

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLERDEN KAYNAKLANAN GERİLİM  
BOZULMALARININ ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Yük. Müh. Murat FİDAN**

**Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU**

**KOCAELİ, 2011**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİKLERDEN KAYNAKLANAN GERİLİM  
BOZULMALARININ ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Y.Müh. Murat FİDAN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 03 Haziran 2011**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 02 Kasım 2011**

**Tez Danışmanı**

**Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**

(.....)

**Üye**

**Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU**

(.....)

**KOCAELİ, 2011**

## ÖNSÖZ

Yüksek gerilim sistemlerinin yalıtım kalitesini belirlemek için kullanılan tahribatsız deney yöntemlerinin başında kısmi boşalma ölçümleri gelmektedir. Yerli yüksek gerilim endüstrisi, kısmi boşalma ölçümlerini gerçekleştirilen ölçme sistemlerini yüksek fiyatlar ile yurt dışından ithal etmektedir. Doktora çalışması kapsamında geliştirilen kısmi boşalma ölçüm sistemi ve yazılımı ile yurt dışına aktarılan kaynakların önüne geçilmesi yönünde önemli bir adım atıldığı düşünülmektedir. Geliştirilen kısmi boşalma ölçüm sistemi yardımıyla harmonikli bileşenler içeren yüksek gerilimlerin, yalıtkanlarda meydana gelen kısmi boşalmalar üzerindeki etkileri deneysel olarak irdelenmiştir.

Bugüne sayelerinde geldiğim sevgili anneme, babama, çalışmalarında bana destek olan sevgili eşime, değerli hocam ve danışmanım sayın Yrd. Doç. Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU'na, değerli hocalarım sayın Prof. Dr. Semra ÖZTÜRK'e, sayın Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ'ye, uygulamalı çalışmalarında büyük desteklerini gördüğüm değerli mesai arkadaşım makine teknikeri sayın Abdülkadir YAYLA ağabeyime, Elopap A.Ş. müdürü sayın Ekrem TEMEL'e, kayınpederim torna ustası sayın Rafet ORUÇ'a, sevgili arkadaşım Fatih Mehmet NUROĞLU'na, çalışmalarında bana laboratuvarını açan TÜBİTAK-UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı personeli adına sayın Dr. Ahmet MEREV'e ve burada adını anamadığım emeği geçen herkese sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	iv
TABLolar DİZİNİ .....	vii
SİMGELER .....	viii
ÖZET .....	x
İNGİLİZCE ÖZET .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR .....	4
2.1. Elektriksel Kısmi Boşalmalara İlişkin Büyüklükler ve Tanımlamalar .....	8
2.2. Alternatif Gerilimde Elektriksel Kısmi Boşalmaların Gelişimi .....	11
2.2.1. Tam sinüsoidal gerilimde kısmi boşalmaların gelişimi .....	11
2.2.2. Harmoniklerden kaynaklanan gerilim dalga şekli bozulmaları .....	13
2.2.3. Tam sinüsoidal olmayan gerilimde kısmi boşalmaların gelişimi .....	16
3. KAYNAK TARAMA .....	19
4. KISMİ BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİ .....	31
4.1. Kısmi Boşalma Ölçme Yöntemleri .....	31
4.1.1. Doğrudan ölçme yöntemi .....	31
4.1.2. Dengelenmiş devre ile ölçme yöntemi .....	33
4.1.3. Kayıp ölçme yöntemi .....	34
4.2. Kısmi Boşalma Ölçümünde Kullanılan Temel Devre Elemanları .....	36
4.2.1. Yüksek gerilim kaynağı .....	36
4.2.2. Filtreler ve akım sınırlayıcı dirençler .....	37
4.2.3. Ölçü dört uçlusu (Coupling device-Coupling quadrapole) .....	37
4.2.3.1. RC ve RLC devreleri .....	38
4.2.4. Kuplaj kondansatörü .....	40
4.2.5. Bağlantı iletkenleri ve alan dağılımı düzenleyicileri .....	40
4.3. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Görünen Yük Değerine Dönüştürülmesi .....	41
4.4. Kısmi Boşalma Ölçme Sistemlerinin Ölçeklenmesi .....	47
5. KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI .....	49
5.1. Kısmi Boşalma Ölçme Sistemlerine İlişkin Karakteristikler .....	49
5.2. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Faz Çözünümlü Örüntüler Şeklinde Ölçümü ..	51
5.3. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Örneklenmesi .....	53
5.4. Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) .....	56
5.4.1. Dalgacık Dönüşümü'nde Kullanılan Parametreler .....	57
5.4.2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) .....	59
5.4.3. Ayırık Dalgacık Dönüşümü (ADD) - Çoklu Çözünürlük Analizi .....	61
6. FAZ ÇÖZÜNÜMLÜ KISMİ BOŞALMA ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI VE YAPIMI .....	67
6.1. Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi İçin Geliştirilen Aygıtlar .....	67
6.1.1. Kuplaj kondansatörü (1 nF - 50 kV) yapımı .....	68
6.1.1.1. Yüksek gerilim kondansatörleri .....	68
6.1.1.2. Kuplaj kondansatörü tasarımı .....	70

6.1.1.3. Kuplaj kondansatörü uygulaması.....	73
6.1.1.4. Kuplaj kondansatörüne ilişkin deneysel sonuçlar.....	77
6.1.2. Sıvı direnç yapımı.....	80
6.1.2.1. Sıvı direnç tasarımı.....	81
6.1.2.2. Sıvı direnç uygulaması.....	85
6.1.3. 100 kV ohmik gerilim bölücü yapımı.....	87
6.1.3.1. 100 kV ohmik gerilim bölücü tasarımı.....	88
6.1.3.2. 100 kV ohmik gerilim bölücü uygulaması.....	90
6.1.4. Kısmi boşalma kalibratörü yapımı.....	93
6.1.5. Kısmi boşalma ölçü aleti yapımı.....	98
6.1.5.1. Şarj ünitesi ve besleme devresi.....	100
6.1.5.2. Kuvvetlendirme (Amplifikatör) devresi.....	101
6.1.5.3. Filtre devreleri.....	102
6.1.5.4. Görünen yük genliği belirleme ve gösterge devresi.....	104
6.1.6. Sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot düzeni.....	105
6.1.7. Disk elektrot düzeni, yağ yalıtımlı deney kabı ve deney cismi yapımı.....	107
6.2. Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma Ölçüm (FÇKBÖ) Yazılımı.....	110
6.3. Geliştirilen Kısmi Boşalma Ölçme Sistemine İlişkin Karakteristikler.....	119
7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	120
7.1. SYK Elektrot Sistemi ile Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	120
7.2. Rogowski Profili Disk Elektrot Sistemi ile Yapılan Deneysel Çalışmalar.....	129
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	132
KAYNAKLAR.....	135
EKLER.....	144
ÖZGEÇMİŞ.....	147

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Yalıtkan içinde bulunan küresel biçimdeki boşluk. ....	6
Şekil 2.2: Mesnet izolatöründe meydana gelen atlama (KOU Y.G. Lab.).....	7
Şekil 2.3: Boşluk içeren bir yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi.....	12
Şekil 2.4: Elektriksel kısmi boşalmaların oluşumu. ....	12
Şekil 2.5: Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin aynı bara üzerinden beslenmesi	14
Şekil 2.6: 3., 5., 7. ve 11. harmoniklerin gerilim dalga şeklinde neden olduğu bozulmalar.....	16
Şekil 2.7: SYK ile 4200 V etkin gerilimde a) tam sinüsoidal b) bozuk gerilimlerde elde edilen KB darbeleri. ....	17
Şekil 2.8: Harmonik bileşen içeren bozuk gerilimde elektriksel KB'ların oluşumu. .....	18
Şekil 3.1: Bozzo ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı deney hücresi. ....	20
Şekil 3.2: Kurihara'nın çalışmasında kullandığı a) ölçme devresi, b) deney numunesi. ....	22
Şekil 3.3: CIGRE II elektrot sistemleri. ....	23
Şekil 3.4: AA'da a) 3. , b) 5. harmonikler için, farklı açılardaki %THB karşı TF...	25
Şekil 3.5: Guastavino ve arkadaşlarının kullandığı deney düzeneği. ....	27
Şekil 3.6: Florkowska ve arkadaşlarının kullandığı deney düzeneği. ....	28
Şekil 4.1: Ölçü empedansının kuplaj kondansatörü ile seri bağlı olduğu ölçme devresi.....	32
Şekil 4.2: Ölçü empedansının deney cismi ile seri bağlı olduğu ölçme devresi. ....	33
Şekil 4.3: Dengelenmiş ölçme devresi. ....	34
Şekil 4.4: Schering köprüsü.....	35
Şekil 4.5: KB ölçümünde kullanılan devre elemanları (KOU YG Lab.).....	36
Şekil 4.6: RC ve RLC devreleri ve KB akım darbesi yanıtları. ....	38
Şekil 4.7: Boşluğun delinmesi ve KB işaretinin oluşumu.....	42
Şekil 4.8: Ölçülebilir KB boşalma akımı ve görünen yük.....	43
Şekil 4.9: Ölçü dört uçlusunun a) kuplaj kondansatörüne, b) deney cismine seri bağlı olduğu devrelerde ölçekleme. ....	48
Şekil 5.1: Geniş bantlı bir KB ölçme sistemi için genlik ve frekans arasındaki ilişki.....	50
Şekil 5.2: KB örüntüsü örneği. ....	53
Şekil 5.3: 50 Hz sinüsün a) 100 Hz, b) 1 kHz örnekleme frekansı ile örnekleme. .....	53
Şekil 5.4: Ana dalgacık fonksiyonu örnekleri. ....	58
Şekil 5.5: Ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacıklar.....	59
Şekil 5.6: Sürekli Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması. ....	60
Şekil 5.7: Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nde kullanılan örnekleme sayılarının dağılımı. ....	62
Şekil 5.8: Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması.....	63
Şekil 6.1: Düzlemsel elektrot sisteminden oluşan basit bir kondansatör iç yapısı...	68
Şekil 6.2: Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen kondansatörün iç yapısı.....	75
Şekil 6.3: Kuplaj kondansatörünün gerçek boyutları. ....	76

Şekil 6.4: Kuplaj kondansatörü bağlantı başlığı.....	77
Şekil 6.5: Kuplaj kondansatörünün gerilime bağlı kapasite değişimi (havalı).....	79
Şekil 6.6: Kuplaj kondansatörünün gerilime bağlı kapasite değişimi (yağlı). ....	79
Şekil 6.7: Sıvı direnç yapımında kullanılan boru biçimindeki saydam PVC mahfaza. ....	82
Şekil 6.8: Bakır sülfat çözeltisinin 25 <sup>0</sup> C deki molariteye bağlı iletkenlik değişimi. 84	
Şekil 6.9: CuSO <sub>4</sub> 5H <sub>2</sub> O çözeltisinin saydam mahfaza içine yerleştirilmesi.....	86
Şekil 6.10: Ohmik gerilim bölücü eşdeğer devresi. ....	88
Şekil 6.11: Dönüştürme oranını etkileyen kaçak kapasiteler. ....	91
Şekil 6.12: 100 kV ohmik gerilim bölücüyü oluşturan dirençlerin yerleşim şekli... 92	
Şekil 6.13: Yapımı gerçekleştirilen 100 kV ohmik gerilim bölücü.....	93
Şekil 6.14: a) Tek yönlü, b) Çift yönlü basamak gerilimlerine bağlı kalibrasyon darbeleri. ....	94
Şekil 6.15: a) Kalibrasyon darbesinin üretilmesi, b) Akım ve yük değişimleri. ....	95
Şekil 6.16: Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilen KB kalibratörleri. ....	95
Şekil 6.17: Geliştirilen KB kalibratörünün blok şeması.....	96
Şekil 6.18: Kalibratörlerin ürettiği farklı periyotlardaki bazı basamak gerilimleri.. 97	
Şekil 6.19: Kalibratörlere ilişkin 2 V basamak gerilimindeki yükselme süresi. ....	98
Şekil 6.20: Geliştirilen KB kalibratörlerinin iç yapısı.....	98
Şekil 6.21: Deneysel çalışmalar için geliştirilen KB ölçü aleti. ....	100
Şekil 6.22: Deneysel çalışmalar için geliştirilen KB ölçü aletinin blok şeması. ....	101
Şekil 6.23: Yükseltme, filtre ve görünen yük genliği belirleme devreleri. ....	102
Şekil 6.24: Çoklu geri beslemeli a) alçak geçiren, b) yüksek geçiren filtre. ....	103
Şekil 6.25: Çoklu geri beslemeli bant geçiren filtre. ....	103
Şekil 6.26: Örnekleyici ve tutucu eşdeğer devresi. ....	104
Şekil 6.27: Sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot sistemi yerleşim şekli. ....	105
Şekil 6.28: Yapımı gerçekleştirilen sivri uç-yarı küre elektrot sistemi. ....	106
Şekil 6.29: Deneysel çalışmalarda kullanılan sivri ucun metal mikroskobundaki görüntüsü.. 106	
Şekil 6.30: Yapay boşluk içeren deney cismi yapısı. ....	107
Şekil 6.31: Yapay boşluk içeren deney numunelerinin yapımı. ....	107
Şekil 6.32: Sonlu ve sonsuz düzlem arasındaki eşpotansiyel yüzeylerin dağılımı. 108	
Şekil 6.33: Deneysel çalışmalarda kullanılan disk elektrotların önden görünüşü.. 110	
Şekil 6.34: Sızdırmaz yağ kabı içindeki disk elektrotlar ve boşluk içeren deney numunesi. ....	110
Şekil 6.35: NI 5112 sayısallaştırıcı kart. ....	111
Şekil 6.36: FÇKBÖ yazılımının kullanıcı arayüzü.....	112
Şekil 6.37: FÇKBÖ yazılımı için geliştirilen bir blok diyagram örneği. ....	113
Şekil 6.38: FÇKBÖ yazılımı ile elde edilen a) Ham KB grafiği, b) KB örüntüsü. 114	
Şekil 6.39: FÇKBÖ yazılımına ilişkin Dosya menüsü görünümü. ....	115
Şekil 6.40: Dalgacık Dönüşümü tabanlı sayısal filtreden geçirilmiş KB işaretleri örnekleri. ....	117
Şekil 7.1: Ortalama darbe tekrarlama oranının TF'ye bağlı değişimi. ....	122
Şekil 7.2: Ortalama darbe tekrarlama oranının % THB'ye bağlı değişimi. ....	122
Şekil 7.3: Ortalama görünen yük genliğinin TF'ye bağlı değişimi. ....	122
Şekil 7.4: Ortalama görünen yük genliğinin % THB'ye bağlı değişimi. ....	123
Şekil 7.5: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,02 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri. ....	125

Şekil 7.6: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,29 kV sabit genliğe sahip sinüoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri. ....	126
Şekil 7.7: SYK elektrot sistemi kullanılarak sabit genliğe sahip bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri.....	127
Şekil 7.8: Boşalma başlama gerilimlerinin, THB ye bağlı değişim grafiği.....	128
Şekil 7.9: Yapay kusur içeren deney numunesi kullanılarak sabit genliğe sahip sinüoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri. ....	131
Şekil 8.1: Kısmi boşalma darbelerinin yalıtkanda meydana getirdiği yaşlanma....	133



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 6.1: Bazı yalıtkan malzemelere ilişkin bağıl dielektrik katsayıları [93]. .....	69
Tablo 6.2: Kuplaj kondansatörünün farklı gerilimlerdeki kapasite ölçüm sonuçları. .....	78
Tablo 7.1: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,02 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB ölçüm sonuçları. ....	121
Tablo 7.2: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,29 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB ölçüm sonuçları. ....	124
Tablo 7.3: SYK elektrot sistemi ile bozuk gerilimlerde elde edilen KB ölçüm sonuçları.....	127
Tablo 7.4: Boşalma başlama gerilimlerinin THB'ye bağılı değişimi.....	128
Tablo 7.5: Yapay kusurlu deney cismi ile sabit gerilimlerde elde edilen KB ölçüm sonuçları.....	130

## SİMGELER

C	: Kapasite
C <sub>a</sub>	: Yalıtkan malzemenin sağlam kısmının kapasitesi
C <sub>b</sub>	: Yalıtkan malzemenin boşluğa seri olan kısmının kapasitesi
C <sub>c</sub>	: Boşluğun kapasitesi
C <sub>e</sub>	: Eşdeğer kapasite
C <sub>k</sub>	: Kuplaj kapasitesi
C <sub>0</sub>	: Kalibrasyon kondansatörü kapasitesi
C <sub>t</sub>	: Dene cisminin (toplam) kapasitesi
D	: Karesel oran
d	: Elektrotlar arası mesafe
Δf	: Bant genişliği
ΔV	: Boşluk üzerindeki gerilim
ε <sub>r</sub>	: Yalıtkan malzemelere ilişkin bağıl dielektrik katsayısı
ε <sub>g</sub>	: Gazlara ilişkin bağıl dielektrik katsayısı
ε <sub>0</sub>	: Boşluğun dielektrik sabiti
E <sub>x</sub>	: Elektrik alan şiddeti (x için)
f <sub>1</sub>	: KB ölçme sistemine ilişkin alt sınır frekansı
f <sub>2</sub>	: KB ölçme sistemine ilişkin üst sınır frekansı
φ <sub>i</sub>	: KB darbesi faz açısı
I	: Ortalama boşalma akımı
L	: Bobin
m	: Kütle
M <sub>A</sub>	: Molekül kütlesi
M	: Molar derişim (Molarite)
n	: KB darbesi tekrarlama oranı
n <sub>i</sub>	: KB darbe sayısı
N	: KB darbesi tekrarlama frekansı (sıklığı)
P	: Boşalma gücü
q	: Görünen yük
q <sub>0</sub>	: Kalibrasyon yük miktarı
q <sub>1</sub>	: Boşlukta transfer edilen yük miktarı
R	: Ölçü direnci
r, r <sub>1</sub> , r <sub>2</sub>	: Yarıçap
s	: Elektrot kesiti
tanδ	: Kayıp faktörü
t <sub>i</sub>	: Dene geriliminin pozitif sıfır geçişi ile KB darbesi arasındaki süre
t <sub>y</sub>	: Basamak gerilimi yükselme süresi
t <sub>r</sub>	: KB darbe çözünürlük süresi
τ	: Ölçme devresi zaman sabiti
U~	: Yüksek gerilim kaynağı
U <sub>i</sub>	: Boşalma başlama gerilimi
U <sub>e</sub>	: Kısmi boşalma sönme gerilimi

$U_m$	: Kısmi boşalma darbesinin genliği
$U_n$	: n. harmonik bileşenin genliği
$U_0$	: Basamak gerilimi tepe değeri
$U_p$	: Deneş gerilimi tepe değeri
$U_{rms}$	: Deneş gerilimi etkin değeri
$U_s$	: Temel bileşenin genliği
$V_a$	: Yalıtkan üzerine düşen gerilim
$V_c$	: Boşluk üzerine düşen gerilim
$V_m$	: Ölçü empedansı üzerine düşen gerilim
$Z$	: Filtre veya akım sınırlayıcı empedans
$Z_m$	: Ölçü empedansı
$Z_{mi}$	: Ölçme sisteminin giriş empedansı
$\omega$	: Açısal frekans
$\chi$	: Öz iletkenlik
$\rho$	: Öz direnç

### Kısaltmalar

AA	: Alternatif Akım
ASD	: Analog Sayısal Dönüştürücü
DA	: Doğru Akım
FÇKBÖ	: Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma Ölçümü
IEC	: International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Kapıdan yalıtımlı bipolar transistör)
KB	: Kısmi Boşalma
KOU	: Kocaeli Üniversitesi
MOS-FET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal oksit yarıiletkenli alan etkili transistör)
MS/s	: Mega sample per second (saniyedeki milyon adet örnek)
Osc	: Osiloskop
pC	: Piko Coulomb
PE	: Polietilen
PET	: Polietilen Tereftalat
PMMA	: Polimetil Meta Krilat
SYK	: Sivri uç-yarı küre elektrot düzlemi
TF	: Tepe Faktörü
THB	: Toplam Harmonik Bozulma
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XLPE	: Cross-Linked Polyethylene (Çapraz bağı polietilen)
YG	: Yüksek Gerilim

# HARMONİKLERDEN KAYNAKLANAN GERİLİM BOZULMALARININ ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Murat FİDAN**

**Anahtar Kelimeler:** Yüksek Gerilim, Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma Ölçümü, Harmonikler.

**Özet:** Güç sistemlerinde meydana gelen harmonik bileşenler, alternatif gerilim dalga şeklini sinüsoidal biçimden uzaklaştırarak bozmaktadır. Bozuk gerilimler, aynı şebekeye bağlı diğer tüm yükleri etkilemektedir. Diğer taraftan elektriksel kısmi boşalma ölçümleri, yüksek gerilim sistemlerinin yalıtım kalitesini ve performansını değerlendirmek için tercih edilen tahribatsız deney yöntemlerinin başında gelmektedir. Bu nedenle kısmi boşalma ölçümleri yüksek gerilim endüstrisinde önemli bir yere sahiptir. Üretimi tamamlanan yüksek gerilim aygıtlarının kısmi boşalma ölçümleri laboratuvar ortamında sinüsoidal gerilimler ile yapılmaktadır. Fakat yüksek gerilim sistemleri işletme koşullarında harmoniklerden kaynaklanan bozuk gerilimler nedeniyle farklı biçimde zorlanabilmektedir.

Doktora çalışmasında, harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının kısmi boşalmalar üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Doktora çalışması kapsamında geliştirilen faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemi kullanılarak deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar iki ana kısımda yapılmıştır. Birinci kısımda, kararlı boşalma kaynağı olarak tanımlanan sivri uç-yarı küre elektrot sisteminin, harmonikli ve tam sinüsoidal yüksek gerilimler altındaki davranışları incelenmiştir. İkinci kısımda yapay kusur içeren katmanlı numunelerin, Rogowski profiline sahip elektrotlar arasına yerleştirilmesiyle elde edilen deney cisimleri harmonikli ve tam sinüsoidal yüksek gerilimler ile zorlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, farklı toplam harmonik bozulmaya sahip üçüncü veya beşinci harmonikler içeren deney gerilimleri kullanılmıştır.

Harmonik bileşen içeren gerilimler ile elde edilen deney sonuçlarının, saf sinüsoidal gerilimler ile elde edilen deney sonuçlarından farklı olduğu belirlenmiştir. Sivri uç-yarı küre elektrot sistemi ile yapılan deneylerde, kısmi boşalma başlama gerilimi etkin değerinin üçüncü harmonik bileşen genliğinin artışına bağlı olarak yükseldiği ve beşinci harmonik bileşen genliğinin artışına bağlı olarak düştüğü saptanmıştır. Yapay kusur içeren deney cisimleri ile elde edilen kısmi boşalma örüntülerinden, harmonik bileşenin derecesine ve genliğine bağlı olarak kısmi boşalma darbelerinin dağılımının farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir.

# ANALYSIS OF EFFECTS OF THE DISTORTED VOLTAGE DUE TO HARMONICS ON PARTIAL DISCHARGES

Murat FİDAN

**Key Words** : High Voltage, Phase Resolved Partial Discharge Measurement, Harmonics

**Abstract:** Harmonics in power systems may cause distortion on the AC sinusoidal voltage shape. These distorted voltages affect the other loads which are connected into the same network. On the other hand, partial discharge tests are the favor non-destructive experimental method for assessment of the high voltage systems insulation performance and quality. This makes partial discharge tests very important for high voltage industry. Upon completion of the construction stage of high voltage equipments, the partial discharge tests of these equipments are done with pure sinusoidal voltage in high voltage laboratory conditions. However the operating conditions may be differed due to the voltage distortion caused by harmonics. This put electrical stress on the equipments in a different way.

In this study, the effects of the distorted voltages due to harmonics on partial discharges are analyzed through experimental methods. The experimental measurements are carried out via Phase Resolved Partial Discharge Measurement System which is developed within the scope of the study. The experiments are done in two stages. In the first stage, the hemisphere-point electrode system as a referred stable discharge source has been analyzed on the high voltage with and without harmonics. In the second stage, the three layer samples with artificial defect are placed between two disc electrodes similar to Rogowski profile. Then the sample has been tested on high voltage with and without harmonics. The distorted voltages with third and fifth harmonic components and different total harmonic distortion values are used through the all experiments.

The experimental results show that the test voltages with harmonic components may cause different behavior responses. For instance, the tests performed on the stable discharge source show that the effective value of the partial discharge inception voltage depends on the degree of the harmonic. The third harmonic component may cause decrement in the effective value of inception voltage, while the fifth harmonic components may causes increment. The partial discharge patterns of the test samples with artificial defect show that the partial discharges may scattered into wide phase angle, in the case of fifth harmonic. However the partial discharges may heap close to the zero pass of the test voltage in the case of the third harmonic.

## 1. GİRİŞ

Güç sistemlerinin önemli bir parçası olan yüksek gerilim aygıtlarına ilişkin yalıtım kalitesi, işletmeye alınmadan önce bu aygıtlara uygulanan bazı tahribatsız deneyler ile belirlenebilmektedir. Kısmi boşalma (partial discharge) ölçümleri, yalıtım kalitesinin değerlendirilmesinde tercih edilen, en güvenilir deney yöntemlerinin başında gelmektedir. Bu nedenle elektriksel kısmi boşalma ölçümlerinin yüksek gerilim endüstrisindeki önemi büyüktür. Diğer taraftan, yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler, kısmi boşalma ölçüm sistemlerinin daha hızlı, güvenilir ve kullanışlı olmasını sağlamıştır. Ancak 100 kV gerilime kadar ölçüm yapabilen, yüksek hassasiyete sahip yeni bir kısmi boşalma ölçüm sisteminin fiyatı oldukça pahalıdır. Özellikle yerli yüksek gerilim sanayimizin kısmi boşalma ölçüm sistemlerini yurt dışından ithal ettiği düşünüldüğünde, büyük oranda yerli kaynağın yurt dışına aktığı önemli bir gerçektir.

Günümüzdeki endüstriyel gelişimle beraber elektrik enerjisine olan talep ve bağımlılık da hızla artmaktadır. Elektrik enerjisindeki talep artışıyla birlikte, enerji kalitesini bozan bazı etkenler ortaya çıkabilmektedir. Özellikle harmonik bileşenler enerji kalitesini bozan etkenlerin başında gelmektedir. Doğrusal olmayan (non-linear) yüklerin yoğun biçimde kullanılması, şebekedeki harmonik bileşenlerin artmasına neden olabilmektedir. Harmonik bileşenler şebeke gerilimini saf sinüsoidal dalga şeklinden uzaklaştırarak, aynı şebekeden beslenen diğer tüm yükleri etkileyebilmektedirler.

Üretim aşaması tamamlanan yüksek alternatif gerilimde kullanılan aygıtların kısmi boşalma ölçümleri, laboratuvar ortamında tam ya da yaklaşık sinüsoidal gerilimler ile gerçekleştirilmektedir. Fakat yukarıda da açıklandığı gibi işletme koşullarında ortaya çıkan harmonik bileşenler, yalıtım sistemlerinin de bozuk gerilimler ile zorlanmasına neden olabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, harmoniklerden kaynaklanan bozuk gerilimlerin yalıtım sistemleri üzerinde meydana getirdiği etkiler, araştırılması gereken önemli bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu doktora çalışması harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının, elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel kısmi boşalma ölçümleri için yerli kaynaklar kullanılarak faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Doktora çalışması temel olarak sekiz bölümde ele alınmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, elektriksel kısmi boşalmaların çeşitleri ve oluşumları genel hatları ile irdelenmiş, kısmi boşalmalara ilişkin büyüklüklere ve tanımlamalara yer verilmiştir. Harmoniklerden kaynaklanan gerilim dalga şeklindeki bozulmalar ele alınarak, sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan alternatif gerilimlerde kısmi boşalmaların gelişimi açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, bozuk gerilimlerin yalıtkanlar üzerindeki etkilerini konu alan literatürdeki deneysel çalışmalardan bazıları aktarılmıştır. Konu ile ilgili olarak gerçekleştirilen doktora çalışmasının farkını vurgulamak için literatürde yer alan bu çalışmalara ilişkin deneysel yöntemler ve ayrıntılar geniş biçimde ele alınmıştır.

Kısmi boşalma ölçme yöntemleri ve ölçmelerde kullanılan temel devre elemanlarına ilişkin özellikler dördüncü bölümde ele alınmıştır. Bu bölümde kısmi boşalma işaretlerinin görünür yük birimine dönüştürülmesi ve kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesi konularına yer verilmiştir.

Elektriksel kısmi boşalma işaretlerinin sayısallaştırılması konusunun irdelendiği beşinci bölümde, kısmi boşalma ölçme sistemlerine ilişkin devre karakteristikleri ve faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm yöntemi irdelenmiştir. Kısmi boşalma işaretlerinin örneklenmesi ve örnekleme sırasında ortaya çıkan gürültünün Dalgacık Dönüşümü yöntemi ile ayıklanması aynı bölüm içinde konu edilmiştir.

Altıncı bölümde deneysel çalışmalar için geliştirilen faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm sistemi anlatılmıştır. Ölçme sistemi için geliştirilen kısmi boşalmasız 1 nF - 50 kV kuplaj kondansatörü, sıvı ön direnç, 100 kV'luk ohmik gerilim bölücü, kısmi boşalma kalibratörü, sivri uç-yarı küre ve disk elektrot düzenleri, yağ yalıtımlı deney kabı ayrıntılı olarak ele alınmıştır. LabVIEW yazılım ortamında geliştirilen grafiksel

kullanıcı ara yüzüne sahip faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm yazılımına ilişkin ayrıntılar da altıncı bölüm içinde aktarılmıştır.

Çalışmanın yedinci bölümünde harmonik bileşen içeren yüksek gerilimler altında iki farklı elektrot düzeni kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ayrıntıları aktarılmıştır. Deneysel çalışmaların birinci kısmında kararlı bir boşalma kaynağı olarak tanımlanan sivri uç-yarı küre elektrot düzeni ile yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçları irdelenmiştir. İkinci kısımda ise disk elektrot düzeni arasında bulunan yapay boşluk içeren deney numuneleri ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve sonuçları verilmiştir.

Doktora tez çalışmasının son bölümü olan sekizinci bölümde, çalışma sonucunda elde edilen birikimler, çıkarımlar ve bu çıkarımlara bağlı olarak yapılan öneriler paylaşılmıştır.



## 2. ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR

Elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında yüksek gerilim (YG) kullanılması, güç sistemlerinde ortaya çıkan kayıpları azaltmak için başvurulan zorunlu bir yöntemdir. Güç sistemlerinde yüksek gerilim kullanılmasıyla enerji kayıpları azaltılabilmekte fakat beraberinde yalıtım sorunları açığa çıkmaktadır.

Son yıllarda yüksek gerilim aygıtlarına ilişkin üretim ve deney yöntemlerinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Özellikle bu aygıtların yalıtımında kullanılan malzemelerin fonksiyonları ve çeşitliliği önemli oranda artmıştır. Yalıtım tekniğindeki önemli gelişmelere rağmen, yüksek gerilim aygıtlarının üretimi ya da montajı sırasında istenmeyen bazı kusurlar meydana gelebilmektedir. Bu kusurlar işletme sırasında kısmi boşalma (KB) adı verilen sorunu ortaya çıkartabilmektedirler. Elektriksel kısmi boşalmalar yalıtkan içinde, meydana geldiği bölgede, fiziksel ve kimyasal etkiler açığa çıkartarak yalıtım parametrelerinin bozulmasına neden olabilirler. Yalıtındaki bozulmalar, zaman içinde aygıtın tamamen delinerek kısa devre olmasına ve bağlı olduğu güç sisteminin de arızalanmasına yol açabilir. Bu nedenle yüksek gerilim aygıtlarına, üretim aşamasından sonra uygulanan KB deneyleri ile aygıtların yalıtım kalitesinin işletme koşullarına uygunluğu belirlenmektedir.

Elektriksel kısmi boşalma deneylerinin uygulanmasına ilişkin genel sınırlar, [1], [2], [3] vb. standartlar ile belirlenmiştir. Bu standartlarda, KB ölçümünde kullanılan aygıtlar, deney gerilimleri, ölçme devreleri, ölçekleme yöntemleri gibi özellikler belirlenmiştir.

Kısmi boşalmalar, iletkenler arasındaki yalıtkanı kısmen köprüleyen ve bölgesel olan elektriksel boşalmalar şeklinde tanımlanmaktadır. Genel olarak elektriksel KB'lar, yalıtkan malzemenin iç kısmındaki ya da yüzeyindeki elektriksel alan yoğunlaşmasından kaynaklanmaktadır [1,2].

Yalıtkanın içinde bulunan kusurlar, elektriksel alan yoğunlaşmasına ve delinmeye neden olan birincil kaynaklar arasında sayılabilirler. Boşluklar, kanallar, kağıt, elyaf, toz gibi yabancı parçacıklar veya metal yongalar, sivri uçlar vb. yalıtkan içindeki bu kusurlara örnek olarak verilebilir. Bu kusurların neden olduğu elektriksel alan yoğunlaşmalarından kaynaklanan KB'lar, malzeme içinde kaldığından gözle görülmeleri mümkün olmayabilir.

Katı yalıtkan malzemelerin üretimi sırasında, iç kısmında kalan boşluklar, KB'ya neden olan kusurların başında gelmektedir. Boşlukların içinde genel olarak gaz fazında maddeler bulunur ve bağıl dielektrik katsayıları ( $\epsilon_g \cong 1$ ) katı yalıtkanla oranla oldukça küçüktür. Bu nedenle boşluk içinde meydana gelen elektriksel zorlanma, yalıtkanla meydana gelen elektriksel zorlanmadan büyük olabilir. Boşlukta meydana gelen elektriksel zorlanma, boşluğu dolduran gazın delinme dayanımını aştığı anda, boşluğu dolduran gaz delinir. Katı yalıtkan içindeki boşluğun delinme dayanımı, boşluğun geometrisine, içindeki gazın basıncına, cinsine vb. bağlıdır. Boşluğun içindeki gazın delinmesi yani kısa devre olması, boşluk içinde bir yük geçişine neden olabilir. Söz konusu yük geçişleri dış ölçme devresine KB darbeleri şeklinde yansır.

Gaz dolu boşluklar, işletme esnasında da ortaya çıkabilmektedir. Katı yalıtkanın üretimi sırasında içinde kalabilecek kağıt, elyaf, toz gibi düşük delinme dayanımına sahip parçacıklar zamanla delinerek gaz açığa çıkartabilir ve böylece gaz dolu boşluklar meydana gelebilir. Benzer olarak yalıtkan içinde kalan, küçük metal kıymıklarının sivri uçlarında oluşan elektrik alan yoğunluğu, yalıtkanın delinme dayanımını aştığı zaman, yalıtkanın kısmen delinmesine ve gaz dolu boşluk meydana getirmesine neden olabilir. Hatta sivri uçların neden olduğu aşırı alan yoğunlaşması sonucunda, özellikle polimerik türdeki katı yalıtkanlarda, elektriksel ağaçlanma olarak tanımlanan kanallar meydana gelebilir. Kanalların içinde sürekli ve tekrarlı biçimde meydana gelen KB'lar zamanla bu kanalların büyümesine ve yalıtkanın tamamen kısa devre olmasına neden olabilirler.

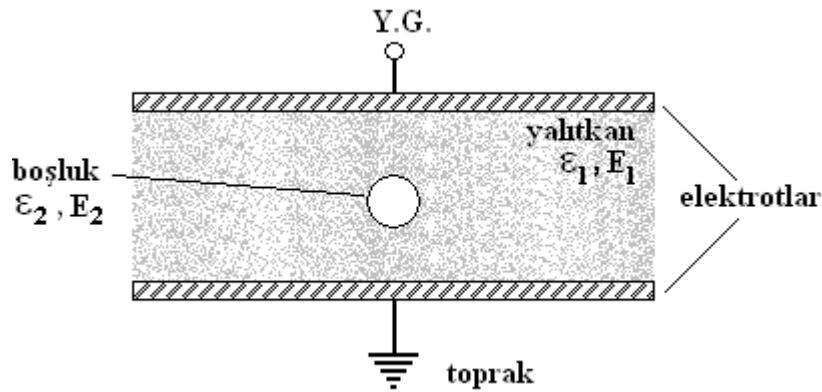
Katı yalıtkanlarda gaz dolu boşlukların gösterdiği etkinin benzerini, sıvı yalıtkanlarda oluşan gaz kabarcıkları da gösterebilir. Yağ yalıtımlı sistemlerde ortaya çıkan gaz kabarcıkları nem ya da elektrokimyasal olaylardan kaynaklanabilir. Zaman

içinde bu kabarcıklarda meydana gelen boşalmalar yağı moleküllerine ayrıştırarak karbonlaştırabilir ve yalıtım performansını düşürebilir. Sıvı yalıtkan içinde bulunan farklı dielektrik katsayısına sahip bir sıvı molekülü için de benzer durumlar söz konusudur. Dielektrik katsayısı farklı olan yabancı sıvı molekülü, sıvı yalıtkanında meydana gelen zorlanmadan daha büyük bir alan dağılımı ile zorlanabilir. Yabancı sıvı molekülü içinde meydana gelen zorlanma, delinme dayanımını aştığı anda sıvı molekülü delinerek KB'ya neden olabilir.

Dielektrik katsayısı  $\epsilon_1$  olan yalıtkanın içinde bulunan ve küresel geometriye sahip olan bir boşluk Şekil 2.1'de görülmektedir. Yalıtkanın katı olması durumunda genel olarak boşluk içindeki madde gaz olabilir. Yalıtkanın sıvı olması durumunda ise boşluğu gaz kabarcığı ya da farklı bir sıvı molekülü meydana getirebilir. KB'ya neden olan bu boşluğu oluşturan maddenin dielektrik katsayısı  $\epsilon_2$  olarak kabul edildiğinde boşluk içindeki elektrik alan şiddeti,

$$E_2 = \frac{3\epsilon_1}{2\epsilon_1 + \epsilon_2} E_1 \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (2.1) eşitliğindeki  $E_1$  yalıtkanında meydana gelen elektrik alan şiddetini ifade etmektedir.



Şekil 2.1: Yalıtkan içinde bulunan küresel biçimdeki boşluk.

Farklı dielektrik katsayısına sahip iki yalıtkan yüzeyin sınır bölgesinde meydana gelen boşalmalar, yüzeysel boşalmalar olarak ifade edilmektedir. Bu boşalmalar gözle görülebilir biçimde oluşabilirler. Ortam koşulları, yalıtkan malzeme yüzeyinde bulunan toz, kir, nem benzeri yabancı maddeler, yüzeye temas eden elektrotların

pürüzlülüğü ve eğrilik yarıçapı, yüzeysel boşalma gerilim seviyesini etkileyen unsurlar arasındadır. Yüzeysel boşalmalara örnek olarak kablo başlıkları ve geçit izolatörlerindeki boşalmalar gösterilebilir. Yüzeysel boşalmaların sıkça meydana geldiği yalıtkan yüzeyler, zamanla karbonlaşarak yalıtkanlık fonksiyonunu yitirebilirler. Şekil 2.2’de mesnet izolatöründe meydana gelen yüzeysel boşalmaların atlama ile sonuçlanması görülmektedir.



Şekil 2.2: Mesnet izolatöründe meydana gelen atlama (KOU Y.G. Lab.).

Korona boşalmaları gaz ile yalıtılmış, eğrilik yarıçapı küçük iletkenlerde görülen, tam olmayan fakat kendi kendini besleyebilen boşalma türlerine verilen isimdir. Korona boşalması sırasında iletkenin yüzeyi gözle görülebilir ışıltılı bir zar ile kaplanır. Boşalmanın kendi kendini beslediği veya iletken yüzeyin ışıltılı bir zar ile kaplandığı andaki gerilime korona gerilimi denir. Korona geriliminin değeri, elektrotlar arası açıklık, eğrilik yarıçapı, sıcaklık basınç nem vb. etkilere göre değişim göstermektedir [4-9].

Elektriksel KB çeşitleri ve sebepleri temel olarak yukarıdaki gibi özetlenebilir. KB’lar yüksek gerilim aygıtlarına başlangıçta önemli bir zarar vermiyor gibi görülsede ilerleyen zamanlarda yalıtkan kalitesini bozarak büyük hasarlara neden olabilirler. Bu nedenle yüksek gerilim aygıtlarının işletmeye alınmadan önce KB seviyelerinin belirlenmesi önemli bir konudur. Hatta generatör, transformatör, kablo gibi güç sistemleri için kritik önem taşıyan yüksek gerilim aygıtlarının işletme altında çevrimiçi (online) olarak KB seviyelerini belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Son yıllarda YG aygıtlarının KB deneyleri, faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm (FÇKBÖ) yöntemi ile yapılmaya başlanmıştır. FÇKBÖ yöntemi ile

elde edilen kısmi boşalma örüntüleri (partial discharge pattern) incelenerek YG aygıtlarının yalıtım kalitesi belirlenebilmekte ve KB'ya neden olan kusurlar hakkında yorumlar yapılabilmektedir. Bu bağlamda elektriksel KB ölçümlerinin, yalıtkanların performanslarının değerlendirilmesinde kullanılan en önemli araçlardan biri olduğu geniş kabul görmektedir [5-69].

Yalıtım kalitesinin değerlendirilebilmesi için, elektriksel KB'ların bazı büyüklükler ve tanımlamalar ile ifade edilmesi gerekmektedir. KB'ları nitelik ve niceliklerini ifade etmekte kullanılan bazı büyüklükler ve tanımlamalar aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır.

## **2.1. Elektriksel Kısmi Boşalmalara İlişkin Büyüklükler ve Tanımlamalar**

- Kısmi boşalma darbesi,

Deney malzemesi içinde meydana gelen, kısmi boşalmadan kaynaklanan akım veya gerilim darbesi, KB darbesi olarak tanımlanmaktadır.

- Görünen yük,

Belirli bir deney devresindeki numunenin elektrotları arasına çok kısa bir süre içinde uygulandığında, ölçü aletinde KB akım darbesine eşit büyüklüğün okunması sağlayan yük miktarı, görünen yük olarak (q) açıklanmaktadır. Görünen yük genellikle pikocoulomb (pC) cinsinden ifade edilmektedir ve boşalma bölgesindeki, ölçülemeyen yük miktarına eşit değildir.

- Darbe tekrarlama oranı,

Belirli bir süre içindeki toplam KB darbesi sayısının bu süreye oranı olarak kabul edilmektedir. Uygulamalarda belirli bir genliğe sahip ya da belirli genlik sınırları içindeki darbeler dikkate alınarak darbe tekrarlama oranı belirlenir. Darbe tekrarlama oranı (n) ile simgelenmektedir.

- Darbe tekrarlama frekansı/sıklığı,

Darbe tekrarlama frekansı (N) ile simgelenmektedir ve bir saniyedeki KB darbesi sayısı olarak tanımlanmaktadır. Darbe tekrarlama frekansı belirlenirken, birbirine eşdeğer darbeler dikkate alınmalıdır.

- KB darbesi faz açısı ve süresi,

Bir kısmi boşalma darbesinin ( $\phi_i$ ) faz açısı ( $^\circ$ ) derece ile ifade edilmektedir ve,

$$\phi_i = 360 \cdot \frac{t_i}{T} \quad (2.2)$$

eşitliği ile belirlenmektedir. (2.2) eşitliğinde  $t_i$  deney geriliminin pozitif yarı dalga başlangıcındaki sıfır geçişi ile KB darbesi arasındaki süredir. T ise deney geriliminin periyodudur.

- Ortalama boşalma akımı,

Ortalama boşalma akımı (I), deney malzemesinde belirli bir  $T_{ref}$  referans zaman aralığında, oluşan ( $q_i$ ) görünen yüklerin mutlak değerleri toplamının,  $T_{ref}$  zaman aralığına bölünmesi ile belirlenir.

$$I = \frac{1}{T_{ref}} (|q_1| + |q_2| + |q_3| + \dots + |q_i|) \quad (2.3)$$

- Karesel oran,

Karesel oran (D), deney malzemesinde, belirli bir  $T_{ref}$  referans zaman aralığında, oluşan ( $q_i$ ) görünen yüklerin kareleri toplamının,  $T_{ref}$  zaman aralığına bölünmesi ile ifade edilmektedir.

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \left[ q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 + \dots + q_i^2 \right] \quad (2.4)$$

➤ Boşalma gücü,

Seçilen bir  $T_{ref}$  zaman aralığı içinde ( $q_i$ ) görünen yük büyüklüklerinden dolayı deney malzemesi uçlarına uygulanan ortalama darbe gücü, boşalma gücü olarak tanımlanmaktadır ve (P) ile simgelenmektedir.

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \left[ q_1 \cdot U_1 + q_2 \cdot U_2 + q_3 \cdot U_3 + \dots + q_i \cdot U_i \right] \quad (2.5)$$

➤ Kısmi boşalma başlama gerilimi,

Deney geriliminin, boşalmaların görülmediği, belirli bir değerden başlayıp yavaşça artırılması sırasında (belirli düşük genliğe sahip) tekrarlı KB'ların ilk olarak görüldüğü andaki gerilim değerine, KB başlama gerilimi ( $U_i$ ) denir.

➤ Kısmi boşalma sönme gerilimi,

Deney malzemesine uygulanan gerilimin, boşalmaların görüldüğü, belirli bir değerden başlayıp yavaşça azaltılması sırasında, (belirli düşük genliğe sahip) tekrarlı KB'ların kesildiği andaki değerine, KB sönme gerilimi ( $U_e$ ) denir.

➤ Kısmi boşalma deney gerilimi,

Deney malzemesine, belirli bir deney yöntemi izlenerek uygulanan gerilimdir. KB deney gerilimi deney malzemesine uygulandığı sırada, KB genliğinin belirli bir değeri aşmaması gerekmektedir [1,2].

Örneğin, alternatif gerilimde kullanılan metal-oksit parafudrlar için şebeke frekansındaki deney gerilimi öncelikle düşük bir değerden başlanıp beyan gerilimine kadar yükseltilir ve bu değerde 2-10 saniye arasında tutulur. Ardından işletme

geriliminin 1,05 katına geri düşürülür. Bu işlemler sırasında parafudrda oluşan KB'ların genliği 10 pC değerini aşmamalıdır [70].

## **2.2. Alternatif Gerilimde Elektriksel Kısmi Boşalmaların Gelişimi**

Alternatif gerilimle yapılan elektriksel KB ölçümlerinde, deney cismine (yüksek gerilim aygıtına) uygulanan gerilim dalga şeklinin tam sinüsoidal biçimde veya tepe değeri ile etkin değeri arasındaki oranın  $\sqrt{2} \pm \% 5$  sınırları içinde olması gerekir [3]. Laboratuvar ortamında yapılan kontrollü deneylerde, gerilim dalga şeklinin standartlarda bildirilen sınırlar içinde kalması sağlanabilir. Fakat yüksek gerilim aygıtlarına işletme koşullarında uygulanan alternatif gerilim dalga şekli için benzer durum söz konusu olmayabilir. Rezonans etkileri, açma-kapama olayları, özellikle de harmonik bileşenler işletme geriliminin dalga şeklini, sinüsoidal biçimden uzaklaştıran ve enerji kalitesini bozan etkiler arasındadır. Güç sistemlerinde harmoniklere neden olan kaynakların başında doğrusal olmayan yükler (AA-DA / DA-AA dönüştürücüler, sürücüler, ark fırınları, elektronik aygıtlar vb.) ve rezonans etkileri gelmektedir. Son yıllarda güç elektroniğinde yaşanan gelişmeler de harmonik kaynaklarının artışı tetiklemektedir. Bu durum, yalıtım sistemlerinin işletme koşullarında bozuk gerilimler ile daha fazla zorlanmasına neden olmaktadır [11-37]. Bu nedenle KB deneyleri yapılırken, tam sinüsoidal olmayan gerilim dalga şekillerinin de dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir.

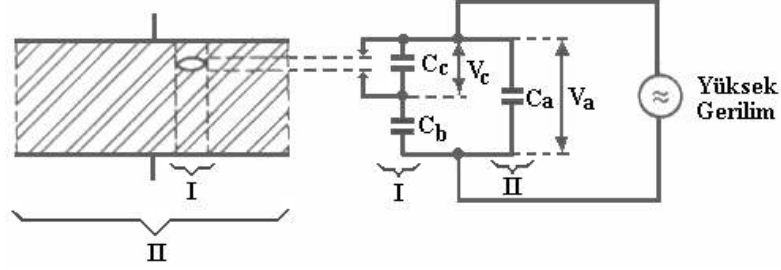
Aşağıdaki bölümlerde tam sinüsoidal ve tam sinüsoidal olmayan alternatif gerilim koşullarında elektriksel KB'ların oluşumu ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

### **2.2.1. Tam sinüsoidal gerilimde kısmi boşalmaların gelişimi**

Elektriksel KB'ların alternatif gerilimdeki davranışları, Şekil 2.3'deki  $C_a$ - $C_b$ - $C_c$  (kapasitif) eşdeğer devre ve Şekil 2.4'de görülen dalga şekli yardımıyla açıklanabilir. Şekil 2.3'deki eşdeğer devre, içinde boşluk (kusur) bulunan bir yalıtkan malzemeyi temsil etmektedir. Eşdeğer devredeki  $C_c$  boşluğun kapasitesini,  $C_b$  boşluğa seri bulunan yalıtkan malzemenin kapasitesini,  $C_a$  yalıtkan malzemenin sağlam olan

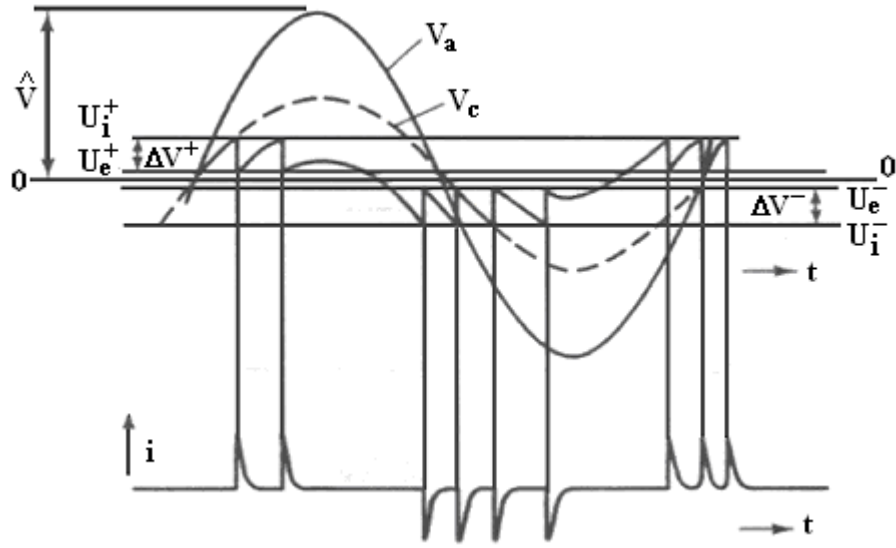


kısmını simgelemektedir. I ile ifade edilen kısım kusurlu bölgeye karşılık olup, II ile ifade edilen kısım yalıtkanın sağlam bölgesine karşılık gelmektedir.



Şekil 2.3: Boşluk içeren bir yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi [5,9].

Şekil 2.4'de  $V_a$  yalıtkanın tamamına uygulanan gerilimi,  $V_c$  boşluk üzerine düşen gerilimi ifade etmektedir. Boşluk üzerine düşen  $V_c$  gerilimi, boşluk içindeki maddenin  $U_i^+$  delinme gerilimine eriştiğinde boşlukta bir boşalma meydana gelir.



Şekil 2.4: Elektriksel kısmi boşalmaların oluşumu [5,9].

Boşalma olayı,  $V_c$  gerilimi  $U_e^+$  seviyesine düşene kadar sürer ve boşalma söner. Gerilimdeki bu düşme mikro-nano saniyeler ile ifade edilebilecek kadar kısa süreli olabilir. 20 milisaniyelik sinüsoidal gerilim periyodu ile karşılaştırıldığında, bu sürelerin çok kısa olduğu açıktır. Buradan yola çıkarak KB işaretlerinin sayısallaştırılabilmesi için oldukça yüksek örnekleme frekanslarına gereksinim olduğu sonucuna varılmaktadır.

Boşalma söner sönmez boşluk üzerindeki  $V_c$  gerilimi,  $V_a$  geriliminden dolayı tekrar artmaya başlar.  $V_c$  gerilimi  $U_i^+$  seviyesine tekrar ulaştığında bir boşalma daha meydana gelir. Bu olayların birbiri ardına sürüp gitmesi ile pozitif yarı dalgada bir KB darbesi grubu oluşur.

Yalıtıkana uygulanan  $V_a$  gerilimi negatif yarı dalgaya geçtiğinde, boşluk üzerindeki  $V_c$  gerilimi de negatif yönde  $U_i^-$  seviyesine doğru artacaktır.  $V_c$  gerilimi  $U_i^-$  seviyesine ulaştığında, önceki boşalma grubuna ters yönde bir başka boşalma meydana gelir. Boşalmadan dolayı  $V_c$  gerilimi,  $U_e^-$  seviyesine düşer ve boşalma söner.  $V_a$  geriliminden dolayı  $V_c$  gerilimi tekrar artmaya başlar ve  $U_e^-$  seviyesine ulaştığında tekrar bir boşalma meydana gelir. Bu sürecin tekrarlanması sonucunda da negatif yarı dalgada bir KB darbesi grubu meydana gelir. Ortam koşulları değişmediği sürece boşalma gruplarının oluşumu sürer ve dış devreye, yüksek frekansa sahip KB darbeleri şeklinde yansır.

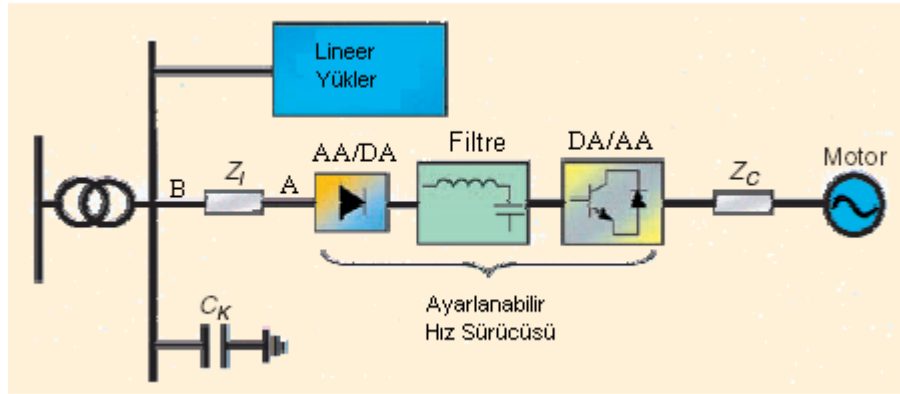
### **2.2.2. Harmoniklerden kaynaklanan gerilim dalga şekli bozulmaları**

Elektrik güç sistemlerinde meydana gelen harmonikler, doğrusal olmayan yüklerin, bağlı oldukları şebekede meydana getirdiği sinüsoidal bileşenlerdir. Bu sinüsoidal bileşenlerin frekansları, temel frekans bileşeninin (50Hz) tam katları (2, 3, 4, ... n) şeklindedir. Harmonik bileşenler güç sistemlerinde,

- Devre elemanlarında aşırı ısınmalar,
- Koruma cihazlarında zamansız ve hatalı açmalar,
- Rezonans etkileri,
- Akım ve gerilimin etkin ve tepe değerinde artma ya da azalmalar,
- Devre elemanlarında yaşlanmalar,
- Yalıtım sorunları,
- Etkin güç faktöründe azalmalar,
- Gürültü ve elektromanyetik kirlilik,

gibi sorunlara neden olabilirler.

Hız sürücülerinin, AA/DA-DA/AA dönüştürücülerin, PWM inverterlerin, MOS-FET ya da IGBT gibi elektronik elemanlardan oluşan sistemlerin kullanımı son yıllarda yoğun olarak artmıştır. Bu artış şebekede aşırı harmonik bileşenler oluşmasına yol açarak, gerilim dalga şeklinde bozulmalara neden olmaktadır. Böylece şebekelerde kirlenme adı verilen ve enerji kalitesini bozan durum ortaya çıkmaktadır. Şebekelerde meydana gelen kirlenmelerin yol açtığı enerji kalitesi bozulmaları aynı şebekeden beslenen diğer yükleri de etkilemektedir.



Şekil 2.5: Doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin aynı bara üzerinden beslenmesi [71].

Şekil 2.5’de doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin aynı bara üzerinden beslendiği durum görülmektedir. Şekil 2.5’deki motorun hız kontrolü için kullanılan sürücünün besleme barası tarafındaki AA/DA dönüştürücüsü, A noktasından şebekeye harmonik akımı enjekte eden bir üreteç gibi davranmaktadır. Dönüştürücüden kaynaklanan harmonik akımları ( $Z_1$ ) hat empedansı boyunca harmonik gerilim düşümlerine neden olur ve böylece B barasına bağlanan diğer yüklerin de besleme gerilimini bozar. Benzer olarak DA/AA dönüştürücünün çıkışındaki gerilimin modülasyonu, yüksek frekanstaki kare dalgalar yardımıyla yapılır. Kare dalgaların üretilmesinde kullanılan MOS-FET, IGBT gibi elemanların yüksek anahtarlama frekanslarına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek dereceli harmonikler şebekede gerilim bozulmalarına neden olabilir. Ortaya çıkan bozulmanın boyutları, bozuk yük gücü ve eşdeğer devrenin (B noktasına göre) kısa devre gücü arasındaki oran ile bağlantılıdır. Kısa devre gücü düşük olan sistemlerde, bozucu etkiye neden olan güç düşük olsa bile sistemde önemli bozulmalara neden olabilir. Gerilimdeki bozulmaların, sisteme güç katsayısını düzeltmek için bağlanan, kapasitelerin neden olduğu paralel rezonanstan dolayı daha da artması mümkündür [11,13,71-73].

Şekil 2.6'da 3., 5., 7. ve 11. harmoniklerin neden olduğu gerilim dalga şeklindeki bozulmalar görülmektedir. Ünlü matematikçi Joseph Fourier'e göre tüm periyodik fonksiyonlar kendi frekansı ve daha yüksek frekanstaki sinüsoidal fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilebilir. Buradan yola çıkılarak bozuk gerilim dalga şekillerinin, (2.6) eşitliğindeki gibi temel ve harmonik bileşenlerin toplamı şeklinde gösterilmesi mümkündür.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n \omega_0 t) + b_n \sin(n \omega_0 t)] \quad (2.6)$$

(2.6) eşitliğinde  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  dır.  $a_0$ ,  $a_n$ ,  $b_n$  katsayıları sırasıyla (2.7), (2.8), (2.9)

eşitlikleri ile ifade edilebilir.

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) dt \quad (2.7)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cdot \cos(n \omega_0 t) dt \quad n = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (2.8)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} f(t) \cdot \sin(n \omega_0 t) dt \quad n = 0, 1, 2, \dots \infty \quad (2.9)$$

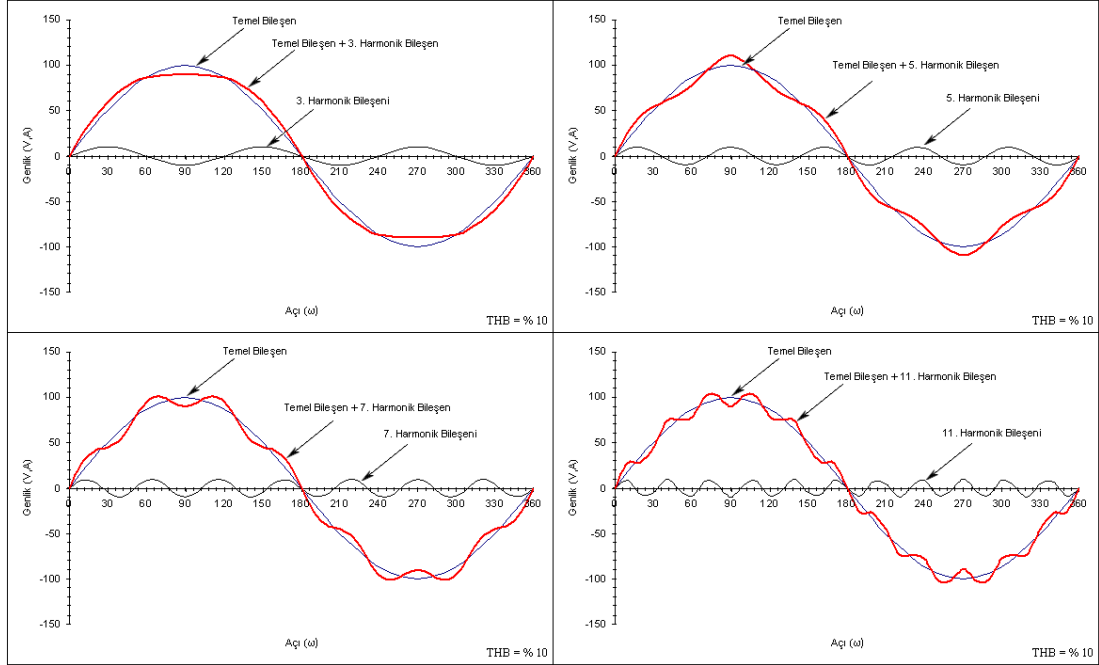
Bir sistemin geriliminde (ya da akımında) harmoniklerin varlığını göstermek için Toplam Harmonik Bozulma (THB) eşitliği kullanılır. Bu eşitlik genel olarak,

$$THB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^a U_n^2}}{U_s} \quad (2.10)$$

biçiminde tanımlanır. (2.10) eşitliğinde,

$U_s$  : temel bileşenin genliği,

$U_n$  : n. harmonik bileşenin genliğidir [74].



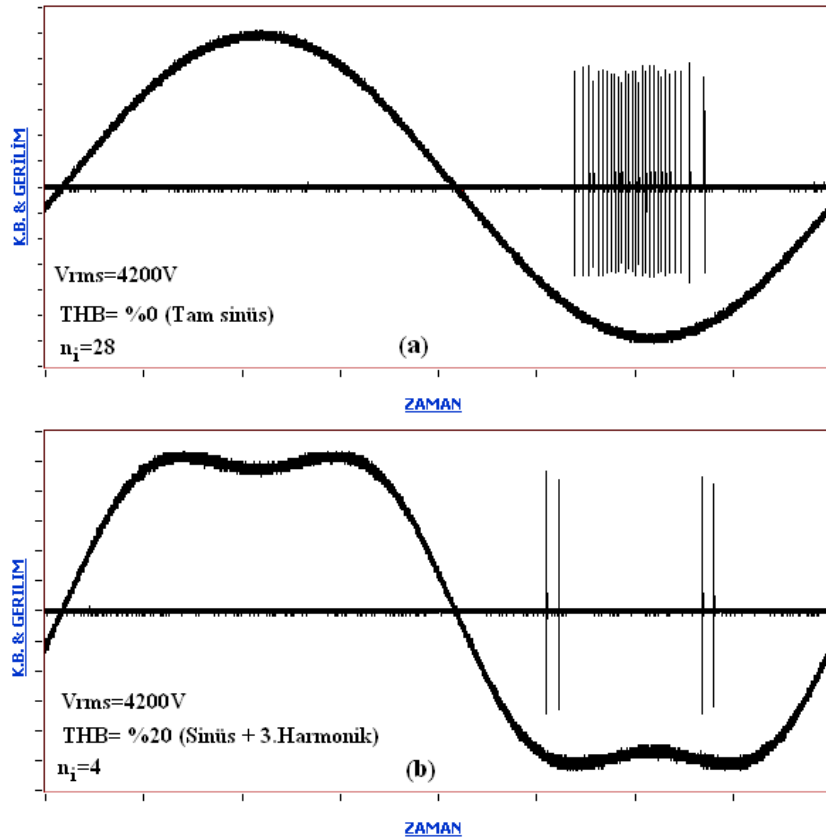
Şekil 2.6: 3., 5., 7. ve 11. harmoniklerin gerilim dalga şeklinde neden olduğu bozulmalar.

### 2.2.3. Tam sinüsoidal olmayan gerilimde kısmi boşalmaların gelişimi

Harmonik bileşenler işletme koşullarında gerilim dalga şeklini sinüsoidal biçimden uzaklaştıran etkenlerin başında gelmektedir. Harmonikli gerilimlerin KB üzerindeki etkilerinin incelenmesine yönelik yapılan çalışmalar, deneysel olarak desteklenmeye ihtiyaç duyulan konulardan birisidir. Tam sinüsoidal gerilimle zorlanan kusurlu bir yalıtıkta meydana gelen KB olayları birçok parametreye bağlıdır. Katı yalıtık içindeki gaz dolu bir boşluk dikkate alındığında, boşluk içindeki gazın cinsi, basıncı, sıcaklığı, boşluğun geometrisi, bulunduğu konum, yalıtık ile boşluk arasındaki yük hareketleri, boşluk duvarında kalan artık yük hareketleri vb. onlarca parametre KB olaylarının gelişimine etkide bulunmaktadır. Parametre sayısının fazlalığı KB gelişiminin besleme gerilimi ile ilişkisini belirlemeyi zorlaştırmaktadır.

Harmoniklerden kaynaklanan bozuk gerilimlerde KB oluşumu Şekil 2.7'deki deney sonuçlarına bağlı olarak açıklanabilir. Şekil 2.7'deki deney sonuçları kararlı bir boşalma kaynağı olarak tanımlanan sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot sistemiyle 4200 V etkin gerilim değerlerinde elde edilmiştir. SYK elektrot sisteminde KB

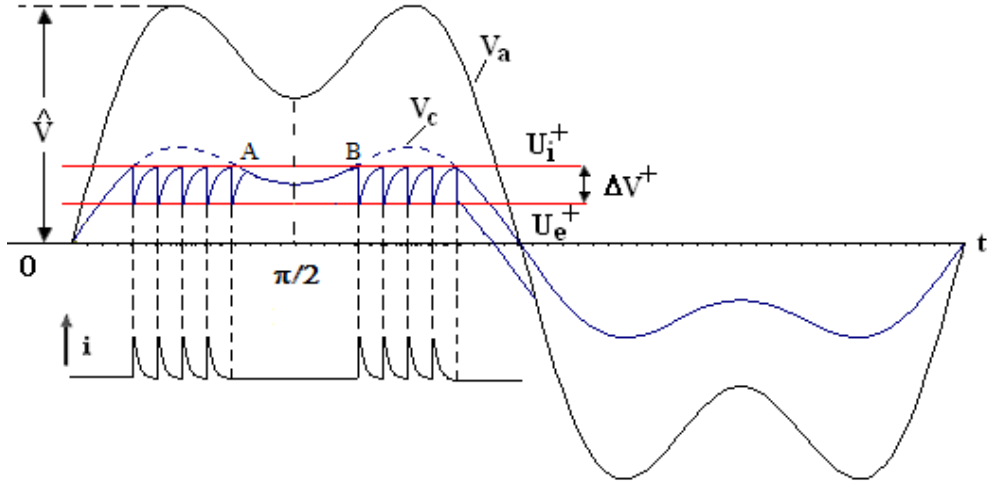
darbeleri öncelikle negatif yarı dalgada meydana gelmektedir. Şekil 2.7.(a)'da tam sinüsoidal gerilim altında meydana gelen KB işaretleri görülmektedir. Şekil 2.7.(b)'de ise 3. harmonik içeren ve THB'si % 20 olan bozuk gerilim ile elde edilen KB işaretleri verilmiştir. Tam sinüsoidal gerilim durumunda meydana gelen ( $n_i$ ), KB darbesi sayısı 28 iken bozuk gerilim dalga şeklinde elde edilen KB darbesi sayısı 4'tür.



Şekil 2.7: SYK ile 4200 V etkin gerilimde a) tam sinüsoidal b) bozuk gerilimlerde elde edilen KB darbeleri.

Şekil 2.7.(b)'de görülen KB darbeleri incelendiğinde, besleme geriliminin şekli ile KB darbelerinin konumları arasında bir ilinti kurmak mümkündür. 3. harmoniğin temel sinüsoidal bileşenin tepe kısmında meydana getirdiği çökme, anlık gerilim değerinin bu kısımda, boşalma başlama gerilim değerinin altında kalmasına neden olmuştur. Bu nedenle tam sinüsoidal gerilimin tepesinde meydana gelen KB darbeleri, bozuk gerilim dalga şeklinde görülmemektedir. Buradan yola çıkarak, Şekil 2.3'deki kusurlu yalıtkan eşdeğer devresine bozuk gerilim uygulandığı düşünülürse, meydana gelebilecek KB'ların oluşumunu Şekil 2.8 yardımıyla açıklanabilir.

Şekil 2.8’da  $V_a$  gerilimine bağlı olarak artan boşluk üzerindeki  $V_c$  gerilimi,  $U_i^+$  delinme gerilimine eriştiğinde bir boşalma meydana getirir. Boşalma,  $V_c$  gerilimi  $U_e^+$  seviyesine inene kadar devam eder. Boşluk üzerindeki  $V_c$  gerilimi  $U_i^+$  seviyesine tekrar ulaştığında bir boşalma daha meydana gelir. Boşalmaların oluşumu bu şekilde A noktasına kadar devam eder. Fakat A noktasında harmonik bileşenden dolayı  $V_c$  gerilimi  $U_i^+$  seviyesine erişemediği için B noktasına kadar KB oluşma şartı sağlanamaz ve KB darbesi oluşamaz. B noktasından sonra boşluk üzerindeki  $V_c$  gerilimi  $U_i^+$  boşalma başlama gerilimine tekrar erişir ve bir öncekine benzer olarak KB darbeleri tekrar görülmeye başlanır. KB’ların gelişimi üzerinde etkisi olan ve yukarıda anılan parametreler dikkate alındığında, bozuk gerilimlerde meydana gelen KB oluşumlarının farklılıklar gösterebileceği unutulmamalıdır.



Şekil 2.8: Harmonik bileşen içeren bozuk gerilimde elektriksel KB’ların oluşumu.

Bilindiği gibi elektriksel kısmi boşalma ölçümlerinin standartlarda yaklaşık sinüsoidal gerilimler altında yapılması önerilmiştir. Fakat işletme koşullarında gerilimlerin her zaman sinüsoidal dalga şekline sahip olmadığı açıktır. Bu nedenle işletme koşullarına daha dayanıklı yalıtkan malzeme üretilebilmesi için kullanımdaki yalıtkanların davranışları bozuk gerilim dalga şekli altında incelenmelidir. Bu sebeple özellikle harmoniklerin neden olduğu gerilim dalga şekli bozulmalarının elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkisi son yıllarda oldukça ilgi çeken konular arasında yer almaktadır. Konu ile ilişkili olarak yapılmış bilimsel çalışmalardan bazıları aşağıda kısaca özetlenmiştir

### 3. KAYNAK TARAMA

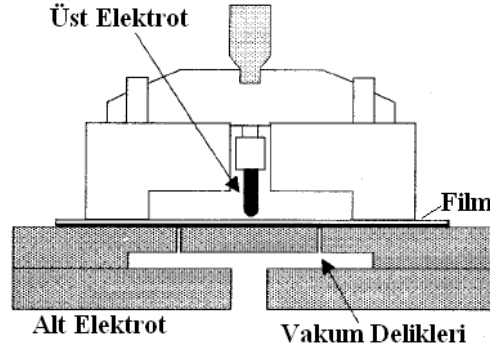
Elektriksel KB ölçümleri, YG sistemlerinin yalıtım kalitesini değerlendirmek için kullanılan en etkili yöntemlerden birisidir. Laboratuvar ortamında KB ölçümleri tam sinüsoidal gerilimler yardımıyla yapılabilmektedir. Fakat işletme gerilimlerinin kalitesini bozan etkenlerin gün geçtikçe artması, YG aygıtlarının bozuk gerilimler ile daha sık zorlanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle bozuk gerilimlerin yalıtkanlarda meydana gelen KB gelişimi üzerindeki etkileri, araştırılması gereken önemli bir konu haline gelmiştir. Literatürde bu konuyla ilgili olarak daha önce gerçekleştirilen çalışmalardan bazıları aşağıda ana hatlarıyla ele alınmıştır.

Chen Wen-tiang ve arkadaşları 1988 yılında, güç sistemlerinde meydana gelen harmoniklerin güç kondansatörlerinde neden oldukları arızaları araştırmak için bir çalışma yapmışlardır. Çalışma da 4 farklı kondansatör yalıtkanını, 3., 5., 7. ve 11. harmonik bileşenlerden oluşan 5 değişik gerilim dalga şekli ile denemişlerdir. Bunun için öncelikle mikroişlemci kontrollü bir işaret üreticiden istenilen gerilim dalga şekline ilişkin sayısal verileri üretmişlerdir. Daha sonra sayısal verileri sayısal/analog dönüştürücü (DAC-Digital Analog Converter) ile analog işaretlere dönüştürerek, 2 kW gücünde ve frekans bandı 5-5000 Hz arası olan bir kuvvetlendirici (amplifikatör) yardımıyla kuvvetlendirmişlerdir. Kuvvetlendirdikleri işaretleri, düşük empedanslı bir transformatör yardımıyla yükselterek deney cisimlerine uygulamışlardır. Çalışma sonucunda, temel ve harmonik bileşenlerin arasındaki açığa bağlı olarak gerilim dalga şeklinin tepe kısmında oluşan keskinliklerin KB başlama gerilimleri üzerinde daha etkili olduğunu ve harmonikli gerilimlerin, kondansatör yalıtkanları üzerinde hasar verici etkisinin bulunduğunu rapor etmişlerdir [11].

R. Bozzo ve arkadaşları 1997 yılında yaptıkları çalışmada, sinüsoidal olmayan gerilim dalga şekillerinin, yalıtkan ömrü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.



Yalıtkanların üzerinde yüzeysel boşalma yapabilmeye uygun bir deney düzeneği yardımıyla, hızlandırılmış ömür deneyleri ve KB boşalma ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını ortalama kalınlığı 23 µm olan PET (polietilen tereftalat) film malzemeler üzerinde ve 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri içeren gerilim dalga şekillerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 3.1: Bozzo ve arkadaşlarının çalışmalarında kullandığı deney hücresi [12].

Bozzo ve arkadaşlarının deneylerde kullandıkları hücre Şekil 3.1'deki gibidir. Yüksek gerilim elektrotu (üst elektrot) paslanmaz çelikten yapılmış ve eğrilik yarıçapı 3 mm'dir. YG elektrotunu, PMMA'dan (polimetil meta akrilat) imal edilmiş bir kaide üzerine monte ederek, film ile arasındaki mesafenin (0,1 mm) hassas biçimde ayarlanmasını sağlamışlardır. Bu sistem sayesinde elektrik alan çizgilerinin, film yüzeyine yaklaşık dik olmasını sağlamışlardır. Alçak gerilim elektrotu (alt elektrot) ile film arasındaki KB'ları engellemek için, bu iki yüzeyin arasını, iletken bir vernikle kaplamışlar ve vakumlamışlardır. Deney düzeneğini, kuru hava akışını (0,5 l/dak) ve bağıl nem oranını (%50 ±1) sabit tutabilmek için PMMA'dan yapılmış bir odacık içine yerleştirmişlerdir. Deneyleri ortalama 20<sup>0</sup>C'de gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kullandıkları sinüsoidal ve harmonikli gerilimleri, 2400 V sabit değerde tutmuşlardır. KB ölçümlerini faz çözünümlü KB ölçüm tekniği ile kaydederek, KB örüntülerini elde etmişlerdir.

Bozzo ve arkadaşlarına göre, yüzeysel boşalmaların neden olduğu yaşlanma süreci ve dolayısıyla malzeme ömrü, uygulanan gerilim dalga şekli ile değişmektedir. Yalıtkanın ömrü KB miktarına bağlı olup, KB miktarı da uygulanan gerilimin tepe değeriyle değişmektedir. Sinüsoidal gerilimle karşılaştırıldığında, harmonik içeren gerilimlerin tepe değeri, harmoniğin derecesine, açısına ve genliğine bağlı olarak

artmakta ya da azalmaktadır. Tepe değerin artması durumunda genel olarak yalıtkan ömrü kısalmakta, tepe değerin düşmesi durumunda ise yalıtkan ömrü genel olarak artmaktadır [12].

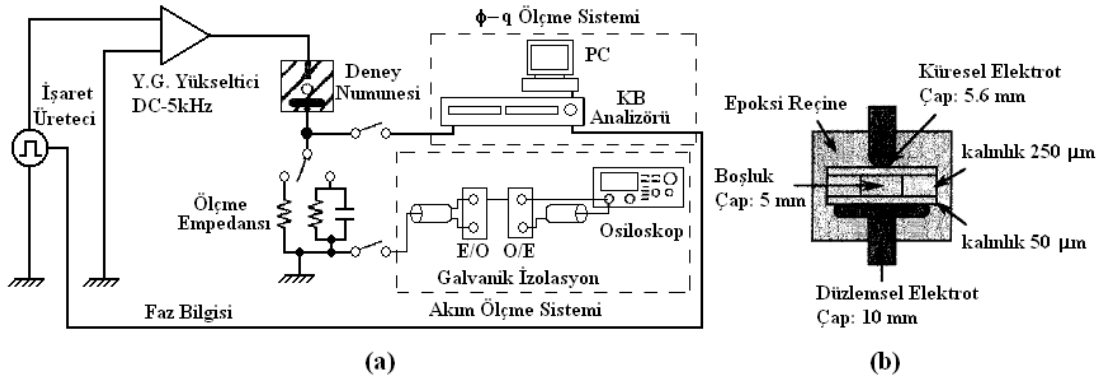
A. J. Hains 1999 yılında yaptığı çalışma sonucunda IGBT kontrollü motor sürücülerinin kullanıcılara sağladığı üstünlüklerin yanı sıra yalıtım sistemlerinin performansını negatif yönde etkilediğini bildirmiştir. Hains'e göre, darbe genliği modülasyonu yönteminde meydana gelen gerilim dalga şeklindeki bozulmalar, KB'lar üzerinde etkili olmaktadır [13].

Gross ve arkadaşları, 1998 yılında gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar sonucunda, harmoniklerin oluşturduğu bozuk gerilim dalga şekillerinin ve transformatörlerin nüvesindeki doymaların, KB örüntüleri üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir [14].

T. Kurihara ve arkadaşları 2001 yılında sinüsoidal olmayan gerilimlerin KB'lar üzerindeki etkisini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında kullandıkları deney numunesi ve ölçme devresi Şekil 3.2'deki gibidir. Deney numunesi olarak 3 katman yapraklı PET malzeme kullanmışlardır. Ortadaki yaprağın kalınlığı 250  $\mu\text{m}$  ve dış yüzeylerdeki kalınlığı 50'şer  $\mu\text{m}$ 'dir. Ortadaki yaprağın merkezine çapı 5 mm olan bir delik açmışlardır. Ayrıca korona boşalmalarını engellemek için deney numunesi epoksi reçine içine almışlardır. Kurihara ve arkadaşları deneylerinde kullandıkları gerilim dalga şekillerini, bir işaret üreticisi yardımıyla, 60 Hz temel sinüsoidal bileşen üzerine 300 Hz - 1,2 kHz frekans aralığındaki sinüsoidal bileşenleri bindirerek elde etmişlerdir. Ürettikleri deney gerilimlerini, bir YG yükselticisi ile yükseltilmişler ve üstteki küresel elektrota aktarmışlardır. Deney numunesinde meydana gelen KB akımlarını  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1000 \text{ pF}$  olan bir ölçme empedansı üzerinden, bant genişliği 10 kHz - 2 MHz ve maksimum örnekleme hızı 0,1 MS/s olan bir KB analizörüne iletmişlerdir.

Kurihara, bozuk gerilim dalga şeklindeki KB başlama gerilimlerinin, 60 Hz sinüsoidal dalga şeklindekine yakın değerde olduğunu, fakat yüksek frekanslı

bileşenin tepe değerinin kritik bir seviyeye ulaştığı anda, KB oluşma frekansında gözle görülür bir artış olduğunu bildirmiştir. Bu şartlar altındaki KB karakteristiklerini, KB olayından önce boşlukta biriken yüklerin neden olduğu artık gerilimlerin bir etkisi olarak ele almıştır. İçinde boşluk bulunan katı yalıtkanlara uygulanan gerilimlerdeki yüksek frekanslı bileşenlerin katı yalıtkanın kötüleşmesini hızlandırdığını bildirmiştir [15].

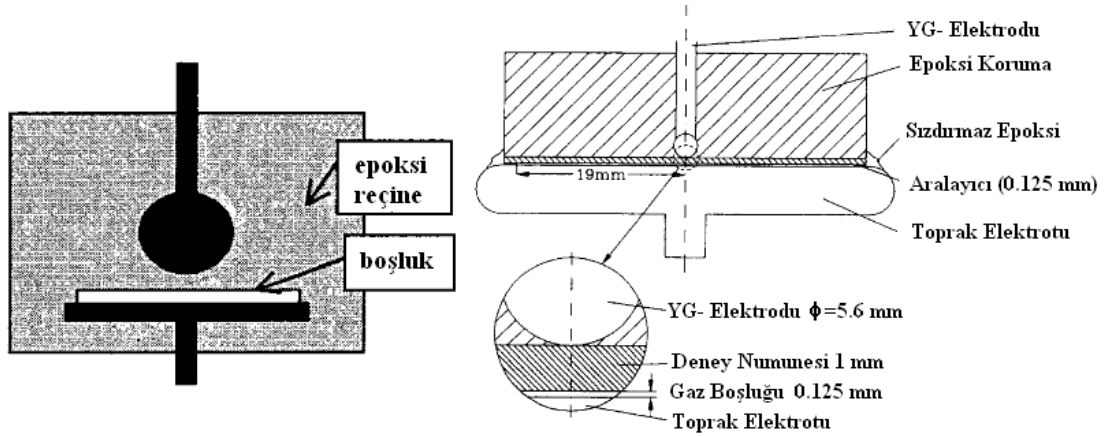


Şekil 3.2: Kurihara'nın çalışmasında kullandığı a) ölçme devresi, b) deney numunesi [15].

C. Boonseng ve arkadaşları, 2001 yılında yaptığı çalışmada, Tayland'daki tekstil endüstrisinde kullanılan alçak gerilim güç kondansatörlerinde meydana gelen arızaları ele almışlardır. Çalışmada toplam 250 adet kondansatör içeren 25 adet kondansatör grubu tekstil sanayisindeki 15 fabrikaya 1998-2000 yılları arasında tesis ederek izlemişlerdir. Boonseng'e göre, özellikle ayarlanabilir hız sürücüleri ile birlikte kullanılan kondansatörler harmonik rezonans etkisini arttırmakta ve buna bağlı olarak da kondansatörlerden geçen akımlar artmaktadır. Artan akımlar, kondansatör yalıtkanında normal işletme koşullarındakinden fazla ısı açığa çıkmasına neden olmaktadır. Isıl etkiler KB başlama gerilimini düşürmekte ve bu nedenle normal işletme koşullarında olmaması gereken KB'lar ortaya çıkmaktadır. KB'larda yalıtkan ömrünü kısaltarak kondansatörlerin arıza yapmasına neden olmaktadır [16].

Duarte ve arkadaşlarının 2002 yılında yaptıkları çalışma sonuçları da, güç sistemlerinde kullanılan kondansatörlerin çalışma gerilimlerinde bulunan, harmoniklerin KB aktivitelerini tetiklediği ve kondansatörlerin yaşlanmalarına katkıda bulunduğu yönündedir [17].

M. Di Lorenzo del Casale ve arkadaşları, 50 Hz sinüsoidal gerilim dalga şeklinde meydana gelen bozulmaların, KB olaylarını ve epoksi reçine ömrünü nasıl etkilediği araştırmak için 2001 yılında bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla farklı genlik ve faz açılarındaki 3. ve 5. harmonik bileşenleri temel frekans üzerine ekleyerek, sinüsoidal biçimden farklı dalga şekilleri elde etmişlerdir. 5 adet birbirinin aynı deney numunesine, etkin değerleri 10, 20, 24 ve 30 kV saf sinüsoidal ve 10 kV sinüsoidal olmayan gerilimler uygulamışlardır. Deney düzeneği olarak Cigré II elektrot sistemini (Şekil 3.3) ve deney numunesi olarak EA 920KA/EA 920KB tipi epoksi reçineyi tercih etmişlerdir. Deney gerilimlerini 5 kHz–2 kVA lık bir güç kaynağından sağlamışlardır. KB işaretlerini 180 kHz rezonans frekansına sahip (RLC) ölçme empedansı üzerinden bir faz çözünümlü KB analizörüne aktarmışlardır. Di Lorenzo del Casale ve arkadaşları çalışmalarının sonucunda, yalıtkan ömrünün uygulanan gerilim dalga şekli ile kuvvetli biçimde ilişkili olduğunu bildirmişler ve uygulanan gerilime bağlı bir ömür modeli rapor etmişlerdir [18,19].



Şekil 3.3: CIGRE II elektrot sistemleri [20,21].

A. E. Emanuel 2002 yılında yapmış olduğu deneysel çalışmada, aynı etkin değere sahip sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan iki gerilim altında meydana gelen KB sayılarını karşılaştırmıştır. Sinüsoidal olmayan gerilimleri elde ederken 3., 5., 7. ve 11. harmonikleri kullanmıştır. THB seviyesini de % 5 - 10 arasında değişen değerlerde tutmuştur. Deneysel çalışma sonuçlarından, harmonikli gerilimde meydana gelen periyot başına kısmi boşalma sayısının, saf sinüsoidal gerilimde meydana gelenden farklı olduğu durumunu çıkarmıştır. Periyot başına KB sayısının, uygulanan gerilimin dalga şekline, tepe değerine, KB başlama gerilimine ve

boşalmadan sonra boşluk çeperinde kalan artık gerilimlere, sıcaklık, gaz basıncı, boşluğun gerçek geometrisi gibi faktörlere, bağlı olduğunu ifade etmiştir [22].

R. Candela ve P. Romano 2003-2004 yılında yaptıkları çalışmalarda, 3. ve 5. harmoniklerden kaynaklanan, gerilim dalga şeklindeki bozulmaların KB ölçümünde neden olduğu hataları incelemişlerdir. Deney düzeneği olarak, Cigré II elektrot sistemi (0,7 mm reçine- 0,25 mm hava boşluğu) ve deney numunesi olarak da EA 920KA/EA 920KB tipi epoksi reçine kullanmışlardır. Deney gerilimlerini, 5 kHz–2 kVA lık bir kuvvetlendiriciden beslenen, 220V/50 kV çevirme oranı olan bir yüksek gerilim transformatörü yardımıyla sağlamışlardır. Deneylelerini 7-10 kV sabit etkin değerlerde gerçekleştirmişlerdir. KB ölçümleri sırasında, deney gerilimini bir gerilim bölücü üzerinden ölçmüşlerdir. KB darbelerini yüksek gerilim sisteminden ayırmak için 1 nF değerinde kuplaj kondansatörü kullanmışlardır. KB işaretlerini 180 kHz rezonans frekansına sahip (RLC) ölçme empedansı üzerinden, faz çözünümlü KB analizörüne aktarmışlardır.

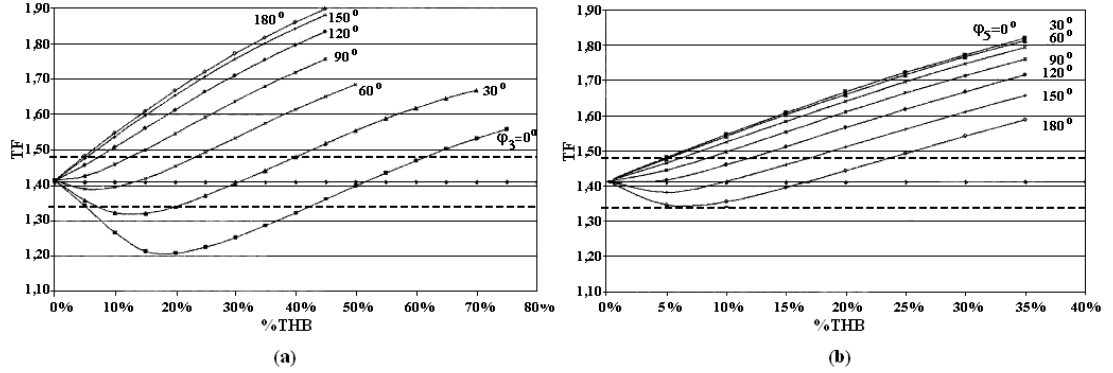
Yüksek gerilim deneylerinde deney geriliminin tam sinüsoidal dalga şeklinden izin verilen sapma miktarı, tepe faktörünün (TF) (CF- Crest Factor)  $\pm$  % 5'i kadardır. Tepe faktörü,

$$TF = \frac{U_p}{U_{rms}} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Eşitlikteki  $U_p$  bileşeni deney geriliminin tepe (maksimum) değerini,  $U_{rms}$  etkin değerini ifade etmektedir [3,23,24].

Romano ve Candela'nın, 3. ve 5. harmonikler için çizdiği, farklı açılardaki % THB'lere karşı TF grafikleri Şekil 3.4'de verilmiştir. Her iki grafikte kesik çizgilerin arasındaki bölge, TF'nin  $\pm$  % 5 sınırını ifade etmektedir. Çalışmada kullandıkları deney gerilimlerinin bir kısmının bu sınırlar arasında kaldığını ifade etmişlerdir. Romano ve Candela çalışmadan elde ettikleri deney sonuçlarına bağlı olarak, yalıtkan sistem davranışı ile harmonikli gerilimlerin arasında güçlü bir ilişki olduğunu bildirmişlerdir. Hatta gerilim dalga şekillerinin standartlarda belirtilen

değerler içinde olduğu durumlarda bile harmoniklerin KB örüntüleri üzerinde etkili olduğunu rapor etmişlerdir [23,24].



Şekil 3.4: AA'da a) 3. , b) 5. harmonikler için, farklı açılardaki %THB karşı TF [23,24].

F. Guastavino ve arkadaşları, 2001 yılında yaptıkları çalışmada, harmonikli gerilimlerin PET film ömrü üzerindeki etkilerini belirlemeye çalışmışlardır. Farklı genlik ve açılardaki 3. ve 5. harmonik bileşenlerden oluşan gerilim dalga şekillerini üretmek için, bir alçak gerilim işaret üretici kullanmışlardır. Ürettikleri gerilimleri bant genişliği 20 Hz - 50 kHz olan bir kuvvetlendirici ile kuvvetlendirerek, yüksek gerilim transformatörü ile yükseltmişlerdir. 2400 V etkin değerinde sabit tutukları deney gerilimlerini 23 µm kalınlığındaki PET filmlere uygulayarak, filmlerin üzerinde yüzeysel boşalmalar oluşturmuşlardır. Deney düzeneği olarak da Şekil 3.1'deki sistemi tercih etmişlerdir. Deneyler sırasında meydana gelen KB işaretlerini 150 kHz rezonans frekansına ve 0,65 zayıflama katsayısına sahip bir RLC ölçme empedansı üzerinden 5 MHz'lik bir bant geçiren filtreye aktarmışlardır. Filtreledikleri işaretleri yükselterek, analog sayısal dönüştürücü (ASD) yardımıyla örneklemişler ve bilgisayar belleğinde depolamışlardır.

Guastavino ve arkadaşları, yüzeysel boşalmaların neden olduğu delinme sürelerini (ömür sürelerini) ölçerek elde ettikleri deneysel sonuçlar yardımıyla iki adet ömür süresi kestirme modeli geliştirmişlerdir. Ömür süresine ilişkin modellerden birincisini, deney geriliminin tepe değerine bağlı olarak geliştirmişler ve aşağıdaki eşitlik ile ifade etmişlerdir.

$$D_{V_{max}} = \frac{1830310}{V_{max}^{1.0735}} \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliğinde  $V_{\max}$  deney geriliminin tepe değerini,  $D_{V_{\max}}$  ise bu değere bağlı olarak hesaplanan ömür süresini ifade etmektedir. Geliştirdikleri ikinci ömür süresi kestirim modelini de,

$$D_{V^*} = \frac{7537}{(V^*)^{0.369}} \quad (3.3)$$

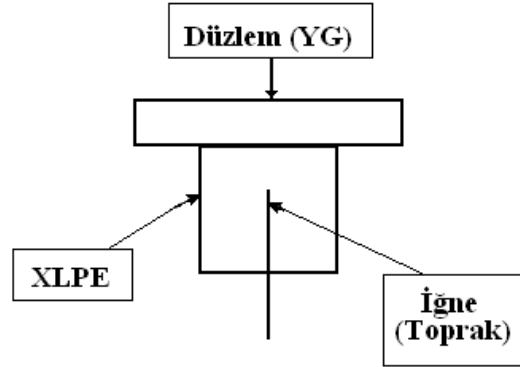
eşitliği ile ifade etmişlerdir. Benzer olarak (3.3) eşitliğinde  $D_{V^*}$  ömür süresini temsil etmektedir. Bu modelin bağlı olduğu  $V^*$  değeri, geriliminin bir yarı dalgasındaki bağlı maksimum ve minimum noktaların sayısına ve KB başlama gerilimine bağlı olarak belirlenmektedir. Bu nedenle tam sinüsoidal ve harmonikli gerilimlerin her ikisinde de bu modelin daha iyi sonuç verdiğini bildirmişlerdir Guastavino ve arkadaşları çalışmalarının sonucunda, gerilim dalga şeklindeki harmoniklerden kaynaklanan bozulmaların PET filmlerin ömür süreleri üzerinde etkili olduğunu da ifade etmişlerdir [25].

F. Guastavino ve arkadaşları 2003 yılında, gerilimdeki harmonik bileşenlerin XLPE (çapraz bağlı polietilen) malzemede oluşan, elektriksel ağaçlanma gelişimine etkisi araştırmışlardır. Deney düzeneği olarak Şekil 3.5'deki sistemi kullanmışlardır. 25x25x6 mm ölçülerindeki XLPE levhalara yerleştirdikleri eğrilik yarıçapları 5  $\mu\text{m}$  ve gövde çapları 1 mm olan Ogura iğnelerini toprak potansiyeline çekmişlerdir. Yüksek gerilim elektrotu olarak da pirinçten yapılmış büyük bir levha kullanmışlardır. Yüksek gerilim elektrotu ile toprak elektrotu (iğne) arasında 3 mm boşluk bırakmışlardır. Gerçekleştirdikleri deney düzeneğine farklı açı ve genlikte 3., 5. ve 7. harmonik bileşenleri içeren bozuk gerilim dalga şekillerini uygulamışlardır. Tüm dalga şekilleri için gerilimin etkin değerini 9000 voltta sabit tutmuşlardır. XLPE malzemede meydana gelen elektriksel ağaçlanmaları bir kamera yardımıyla görüntülemişler ve bu ağaçlanmalarda ortaya çıkan KB'ları da osiloskop ve voltmetre yardımıyla ölçmüşlerdir.

Guastavino ve arkadaşları elde ettikleri deney sonuçlarından, uygulanan gerilimin maksimum değeri ile ömür süresi arasındaki ilişkiyi

$$D_{V_{\max}} = 7,62869 \cdot 10^{31} (V_{\max})^{-6.75197} \quad (3.4)$$

eşitliği ile modellemiştir. Sonuç olarak da, bozuk gerilim dalga şekillerinin, XLPE malzemede meydana gelen elektriksel ağaçlanma biçimlerini ve malzeme ömrünü etkilediğini rapor etmişlerdir [26,27].



Şekil 3.5: Guastavino ve arkadaşlarının kullandığı deney düzeneği [25].

F. Guastavino ve arkadaşları 2006 yılında, önceki çalışmalarında kullandıkları yöntemler yardımıyla yeniden deneyler yapmışlardır. Deneylerinde temel bileşen ile arasında faz farkı olmayan 3., 5., ve 7. harmonikler yardımıyla elde ettikleri 21 kV sabit etkin değere sahip gerilim dalga şekillerini kullanmışlardır. Deneyler sonucunda XLPE malzemeler için yeni bir ömür kestirim modeli geliştirmişlerdir. Söz konusu bu modelde malzeme ömrünü periyot başına ortalama KB akımı  $I_a^*$  ile ilişkilendirmişlerdir. (2.5) eşitliği ile ifade ettikleri modelin bozuk gerilim dalga şekillerinde de daha güvenilir sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir [28].

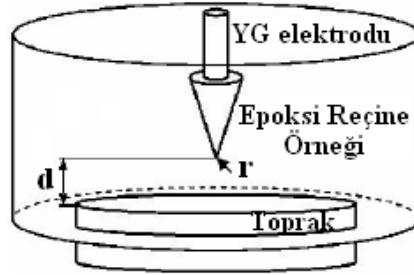
$$D_{I_a^*} = 9212,3 \cdot (I_a^*)^{-0,5042} \quad (3.5)$$

M. Florkowski ve arkadaşları harmonikli gerilimlerin yalıtkan üzerindeki etkilerini incelemek için 2006 yılında bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarını statorlarda kullanılan yalıtkan malzemelere 3., 5. ve 11. harmonik bileşenleri içeren 15 kV değerindeki deney gerilimlerini uygulayarak gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sırasında meydana gelen KB işaretlerini faz çözünümlü KB ölçüm sistemi ile kaydetmişlerdir. M. Florkowski ve arkadaşları deneysel çalışma sonuçlarına bağlı olarak şu yorumları iletmişlerdir. Harmoniklerin deney gerilimine olan etkisi, KB



ölçüm sonuçlarında, bu sonuçların doğru yorumlanması ve değerlendirilmesinde kritik önem taşır. Deney gerilimindeki harmoniklerden kaynaklanan bozulma KB aktivitesini ivmelendirebileceği için, yalıtkanların ömrüne ve dayanımına doğrudan etkide bulunabilir. Bu nedenle deney gerilimi için etkin değer, tepe değer ve frekans ölçümünün yanı sıra harmonik analizi yapan bir harmonik analizörü de ölçüm sistemine yerleştirilmelidir [29,30].

B. Florkowska ve arkadaşları, harmonikli gerilimlerin KB'lar üzerindeki etkilerini araştırmak için 2010 yılında yaptıkları deneylerde epoksi reçine üzerinde çalışmışlardır. Epoksi reçine içine gömdükleri yarıçapı  $r = 100 \mu\text{m}$  olan sivri uçlu elektroda yüksek gerilim uygularken, karşısındaki düzlemsel elektrotu toprak potansiyeline bağlamışlardır. Sivri uç ve düzlem elektrot arasındaki mesafeyi Şekil 3.6'daki gibi  $d = 10 \text{ mm}$  olarak ayarlamışlardır.



Şekil 3.6: Florkowska ve arkadaşlarının kullandığı deney düzeneği [31].

Saf sinüsoidal ve harmonikli gerilimler ile 720 saat (1 ay) süren yaşlanma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. B. Florkowska ve arkadaşları harmonikli gerilimlerin KB boşalma örüntüleri üzerinde etkili olduğunu, özellikle harmonikli gerilimler altında KB'ların genliğinin, açısının ve miktarının değiştiğini ve yalıtkan sistemlerde yaşlanma sürecini hızlandığını rapor etmişlerdir. Ek olarak sahada yapılan KB ölçümleri sırasında, deney gerilimindeki harmonik bileşenlerin varlığından haberdar olunması gerektiğini iletmişlerdir [31].

S. Bahadoorsingh ve arkadaşları 2009-2010 yıllarında yaptıkları dört farklı çalışmada genel olarak harmonikli gerilimlerin yalıtkanlar üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney gerilimlerini elde ederken 3., 5., 7., 11., 13., 23. ve 25. harmonik bileşenleri kullanmışlardır. Deney numunesi olarak da sivri uç-düzlem elektrot düzeni arasında

bulunan epoksi reçineyi tercih etmişlerdir. Elektrot sistemindeki sivri ucun çapı 3 µm olup düzlem ile arasında 2 mm boşluk bırakmışlardır. Epoksi reçinelerde, başlangıç, orta ve son seviye olmak üzere üç farklı aşamada bulunan elektriksel ağaçlanmalar meydana getirerek farklı deney numuneleri oluşturmuşlardır. Deney numunelerindeki ağaçlanmaların neden olduğu KB'ları faz çözünümlü KB ölçüm sistemi yardımıyla incelemişlerdir. Bahadoorsingh ve arkadaşları elde ettikleri sonuçlar yardımıyla, elektriksel ağaçlanmalarda oluşan kısmi boşalmaları  $\cosh\left(V(t) + \frac{dV(t)}{dt}\right)$  fonksiyonu ile modellemişlerdir. Söz konusu modele göre  $V(t)$  deney gerilimi kullanılarak elde edilen kısmi boşalma örüntüsü ile  $\cosh\left(V(t) + \frac{dV(t)}{dt}\right)$  fonksiyonundan elde edilen dalga şeklinin birbirine benzediğini bildirmişlerdir. Ek olarak ölçümlerinde kullanılan deney geriliminin harmonik bileşenler içermesi durumunda, deney sonuçlarının hatalı yorumlanabileceğini, bu nedenle KB ölçümleri sırasında harmoniklerin dikkate alınması gerektiğini rapor etmişlerdir [32-35].

Bozuk gerilimlerin KB'lar üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılan çalışmalardan bazılarına ilişkin genel hatlar yukarıdaki gibidir. Yapılan çalışma sonuçlarından, bozuk gerilimlerin yalıtkanların performansını ve yaşlanma sürecini önemli biçimde etkilediği genel olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat konuyla ilgili yapılan çalışmaların farklı teorik ve deneysel çalışmalar ile zenginleştirilmesi, elde edilen yargı ve sonuçların artırılması gerektiği düşünülmektedir. Özellikle deneysel çalışma sonuçlarının artması KB ölçümünde kullanılan deney gerilimlerine ilişkin sınırların güncellenmesine daha güvenilir biçimde olanak sağlayacaktır.

Yukarıda ele alınan nedenlerden dolayı önem kazanan bu konu, doktora tez konusu olarak seçilmiştir. Tez çalışması ile literatürdeki çalışmalara farklı bir bakış açısı ve yeni bir yaklaşım kazandırılması hedeflenmiştir. Çalışma üç aşama olarak gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada deneylerin gerçekleştirilmesi için faz çözünümlü KB ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bunun için KB ölçüm sistemlerinin temel parçaları olan kuplaj kondansatörü, gerilim bölücü, akım sınırlayıcı direnç, KB ölçüm devresi, bilgisayar yazılımı, KB kalibratörü tasarlanmış ve yapılmıştır.

Tasarımı ve uygulaması tamamen yerli olanaklarla gerçekleştirilen ölçüm sisteminin güvenilir biçimde çalıştığı ispatlandıktan sonra ikinci aşamaya geçilmiştir. İkinci aşamada, deneylerde kullanılan elektrot düzeneklerinin yapımı gerçekleştirilmiştir. Elektrot düzeneği olarak literatürde daha önce karşılaşılmayan sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot düzeneği ve Rogowski profili benzeri disk elektrot düzeneği tercih edilmiştir. Üçüncü aşamada ise geliştirilen ölçme sistemi yardımıyla harmonikli gerilimler altında KB ölçümleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

## **4. KISMİ BOŞALMALARIN ÖLÇÜLMESİ**

### **4.1. Kısmi Boşalma Ölçme Yöntemleri**

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçümünde kullanılan yöntemleri, elektriksel ve elektriksel olmayan yöntemler şeklinde ikiye ayırmak mümkündür. Elektriksel olmayan yöntemler, KB'ların ortaya çıkardığı gaz basıncı, ısı (sıcaklık), ses, ışık gibi fiziksel etkileri inceleme temeline dayanmaktadır. Elektriksel yöntemler ise KB'lardan kaynaklanan yük transferinin neden olduğu akım ve gerilim darbeleri gibi elektriksel büyüklükleri ölçme temeline dayanır. Genel olarak ölçülen büyüklük KB'ların meydana getirdiği görünen yük değeri ile orantılı olarak elde edilir. Görünen yük ile ölçülen büyüklük arasındaki orantı ölçme devresinin ölçeklenmesi ile doğrulanır.

Elektriksel yöntemler yardımıyla KB'ların ölçülmesi işlemi uygulamada daha sık tercih edilmektedir. KB'lara ilişkin büyüklüklerin belirlenmesinde kullanılan elektriksel yöntemleri temel olarak,

- Doğrudan ölçme yöntemi
- Dengelenmiş devre ile ölçme yöntemi
- Kayıp ölçme yöntemi

şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

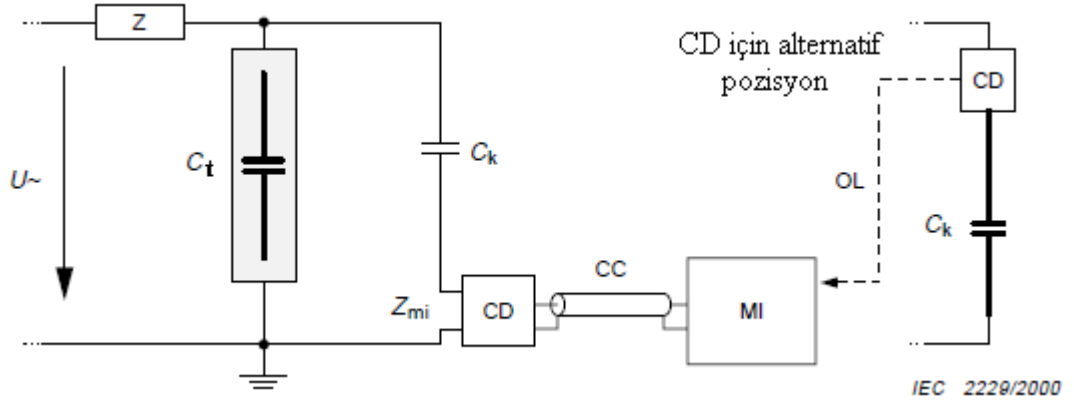
#### **4.1.1. Doğrudan ölçme yöntemi**

Doğrudan ölçme yöntemi, KB'lardan kaynaklanan yük hareketlerinin meydana getirdiği akım darbelerini bir ölçü dört uçlusunu (ölçme empedansı) yardımıyla gerilim darbelerine dönüştürerek ölçme temeline dayanmaktadır.

Doğrudan ölçme yöntemini ölçü dört uçlusunun,

- Kuplaj kapasitesi ile seri bağlı olduğu devre,
- Deney cismi ile seri bağlı olduğu devre,

şeklinde ikiye ayırmak mümkündür.



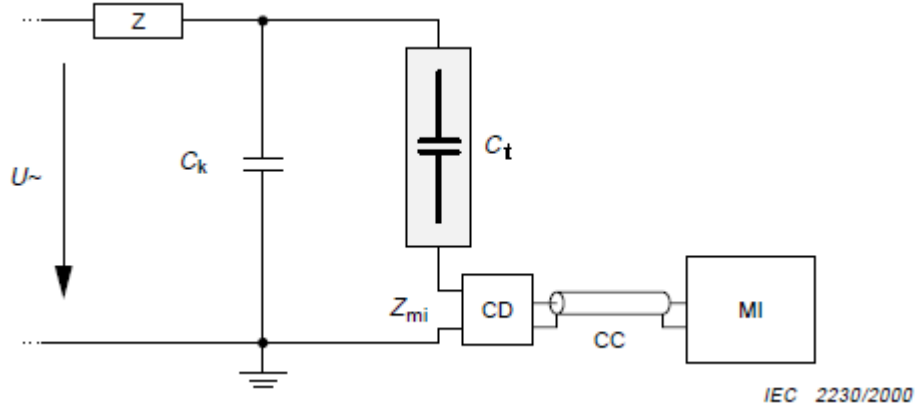
Şekil 4.1: Ölçü empedansının kuplaj kondansatörü ile seri bağlı olduğu ölçme devresi [1].

Ölçü dört uçlusunun kuplaj kondansatörü ile seri bağlı olduğu ölçme devresi Şekil 4.1'de görülmektedir. Devrede,

- $U_{\sim}$  : yüksek gerilim kaynağı,
- $Z$  : filtre veya akım sınırlayıcı empedans,
- $C_t$  : deney cismi,
- $Z_{mi}$  : ölçme sisteminin giriş empedansı,
- $CC$  : bağlantı kablosu,
- $C_k$  : kuplaj kondansatörü,
- $OL$  : optik bağlantı,
- $CD$  : ölçü dört uçlusunu,
- $MI$  : ölçü aleti,

olarak simgelenmiştir. Bu devrenin en önemli üstünlüğü, bir ucu toprağa ve diğer ucu yüksek gerilime bağlı olan ve topraktan yalıtılmayan deney cisimleri için bağlantı kolaylığı sağlamasıdır. Ölçü dört uçlusunu bu devrede kuplaj kondansatörünün alçak gerilim (toprak) tarafına yerleştirildiği için, deney sırasında  $C_t$  deney cisminde

meydana gelebilecek atlama, delinme gibi durumlarda ölçme sisteminin hasar görme riski azaltılmış olur. Ölçü dört uçlusunun, Şekil 4.1'in sağ kısmında da görüldüğü gibi, yüksek gerilim tarafına bağlanabilmesi mümkündür. Bu durumda doğrudan yüksek gerilime maruz kalan ölçü dört uçlusunun, ölçme sistemine optik bağlantı yardımıyla bağlanması daha güvenli olacaktır.



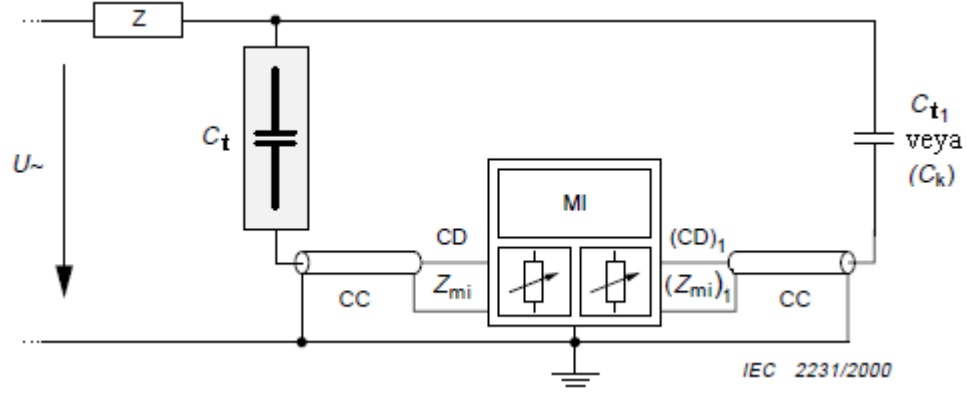
Şekil 4.2: Ölçü empedansının deney cismi ile seri bağlı olduğu ölçme devresi [1].

Deney cisminin topraktan yalıtılabilir olması durumunda Şekil 4.2'deki, ölçü dört uçlusunun deney cismine seri bağlı olduğu devre kullanılabilir. Şekil 4.2'deki deney devresinin düşük kapasiteye sahip olması durumunda, Şekil 4.1'deki devreye kıyasla daha duyarlı KB ölçümleri yapmak mümkündür. Ek olarak bu ölçme devresinin, kaynaktan gelen bozucu etkileri daha iyi zayıflatabilme özelliği vardır.  $C_k$  kuplaj kondansatörünün kapasitesi  $C_t$  deney cismine kapasitesinden büyük seçilerek, bozucu etkiler  $\frac{C_t}{C_k}$  oranında zayıflatılabilir [8]. Deney sırasında deney cisminde oluşabilecek herhangi bir atlama ya da kısa devre durumuna karşı ölçü dört uçlusunun ve ölçme devresinin korunması gerekmektedir. Bu durumun, ölçme devresinin güvenliğinin sağlanabilmesi açısından göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

#### 4.1.2. Dengelenmiş devre ile ölçme yöntemi

Doğrudan ölçme devreleri pratik, kolay ve fazla karışık olmadığından dolayı uygulamalarda daha sık tercih edilmektedir. Fakat ortam ve ölçme devresinden

kaynaklanan gürültünün fazla olduğu durumlarda Şekil 4.3'deki dengelenmiş ölçme devresi kullanılabilir.



Şekil 4.3: Dengelenmiş ölçme devresi [1].

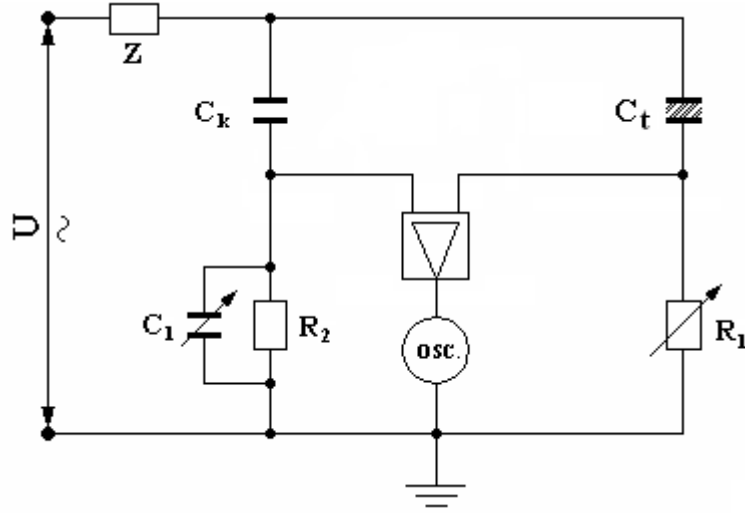
Şekil 4.3'deki devrede iki adet ölçü dört uçlusu kullanılmıştır. Ölçü dört uçluları deney cismi ve kuplaj kondansatörünün alçak gerilim taraflarına yerleştirilmiştir. Bu devrede kuplaj kondansatörünün ve deney cisminin, kapasitelerinin birbirine eşit olması gerekmez. Fakat daha doğru bir ölçüm sonucu için kapasitelerinin birbirine yakın dielektrik kayıp faktörlerinin ve frekansa bağımlılıklarının da benzer olması gerekmektedir. Bu bağlamda kuplaj kondansatörünün yerine KB'sız ikinci bir deney cismi kullanılabilir.  $C_t$  ve  $C_{t1}$  den geçen akımlar birbirini sönmürler fakat deney cisminde kaynaklanan kısmi boşalma akımlarını kuvvetlendirir. Dengelenmiş devrelerde ölçü empedanslarının ayarı değiştirilerek ortamdaki diğer boşalmaların veya gürültülerin etkileri, boşalma darbelerinden kolayca ayırt edilebilmektedir.

#### 4.1.3. Kayıp ölçme yöntemi

Elektriksel KB'ların ölçülmesinde kullanılan yöntemlerden bir diğeri kayıp ölçme yöntemidir. Kayıp ölçme yöntemi, deney cisminde meydana gelen kısmi boşalmaların oluşturduğu güç kaybını ölçme temeline dayanmaktadır. Yalıtıkanda meydana gelen kayıp güç, dielektrik kaybı ve  $(\tan\delta)$  kayıp faktörü ile ilişkilidir. Yalıtık malzemedeki dielektrik kayıplarının ölçülmesi ile KB'lar hakkında fikir sahibi olunabilir.

Dielektrik kayıplarını ve kayıp faktörünü belirlemek için kullanılan Schering köprüsü Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Dört koldan oluşan köprünün bir koluna deney cismi

diğer koluna kayıpsız kuplaj kondansatörü bağlanır. Diğer iki koldan birisine değişken standart küçük değerli bir direnç değerine de birbirine paralel bağlı düşük değerli bir direnç ile değişken bir kapasite bağlanır. Ayar yapmak için kullanılan kollar toprak potansiyeline yakın olduğundan güvenli biçimde ayarlama yapılması mümkündür.



Şekil 4.4: Schering köprüsü.

Şekil 4.4'deki devre dengeye getirildiğinde

$$C_t = C_k \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (4.1)$$

$$\tan\delta = \omega \cdot R_2 \cdot C_1 \quad (4.2)$$

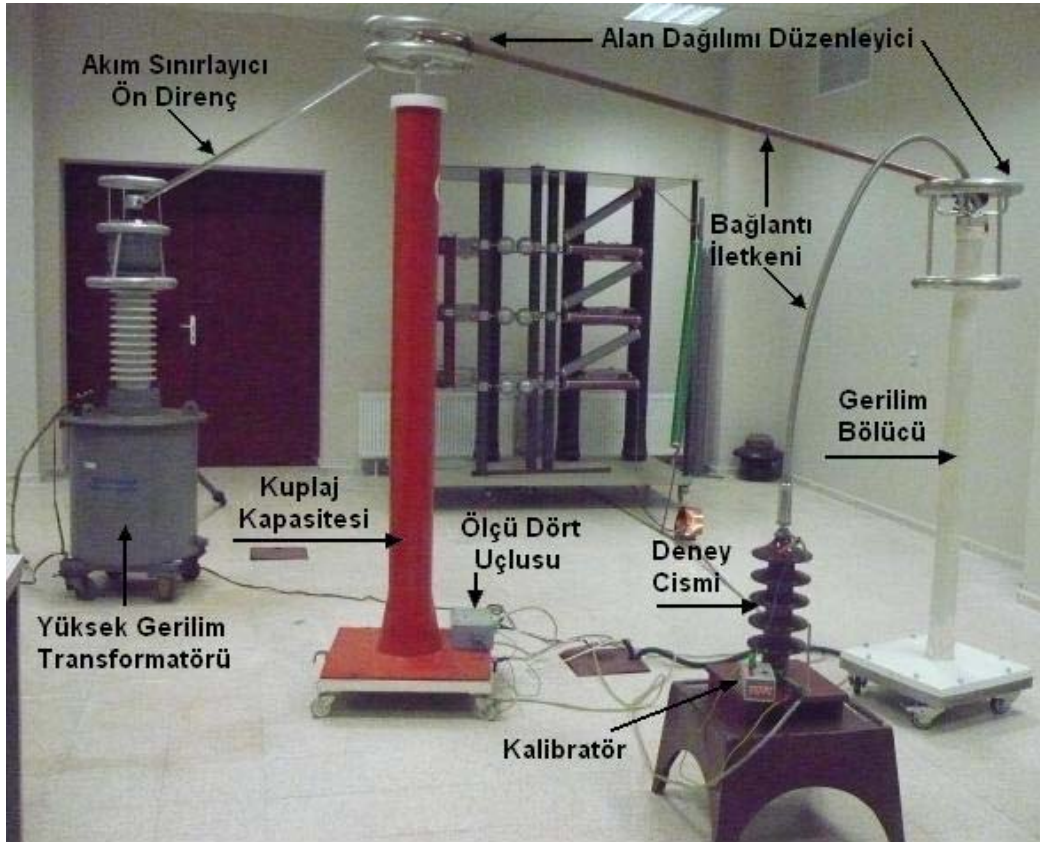
eşitlikleri ile  $\tan\delta$  değeri belirlenebilir. (4.1) ve (4.2) eşitliklerindeki  $C_k$ ,  $R_2$ ,  $C_1$ 'in değerleri bilinmektedir.

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçümünde kullanılan ölçme yöntemleri ve devreleri temel olarak yukarıda anlatıldığı gibidir. Bu devrelere yapılacak eklentiler yardımıyla hassas KB ölçme sistemleri geliştirmek mümkündür. Son yıllarda elektronik ve yazılım alanındaki gelişmeler KB işaretlerinin sayısallaştırılarak ölçülmesine yönelik çalışmalarını arttırmıştır.



## 4.2. Kısmi Boşalma Ölçümünde Kullanılan Temel Devre Elemanları

Elektriksel kısmi boşalma işaretlerinin doğru olarak ölçülmesi yüksek hassasiyet ve dikkat gerektiren bir işlemdir. Bu nedenle KB ölçümünde kullanılan devre elemanlarının da hassas ve belirli özelliklere sahip olması gerekmektedir. KB ölçümünde kullanılan temel devre elemanlarında aranan belirli özellikler aşağıdaki bölümlerde ele alınmıştır. KB ölçüm devresinde kullanılan temel devre elemanları Şekil 4.5'deki ölçü dört uçlusunun kuplaj kondansatörüne seri bağlandığı doğrudan ölçme devresi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5: KB ölçümünde kullanılan devre elemanları (KOU YG Lab.).

### 4.2.1. Yüksek gerilim kaynağı

KB ölçümünde dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi de deney gerilimidir. Deney gerilimleri genel olarak uygulamada bir yükseltici transformatör yardımıyla sağlanmaktadır. Yüksek gerilim transformatörünün alçak gerilim sargısı, motor-generatör grubu ile ya da filtre edilmiş şebeke gerilimi ile beslendiğinde, deney geriliminde oluşabilecek bozucu etkiler engellenebilir. Deney

transformatörünün yüksek gerilim çıkışı standartlarda belirtildiği gibi sinüsoidal biçimde olmalıdır. Ayrıca istenilen deney gerilimi seviyesinde kısmi boşalmaz ve çok düşük gürültü seviyesine sahip olmalıdır.

#### **4.2.2. Filtreler ve akım sınırlayıcı dirençler**

Yüksek gerilim kaynağından gelen bozucu etkilerin önlenememesi durumunda deney gerilimi yüksek gerilim filtreleri veya empedansları yardımıyla filtrelenebilir. Ayrıca yüksek gerilim deneyleri sırasında, deney malzemesinde meydana gelebilecek herhangi bir atlama veya delinme durumunda, aşırı akımın oluşturacağı zararı engelleyebilmek için, yüksek gerilim kaynağı ile ölçme devresi arasına akım sınırlayıcı bir ön direnç yerleştirilmelidir. Yüksek gerilim kaynağına seri olarak bağlanan filtre veya akım sınırlayıcı ön dirençlerin KB'sız ve deney geriliminin temel frekanstaki bileşenlerine etki etmeyecek biçimde seçilmesi gerekmektedir.

#### **4.2.3. Ölçü dört uçlusu (Coupling device-Coupling quadrapole)**

Ölçü dört uçlusu bir kısmi boşalma ölçüm devresinde en uygun hassasiyeti elde etmek için kullanılan elemanlardan birisi olup girişindeki KB akım işaretlerini, çıkışında gerilim işaretlerine dönüştüren devrelerdir. Bu devreler aktif ya da pasif tipte olabilir. Pasif dört uçlular genelde R-L-C gibi pasif devre elemanlarından oluşurlar ve dışarıdan bir besleme kaynağına ihtiyaç duymazlar. Aktif ölçü dört uçlularında KB işaretleri, dış besleme kaynağına gereksinim duyan elektronik devrelerle işlenmektedir. Ölçü dört uçlularının, giriş akımına verdiği çıkış gerilimi tepkisiyle frekans yanıtları belirlenir. Ölçü dört uçluları KB işaretlerini deney gerilimi ve harmonik bileşenlerinden etkin biçimde ayırt edebilmelidir. Ayrıca deney gerilimi ve harmonik bileşenlerinin ölçü aletine ulaşmasını engellemelidir. Ölçü dört uçlusunun çıkışındaki KB işaretleri iletim sistemi yardımıyla ölçü aletine iletilir.

Ölçü dört uçlularının giriş empedansları, kuplaj kondansatörü ve deney cisminin kapasiteleriyle etkileşimde bulunduğundan deney devrelerinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Deney cismi ve dört uçlu arasındaki bağlantı iletkenlerinin, ölçme bandı üzerindeki etkilerini sınırlandırmak için, olabildiğince kısa tutulmalarında fayda vardır. Ayrıca bir kısa devre durumunda ölçü dört uçlusuna bağlı ölçüm

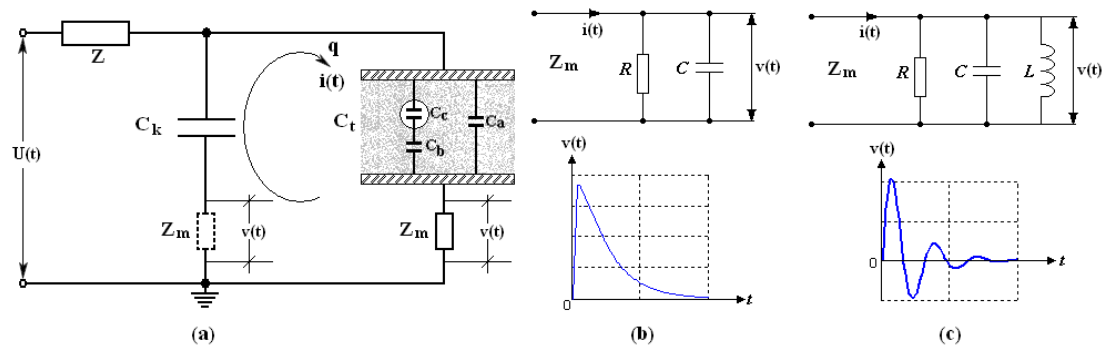
sisteminin zarar görmemesi için, dört uçlunun giriş uçları aşırı gerilime karşı korunmalıdır.

KB ölçümlerinde kullanılan pasif ölçü dört uçluları RC ve RLC devresi şeklinde ikiye ayrılabilir. Her iki devreye ilişkin ayrıntılar aşağıda ele alınmıştır.

#### 4.2.3.1. RC ve RLC devreleri

KB darbelerinden kaynaklanan  $i(t)$  boşalma akımı, ölçü dört uçlusunuyla  $v(t)$  gerilimine dönüştürülerek ölçü aletine iletilir. Şekil 4.6.(a)'da ölçü dört uçlusunun deney cismine veya kuplaj kapasitesine seri bağlı olduğu devre görülmektedir. Devrede ölçü dört uçlusuna ilişkin empedans  $Z_m$  ile ifade edilmiştir.  $Z_m$  empedansını oluşturan devreleri RC veya RLC devresi şeklinde iki sınıfta incelemek mümkündür.

RC ve RLC devrelerinin her ikisi içinde en önemli elemanlardan birisi ohmik R direncidir.  $i(t)$  KB darbe akımları, R direnci içinden geçirilerek direnç üzerinde bir gerilim düşümü elde edilir. Şekil 4.6.(b)'de RC devresi ve KB akımına verdiği yanıt görülmektedir. RC devresindeki C kapasitesi, değeri 5-20 pF arasında kabul edilebilen kaçak kapasitelerden meydana gelmektedir. Ek olarak,  $v(t)$  KB gerilim darbesini ölçü aletine iletmek için dorudan R direnci uçlarına bağlanan kablonun kapasitesi de C kapasitesini etkiler.



Şekil 4.6: RC ve RLC devreleri ve KB akım darbesi yanıtları.

KB akım darbesi  $i(t)$ , yükselme süresi yaklaşık sıfır olan Dirac darbesi şeklinde ele alınırsa, RC devresinin bu darbeye yanıtı Şekil 4.6.(b)'deki gibi, üstel olarak yükselen ve düşen bir  $v(t)$  gerilim darbesi şeklinde olur. Bu durumda  $v(t)$  darbesi,

$$V = \frac{q}{C_t + C \cdot \left(1 + \frac{C_t}{C_k}\right)} \cdot e^{(-t/\tau)} \quad (4.3)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (4.3) eşitliğinde  $\tau$  devrenin zaman sabitidir ve,

$$\tau = R \cdot C_e = R \cdot \left(C + \frac{C_t \cdot C_k}{C_t + C_k}\right) \quad (4.4)$$

şeklinde belirlenebilir. (4.4) eşitliğindeki  $C_e$  eşdeğer kapasiteyi simgelemektedir. RC devrelerinin, hızlı değişime sahip KB işaretlerinin yüksek frekans bileşenlerini geciktirerek, darbe şeklini bozabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Ölçü dört uçlusunu meydana getiren RC devresi, küçük kapasiteli deney cismine seri bağlandığında, deney cisminin çektiği kapasitif akımı, KB darbesi akımından ayırt etmek mümkündür.

Şekil 4.6.(c)'de RLC devresi ve Dirac darbesi olarak ele alınan  $i(t)$  KB akım darbesine verdiği yanıt görülmektedir. RLC devresindeki L endüktansı, genelde KB darbelerinin yükseltilmesi için kullanılan yükseltici transformatorün primer sargısının endüktansından kaynaklanmaktadır. KB işaretlerini yükseltmek için kullanılan transformatorün yüksek frekanslara uygun ve KB işaretlerinin karakteristiklerini bozmayacak biçimde tasarlanmış olması gereklidir. Aynı zamanda KB darbelerinin büyük kapasitif yer değiştirme akımlarından (sinüsoidal bileşenlerden) süzülmesi işlemi de yükseltici transformator ile sağlanabilir. Yani transformator sargısı sinüsoidal bileşenleri filtre etmekte kullanılan, bant geçiren filtre devresinin bir elemanı gibi davranır. RLC devrelerinin KB darbelerine verdiği yanıt sönümlü ve üstel karakterli bir darbe şeklindedir ve,

$$V = \frac{q}{C_t + C \cdot \left(1 + \frac{C_t}{C_k}\right)} \cdot e^{(-t/2\tau)} \times \cos(\omega t) \quad (4.5)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (4.5) eşitliğindeki  $\omega$  açısal frekansı temsil etmektedir ve,

$$\omega = \sqrt{\left( \frac{1}{L \cdot C_e} - \frac{1}{4 \cdot R^2 \cdot C_e^2} \right)} \quad (4.6)$$

eşitliği ile bulunabilir. Devrenin  $\tau$  zaman sabitini RC devresinde olduğu gibi (4.4) eşitliği ile belirlemek mümkündür.

KB işaretlerini kuvvetlendirmek için RC ve RLC devrelerinin çıkışına kuvvetlendirici devreler (amplifikatör) bağlamak mümkündür. Kuvvetlendirme işlemi için kullanılan amplifikatör devrelerinin tasarımında, KB işaretlerinin yüksek frekanslı bileşenleri göz önüne alınmalıdır.

#### 4.2.4. Kuplaj kondansatörü

Elektriksel kısmi boşalma ölçümlerinde kullanılan önemli devre elemanlarından birisidir. KB deneyleri sırasında, deney cisminde ortaya çıkan KB darbelerinin meydana getirdiği gerilim düşümleri (yük hareketleri) kuplaj kondansatöründen karşılanmaktadır. Bu nedenle kuplaj kondansatörünün kapasitesi, KB ölçümlerinde duyarlılığa etkide bulunan önemli parametrelerden birisidir. Büyük kapasiteli kuplaj kondansatörleri kullanılarak ölçme duyarlılığını arttırmak mümkündür. Uygulamalarda kullanılabilen kuplaj kondansatörünün kapasitesini deney geriliminin elde edildiği kaynağın gücü sınırlandırmaktadır. Genel olarak 1 nF veya daha büyük değerdeki kuplaj kondansatörleri ile yeterli ölçüm duyarlılığı elde edilebilmektedir.

Kuplaj kondansatörü seçilirken kondansatörün gürültüsüz, KB'sız ve düşük endüktans özelliğine sahip olmasına özen gösterilmelidir [1,2].

#### 4.2.5. Bağlantı iletkenleri ve alan dağılımı düzenleyicileri

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesinde dikkat edilmesi ve önlem alınması gereken en önemli noktalardan biriside harici boşalma kaynaklarıdır. KB ölçüm devresindeki yüksek gerilim aygıtlarının bağlantısında kullanılan iletkenlerin eğrilik yarıçapı, korona boşalmasına neden olmayacak şekilde seçilmelidir. İletkenlerin birbirine ve aygıtlara bağlantısının, elektrik alan dağılımını düzenleyen elektrotlar

üzerinden yapılmasında fayda vardır. Ek olarak KB devresinin ölçekleme işleminin, kalibratör ile yapılması durumunda yüksek ve alçak gerilim bağlantılarının, büyük geçiş dirençleri oluşturacak kadar gevşek olmamasına ve uygun uzunlukta olmasına dikkat edilmelidir. Deneysel çalışmalar sırasında ölçme devresindeki bağlantıların gevşek olması durumunda, ölçüm sonuçlarının kararsız ve hatalı olarak elde edildiği belirlenmiştir.

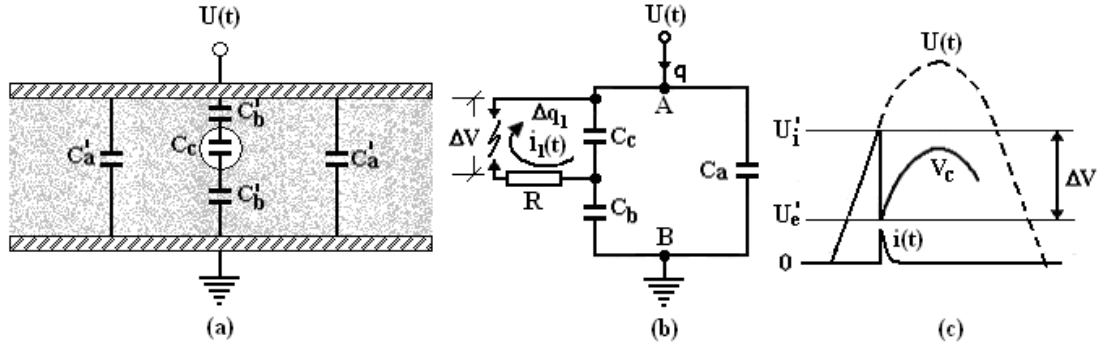
### 4.3. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Görünen Yük Değerine Dönüştürülmesi

Elektriksel KB işaretlerinin değerlendirilebilmesi için öncelikle ölçülebilir bir büyüklük olarak ifade edilebilmesi gerekmektedir. Genel olarak KB ölçümlerini düzenleyen kaynaklarda, KB'lar görünen yük cinsinden ifade edilmektedir. Görünen yükü, KB'lardan kaynaklanan yük hareketlerinden dolayı, deney malzemesinin elektrotları arasındaki yük geçişi olarak ifade etmek mümkündür. Uygulamalarda görünen yükün neden olduğu, ölçme devresine yansıyan işaretler ölçülür ve bu işaretler ile görünen yük arasında genlik ilişkisi kurulur. Söz konusu bu genlik ilişkisi, KB deneylerinden önce tüm ölçme devresine uygulanan ölçekleme işlemi ile tesis edilir.

Ölçme devresine yansıyan (görünen yükün belirlenmesinde kullanılan) işaretlerin, KB'ların oluşturduğu boşalma akımı ve boşlukta transfer edilen yük ile ilişkisi, Şekil 4.7 yardımıyla açıklanabilir. Şekil 4.7 (a) içinde boşluk bulunan bir yalıtkanı, (b) bu yalıtkanın eşdeğer devresini, (c) yalıtkan üzerindeki gerilimi, KB akımını ve boşluk üzerindeki gerilim değişimini temsil etmektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi Şekil 4.7'de  $C'_a$  yalıtkanın sağlam kısımlarının,  $C'_b$  yalıtkanın boşluğa (kusurlu bölgeye) seri kısımlarının,  $C_c$  boşluğun kapasitelerini temsil etmektedir. Küçük boşluklar için bu kapasiteler,

$$C_t \approx C_a \gg C_c \gg C_b \quad (4.7)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.



Şekil 4.7: Boşluğun delinmesi ve KB işaretinin oluşumu.

Boşluğun  $U'_i$  delinme gerilimi aşırsa, boşluk kısa devre olur ve  $C_c$  kapasitesi R direnci üzerinden boşalır. Bu süreç küçük boşluklarda nanosaniyeler içinde gerçekleşebilmektedir. Boşluk üzerindeki  $\Delta V$  gerilim düşümü  $i_1(t)$  boşalma akımına ve  $\Delta q_1$  yükünün açığa çıkmasına neden olur. Boşlukta transfer edilen  $\Delta q_1$  yükü ile  $\Delta V$  gerilim düşümü arasında,

$$\Delta q_1 = \Delta V \cdot C_c \quad (4.8)$$

ilişkisi kurulabilir.  $i_1(t)$  boşalma akımı bölgesel olduğu için ölçülmesi mümkün değildir.  $C_c$  kapasitesinde meydana gelen boşalma,  $C_a$  ve  $C_b$  kapasitelerinde hızlı bir yük transferine neden olur. Bu yük transferine bağlı olarak, yalıtkanın A-B uçları arasında meydana gelen  $\Delta U(t)$  gerilim düşümü, Şekil 4.7 (b)'deki eşdeğer devreden de anlaşıldığı gibi,

$$\Delta U(t) = \frac{C_b}{C_b + C_a} \cdot \Delta V \quad (4.9)$$

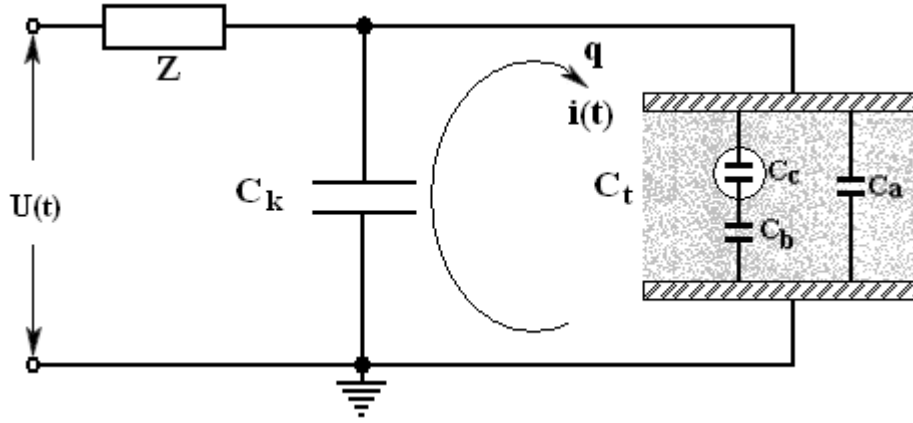
eşitliği ile hesaplanabilir. (4.8) eşitliği (4.9) eşitliğinde dikkate alındığında,  $\Delta U(t)$  gerilim düşümü,

$$\Delta U(t) = \frac{C_b}{C_b + C_a} \cdot \Delta V = \frac{C_b}{(C_b + C_a) \cdot C_c} \cdot \Delta q_1 \quad (4.10)$$

eşitliği ile  $\Delta q_1$  yüküne bağlı olarak ifade edilebilir.  $C_a$  ve  $C_b$  nin değerleri ampirik kestirime bağlı olarak dikkate alındığında,  $\Delta V$  gerilim düşümü milivoltlar

seviyesinde iken  $\Delta U(t)$  gerilim düşümü kilovoltlar seviyesinde olabileceği söylenebilir. Gerçekte  $C_b$  ve  $C_c$  kapasitelerinin değeri tam olarak bilinemediğinden,  $\Delta U(t)$  gerilim düşümünü boşalma bölgesindeki  $\Delta V$  ve  $\Delta q_1$  büyüklükleri ile ilişkilendirebilmek zordur.

Şekil 4.8’de verilen KB eşdeğer devresinde, kuplaj kondansatörü ile yalıtkan arasında dolaşan ölçülebilir  $i(t)$  çevresel akımı ve  $q$  (görünen) yükü görülmektedir.  $\Delta U(t)$  gerilim düşümünün dengelenmesi için gerekli yük miktarı,  $C_k$  kuplaj kondansatöründen sağlandığından dolayı, ölçülebilir  $i(t)$  akımının genliği  $C_k/C_t$  oranına bağlıdır.



Şekil 4.8: Ölçülebilir KB boşalma akımı ve görünen yük.

Şekil 4.8’deki devrede KB darbelerinin dengelenmesi için kuplaj kondansatöründen sağlanan yük miktarı,

$$q = \int i(t) \cdot dt = C_t \cdot \Delta U(t) \quad (4.11)$$

denklemleri ile bulunabilir. (4.11) eşitliğindeki KB’ya neden olan deney cisminin toplam kapasitesi,

$$C_t = \left( C_a + \frac{C_b \cdot C_c}{C_b + C_c} \right) \quad (4.12)$$



eşitliği ile ifade edilebilir. (4.7) eşitliğine göre  $C_c \gg C_b$  olduğundan (4.12) eşitliğindeki yalıtkanın  $C_t$  kapasitesini,

$$C_t \cong (C_a + C_b) \quad (4.13)$$

şeklinde ifade etmek mümkündür. Buradan (4.11) eşitliğini,

$$q = C_t \cdot \Delta U(t) \cong (C_a + C_b) \cdot \Delta U(t) \quad (4.14)$$

biçiminde düzenlemek mümkündür. (4.10) ve (4.8) eşitlikleri, (4.14) eşitliğinde dikkate alındığında, (4.14) eşitliğini,

$$q = C_t \cdot \Delta U(t) \cong (C_a + C_b) \cdot \Delta U(t) = C_b \cdot \Delta V = \frac{C_b}{C_c} \cdot \Delta q_1 \quad (4.15)$$

şeklinde yeniden düzenlemek mümkündür. (4.15) eşitliğine göre görünen  $q$  yükünün, boşlukta transfer edilen  $\Delta q_1$  yükü ile orantılı olduğu söylenebilir. KB'dan dolayı  $C_k$  kuplaj kondansatörü ve  $C_t$  deney cismi arasında meydana gelen yük transferi,

$$q = C_t \cdot \Delta U(t) = (C_t + C_k) \cdot \Delta U(t)' \quad (4.16)$$

eşitliği ile gösterilebilir. (4.16) eşitliğindeki  $\Delta U(t)'$  gerilimi, yük transferinden sonraki artık gerilim düşümünü simgelemektedir.  $C_k$  kuplaj kondansatöründen yayılan yük,

$$q_m = C_k \cdot \Delta U(t)' \quad (4.17)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.  $q_m$  yükünü ölçülebilir yük olarak nitelendirmek mümkündür. Ölçülebilir  $q_m$  yükü ile görünen  $q$  yükü arasındaki ilişkiyi, deney cisminin ve kuplaj kondansatörünün kapasiteleri cinsinden, belirlemek için (4.17) ve (4.16) eşitlikleri birbirine oranlandığında,

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (4.18)$$

eşitliği elde edilir. (4.18) eşitliği incelendiğinde,  $C_k$  kuplaj kondansatörünün büyük değerlikte seçilmesi,  $q_m$  ölçülen yükünün,  $q$  görünen yüküne yakın olmasını sağlar. Buradan yola çıkılarak, deney cisminin kapasitesine göre büyük kapasiteye sahip kuplaj kondansatörünün tercih edilmesi durumunda, KB ölçüm duyarlılığının arttırılabileceği söylenebilir.

KB'lardan kaynaklanan ölçülebilir  $i(t)$  akımı ile görünen  $q$  yükü arasındaki ilişki (4.11) eşitliği ile verilmiştir. (4.11) eşitliğine göre ölçülebilir  $i(t)$  akımının zamana bağlı integralinin alınmasıyla görünen  $q$  yükünü belirlemek mümkün olabilir. Kısa süreli KB akım darbelerinin integrali genelde geniş ya da dar bantlı ölçme sistemleri ile alınır. Bu sistemler basit olarak bant geçiren filtre sistemleridir.

Kısmi boşalma akım darbelerinin frekans spektrumu incelendiğinde, bant geçiren filtrelerin KB darbelerinin integrasyonu için uygun olduğunu ispatlamak mümkündür. Bunun için periyodik olmayan  $i(t)$  akım darbesinin karmaşık frekans spektrumu,

$$I(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} i(t) \cdot e^{-j\omega t} \cdot dt \quad (4.19)$$

Fourier integrali yardımıyla belirlenebilir. (4.19) eşitliğinde  $i(t)$  akım darbesinin karmaşık spektrumu  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  açısal frekansına bağlıdır ve genlik spektrumu,

$$I(\omega) = |I(j\omega)| \quad (4.20)$$

eşitliği ile elde edilebilir. KB akım darbeleri tepe değerden sıfıra üstel olarak azalan bir karakter gösterirler. Buradan yola çıkarak  $i(t)$  akımını,

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (4.21)$$

eşitliği ile ifade etmek mümkündür. (4.21) eşitliğinde,  $I_0$ , KB akımı darbesinin tepe değerini ve  $\tau$ , ölçme devresine bağlı olan zaman sabitini ifade etmektedir. (4.21) eşitliğinde verilen akımın neden olduğu görünen  $q$  yükü,

$$q = \int_0^{\infty} i(t) \cdot dt = I_0 \cdot \tau \quad (4.22)$$

eşitliği yardımıyla belirlenebilir. (4.21) ve (4.22) eşitliği (4.19) eşitliğinde dikkate alındığında,

$$I(\omega) = \frac{I_0 \cdot \tau}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2}} = \frac{q}{\sqrt{1 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau)^2}} \quad (4.23)$$

eşitliği elde edilir. (4.23) eşitliğinde frekansın (0) sıfır bileşeni için, görünen  $q$  yükünün değeri ( $q = I_0 \cdot \tau$ ) belirlenebilir. Buradan frekansın sıfır bileşenine yani DA bileşene yanıt verebilen bir sistem yardımıyla KB akım darbelerinin yaklaşık integrasyonunun (quasi-integration) yapılabileceği sonucu çıkartılabilir [5,8-10].

Ölçü dört uçluları KB akım darbelerini sinüsoidal bileşenlerden ayırmak için bant geçiren filtreler şeklinde tasarlanmaktadır. Bu bağlamda geniş bantlı ölçme sistemleri için filtre şeklinde tasarlanan ölçü dört uçlularına giren KB akım darbelerinin, integrali alınmış olarak çıkışa yansıdığını söylemek mümkündür. Çıkışa yansıyan işaretin tepe değeri görünen  $q$  yükü ile orantılıdır. Bu işaretlerin tekrar kuvvetlendirme devreleri ile kuvvetlendirilmeleri veya elektronik filtrelerle işlenmeleri durumunda, integrasyon etkisinin yani görünen  $q$  yükü ile orantısının bozulmadığını söylemek mümkündür.

KB ölçüm sistemlerinde görünen  $q$  yükünün doğru olarak ölçülebilmesi için öncelikle ölçme sistemi ölçeklenmelidir. Ölçme sisteminin ölçeklenmesi işlemi bilinen bir yük değerinin ölçme sistemine uygulanmasıyla yapılır. KB ölçme sistemlerinin ölçeklenmesi aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

#### 4.4. Kısmi Boşalma Ölçme Sistemlerinin Ölçeklenmesi

Kısmi boşalma ölçüm işlemlerinde, ölçme devresinin ölçeklenmesi en önemli konulardan birisidir. Hatalı ölçeklenmiş bir ölçme devresinden elde edilen sonuç da hatalı olacağı için ölçekleme işlemine gerekli duyarlılığın gösterilmesi gerekir. KB ölçüm sistemlerinde ölçeklemenin amacı, ölçme sisteminin bilinen bir yük büyüklüğünü doğru olarak ölçebildiğini doğrulamaktır.

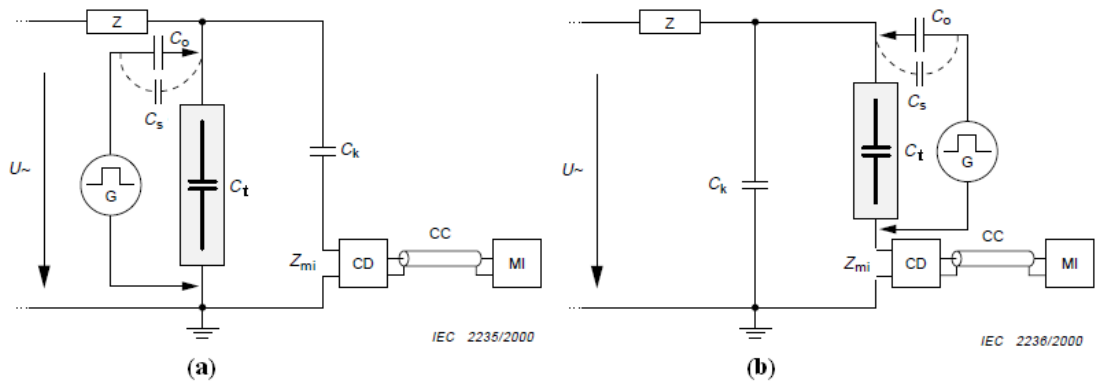
KB ölçüm sistemleri ölçeklenirken, bilinen bir görünen yük büyüklüğü deney cisminin uçlarına uygulanır. Ölçme sistemi bilinen yük büyüklüğünü işaret edebilecek biçimde ayarlanır. Ölçme sistemi ayarlanmaya uygun tasarlanmamış ise ölçme sisteminin gösterdiği değer ile bilinen yük büyüklüğü arasındaki oran düzeltme katsayısı ya da ölçekleme faktörü (k) olarak belirlenir. Elde edilen ölçüm sonuçları düzeltme katsayısı ile çarpılarak gerçek değerine ötelenir. Ölçekleme işlemi sırasında bilinen yük büyüklüğü elde edilirken,

$$q_0 = C_0 \cdot U_0 \quad (4.24)$$

eşitliğinden faydalanılır. (4.24) eşitliğine göre  $U_0$  gerilimi ile doldurulan  $C_0$  kondansatöründe depolanan yük, bilinen  $q_0$  yük miktarıdır. Ede edilen  $q_0$  yükü deney cisminin elektrotları arasına sistem enerjisiz durumda iken ya bir kalibratör yardımıyla ya da dışarıdan basamak gerilim kaynağı ve  $C_0$  kondansatörü yardımıyla uygulanabilir. Kalibratörlerde basamak gerilim kaynağı ve  $C_0$  kondansatörü kapalı bir hacim içerisinde tümleşik bir devre şeklinde bulunmaktadır. Ölçekleme işleminde kullanılan basamak gerilimi  $U_0$  tepe değerine 60 ns içinde ulaşmalıdır.  $C_0$  kondansatörü yüksek frekansta kullanılabilen kararlı ve düşük gürültülü bir yapıya sahip olmalıdır.  $C_0$  için genel olarak alçak gerilim kondansatörü tercih edilmektedir.

Kısmi boşalma ölçüm sistemlerinde ölçekleme işlemi tüm ölçme devresi elemanları ölçme devresine bağlı iken yapılmalıdır. Çünkü deney cismi, kuplaj kondansatörü ve diğer devre elemanlarının kapasiteleri, ölçekleme sonucuna doğrudan etkide bulunmaktadır. Şekil 4.9'da ölçü dört uçlusunun konumuna göre ölçekleme bağlantı şemaları görülmektedir. Şekil 4.9'da verilen her iki bağlantı şemasında da bilinen  $q_0$

yükü deney cisminin elektrotları arasından ölçme sistemine uygulanmaktadır. Böylece deneyler sırasında deney cisminden yayılan KB darbelerine ölçme devresinin verdiği tepkinin benzetimi (simülasyonu) daha doğru olarak sağlanabilir. Ölçekleme işlemi sırasında bağlantı iletkenlerinin oluşturabileceği kaçak kapasiteler hatalara neden olabilir. Bu nedenle bağlantı iletkenlerinin kısa tutulması daha doğrudur. Boyu uzun deney cisimlerinin ölçeklenmesi sırasında kalibratör (veya  $C_0$  kondansatörü ve basamak gerilim kaynağı), yüksek gerilim bağlantı noktasına yakın konumlandırılarak kaçak kapasiteler azaltılabilir.



Şekil 4.9: Ölçü dört uçlusunun a) kuplaj kondansatörüne, b) deney cismine seri bağlı olduğu devrelerde ölçekleme.

Ölçme devresinin, belirli bir gerilim altında ölçülmesi beklenen yük miktarına yakın aralıktaki bir değere ölçeklenmesi ile daha doğru KB ölçüm sonuçları elde edilebilir. Söz konusu aralık, ölçülmesi beklenen görünen yük değerinin % 50 ile % 200'ü olarak ifade edilmektedir [1,75,76].

Ölçekleme işlemi genelde ölçme devresi enerjisiz iken alçak gerilim ile yapılmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında gevşek bırakılan yüksek gerilim bağlantılarının temas sorunu ve geçiş direnci meydana getirerek, ölçekleme işleminde kararsızlığa neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ölçekleme işlemi yapılırken yüksek gerilim bağlantılarının sıkı biçimde yapılmasında fayda görülmektedir.

## 5. KISMİ BOŞALMA İŞARETLERİNİN SAYISALLAŞTIRILMASI

### 5.1. Kısmi Boşalma Ölçme Sistemlerine İlişkin Karakteristikler

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesine yönelik yöntemler ve temel ölçme devreleri yukarıda genel olarak ele alınmıştır. Temel ölçüm devrelerine yapılan ek uygulamalar yardımıyla, hassas KB ölçümü gerçekleştiren sistemler geliştirmek mümkündür. Bir KB ölçme sisteminin özellikleri, transfer empedansı, alt-üst sınır frekansları, orta bant frekansı, bant genişliği, süperpozisyon, entegrasyon hataları ve darbe çözünürlük süresi gibi karakteristikler ile ifade edilmektedir.

Transfer empedansı  $Z(f)$  frekansın bir fonksiyonudur ve çıkış gerilim genliğinin sabit bir (sinüsoidal) giriş akımının genliğine oranı şeklinde tanımlanır. Bir KB ölçme sisteminde transfer empedansı  $Z(f)$ 'nin geçiş bandının tepe değerinden 6 dB aşağıya düştüğü frekanslar alt ( $f_1$ ) ve üst ( $f_2$ ) sınır frekansları olarak ifade edilir.

KB ölçme sistemlerinin orta bant frekansını ( $f_m$ ),

$$f_m = \frac{f_1 + f_2}{2} \quad (5.1)$$

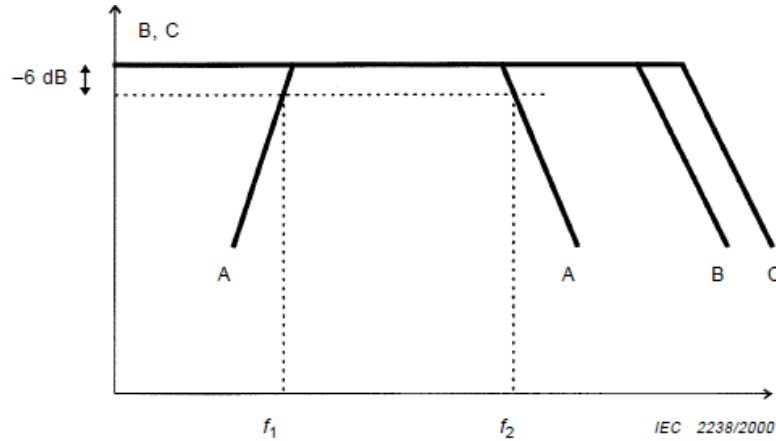
eşitliği ile belirlemek mümkündür. Ölçme sisteminin bant genişliği ise,

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (5.2)$$

denklemleri ile bulunabilir.

KB ölçme sisteminin girişindeki, birbirine eşdeğer ardışık iki KB darbesi arasındaki sürenin, bu tepki süresinden kısa olmaması gerekmektedir. Aksi takdirde çıkışta bu iki darbenin üst üste binmesi (örtüşmesi) durumu meydana gelebilir ki bu da süperpozisyon hatası olarak tanımlanır. Buradan yola çıkarak bir ölçme sisteminin girişindeki, birbirine eşdeğer ardışık iki darbe arasında olabilecek en kısa zaman aralığını, darbe çözünürlük süresi ( $t_r$ ) olarak tanımlamak mümkündür.

Kısmi boşalma ölçüm sistemlerini genel olarak geniş bantlı ve dar bantlı ölçme sistemleri olarak iki kısımda incelemek mümkündür. Geniş bantlı ölçme sistemlerinde alt sınır frekansının  $30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz}$ , üst sınır frekansının  $f_2 \leq 500 \text{ kHz}$  ve bant genişliğinin  $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$  arasında olması tavsiye edilmektedir. Ayrıca geniş bantlı ölçme sistemleri KB işaretlerini alt ve üst sınır frekanslarının altında ve üstünde yeteri kadar zayıflatabilmelidir. Geniş bantlı bir KB ölçme sisteminde genlik ve frekans arasındaki ilişki Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1: Geniş bantlı bir KB ölçme sistemi için genlik ve frekans arasındaki ilişki [1].

Şekil 5.1’de geniş bantlı bir ölçme sisteminin geçirme bandı A ile ifade edilmiştir. Bu ölçme sisteminde ölçülebilecek KB akım darbelerinin genlik spektrumuna ilişkin üst sınır frekansı, ölçme sisteminin  $f_2$  üst sınır frekansından büyük olmalıdır. Bu şartın sağlanmaması durumunda görünen yük ölçümünde meydana gelen hatalar entegrasyon hataları olarak tanımlanır. Ölçülebilecek KB akım darbelerinin genlik-frekans spektrumunu B eğrisi ile ifade etmek mümkündür. Benzer olarak bu ölçme

sisteminin C ile ifade edilen genlik-frekans spektrumuna sahip KB darbeleri ile ölçeklenmesi gerekmektedir.

Üst sınır frekansı ( $f_2$ ) 500 kHz'e kadar olan ölçme sistemlerinde, C ile ifade edilen genlik-frekans spektrumu, 60 ns'den düşük  $t_y$  yükselme süresine sahip basamak gerilimleri ile üretilen kalibrasyon darbeleri yardımıyla elde edilebilir. Üst sınır frekansı ( $f_2$ ) 500 kHz'den büyük ölçme sistemlerinde, C ile ifade edilen genlik-frekans spektrumunu,

$$t_y < \frac{0,03}{f_2} \quad (5.3)$$

şartını sağlayarak elde etmek mümkündür.

Küçük bant genişliği ( $\Delta f$ ) ile karakterize edilen KB ölçme sistemleri, dar bantlı KB ölçme sistemleri olarak tanımlanabilir. Dar bantlı KB ölçme sistemlerinin ( $f_m$ ) orta bant frekansı geniş bir frekans aralığında değiştirilebilir. Bu tip ölçme sistemlerinde bant genişliğinin  $9 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 30 \text{ kHz}$  arasında ve orta bant frekansının  $50 \text{ kHz} \leq f_m \leq 1 \text{ MHz}$  arasında olması tavsiye edilmektedir. Ek olarak  $f_m \pm \Delta f$  frekanslarında transfer empedansının, geçiş bandının tepe değerinin 20 dB aşağısında olması önerilmektedir. Dar bantlı bir KB ölçme sisteminde ölçülebilecek KB akım darbelerinin genlik spektrumunun üst sınır frekansı, bu sistemin ( $f_m$ ) orta bant frekansından büyük olmalıdır. Ters bir durum görünen yük ölçümünde entegrasyon hatalarına neden olabilir [1,60].

## 5.2. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Faz Çözünümlü Örüntüler Şeklinde Ölçümü

Yüksek gerilim sistemlerinin güvenli biçimde çalışması büyük oranda yalıtım kalitesine bağlıdır. Bu nedenle üretim aşamasından sonra yüksek gerilim aygıtlarına yapılan tahribatsız deneyler yardımıyla, yalıtım kalitesinin belirlenmesi gerekmektedir. Elektriksel kısmi boşalma ölçümlerinin yalıtım performansının değerlendirilmesinde kullanılan en önemli araçlardan birisi olduğu kesin kabul görmektedir [5-69].

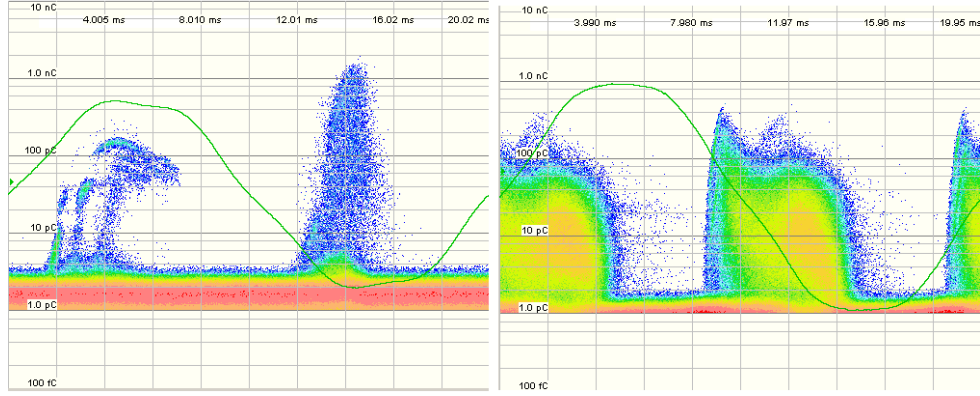


Geçmiş yıllardaki uygulamalarda genel olarak ( $U_i$ ) kısmi boşalma başlama geriliminin ve belirli bir gerilim değerindeki en büyük görünen yük genliğinin ( $q_{max}$ ) ölçülmesi işlemi gerçekleştirilmekteydi. Yalıtkan kalitesinin değerlendirilmesi işlemi ise yalnızca bu iki büyüklüğün karşılaştırılması ile sınırlı olarak kalmaktaydı. Yalıtkanın izin verilebilen en büyük boşalma genliği değerini aşması durumunda, yalıtkindaki KB'yı meydana getiren sebebin bilinmesi önemlidir. Yalıtkanlardaki KB'ların sebebinin belirlenmesinde osilografik gözlem önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle ticari KB ölçüm sistemleri 1969'da CIGRE tarafından yayınlanan yöntemine uygun olarak osilografik gözlem sağlamaktadırlar. KB işaretlerinin osiloskop ekranından yorumlanması, KB'ya neden olan kusurun sınırlı biçimde tanımlanmasını sağlar. Ayrıca osilografik gözlem yöntemi deneyim gerektiren ve yalnızca deney sırasında yapılabilen bir işlemdir [40-45].

Yarı iletken teknolojisindeki hızlı gelişmeler ile KB işaretlerinin görsel ve sayısal olarak incelenmesi konusuna önemli katkılar sağlanmıştır. Özellikle gelişmiş analog sayısal dönüştürücüler yardımıyla KB işaretlerine ilişkin veriler bilgisayar ortamına aktarılabilmektedir. Hızlı işlem yapabilme yeteneğine sahip bilgisayarlar ile de bu veriler işlenebilmekte ve depolanabilmektedir. Böylece klasik KB ölçüm yöntemleri yerini faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm yöntemlerine bırakmaya başlamıştır.

FÇKBÖ yöntemi, KB'ların ( $q$ ) görünen yük genliğinin, ( $\phi_i$ ) açısının (deney gerilimine göre), ve ( $n_i$ ) darbe sayısının deney gerilimi periyodunca eş zamanlı olarak kaydedilmesi temeline dayanır. Bu şekilde kayıtlar, belirli sayıdaki deney gerilimi periyodu adedince yapılır. Daha sonra bütün kayıtlardaki KB'ların görünen yük genliği, darbe sayısı ve deney gerilimine bağlı açısı sinüsoidal deney geriliminin bir periyodu üzerinde renkli ya da gri ölçekli olarak çizdirilir. Çizdirilen bu  $D(q, \phi_i, n_i)$  grafikleri, KB örüntüleri olarak tanımlanmaktadır. KB örüntülerindeki, KB işaretlerinin faz pozisyonuna göre kümelenişlerinden, oluşum mekanizmaları, tipleri (gaz dolu boşluk, korona, elektriksel ağaçlanma, yüzeysel boşalma) vb. hakkında yorumlar yapmak mümkündür. Bu üstünlükleri nedeniyle FÇKBÖ yöntemi ticari ve bilimsel KB ölçüm çalışmalarında sık olarak kullanılmaktadır [12,14,15,18,19,25-30,38-57]. Şekil 5.2'de OMICRON firmasının ürettiği ticari bir

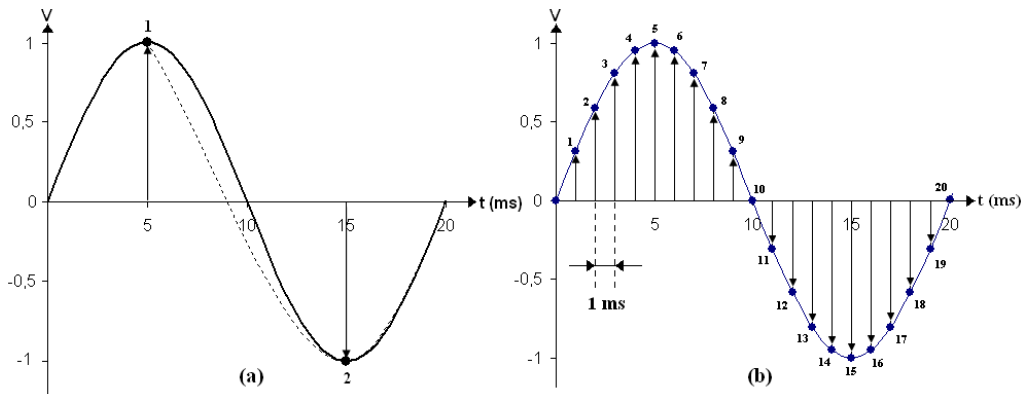
KB ölçüm yazılımı (Mtronix Software) ve donanımı ile elde edilmiş KB örüntüsü örnekleri görülmektedir.



Şekil 5.2: KB örüntüsü örneği.

### 5.3. Kısmi Boşalma İşaretlerinin Örneklenmesi

Faz çözünümlü KB ölçüm yönteminin uygulanabilmesi için öncelikle KB işaretlerinin sayısallaştırılması ve bir bellekte depo edilmesi gerekmektedir. KB işaretlerinin sayısallaştırılması için genelde analog sayısal dönüştürücüler tercih edilmektedir. ASD'ler yardımıyla bir analog işaret sayısallaştırılırken kullanılan örnekleme frekansının önemi büyüktür. Nyquist teoremine göre bir işaretin doğru olarak örneklenebilmesi için örnekleme frekansı, örneklenen işaret frekansının en az iki katı olmalıdır. Bu bağlamda frekansı 50 Hz olan bir sinüs işareti Şekil 5.3.(a)'daki gibi en az 100 Hz frekansla örneklenebilir. Fakat aynı sinüs işareti, 1 kHz frekansla örneklendiğinde, Şekil 5.3.(b)'deki gibi gerçek işaretle daha fazla örtüşmesi sağlanabilir.



Şekil 5.3: 50 Hz sinüsün a) 100 Hz, b) 1 kHz örnekleme frekansıyla örneklenmesi.

KB işaretleri oldukça yüksek frekansa sahip işaretlerdir. Bu nedenle KB işaretlerini örnekleme için yüksek örnekleme frekanslarına gereksinim duyulmaktadır. Yüksek örnekleme frekanslarıyla yapılan işaret örneklemelemlerinde, gerçek işaretle beraber gürültünün de örneklenmesi olasıdır. Ek olarak örnekleme frekansının artması, örnek sayısının da artmasına neden olur. 50 Hz frekansa sahip bir sinüsoidal işaretin tek periyodu 1 MHz örnekleme frekansıyla 20.000 adet örnekle, 100 MHz örnekleme frekansıyla 2.000.000 adet örnekle temsil edilir.

Elektriksel kısmi boşalmaların sayısallaştırılarak ölçülmesinde aşılması gereken en önemli sorunlardan birisi, KB darbeleri ve gürültünün birbirinden ayırt edilmesidir. Sayısallaştırıcı kullanılarak örneklenen işaretler, özellikle yüksek örnekleme frekanslarında ve gürültünün yoğun olduğu durumlarda, büyük oranda gürültü içine gömülmüş olabilir. KB işaretlerini içine alan gürültünün türünü bilmek, işareti bu gürültüden arındırırken seçilecek tekniğin belirlenmesinde büyük önem taşır. Sayısal kısmi boşalma ölçümlerinde karşılaşılabilecek söz konusu gürültü türlerini, ayırık tayftaki gürültüler (Discrete Spectral Interference), darbe karakterli gürültüler, beyaz gürültü (white noise) ve diğer gürültüler şeklinde sınıflandırmak mümkündür.

Ayırık tayftaki gürültüler (ATG) genellikle iletişim kaynaklarının veya radyo yayımlarının (FM/AM) neden olduğu sinüsoidal karakterli gürültülerdir. Ek olarak kısmi boşalma deneyinin yapıldığı ortama yakın bir bölgeden geçen iletim ve dağıtım hatlarının da sinüsoidal karakterli gürültü meydana getirme olasılığı vardır. ATG karakterli gürültüleri, KB deney hacminin ekranlanması ve uygun filtreleme yöntemleri ile zayıflatmak mümkündür.

Darbe karakterli gürültüler, rasgele ve tekrarlı darbe şeklindeki gürültülerdir. Rasgele darbe karakterli gürültüler, anahtarlama olayları sırasında ortaya çıkan ya da yüksek gerilim aygıtlarından kaynaklanan, korona veya diğer boşalma türlerinin neden olduğu, gürültülerdir. Özellikle KB deney geriliminin şebekeden sağlanması durumunda şebekede meydana gelen anahtarlama olayları rasgele darbelere neden olabilir. Bu durumda şebeke geriliminin filtre edilmesi ile besleme geriliminin neden olduğu rasgele darbelerin önüne geçilebilir. Hatta deney geriliminin, motor-generatör grubunun üzerinden sağlanması ile hem şebekedeki parazitlerin hem de bozuk

gerilim dalga şekillerinin engellenmesi mümkündür. Tekrarlı darbe şeklindeki gürültüleri, genellikle güç elektroniği aygıtlarının neden olduğu belirli periyoda sahip darbe karakterli gürültüler oluşturur. Bu darbeleri özel filtrelerle ya da kapılama devreleri (gating circuits) ile engellemek mümkündür.

Beyaz gürültü olarak bilinen gürültü tipi ile tüm sayısal ölçümlerde karşılaşmak mümkündür. Beyaz gürültü türüne genellikle ortamın gürültüsü ya da deneyde kullanılan elektronik devrelerin gürültüsü neden olabilir. Beyaz gürültüyü bazı sayısal filtreler kullanarak kaldırmak mümkün olabilir. Diğer gürültüler olarak sınıflandırılan gürültülere, rastlantısal (stochastic) karakterli gürültüler örnek verilebilir. Rastlantısal gürültüleri, anlık oluşan bir daha oluşup oluşmayacağı kesin olmayan ve kaynağı tam olarak kestirilemeyen gürültü türü olarak tanımlamak mümkündür. Rastlantısal gürültünün karakteri bilindiği durumlarda zayıflatılması mümkün olabilir [77,78].

ATG karakterli gürültüler, dar bantlı, darbe karakterli gürültüler, beyaz gürültü ve olasