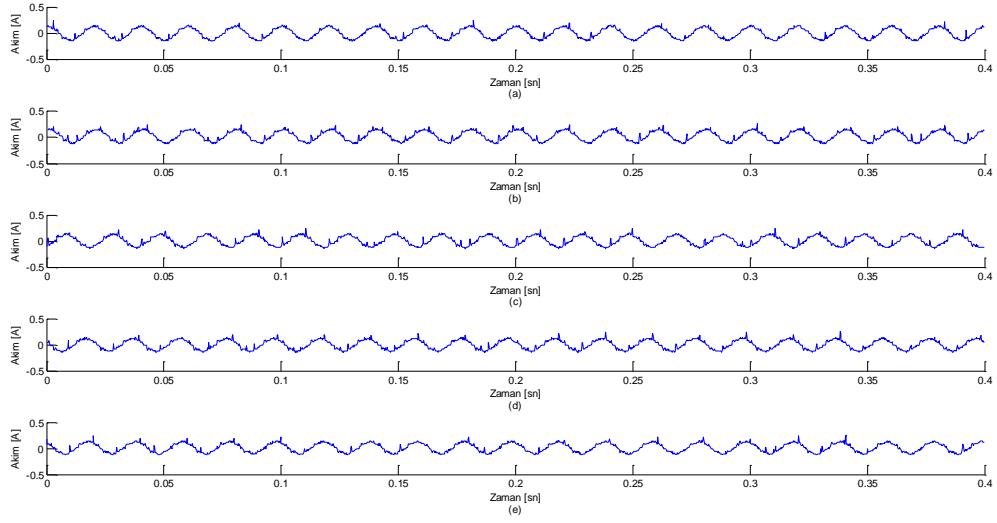
4.1. ÖLÇÜM SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında yağ içinde bulunan düzgün olmayan elektrik alanının içinde kısmi deşarj davranışının analiz edilmesi için yapılan deneysel çalışmalar 60270 uluslararası standartlara göre test standardına uygun olarak kurulan bir test düzeneğinde yapılmıştır. Uluslararası standartlara karşılık gelen Türk Standardı Elektrik İhtisas grubu tarafından hazırlanan TS2051 standardıdır [23, 24].

Deneyde 6 farklı elektrot tipi kullanılmıştır. Her bir elektrot tipi için 6 farklı gerilim değeri ve 5 farklı elektrot açıklığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler de 4,8 saniye boyunca örnekleme alınmış ve bulgular bu sonuçlara göre analiz edilmiştir.

4.1.1. 1.Elektrot Düzeni

İlk Olarak 1. Elektrot tipi için 6 cm çaplı yarım küre içinde tabana 1 mm' den 5 mm' ye kadar elektrotlar arası açıklık için, 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu bakır elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 6 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu 6 farklı gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 6 farklı gerilim değeri için verilmiştir.

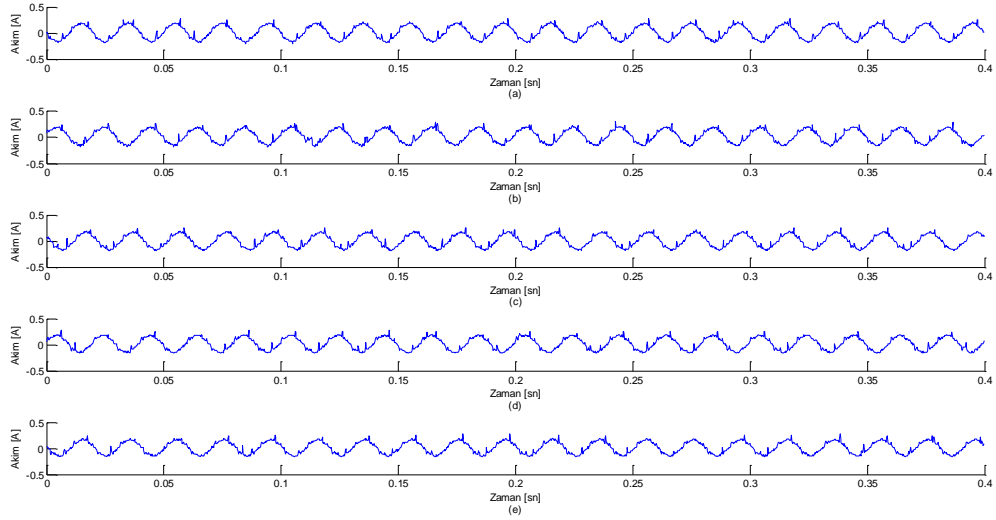


Şekil 4.1: 1. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.1 'den ve görüleceği üzere 5,4 kV gerilim değeri için 1-5 mm aralıkta yapılan ölçümlerde 20 periyotluk örnek incelendiğinde 3 mm elektrotlar arası açıklık için bozulmanın diğer elektrot açıklıkları ile karşılaştırıldığında daha fazla olduğu görülmüştür. Harmonik değerlerini incelediğimizde de bütün elektrot açıklıklarında 5. harmoniğin bozulmaya etkisinin yüksek olduğu görülmüştür.

Tablo 4.1: 1. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0656	0,0299	0,0094	0,0196	0,0736	0,0252	0,0238	0,0199	0,0373
2	0,0624	0,0424	0,0062	0,0571	0,0911	0,0534	0,0265	0,0427	0,0427
3	0,0602	0,0444	0,0122	0,0476	0,1080	0,0401	0,0125	0,0333	0,0538
4	0,0595	0,0497	0,0108	0,0429	0,0760	0,0527	0,0343	0,0482	0,0267
5	0,0571	0,0359	0,0192	0,0344	0,0809	0,0267	0,0258	0,0210	0,0247

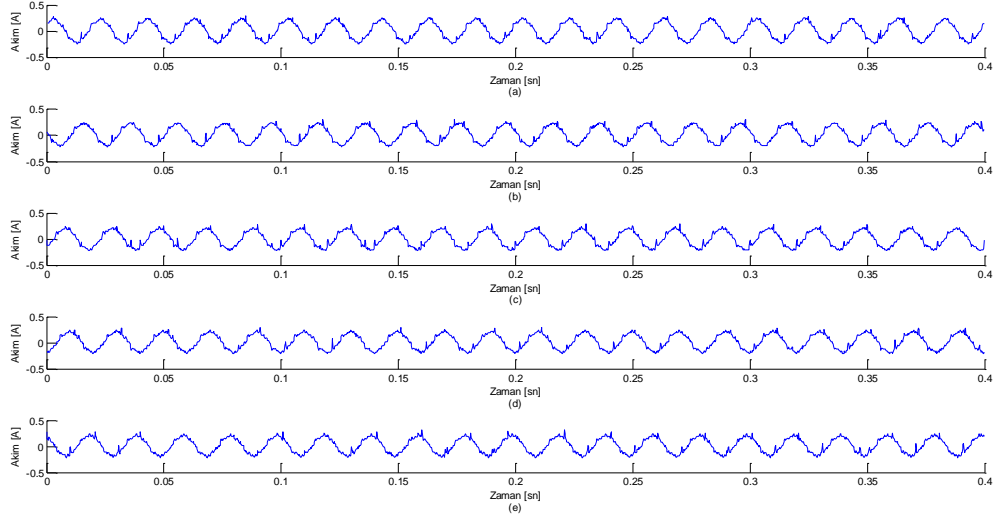


Şekil 4.2: 1. Elektrot tipi:7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.2 ve tablo 4.2 değerlendirildiğinde uygulanan 7,2 kV değerine baktığımızda ise 20 periyotluk örnekleme zamanı için bütün elektrot açıklık değerleri için 5. Harmoniğin bozulmaya etkisinin yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.2’ de verilen 20 periyotluk örnekler incelendiğinde kısmi deşarjın çok değişken olduğu ve periyodik olarak gözlemlenmediği analiz edilmiştir.

Tablo 4.2: 1. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0871	0,0448	0,0070	0,0446	0,0701	0,0424	0,0192	0,0332	0,0368
2	0,0827	0,0492	0,0101	0,0458	0,0768	0,0452	0,0202	0,0345	0,0379
3	0,0822	0,0331	0,0091	0,0364	0,0794	0,0382	0,0341	0,0325	0,0307
4	0,0806	0,0222	0,0121	0,0394	0,0766	0,0378	0,0350	0,0338	0,0325
5	0,0768	0,0418	0,0112	0,0253	0,0790	0,0296	0,0267	0,0219	0,0223

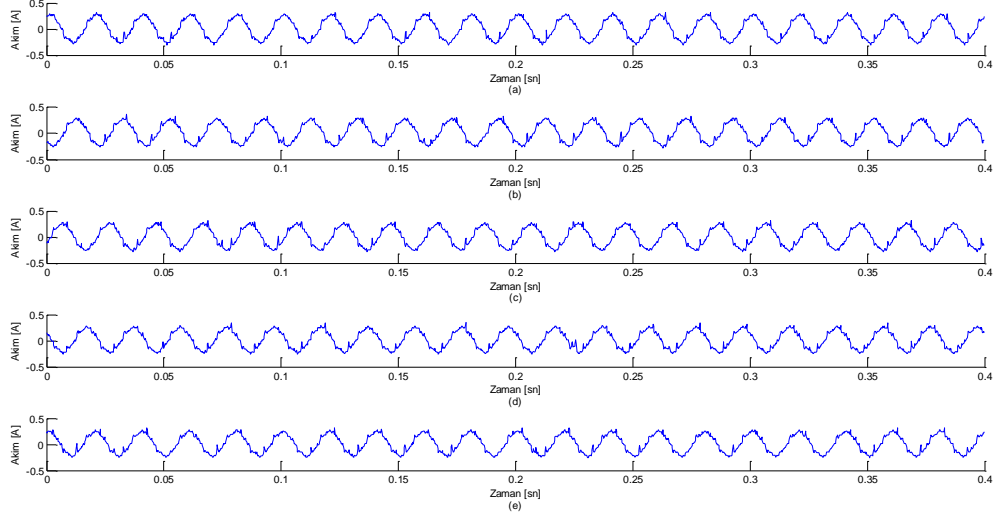


Şekil 4.3: 1. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

1. elektrot tipi için 9 kV giriş gerilim değeri sonuçları analiz edildiğinde şekil 4.3 ve tablo 4.3’ de verildiği üzere en yüksek temel bileşenin 1 mm elektrot açıklığında görülmüştür. Bütün elektrot açıklıkları için 5. harmoniğin yüksek oluşu bozulmaya etkisinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur.

Tablo 4.3: 1. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1106	0,0186	0,0068	0,0135	0,0855	0,0168	0,0213	0,0174	0,0348
2	0,1041	0,0261	0,0071	0,0218	0,0783	0,0241	0,0300	0,0180	0,0383
3	0,1001	0,0304	0,0091	0,0323	0,0761	0,0377	0,0337	0,0299	0,0359
4	0,0981	0,0299	0,0117	0,0220	0,0831	0,0258	0,0283	0,0179	0,0343
5	0,0965	0,0375	0,0086	0,0294	0,0723	0,0322	0,0265	0,0188	0,0372

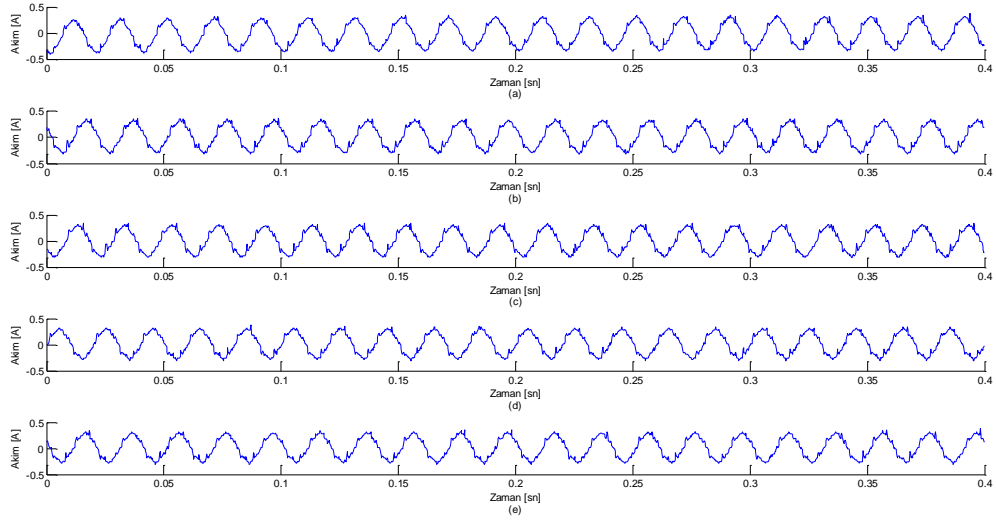


Şekil 4.4: 1. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.4’ de görüldüğü üzere 1. elektrot tipi için 10,8 kV giriş gerilim seviyesi değerine çıktığında 20 örnek periyodu incelendiğinde kısmi deşarjın elektrotlar arası açıklık arttıkça azaldığı görülmüştür. Bu değer en az olduğu seviyenin 3 mm’ lik elektrot açıklığı olduğu görülmektedir. Temel bileşen değerlerinin elektrot açıklıkları arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. 5. Harmonik değeri için bozulmaya etki oranının büyük olduğu tablo 4.4’ de görülmektedir.

Tablo 4.4: 1. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1320	0,0125	0,0066	0,0115	0,0780	0,0180	0,0264	0,0165	0,0313
2	0,1243	0,0245	0,0079	0,0169	0,0864	0,0246	0,0252	0,0126	0,0464
3	0,1233	0,0254	0,0063	0,0233	0,0691	0,0251	0,0179	0,0223	0,0337
4	0,1163	0,0250	0,0090	0,0154	0,0850	0,0279	0,0238	0,0273	0,0326
5	0,1150	0,0288	0,0084	0,0271	0,0780	0,0320	0,0257	0,0290	0,0315

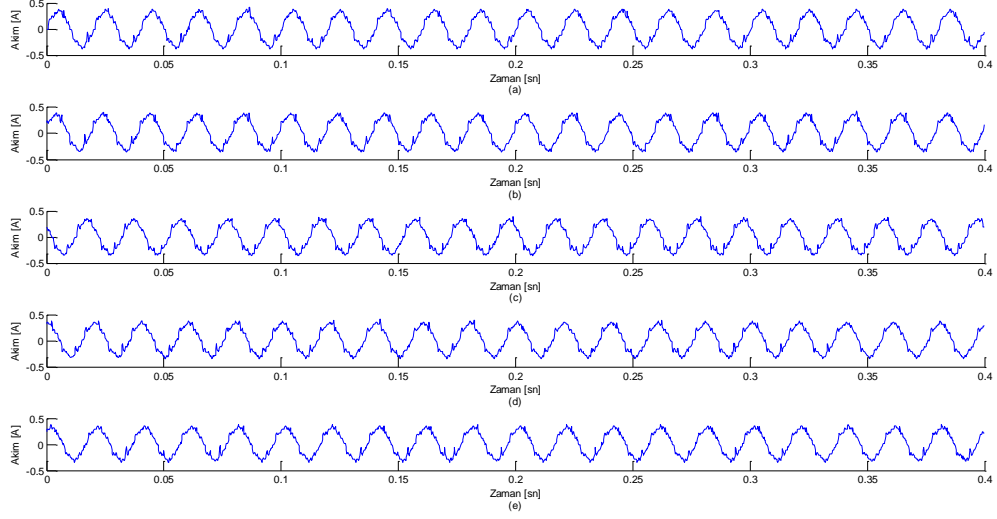


Şekil 4.5: 1. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)
(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Sisteme giriş gerilim seviyesi olarak 12,6 kV uygulandığında akım değerlerinin 20 periyotluk örneklemeleri şekil 4.5’ de görülmektedir. Yapılan ölçümler neticesinde her bir elektrot açıklık değeri için 5. harmonik değerlerinin yüksek bulunduğu tablo 4.5’ de görülmektedir. Çift harmonikler görülmeye devam etmiş kısmi deşarjın etkisinin elektrotlar arası açıklık arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. 1 mm elektrotlar arası açıklık için mesafenin de kısa olması nedeniyle harmoniklerin ana bileşene göre ve diğer elektrotlar arası açıklıklara göre daha az olduğu ölçülmüştür.

Tablo 4.5: 1. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1521	0,0091	0,0070	0,0133	0,0737	0,0132	0,0145	0,0087	0,0348
2	0,1450	0,0176	0,0053	0,0169	0,0830	0,0217	0,0296	0,0177	0,0353
3	0,1439	0,0240	0,0081	0,0215	0,0685	0,0256	0,0347	0,0157	0,0305
4	0,1379	0,0127	0,0075	0,0106	0,0850	0,0210	0,0249	0,0199	0,0321
5	0,1359	0,0178	0,0097	0,0110	0,0817	0,0184	0,0315	0,0179	0,0265



Şekil 4.6: 1. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)
(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.6: 1. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

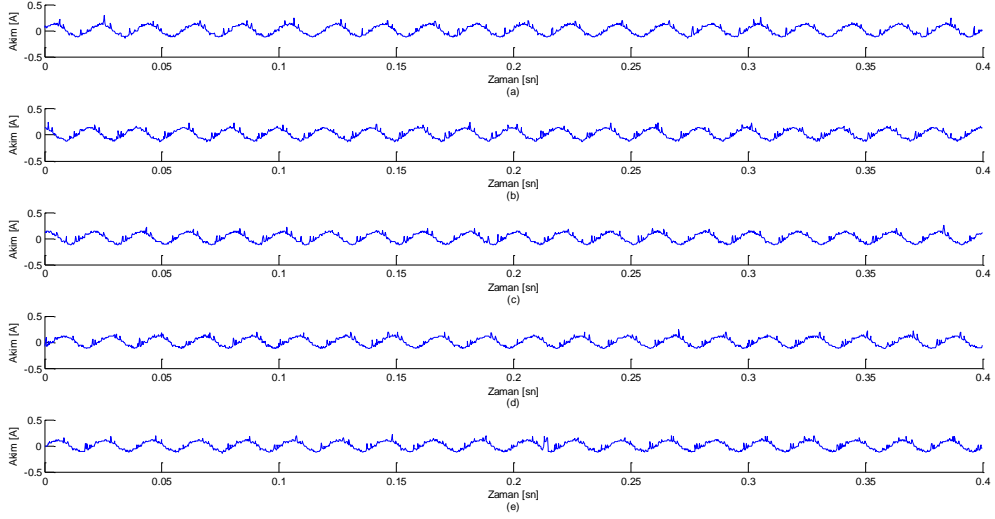
d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1689	0,0143	0,0127	0,0128	0,0857	0,0169	0,0197	0,0051	0,0438
2	0,1663	0,0193	0,0067	0,0204	0,0698	0,0221	0,0179	0,0101	0,0374
3	0,1602	0,0120	0,0059	0,0178	0,0799	0,0244	0,0262	0,0263	0,0283
4	0,1566	0,0149	0,0042	0,0150	0,0791	0,0178	0,0238	0,0123	0,0275
5	0,1540	0,0178	0,0066	0,0191	0,0720	0,0228	0,0317	0,0123	0,0368

Uygulanan en yüksek gerilim değeri olan 14,4 kV gerilim değeri verildiğinde ark oluşumunun elektrotlar arası açıklık arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Temel bileşenler incelendiğinde elektrotlar arası açıklık arttıkça düşmeye başladığı görülmüştür. Aynı zamanda 5. harmonik değerinin azaldığı gözlemlenmiş ve bozulmaya etkisinin de azaldığı tespit edilmiştir.

4.1.2. 2. Elektrot Düzeni

Hazırlanan 2. Elektrot tipi için 6 cm yarım küre içinde tabana 1 mm' den 5 mm' ye kadar elektrotlar arası açıklık için 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu çelik elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 6 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu 6 farklı gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 6 farklı gerilim değeri için verilmiştir.

2. elektrot tipinde çelik iğne kullanılmıştır. Kullanılan çelik iğnenin iletkenliği bakıra göre daha az olduğu için ark oluşumlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. 5,4 kV giriş gerilim değerinde 2 mm ve 4 mm elektrot açıklıkları için 2. harmoniğin daha yüksek çıkarak sistemde bozulma etkisini arttırdığı görülmüştür.

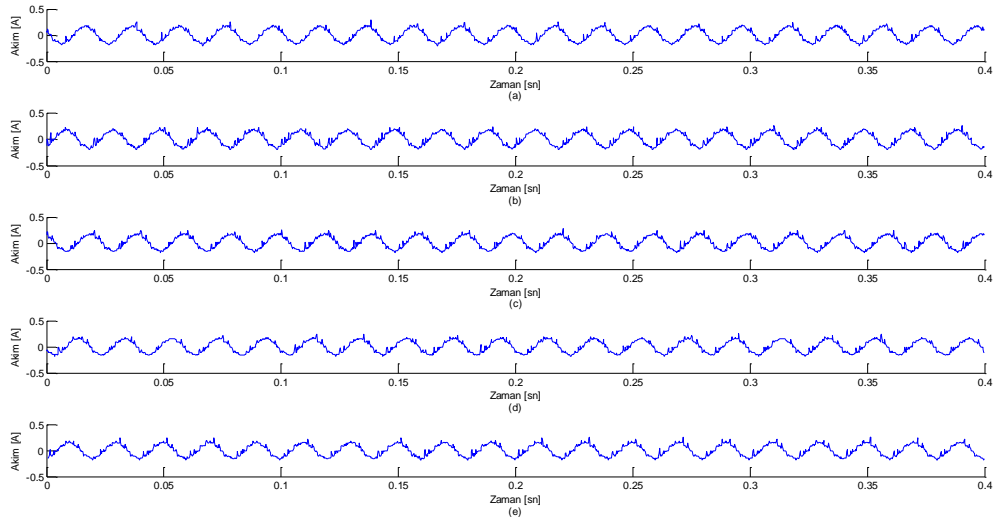


Şekil 4.7: 2. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar (d) arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.7' de görüldüğü üzere 1-5 mm arası aralıklarla giriş gerilimi olarak 5,4 kV uygulanmış ve kaçak akım değerleri 1 mm aralıktaki kısmi deşarjların daha çok olduğu görülmüştür. 5 mm aralıktaki 0,22. Saniyedeki delinme akımı net bir şekilde görülmektedir. Tablo 4.7' de ölçülen akım değerleri üzerinden elde edilen harmonikleri incelediğimizde ise ikinci ve beşinci harmonik değerlerinin bozulmaya katkısının en büyük ve yaklaşık olduğu görülmektedir. Burada da 4 mm elektrot açıklığı için en büyük harmonik distorsiyonun 5. harmonik distorsiyonda olduğu ve fakat 2. harmonik distorsiyonunun ve diğer çift distorsiyonların çok fazla olduğu ölçülmüştür. Uygulanan gerilim sonucunda yağ içerisinde kapasitif etki gösteren habbeciklerin çift harmonik distorsiyonlara neden olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4.7: 2. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0584	0,0622	0,0138	0,0408	0,0650	0,0530	0,0214	0,0527	0,0230
2	0,0575	0,0842	0,0106	0,0520	0,0833	0,0268	0,0260	0,0464	0,0195
3	0,0572	0,0667	0,0112	0,0457	0,0890	0,0301	0,0297	0,0354	0,0293
4	0,0546	0,1028	0,0096	0,0621	0,0668	0,0283	0,0329	0,0377	0,0256
5	0,0518	0,0611	0,0164	0,0578	0,0965	0,0390	0,0357	0,0288	0,0219

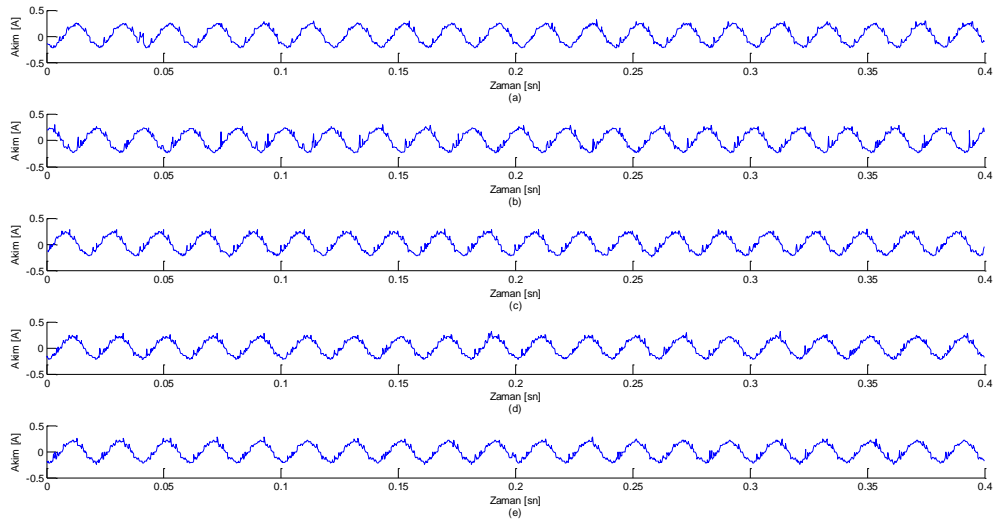


Şekil 4.8: 2. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.8: 2. Elektrot Tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0830	0,0352	0,0071	0,0177	0,0662	0,0246	0,0106	0,0274	0,0361
2	0,0825	0,0524	0,0108	0,0250	0,0891	0,0239	0,0230	0,0330	0,0214
3	0,0803	0,0492	0,0067	0,0264	0,0659	0,0341	0,0136	0,0450	0,0299
4	0,0764	0,0425	0,0111	0,0280	0,0752	0,0229	0,0159	0,0286	0,0333
5	0,0745	0,0551	0,0091	0,0271	0,0693	0,0443	0,0278	0,0676	0,0348

Şekil 4.8 ve tablo 4.8' den görüleceği üzere 7,2 kV giriş gerilimi değeri sabit tutulup elektrotlar arası açıklık değiştiğinde temel bileşenin azaldığı görülmesine rağmen 5. harmonik distorsiyonun bütün elektrot açıklıklarında yüksek çıktığı ve en yüksek harmonik değerinin 2 mm elektrotlar arası açıklıkta bulunduğu görülmüştür.

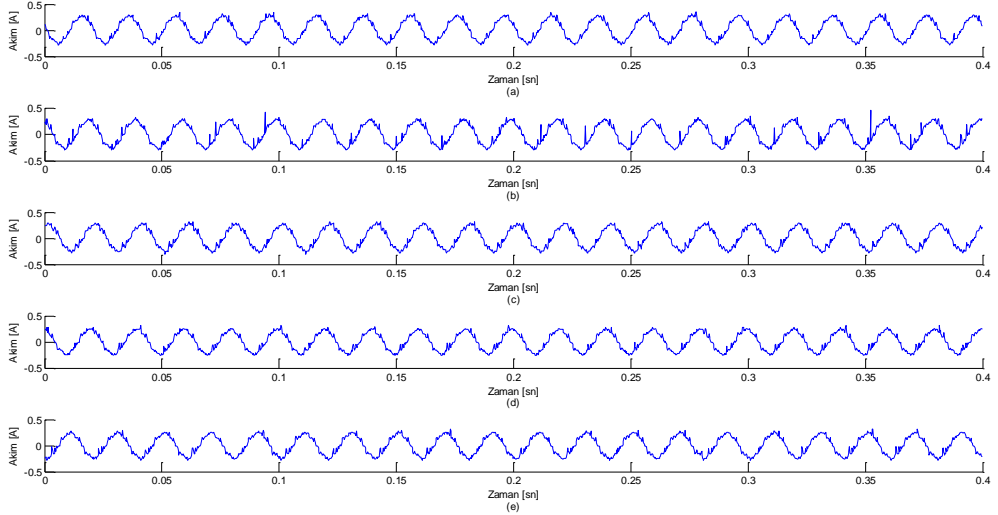


Şekil 4.9: 2. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.9: 2. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1061	0,0227	0,0082	0,0176	0,0826	0,0269	0,0112	0,0256	0,0343
2	0,1067	0,0560	0,0133	0,0336	0,0895	0,0241	0,0180	0,0310	0,0280
3	0,1051	0,0403	0,0075	0,0183	0,0696	0,0345	0,0191	0,0427	0,0300
4	0,1002	0,0356	0,0102	0,0160	0,0670	0,0237	0,0046	0,0336	0,0312
5	0,0966	0,0343	0,0091	0,0209	0,0830	0,0192	0,0225	0,0207	0,0296

Giriş gerilimi 9 kV 'a çıkarıldığında yine 5. Harmonik değerlerinin burada da bütün elektrot açıklıkları için yüksek çıktığı görülmüştür. Artan elektrot açıklığı ile birlikte 5. harmoniğin değeri 1 mm, 2 mm değerlerinde diğer elektrot açıklıklarından daha fazla olduğu bunun sebebinin de elektrotlar arası mesafeden kaynaklandığı görülmüştür.

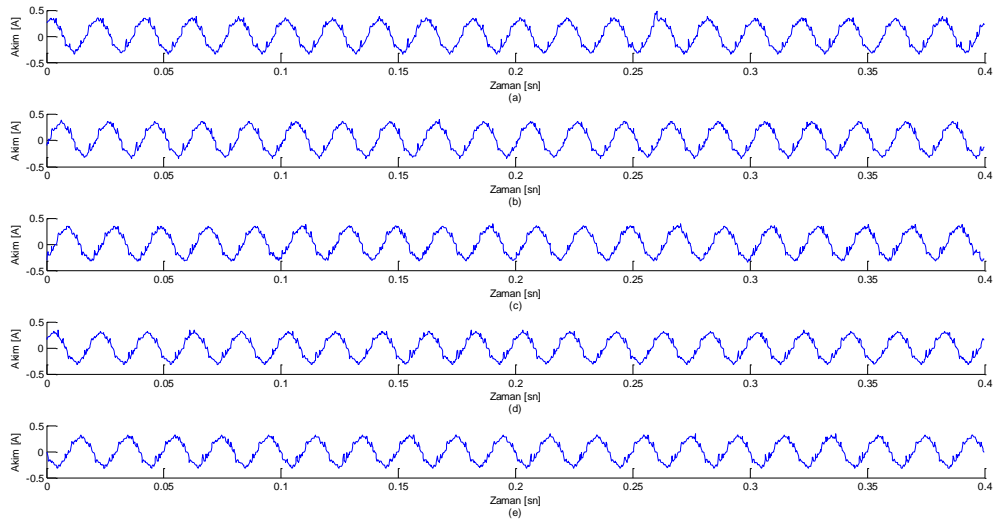


Şekil 4.10: 2. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)
(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.10: 2. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1301	0,0273	0,0093	0,0094	0,0622	0,0175	0,0247	0,0183	0,0284
2	0,1311	0,0433	0,0120	0,0130	0,0812	0,0221	0,0135	0,0184	0,0275
3	0,1275	0,0320	0,0062	0,0101	0,0745	0,0163	0,0216	0,0222	0,0343
4	0,1174	0,0385	0,0118	0,0204	0,0756	0,0160	0,0188	0,0180	0,0328
5	0,1195	0,0304	0,0059	0,0182	0,0819	0,0184	0,0114	0,0233	0,0300

Giriş geriliminin 10,8 kV' a artması ile birlikte temel bileşenler ve harmonik distorsiyonlar yükselirken elektrotlar arası açıklıklar arttığında ise temel bileşen değerleri tekrar düşüşe geçmiştir. Şekil 4.10 ve tablo 4.10' da görüldüğü üzere 2 mm açıklık için kısmi deşarj durumu diğer elektrot açıklıklarına göre daha yüksektir.

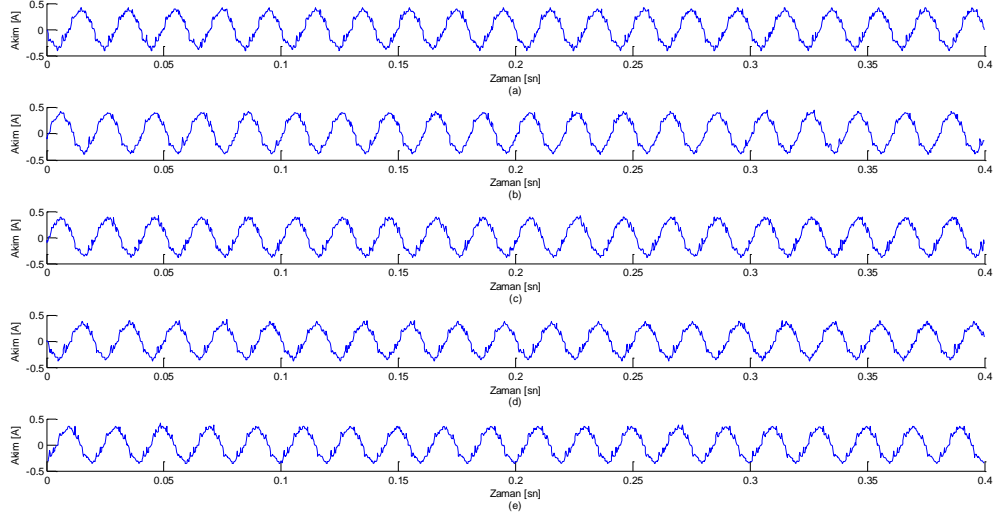


Şekil 4.11: 2. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.11: 2. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1542	0,0174	0,0134	0,0150	0,0732	0,0240	0,0191	0,0212	0,0260
2	0,1533	0,0230	0,0127	0,0111	0,0840	0,0172	0,0110	0,0202	0,0332
3	0,1516	0,0234	0,0037	0,0072	0,0774	0,0074	0,0218	0,0144	0,0304
4	0,1410	0,0309	0,0131	0,0102	0,0774	0,0138	0,0222	0,0218	0,0268
5	0,1387	0,0299	0,0085	0,0131	0,0854	0,0160	0,0194	0,0217	0,0287

Şekil 4.11'de giriş gerilimi 12,6 kV 'a çıkartılmıştır. Tablo 4.11' den de görüleceği üzere giriş geriliminin sabit tutulduğu fakat elektrotlar arası açıklıkların artması ile temel bileşen değerlerinde azalma bulunurken çift harmoniklerde, özellikle 2. harmonik değerinde artma gözlemlenmiştir. Bu seviyede elektrotlar arası açıklık 4 mm olarak ayarlandığında gözlenen 2. harmonik hesaplanan tüm diğer harmonik distorsiyon değerlerinden daha fazla olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.12: 2. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.12: 2. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

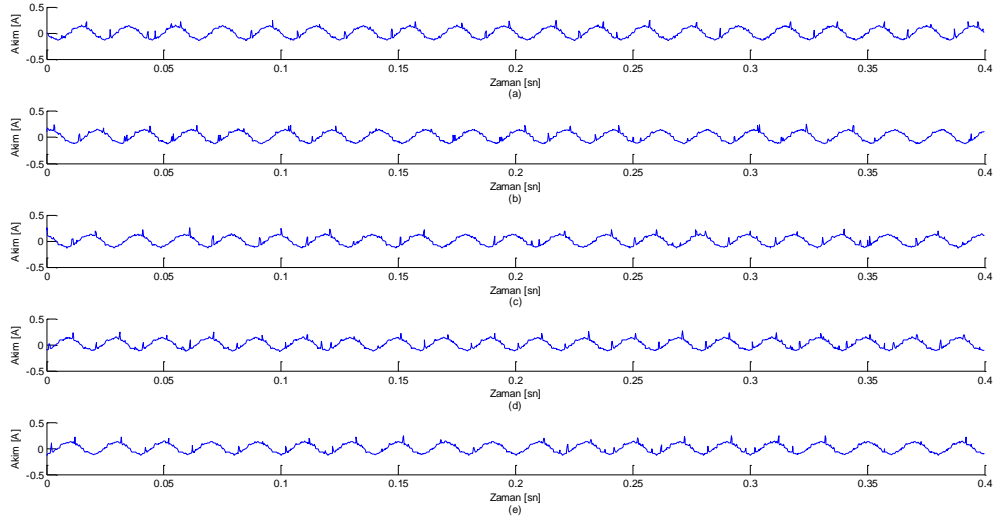
d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1772	0,0252	0,0091	0,0096	0,0736	0,0145	0,0247	0,0143	0,0252
2	0,1810	0,0186	0,0147	0,0067	0,0761	0,0136	0,0158	0,0114	0,0320
3	0,1746	0,0266	0,0076	0,0128	0,0678	0,0088	0,0228	0,0074	0,0332
4	0,1611	0,0301	0,0092	0,0139	0,0835	0,0124	0,0166	0,0161	0,0299
5	0,1611	0,0196	0,0092	0,0082	0,0797	0,0188	0,0271	0,0233	0,0300

Şekil 4.12’ de giriş gerilim seviyesi 14,4 kV iken toprak elektrodunda toplanan kaçak akımlar verilmiştir. Tablo 4.12’ de verilen ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan harmoniklerde elektrotlar arası açıklık arttıkça temel bileşen değerleri giderek azalmış olmasına rağmen 4. harmonik değeri azalırken 6. Harmonik değerinin giderek arttığı gözlenmiştir.

4.1.3. 3. Elektrot Düzeni

3. Elektrot tipi için 5 cm yarı küre içinde tabana 1 mm’ den 5 mm’ ye kadar elektrotlar arası açıklık için 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu bakır elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 6 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu 6 farklı gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 6 farklı gerilim değeri için verilmiştir.

6 cm çaplı yarı küre elektrot sistemi ile karşılaştırıldığında bu 5 cm’ lik yarı küre elektrot kullanılarak yapılan deneylerde aynı gerilim seviyeleri karşılaştırıldığında 5,4 kV gerilim seviyesi için harmonik distorsiyonların 1 mm açıklık için arttığı fakat diğer elektrotlar arası açıklıklar dikkate alındığında azaldığı görülmüştür. 14,4 kV gerilim seviyesi için 6 cm çaplı yarı küre elektrot sistemi ve 5 cm çaplı yarı küre elektrot sistemine göre 1 mm elektrotlar arası açıklıkta HD değeri yüksek iken diğerlerinde azaldığı görülmüştür.

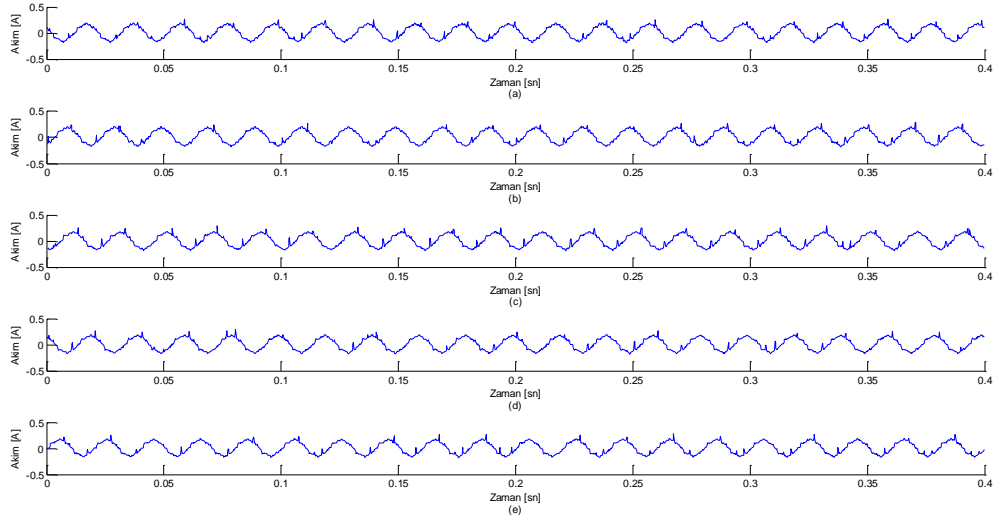


Şekil 4.13: 3. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımını. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.13: 3. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0634	0,0591	0,0137	0,0474	0,0526	0,0508	0,0453	0,0429	0,0334
2	0,0614	0,0652	0,0134	0,0408	0,0626	0,0370	0,0287	0,0302	0,0404
3	0,0579	0,0690	0,0146	0,0509	0,0842	0,0538	0,0164	0,0376	0,0532
4	0,0577	0,0725	0,0115	0,0593	0,0920	0,0756	0,0311	0,0670	0,0369
5	0,0575	0,0540	0,0118	0,0403	0,0764	0,0521	0,0347	0,0466	0,0313

Bakır sivri uçlu elektrotlar ile yapılan bu ölçümlerde ilk olarak 5,4 kV gerilim seviyesi uygulanmıştır. Buna ait grafikler Şekil 4.13' de verilmiştir. Tablo 4.13' de toplanan kaçak akımların üçüncü elektrot düzeni için yapılan harmonik hesaplamalarında temel bileşenin burada da elektrotlar arası açıklık arttıkça düştüğü görülmektedir. Çift harmonikler görülmeye devam etmiştir.

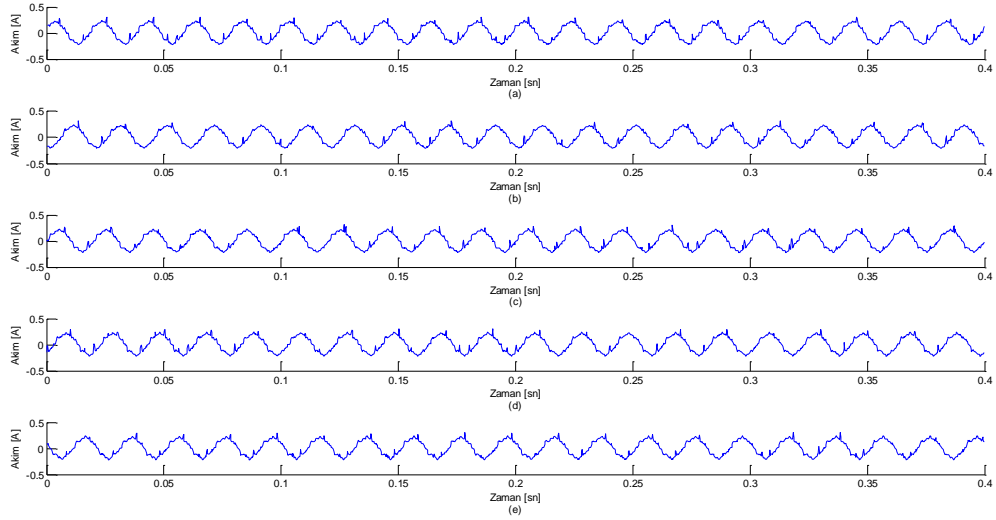


Şekil 4.14: 3. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)
(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.14: 3. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0809	0,0379	0,0143	0,0239	0,0599	0,0279	0,0483	0,0161	0,0362
2	0,0819	0,0326	0,0087	0,0207	0,0638	0,0286	0,0355	0,0222	0,0364
3	0,0791	0,0599	0,0057	0,0476	0,0758	0,0458	0,0192	0,0371	0,0454
4	0,0786	0,0387	0,0114	0,0291	0,0784	0,0345	0,0237	0,0299	0,0314
5	0,0769	0,0348	0,0098	0,0252	0,0810	0,0390	0,0308	0,0325	0,0358

7,2 kV giriş gerilim seviyesi için yarı küre elektrot ucundan toplanan kaçak akımlar şekil 4.14' de verilmiştir. Bu deney sistemine 7,2 kV uygulandığında oluşan harmonikler tablo 4.14' de hesaplanmıştır. Hesaplanan çift harmoniklerin sönümlenmemesi ile birlikte bozulma oranına katkısının beşinci harmonik de daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu seviyede de elektrotlar arası açıklığın 3 mm olduğu durumda çift harmonikler oldukça büyük değerlerde ölçülmüştür.

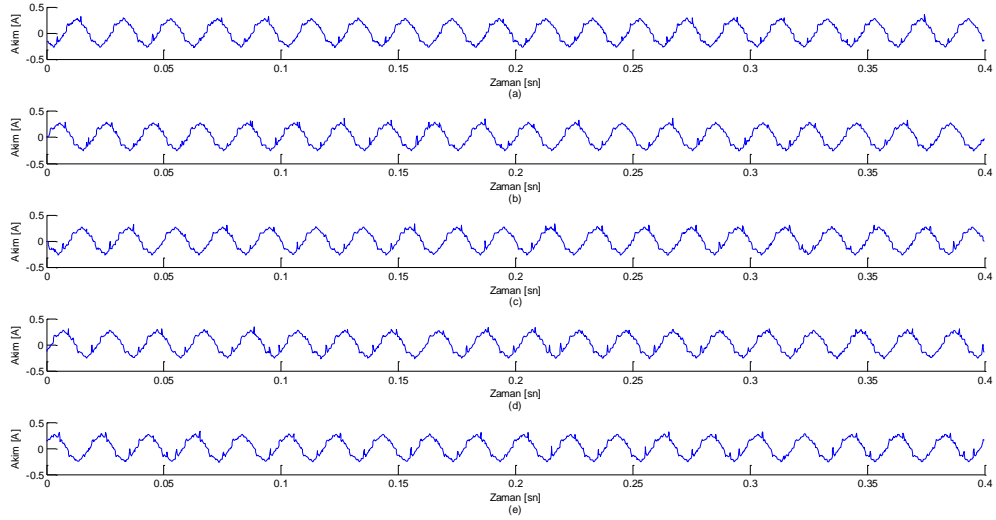


Şekil 4.15: 3. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.15: 3. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1031	0,0358	0,0082	0,0291	0,0757	0,0341	0,0273	0,0321	0,0397
2	0,0999	0,0301	0,0050	0,0200	0,0756	0,0206	0,0225	0,0149	0,0411
3	0,1001	0,0443	0,0078	0,0346	0,0668	0,0343	0,0373	0,0204	0,0327
4	0,1002	0,0355	0,0102	0,0327	0,0749	0,0365	0,0328	0,0296	0,0323
5	0,0974	0,0295	0,0117	0,0215	0,0856	0,0344	0,0375	0,0278	0,0322

Giriş gerilim seviyesi 9 kV değerine getirildiğinde elde edilen kaçak akımlar şekil 4.15' de verilmiştir. Üçüncü elektrot tipi için harmoniklerin hesaplandıktan sonra çıkan değerler analiz edilmiş ve tablo 4.15' de verilmiştir. Bu seviyede de 5. harmonik değerinin bozulmaya etkisinin büyük olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplanan harmoniklerin temel bileşenlerinin gerilim değeri ile arttığı görülmüştür.

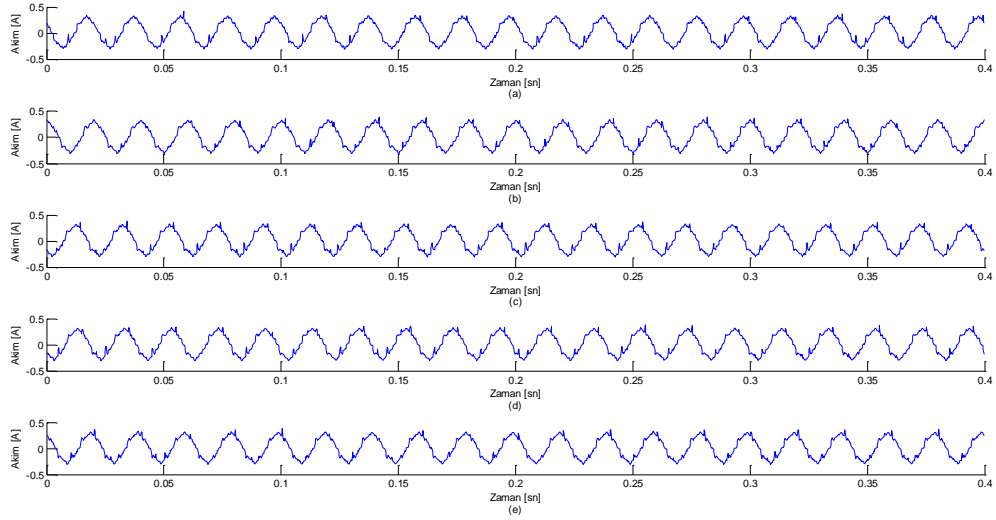


Şekil 4.16: 3. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Uygulanana gerilim seviyesi 10,8 kV değerine getirildiğinde yarı küre elektrot ucundan toplanan kaçak akım değerleri şekil 4.16’ da verilmiştir. Tablo 4.16’ da bu gerilim seviyesinde ölçülen kaçak akımların harmonik distorsiyonları hesaplanmış ve giriş gerilimi sabit tutulduğunda yapılan deney ölçümlerinde 3. harmonikle 5. harmonik değerleri arasında yaklaşık 8 kat fark meydana geldiği hesaplanmıştır. Bu durum tüm elektrotlar arası açıklık seviyelerinde belirgin olarak ölçülmüştür.

Tablo 4.16: 3. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1230	0,0149	0,0063	0,0067	0,0743	0,0135	0,0294	0,0136	0,0399
2	0,1192	0,0285	0,0052	0,0186	0,0737	0,0178	0,0356	0,0099	0,0400
3	0,1189	0,0233	0,0061	0,0179	0,0742	0,0244	0,0286	0,0155	0,0348
4	0,1183	0,0298	0,0105	0,0194	0,0870	0,0213	0,0259	0,0162	0,0468
5	0,1170	0,0317	0,0064	0,0259	0,0774	0,0304	0,0321	0,0208	0,0447

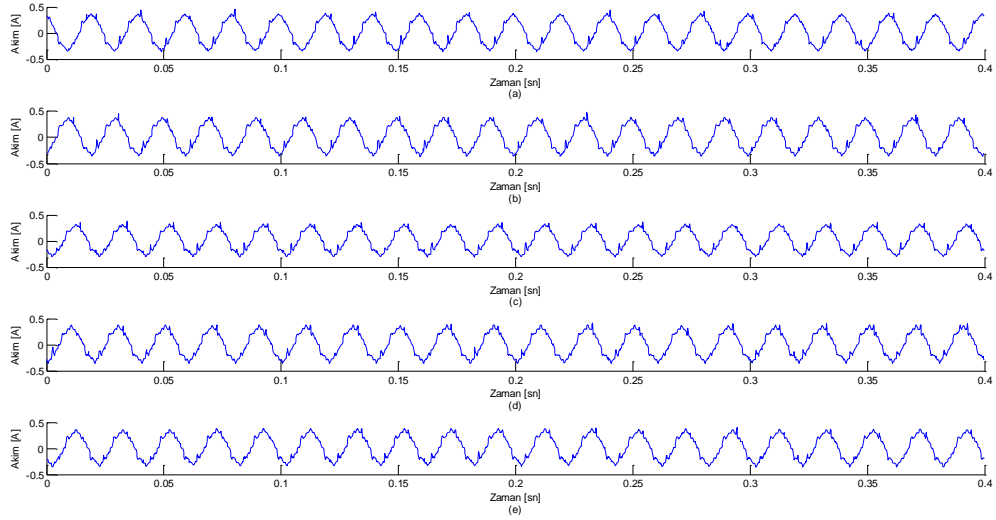


Şekil 4.17: 3. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.17’ de görüldüğü üzere 12,6 kV giriş gerilimi uygulandığında deney düzeneğinde elektrotlar arası açıklık 1 mm’den 5 mm seviyesine arttırıldığında hesaplanan harmoniklerde temel bileşen değerlerinin düştüğü tablo 4.17’ de görülmüştür. 5. harmoniğin ise bozulmaya katkısı diğer harmoniklerden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Tablo 4.17: 3. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1415	0,0218	0,0070	0,0163	0,0641	0,0190	0,0286	0,0108	0,0407
2	0,1407	0,0222	0,0071	0,0124	0,0793	0,0165	0,0348	0,0122	0,0404
3	0,1377	0,0310	0,0075	0,0241	0,0774	0,0333	0,0246	0,0274	0,0395
4	0,1378	0,0267	0,0069	0,0237	0,0816	0,0317	0,0261	0,0235	0,0371
5	0,1361	0,0235	0,0069	0,0183	0,0713	0,0206	0,0224	0,0207	0,0348



Şekil 4.18: 3. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

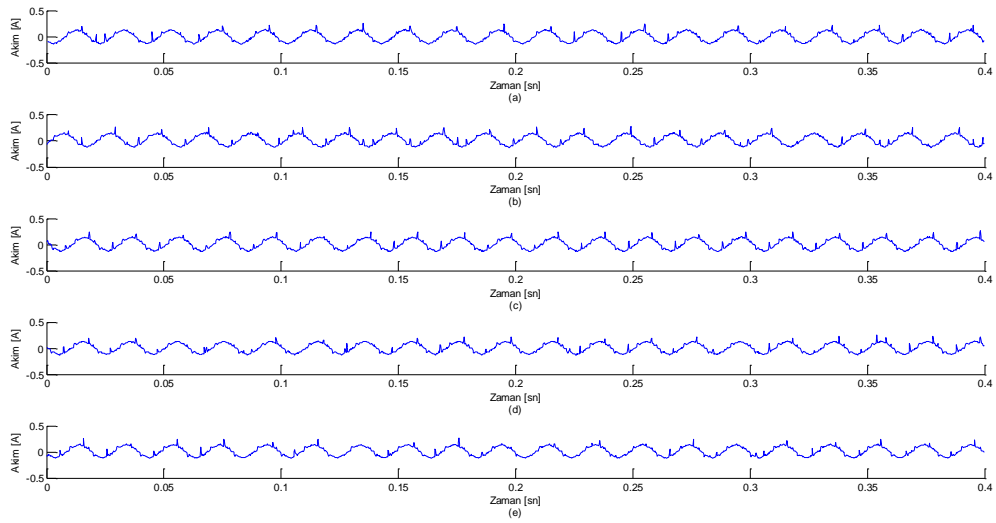
Uygulanan giriş geriliminin en yüksek olduğu 14,4 kV için 20 periyotluk kaçak akımlar elektrotlar arası açıklıkların değişimi için şekil 4.18’ de gösterilmiştir. Tablo 4.18’ de hesaplandığı üzere en yüksek temel bileşenler 14,4 kV giriş gerilimi verildiği durumda hesaplanmıştır. Burada da 5. harmoniğin elektrotlar arası açıklıkla azalmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.18: 3. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1628	0,0218	0,0068	0,0196	0,0704	0,0210	0,0199	0,0072	0,0414
2	0,1628	0,0287	0,0049	0,0178	0,0775	0,0221	0,0336	0,0107	0,0456
3	0,1377	0,0310	0,0075	0,0241	0,0774	0,0333	0,0246	0,0274	0,0395
4	0,1574	0,0249	0,0081	0,0147	0,0727	0,0244	0,0361	0,0155	0,0355
5	0,1554	0,0189	0,0081	0,0149	0,0826	0,0195	0,0334	0,0151	0,0426

4.1.4. 4. Elektrot Düzeni

4. Elektrot tipi için 5 cm çapında yarım küre içinde tabana 1 mm' den 5 mm' ye kadar elektrotlar arası açıklık için 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu çelik elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 6 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu 6 farklı gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 6 farklı gerilim değeri için verilmiştir.

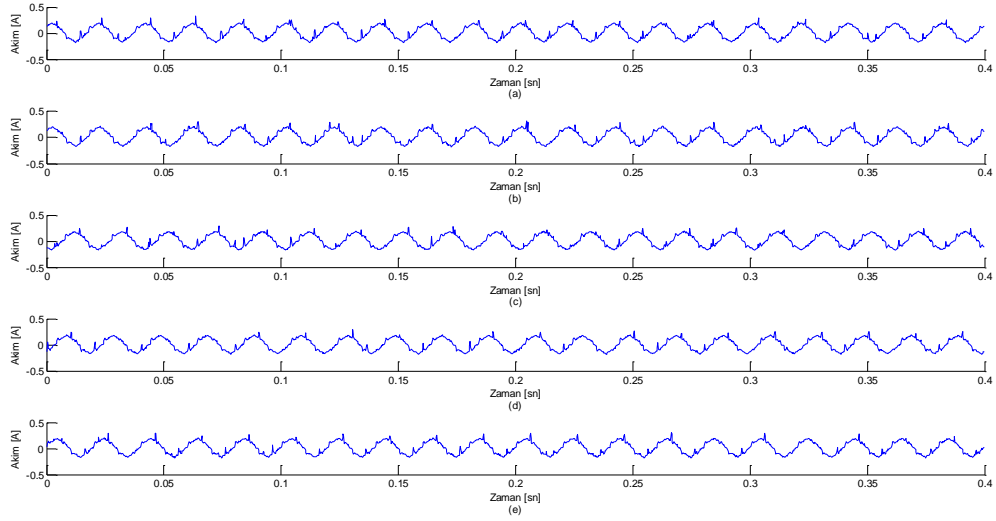


Şekil 4.19: 4. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımını. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.19' da 4. elektrot tipi için giriş gerilimi 5,4 kV olarak verildiğinde 20 periyotluk kaçak akımlar farklı elektrotlar açıklık için ölçülmüştür. Tablo 4.19' da hesaplanan harmonikler incelendiğinde elektrotlar arası açıklıklar 1 mm' den 5 mm' ye doğru arttığında 5. Harmonik distorsiyonların arttığı gözlenmiştir.

Tablo 4.19: 4. Elektrot tipi: 5,4 kV gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0640	0,0582	0,0173	0,0418	0,0545	0,0454	0,0511	0,0395	0,0237
2	0,0618	0,0662	0,0102	0,0654	0,0584	0,0613	0,0585	0,0456	0,0513
3	0,0638	0,0766	0,0061	0,0676	0,0603	0,0672	0,0404	0,0677	0,0485
4	0,0591	0,0653	0,0141	0,0513	0,0661	0,0452	0,0559	0,0325	0,0560
5	0,0603	0,0540	0,0126	0,0364	0,0738	0,0396	0,0388	0,0421	0,0500

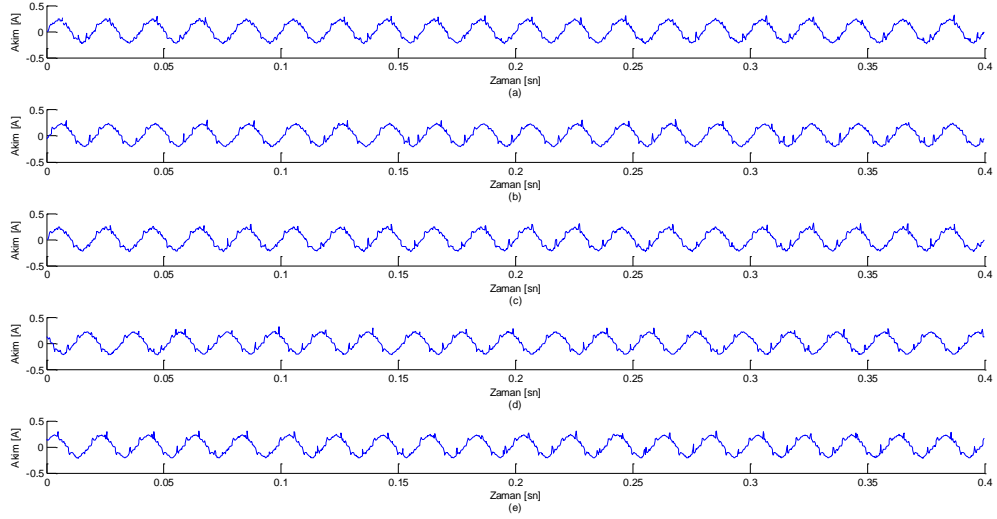


Şekil 4.20: 4. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.20' de verilen 7,2 kV giriş gerilimi için 20 periyotluk çıkış akımları ölçümü sonucunda hesaplanan harmonikler tablo 4.20' de görülmektedir. Hesaplanan harmonikler incelendiğinde ikinci ve beşinci harmoniklerin diğer harmoniklere kıyasla yüksek çıktığı gözlenmiştir. Aynı zamanda hesaplanan ikinci ve beşinci harmonikler incelendiğinde elektrotlar arası açıklık arttıkça azalmadığı görülmüştür.

Tablo 4.20: 4. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,0827	0,0534	0,0082	0,0427	0,0718	0,0411	0,0371	0,0254	0,0366
2	0,0837	0,0438	0,0085	0,0411	0,0695	0,0427	0,0454	0,0285	0,0551
3	0,0800	0,0509	0,0117	0,0429	0,0717	0,0383	0,0422	0,0295	0,0485
4	0,0798	0,0435	0,0127	0,0393	0,0739	0,0378	0,0333	0,0364	0,0482
5	0,0815	0,0493	0,0068	0,0431	0,0732	0,0475	0,0358	0,0390	0,0508

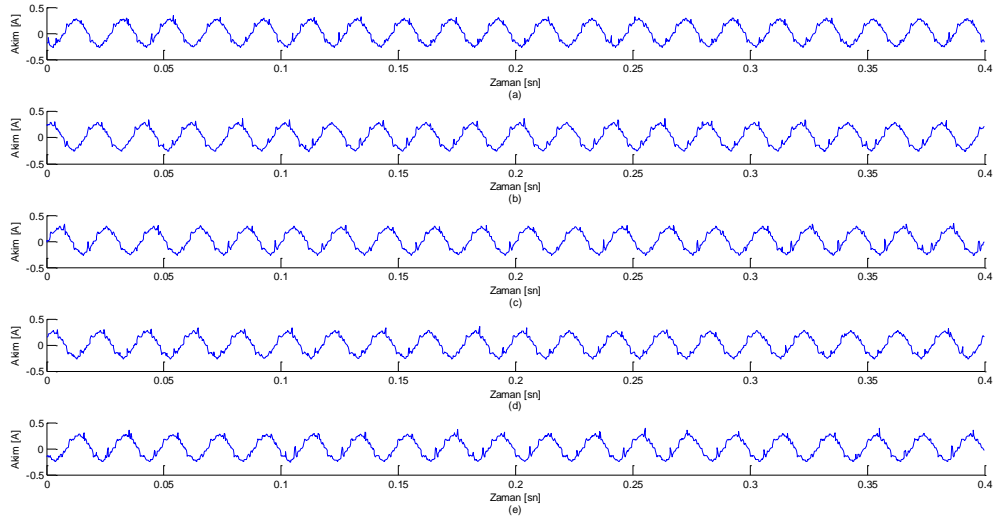


Şekil 4.21: 4. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)
(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

9 kV giriş gerilimi uygulandığında oluşan çıkış akımının 20 periyotluk örneklemeleri her bir elektrot açıklığı için Şekil 4.21’ de verilmiştir. Tablo 4.21’ deki hesaplanan harmonikler incelendiğinde 1-5 mm elektrot açıklığı için 5. harmonik değerinin yüksek çıktığı gözlenmiştir. Hesaplanan harmonik değerlerinden 3. harmonik distorsiyonların en düşük çıktığı ve bozulmaya etkisinin en az olduğu görülmektedir.

Tablo 4.21: 4. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1050	0,0390	0,0063	0,0294	0,0624	0,0363	0,0423	0,0343	0,0425
2	0,1000	0,0334	0,0110	0,0301	0,0710	0,0284	0,0382	0,0189	0,0535
3	0,1032	0,0379	0,0085	0,0334	0,0664	0,0335	0,0492	0,0242	0,0606
4	0,0999	0,0326	0,0056	0,0311	0,0717	0,0296	0,0410	0,0316	0,0485
5	0,1013	0,0461	0,0089	0,0407	0,0708	0,0410	0,0513	0,0209	0,0490

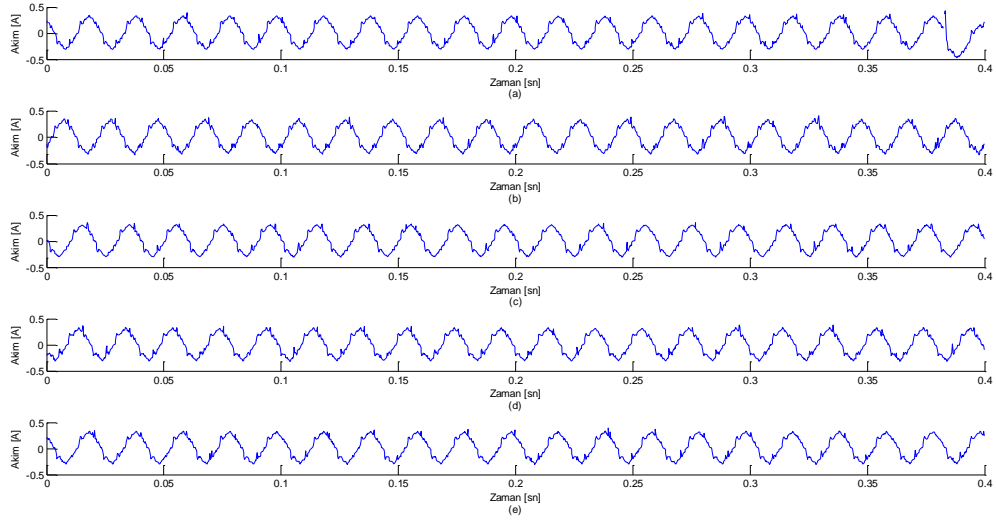


Şekil 4.22: 4. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

4. elektrot düzenine uygulanan 10,8 kV giriş gerilimine karşılık gelen çıkış akımlarının farklı elektrot aralıklarına karşılık gelen 20 periyotluk akım grafikleri Şekil 4.22’ de verilmiştir. 20 periyotluk çıkış akımına göre hesaplanan harmonikler incelendiğinde en düşük çıkan harmonik değerlerinin 3. harmonikler olduğu görülmektedir. Tablo 4.22 incelendiğinde ise elektrotlar arası açıklık artmasına rağmen 5. harmonik distorsiyonun azalmadığı gözlenmiştir. Aynı zamanda beşinci harmonik distorsiyonlar diğer harmonik distorsiyonlara göre daha yüksek çıkmıştır.

Tablo 4.22: 4.Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1240	0,0267	0,0094	0,0203	0,0546	0,0201	0,0347	0,0109	0,0476
2	0,1221	0,0321	0,0052	0,0311	0,0673	0,0292	0,0426	0,0213	0,0510
3	0,1214	0,0362	0,0079	0,0264	0,0608	0,0255	0,0350	0,0170	0,0610
4	0,1195	0,0233	0,0049	0,0179	0,0754	0,0210	0,0415	0,0193	0,0544
5	0,1187	0,0415	0,0079	0,0316	0,0725	0,0300	0,0383	0,0165	0,0642

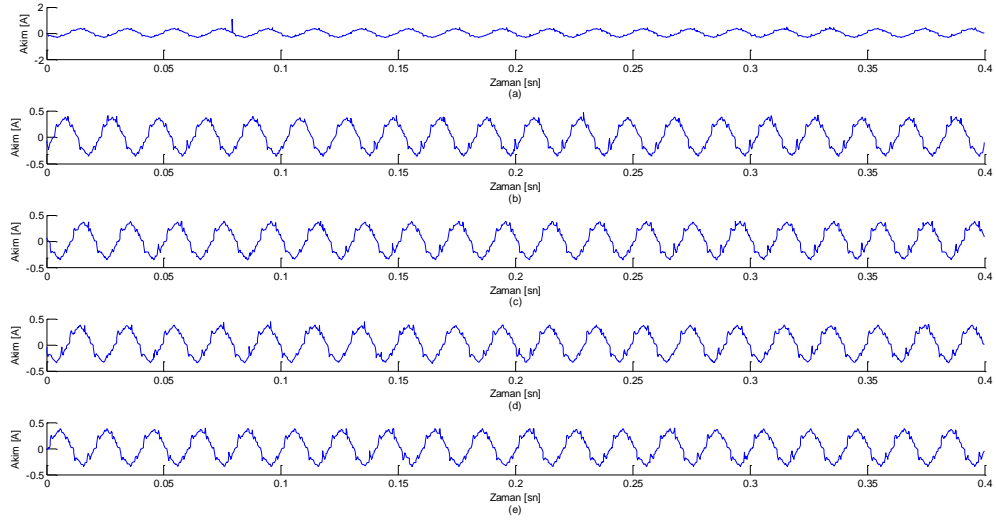


Şekil 4.23: 4. Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.23' den de görüleceği üzere uygulanan giriş gerilimi yükseldikçe çıkış akımının 20 periyotluk sinüs dalgasının incelendiğinde daha fazla bozulduğu gözlemlenmiştir. Tablo 4.23' de hesaplanan harmonikler incelendiğinde temel bileşen değerlerinin giriş gerilim seviyesi arttıkça arttığı 5. harmonik değerlerinin bir önceki 10,8 kV uygulanan giriş gerilim seviyesinde hesaplanan harmoniklerle yaklaşık aynı çıktığı görülmektedir.

Tablo 4.23: 4.Elektrot tipi: 12,6 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1464	0,0179	0,0171	0,0200	0,0677	0,0126	0,0399	0,0151	0,0485
2	0,1448	0,0218	0,0097	0,0188	0,0565	0,0141	0,0291	0,0102	0,0488
3	0,1419	0,0227	0,0105	0,0203	0,0658	0,0203	0,0477	0,0098	0,0507
4	0,1393	0,0226	0,0079	0,0184	0,0886	0,0208	0,0362	0,0184	0,0580
5	0,1388	0,0212	0,0110	0,0160	0,0719	0,0136	0,0473	0,0100	0,0555



Şekil 4.24: 4. Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

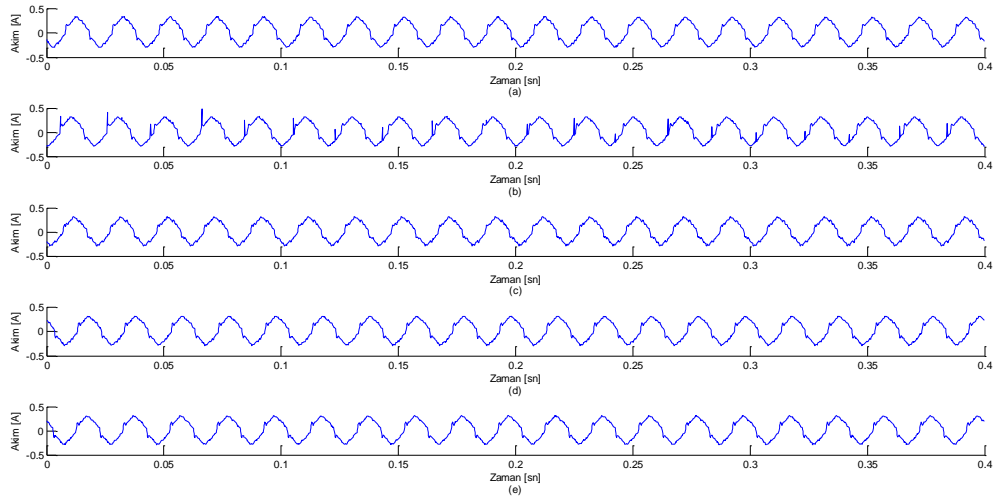
Şekil 4.24 (a)' da da görüleceği üzere giriş geriliminin maksimum olduğu durumda elektrotlar arası açıklık 1 mm iken arkların arttığı görülmüş ve harmonik hesaplamaları zorlaşmıştır. Harmonikler uygulanan 14,4 kV giriş gerilimine göre hesaplanmış ve tablo 4.24' de görülmektedir. Tablo 4.24 incelendiğinde de beşinci harmonik distorsiyonlar diğer harmonik distorsiyonlara göre yüksek çıkmıştır.

Tablo 4.24: 4.Elektrot tipi: 14,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1536	0,0240	0,0180	0,0219	0,0709	0,0253	0,0434	0,0188	0,0471
2	0,1649	0,0255	0,0143	0,0225	0,0600	0,0208	0,0368	0,0086	0,0616
3	0,1634	0,0267	0,0082	0,0211	0,0648	0,0226	0,0455	0,0111	0,0569
4	0,1611	0,0212	0,0088	0,0204	0,0803	0,0193	0,0373	0,0104	0,0554
5	0,1591	0,0204	0,0091	0,0180	0,0670	0,0185	0,0427	0,0116	0,0547

4.1.5. 5. Elektrot Düzeni

Elektrot tipi için 2 cm yarım küre içinde tabana 1 mm' den 5 mm' ye kadar elektrotlar arası açıklık için 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu bakır elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 4 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu elektrot tipinde seçilen küre çapı küçük olduğundan dolayı son 2 giriş gerilim seviyeleri olan 12,6 kV ve 14,4 kV gerilim giriş gerilim seviyelerinde oluşan yüksek miktardaki atlamadan dolayı ölçüm yapılamamıştır. Ölçüm yapılan 5,4 kV, 7,2 kV, 9 kV, 10,8 kV giriş gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 4 farklı gerilim değeri için verilmiştir.



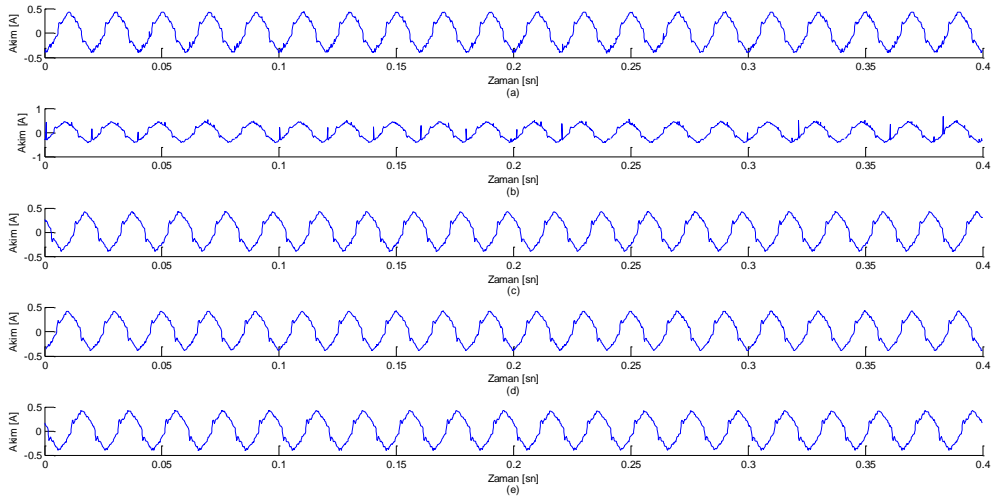
Şekil 4.25: 5. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımını. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.25’ de yarı küre elektrot ucundan toplanıp seçilen 20 periyotluk veriler incelendiğinde 2 mm açıklık için çıkış akımının daha fazla bozulduğu görülmektedir. Hesaplanan harmonik distorsiyonların verildiği tablo 4.25’ e bakıldığında ise Temel bileşen değerlerinin 5 cm ve 6 cm çaplı yarı kürelerde diğer daha küçük çaplı yarıkürelerde elde edilen aynı giriş gerilim seviyesine göre harmonik distorsiyonların daha yüksek çıktığı ölçülmüştür

Tablo 4.25: 5.Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1433	0,0106	0,0119	0,0028	0,0767	0,0045	0,0372	0,0032	0,0447
2	0,1402	0,0198	0,0096	0,0050	0,0731	0,0039	0,0392	0,0046	0,0463
3	0,1366	0,0090	0,0136	0,0021	0,0785	0,0035	0,0386	0,0038	0,0509
4	0,1378	0,0120	0,0138	0,0048	0,0818	0,0025	0,0401	0,0062	0,0438
5	0,1375	0,0132	0,0120	0,0051	0,0856	0,0043	0,0350	0,0056	0,0441

5. Elektrot tipindeki yarı küre çapı 2 cm olmasından dolayı hesaplanan harmonik distorsiyonların diğer elektrot tiplerindeki aynı giriş gerilim seviyelerine göre daha büyük çıktığı görülmüştür.



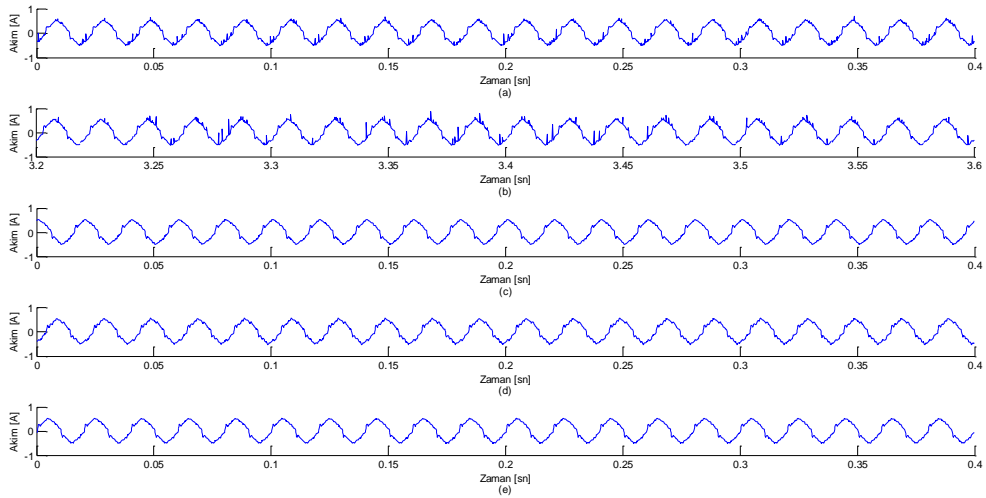
Şekil 4.26: 5. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d)

(a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

2 cm çapındaki yarı küre elektrot düzeni için sivri uçlu yüksek gerilim ucuna verilen 7,2 kV giriş gerilim seviyesine ait toprak elektrottan toplanan çıkış akımları şekil 4.26' da verilmiştir. Seçilen 20 periyotluk çıkış akımlarında 2 mm elektrotlar arası açıklık için bozulmanın diğer elektrotlar arası açıklığa göre daha fazla olduğu gözlenmektedir. Tablo 4.26 aynı giriş gerilim seviyesi uygulandığında diğer 5 cm ve 6 cm yarı küre elektrot tipleri ile karşılaştırıldığımızda hesaplanan diğer temel bileşenlerde artış gözlenmemiştir.

Tablo 4.26: 5. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1907	0,0067	0,0100	0,0059	0,0799	0,0033	0,0326	0,0031	0,0448
2	0,1944	0,0225	0,0090	0,0073	0,0839	0,0057	0,0360	0,0058	0,0535
3	0,1875	0,0097	0,0088	0,0095	0,0865	0,0042	0,0331	0,0054	0,0467
4	0,1856	0,0095	0,0101	0,0087	0,0800	0,0033	0,0382	0,0061	0,0453
5	0,1865	0,0108	0,0089	0,0102	0,0817	0,0043	0,0320	0,0066	0,0434

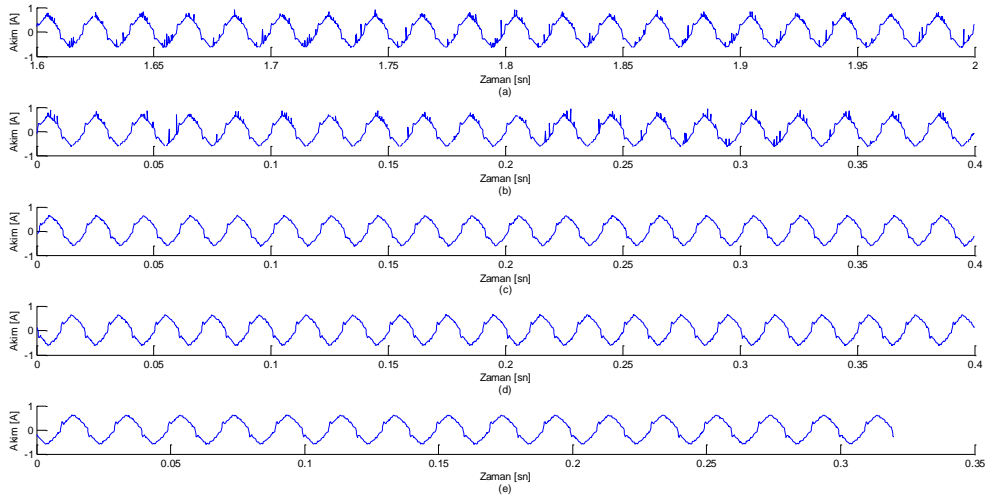


Şekil 4.27: 5. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.27' de 9 kV Giriş gerilimi uygulandığında elektrotlar arası açıklığa göre çıkış akımının değişimini gösteren 20 periyotluk örnek verilerin grafikleri verilmiştir. 1 mm ve 2 mm elektrotlar arası açıklık için çıkış akımındaki bozulmanın yüksek olduğu görülmektedir. 3 mm elektrotlar arası açıklık için çıkış akımının 20 periyotluk örnek verisi incelendiğinde bozulma daha düşük çıktığı görülmektedir. Harmonik distorsiyon değerlerin hesaplandığı tablo 4.27 ' de temel bileşenlerin elektrotlar arası açıklık için değişmediği görülmektedir.

Tablo 4.27: 5. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,2378	0,0241	0,0106	0,0083	0,0812	0,0040	0,0339	0,0042	0,0417
2	0,2486	0,0188	0,0115	0,0094	0,0737	0,0027	0,0366	0,0088	0,0398
3	0,2386	0,0106	0,0083	0,0049	0,0803	0,0071	0,0386	0,0026	0,0440
4	0,2386	0,0101	0,0092	0,0036	0,0728	0,0066	0,0328	0,0048	0,0458
5	0,2388	0,0113	0,0092	0,0055	0,0742	0,0064	0,0380	0,0043	0,0426



Şekil 4.28: 5. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

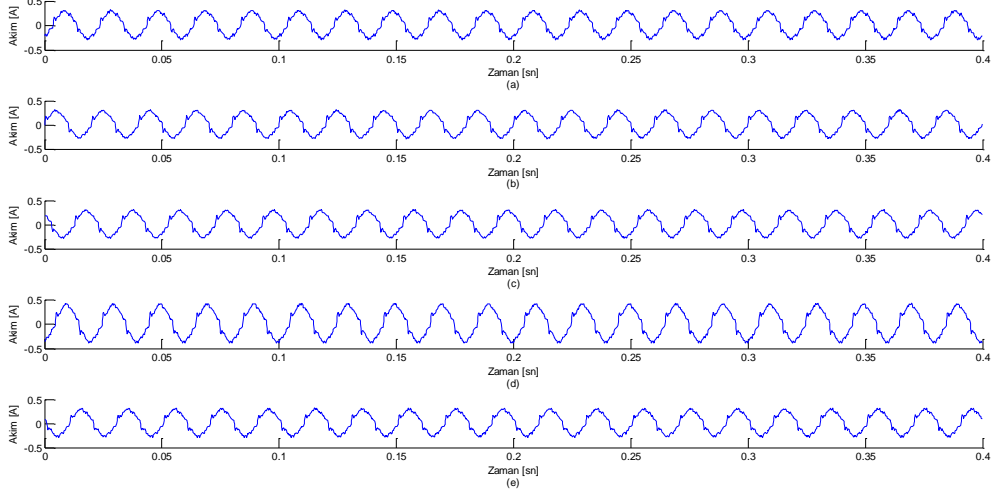
10,8 kV giriş gerilim seviyesi verildiğinde 1 mm ve 2 mm açıklık için bozulmaların diğer elektrot açıklıklarına göre daha fazla olduğu Şekil 4.28’ de görülmektedir. Tablo 4.28’ de hesaplanan temel bileşen değerlerinin arttığı görülürken 5. Harmonik değerlerinin farklı elektrot açıklıklarına göre aynı kaldığı gözlenmiştir.

Tablo 4.28: 5. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,2995	0,0263	0,0074	0,0044	0,0787	0,0055	0,0254	0,0037	0,0489
2	0,2962	0,0211	0,0109	0,0042	0,0804	0,0074	0,0353	0,0049	0,0413
3	0,2890	0,0107	0,0137	0,0060	0,0770	0,0055	0,0371	0,0046	0,0467
4	0,2876	0,0119	0,0123	0,0063	0,0796	0,0048	0,0373	0,0061	0,0452
5	0,0009	0,2206	0,1052	22,2530	0,0824	0,1706	0,2423	2,8820	0,4432

4.1.6. 6. Elektrot Düzeni

Elektrot tipi için 2 cm yarım küre içinde tabana 1 mm’ den 5 mm’ ye kadar elektrotlar arası açıklık için 5 cm uzunluğunda 0,1 mikron kalınlığında iğne uçlu çelik elektrot kullanılarak yağ içinde düzgün olmayan elektrik alan oluşturulmuştur. Yapılan deneyler 4,8 saniye boyunca 4 farklı gerilim değeri için tekrarlanmıştır. Bu elektrot tipinde seçilen küre çapı küçük olduğundan dolayı son 2 giriş gerilim seviyeleri olan 12,6 kV ve 14,4 kV gerilim giriş gerilim seviyelerinde oluşan yüksek miktardaki atlamadan dolayı ölçüm yapılamamıştır. Son iki gerilim seviyesinde bu çaptaki küre çeperleri ile yüksek gerilim elektrodu oldukça yakındır. Küre çeperi ve elektrot arasındaki deşarjlar ile birlikte iğne elektrottan küre tabanına doğru oluşan yüksek arklar ölçüm sistemimizdeki cihazlara zarar verecek seviyede olduğundan bu küre için ilk dört gerilim seviyesi test edilmiştir Ölçüm yapılan 5,4 kV, 7,2 kV, 9 kV, 10,8 kV giriş gerilim değerlerine göre 20 periyotluk örnek bir veri seçilerek analiz edilmiştir. Analizler neticesinde elde edilen kaçak akımını temel ve harmonik bileşenleri 5 farklı elektrot aralığında, 4 farklı gerilim değeri için verilmiştir.

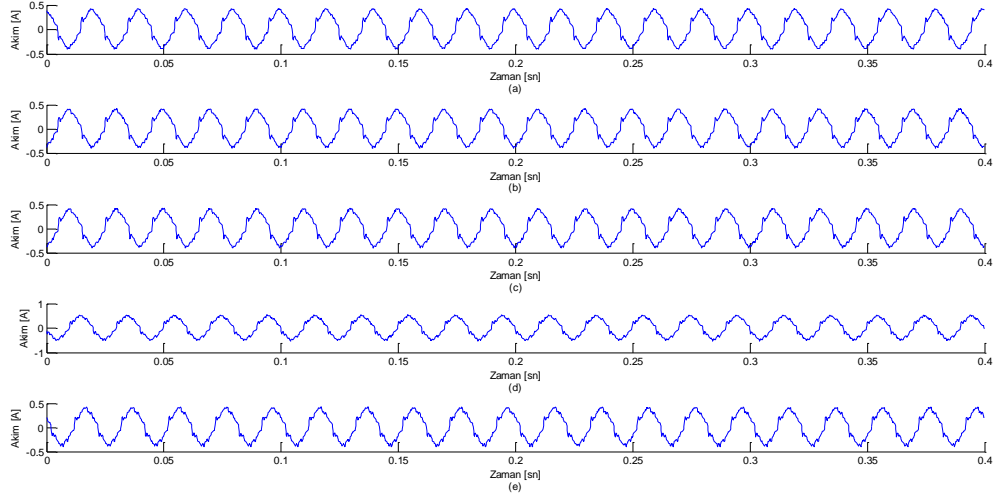


Şekil 4.29: 6. Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Uygulanan giriş gerilim seviyesi 5,4 kV seçildiği 6. Elektrot tipinde kısmi deşarj atım sayısı 1 mm ve 2 mm elektrotlar arası açıklık için daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 4.26 da hesaplanan 5. harmoniklerin aynı gerilim seviyesindeki 5. Elektrot tipi ile karşılaştırıldığında yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir. Diğer harmonikler incelendiğinde 4., 6. Ve 8. harmoniklerin aynı giriş gerilim seviyesi verilen 5. Elektrot tipine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

Tablo 4.29: 6.Elektrot tipi: 5,4 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1371	0,0102	0,0093	0,0044	0,0604	0,0067	0,0357	0,0074	0,0675
2	0,1365	0,0145	0,0082	0,0049	0,0728	0,0069	0,0474	0,0087	0,0609
3	0,1370	0,0151	0,0076	0,0063	0,0704	0,0076	0,0503	0,0089	0,0611
4	0,1862	0,0102	0,0050	0,0088	0,0723	0,0063	0,0451	0,0051	0,0621
5	0,1364	0,0109	0,0097	0,0056	0,0690	0,0056	0,0484	0,0071	0,0718

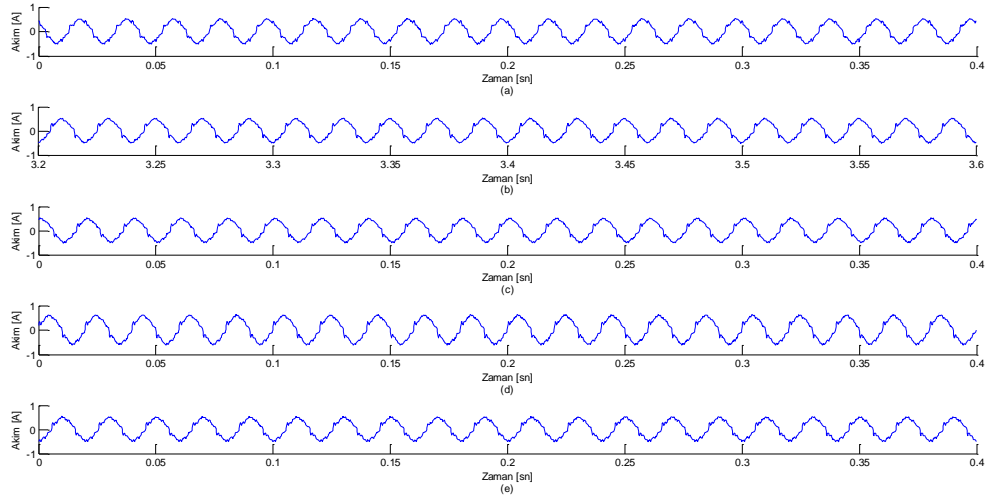


Şekil 4.30: 6. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Şekil 4.30’ da 7.2 kV giriş gerilim seviyesine göre elektrotlar arası açıklık için ölçülen akım değerlerinin 20 periyotluk örnekleme verilmiştir. Akım değerleri incelendiğinde 4 mm elektrotlar arası açıklık için bozulmanın diğer elektrotlar arası açıklıklara kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 4.30’ da hesaplanan harmonik değerler incelendiğinde ise temel bileşen değerlerinin bir önceki gerilim seviyesine göre arttığı fakat 5. harmoniklerin artmadığı gözlenmiştir.

Tablo 4.30: 6. Elektrot tipi: 7,2 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,1907	0,0110	0,0081	0,0074	0,0742	0,0067	0,0448	0,0095	0,0580
2	0,1857	0,0106	0,0075	0,0084	0,0717	0,0074	0,0476	0,0066	0,0611
3	0,1856	0,0106	0,0058	0,0084	0,0731	0,0072	0,0471	0,0073	0,0611
4	0,2362	0,0100	0,0058	0,0057	0,0651	0,0081	0,0373	0,0044	0,0641
5	0,1837	0,0079	0,0062	0,0090	0,0692	0,0060	0,0418	0,0066	0,0708

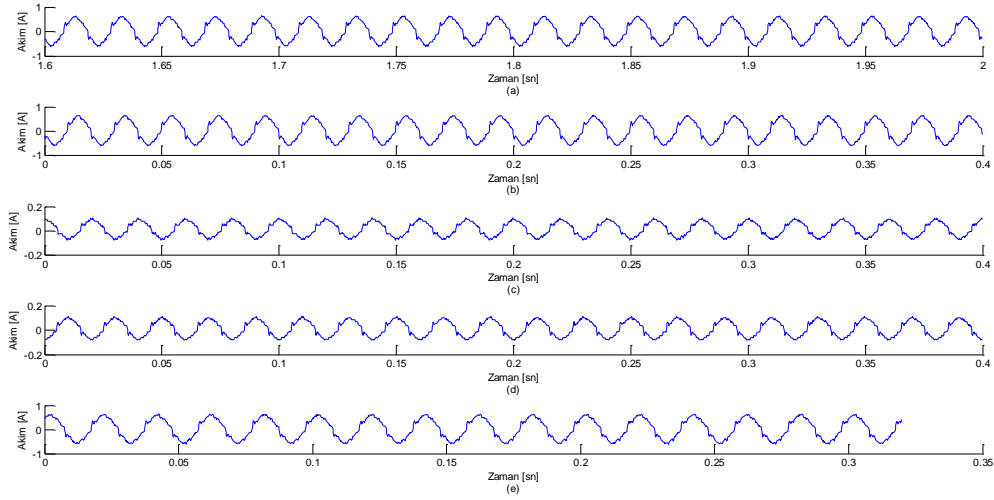


Şekil 4.31: 6. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Uygulanan giriş gerilim seviyesi 9 kV çıkarıldığında oluşan çıkış akımının için 20 periyotluk örneklerin elektrotlar arası açıklıkların değişimi ile şekil 4.31’ de verilmektedir. Tablo 4.31 hesaplanan harmonikler incelendiğinde bir önceki giriş gerilimi olan 7,2 kV gerilim değerine göre harmonikleri arttığı görülmektedir.

Tablo 4.31: 6. Elektrot tipi: 9 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,2407	0,0090	0,0084	0,0034	0,0650	0,0084	0,0495	0,0072	0,0621
2	0,2376	0,0121	0,0067	0,0055	0,0726	0,0082	0,0484	0,0065	0,0595
3	0,2363	0,0112	0,0056	0,0060	0,0648	0,0071	0,0340	0,0057	0,0610
4	0,2853	0,0132	0,0086	0,0059	0,0601	0,0062	0,0369	0,0058	0,0632
5	0,2349	0,0100	0,0076	0,0080	0,0634	0,0078	0,0368	0,0070	0,0683



Şekil 4.32: 6. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi için çıkış akımı. Elektrotlar arası açıklık (d) (a) 1 mm (b) 2 mm (c) 3 mm (d) 4 mm (e) 5 mm

Tablo 4.32: 6. Elektrot tipi: 10,8 kV giriş gerilimi, elektrotlar arası açıklık değişkenleri için HD değerleri

d (mm)	Temel Bileşen	HD ₂	HD ₃	HD ₄	HD ₅	HD ₆	HD ₇	HD ₈	HD ₉
1	0,2859	0,0139	0,0080	0,0073	0,0710	0,0059	0,0453	0,0081	0,0619
2	0,2920	0,0136	0,0083	0,0057	0,0694	0,0066	0,0458	0,0071	0,0603
3	0,0401	0,0035	0,0181	0,0049	0,0819	0,0053	0,0529	0,0039	0,0714
4	0,0438	0,0056	0,0194	0,0036	0,0752	0,0083	0,0472	0,0025	0,0622
5	0,0008	0,2866	0,2173	20,5486	0,1514	0,1719	0,2391	4,1126	0,9590

Şekil 4.32' de 6. Elektrot düzeni için 10,8 kV giriş gerilim değeri için çıkış akımların 20 periyotluk örnekleri elektrotlar arası açıklık için verilmiştir. 1 mm ve 2 mm elektrotlar arası açıklık için bozulmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Tablo 4.32' de hesaplanan harmonikler ve temel bileşenler incelendiğinde ise aynı giriş gerilimi uygulanan 5. elektrot tipi için 5 mm elektrotlar arası açıklık için temel bileşen değerinin düştüğü görülürken 6. elektrot tipinde temel bileşen değerlerinin 3 mm elektrot açıklığından itibaren düştüğü gözlenmektedir.

Aynı giriş gerilim değeri uygulanan diğer 6 cm çaplı 1. ve 2. elektrot ve 5 cm çaplı 3. ve 4. elektrot tiplerine ait temel bileşenler ile karşılaştırıldığında 1 mm için ve 2 mm elektrotlar arası açıklık için temel bileşen değerlerinin 6. elektrot tipinde 2,5 kat arttığı görülmektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan çalışmada mineral yağ içerisinde oluşturulan düzgün olmayan elektrik alanda kısmi deşarj davranışının analizi deneysel olarak yapılmıştır. Önceki bölümlerde sıvı dielektrik malzeme üzerinde durularak deney ortamının modellenmesi ölçüm sonuçlarının nasıl işleneceği anlatılmıştır.

5 cm uzunluğunda 0,1 mikron uç kalınlığında sivri uçlu çelik ve bakır elektrotlar sivri uçlu elektrot olarak seçilmiştir. Çapları 6 cm, 5 cm ve 2 cm olmak üzere 3 adet yarı küre seçilerek toplamda 6 adet farklı elektrot tipi oluşturulmuştur. Yapılan ölçümler için 5,4 kV - 14,4 kV arasında 6 farklı gerilim değeri kullanılmıştır. Elektrotlar arasında 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm ve 5 mm uzunluğundaki farklı açıklık değerleri için deneyler mineral yağ içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel yalıtım sistemlerinde, yalıtkan malzemenin durumunu belirlemede en sık kullanılan yöntem olan FFT yöntemi ile Fourier analizi yapıp, sinyal içerisindeki harmonikler hesaplanmıştır. Harmoniklerin hesaplanması neticesinde düzgün olmayan elektrik alanda kısmi deşarj davranışı incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda şebeke gerilimi uygulamalarında birbirlerini sönmelenmesi beklenen çift harmoniklerin de oluştuğu gözlemlenmiştir. Çift harmonikler deşarj sırasında yağ içinde anlık olarak oluşan habbeciklerin polarize olması nedeniyle meydana geldiği düşünülmektedir. Bu habbeciklerin yarattığı kapasitif etki çift harmoniklerin ölçülmesine sebebiyet vermiştir.

İlk olarak 5,4 kV gerilim uygulaması ile başlatılan testler kademe kademe 7,2 kV, 9 kV, 10,8 kV 12,6 kV ve son olarak 14,4 kV seviyelerinde uygulanmıştır. Özellikle 14,4 kV seviyelerine çıktığında kısmi deşarjın artarak elektrotlar üzerinde oluşan arkların arttığı ölçülmüştür. Yapılan hesaplamalarda 5. harmoniğin diğer harmoniklere oranla daha yüksek olduğu ve kısmi deşarj sonucu bozulmalara katkısı oluştuğu gözlemlenmiştir.

Elektrot açıklıkları 1 mm' den başlanarak 5 mm' ye doğru arttırıldığında yapılan ölçümlerde kısmi deşarj atım sayısının azaldığı genliğinin ise uygulanan gerilim ile orantılı olacak şekilde arttığı ölçülmüştür.

Ayrıca küre çapları küçüldükçe ve gerilim seviyeleri arttıkça oluşan atlamaların sayısının arttığı gözlemlenmiştir. 5. ve 6. elektrot tipinde kullanılan 2 cm çaplı küre için 10,8 kV gerilim

değerinin üstündeki iki gerilim seviyesi için, düzenek içinde oluşan arkların sayısının ve genliğinin artması neticesinde ölçümler alınamamıştır. Bu nedenle küre çapı küçüldükçe kısmi deşarj atım sayısı arttığı ve delinme gerilimine yaklaştığı yapılan deneysel çalışma ile görülmüştür.

Kullanılan bakır ve çelik sivri uçlu elektrotlar arasındaki farklar iletkenlik bakımından bakırın üstün oluğunu ortaya koymuştur. Yapılan ölçüm sonuçlarında çelik sivri uçlu elektrotun bakır iğne uçlu elektrotta göre iletkenlik dezavantajından dolayı kısmi deşarjların analiz edilmesi için oluşturulan harmoniklerin daha yüksek olduğu ve bu nedenle elektrotun ucunun daha hızlı deforme olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmanın neticesinde sıvı dielektriklerde kısmi deşarjın üzerinde etkisi olan harmoniklerin, yağ dielektrik malzemelerin bozulmasındaki etkisi ölçümler ile ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] Lu, W., & Liu, Q. (2015, July). Effect of cellulose particles on streamer initiation and propagation in dielectric liquids. In *2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM)* (pp. 939-942). IEEE.
- [2] Zhang, J., Li, J., Huang, D., Zhang, X., Liang, S., & Li, X. (2015, October). Influence of nonmetallic particles on the breakdown strength of vegetable insulating oil. In *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)* (pp. 609-612). IEEE.
- [3] Tao, Z., Yunpeng, L., Fangcheng, L., & Ruihong, D. (2016). Study on dynamics of the bubble in transformer oil under non-uniform electric field. *IET Science, Measurement & Technology*, 10(5), 498-504.
- [4] Nazari, M., Rasoulifard, M. H., & Hosseini, H. (2016). Dielectric breakdown strength of magnetic nanofluid based on insulation oil after impulse test. *Journal of magnetism and magnetic Materials*, 399, 1-4.
- [5] Berg, G., Lundgaard, L. E., Becidan, M., & Sigrnond, R. S. (2002). Instability of electrically stressed water droplets in oil. In *Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL 2002 (Cat. No. 02CH37319)* (pp. 220-224). IEEE.
- [6] Yilmaz, H., & Guler, S. (1996, July). The effect of electrode shape, gap and moisture on dielectric breakdown of transformer oil. In *ICDL'96. 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids* (pp. 354-357). IEEE.
- [7] International Electrotechnical Commission. (2000). High-voltage test techniques-Partial discharge measurements. *IEC Standard 60270*.
- [8] Ersoy, A. (2007). Elektriksel yalıtım sistemlerinde kullanılan polimerik izolatörlere bor katkısı ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- [9] Bartnikas, R. (2002). Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5), 763-808.

- [10] Gowri, N. V., Raju, M. R., & Singh, B. P. (2018). Analysis of Particle Movement and Partial Discharge in OFAF Power Transformers Using Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(1), 783-790.
- [11] Li, Y. (2015, July). Summary of transformer partial discharge detection methods. In *First International Conference on Information Sciences, Machinery, Materials and Energy*. Atlantis Press.
- [12] Chen, W., Chen, X., Peng, S., & Li, J. (2012). Canonical correlation between partial discharges and gas formation in transformer oil paper insulation. *Energies*, 5(4), 1081-1097.
- [13] Xu, Y., Liu, W., Gao, W., Zhang, X., & Wang, Y. (2016). Comparison of pd detection methods for power transformers-their sensitivity and characteristics in time and frequency domain. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(5), 2925-2932.
- [14] Calcara, L., Pompili, M., & Muzi, F. (2017). Standard evolution of Partial Discharge detection in dielectric liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(1), 2-6.
- [15] Gulski, E., & Kreuger, F. H. (1992). Computer-aided recognition of discharge sources. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 27(1), 82-92.
- [16] Kreuger, F. H., Gulski, E., & Krivda, A. (1993). Classification of partial discharges. *IEEE transactions on Electrical Insulation*, 28(6), 917-931.
- [17] Cavallini, A., Contin, A., Montanari, G. C., & Puletti, F. (2003). Advanced PD inference in on-field measurements. I. Noise rejection. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(2), 216-224.
- [18] Cavallini, A., Conti, M., Contin, A., & Montanari, G. C. (2003). Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(3), 528-538.

- [19] Contin, A., & Pastore, S. (2009). Classification and separation of partial discharge signals by means of their auto-correlation function evaluation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16(6), 1609-1622.
- [20] Contin, A., Cavallini, A., Montanari, G. C., Pasini, G., & Puletti, F. (2002). Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals. *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, 9(3), 335-348.
- [21] Van Breen, H. J., Gulski, E., Smit, J. J., Verhaart, H. F. A., & De Leeuw, W. (2002, April). Experience with on-line PD measurements on generators in frequency and time domain. In *Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316)* (pp. 31-35). IEEE.
- [22] Alvarez, F., Ortego, J., Garnacho, F., & Sanchez-Uran, M. A. (2016). A clustering technique for partial discharge and noise sources identification in power cables by means of waveform parameters. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(1), 469-481.
- [23] Zaengl, W. S. (2003). Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(5), 5-19.
- [24] Saha, T. K., & Purkait, P. (2004). Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(1), 144-154.
- [25] Saha, T. K., Hill, D. J. T., Yao, Z. T., Yeung, G., & Darveniza, M. (1998). The application of interfacial polarization spectra for assessing insulation condition in aged power transformers. *CIGRE session, Paris*.
- [26] Setayeshmehr, A., Fofana, I., Eichler, C., Akbari, A., Borsi, H., & Gockenbach, E. (2008). Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 15(4), 1100-1111.

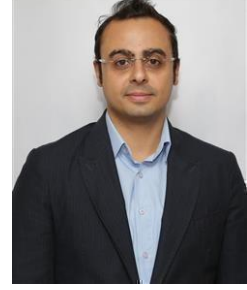
- [27] Jota, P. R. S., Islam, S. M., & Jota, F. G. (1999). Modeling the polarization spectrum in composite oil/paper insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 6(2), 145-151.
- [28] Saha, T. K., Purkait, P., & Muller, F. (2005). Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 149-157.
- [29] Supramaniam, G. K., & Hussien, Z. F. (2008, December). Application of frequency domain spectroscopy (FDS) in assessing dryness and ageing state of transformer insulation systems. In *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference* (pp. 55-61). IEEE.
- [30] Fofana, I., Hemmatjou, H., Meghnefi, F., Farzaneh, M., Setayeshmehr, A., Borsi, H., & Gockenbach, E. (2010). On the frequency domain dielectric response of oil-paper insulation at low temperatures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(3), 799-807.
- [31] Ekanayake, C., Gubanski, S. M., Graczkowski, A., & Walczak, K. (2006). Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21(3), 1309-1317.
- [32] Pradhan, A. K., Chatterjee, B., & Chakravorti, S. (2015). Estimation of paper moisture content based on dielectric dissipation factor of oil-paper insulation under non-sinusoidal excitations. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 822-830.
- [33] TS EN 60270/A1 Kablolar-Yüksek gerilim deney teknikleri-Kısmi boşalma ölçmeleri
- [34] TS 2051, Elektriksel Kısmi Boşalmaların Ölçülmesi, Türk Standartları Enstitüsü, 1975.
- [35] Seker, S., & Ayaz, E. (2003). Feature extraction related to bearing damage in electric motors by wavelet analysis. *Journal of the Franklin Institute*, 340(2), 125-134.
- [36] Chen, H., Prasai, A., Moghe, R., Chintakrinda, K., & Divan, D. (2016). A 50-kVA three-phase solid-state transformer based on the minimal topology: Dyna-C. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(12), 8126-8137.

- [37] She, X., Burgos, R., Wang, G., Wang, F., & Huang, A. Q. (2012, September). Review of solid state transformer in the distribution system: From components to field application. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 4077-4084). IEEE.
- [38] Khanali, M., Jayaram, S., & Cheng, J. (2013, June). Effects of voltages with high-frequency contents on the transformer insulation properties. In *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)* (pp. 235-238). IEEE.
- [39] Morshuis, P. H. (2005). Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(5), 905-913.
- [40] Kikuchi, Y., Yamashita, K., Matsuoka, S., Kumada, A., Hidaka, K., Tatamidani, K., & Masuda, T. (2015). Partial discharge characteristics in composite insulation systems with PPLP for HTS cable. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(2), 1025-1030.
- [41] Bodega, R., Cavallini, A., Morshuis, P. H. F., & Wester, F. J. (2002). The effect of voltage frequency on partial discharge activity. In *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (pp. 685-689). IEEE.
- [42] Bodega, R., Morshuis, P. H., Lazzaroni, M., & Wester, F. J. (2004). PD recurrence in cavities at different energizing methods. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53(2), 251-258.
- [43] Fabiani, D., Montanari, G. C., Cavallini, A., & Mazzanti, G. (2004). Relation between space charge accumulation and partial discharge activity in enameled wires under PWM-like voltage waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(3), 393-405.
- [44] Cavallini, A., & Montanari, G. C. (2006). Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system. *IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 13(1), 111-121.
- [45] Liu, T., Li, Q., Huang, X., Lu, Y., Asif, M., & Wang, Z. (2018). Partial discharge behavior and ground insulation life expectancy under different voltage frequencies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 25(2), 603-613.

- [46] Sheng, B., Zhou, C., Hepburn, D. M., Dong, X., Peers, G., Zhou, W., & Tang, Z. (2015). A novel on-line cable pd localisation method based on cable transfer function and detected pd pulse rise-time. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(4), 2087-2096.
- [47] Gallagher, T. J., & Pearmain, A. J. (1983). *High voltage: measurement, testing and design*. Wiley.
- [48] M. Khalifa (ed.). *High Voltage Engineering: Theory and Practice*, Marcel Dekker, Inc., New York, 1990.
- [49] Dutton, J. (1978). *Electrical Breakdown of Gases* eds. JM Meek and JD Craggs.
- [50] Kuffel, J., & Kuffel, P. (2000). *High voltage engineering fundamentals*. Elsevier.
- [51] Chari, M. V., & Silvester, P. P. P. (Eds.). (1980). *Finite elements in electrical and magnetic field problems*. John Wiley & Sons Incorporated.
- [52] Malik, N. H., Al-Arainy, A. A., & Qureshi, M. I. (1998). *Electrical insulation in power systems*. Marcel Dekker.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Alper AYDOĞAN
Doğum Yeri	BURDUR
Doğum Tarihi	09.11.1981
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	0 555 255 2971
E-Posta Adresi	aydogananlper@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Niğde Üniversitesi (Ömer Halisdemir Üniversitesi)
Fakülte	Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2005

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler	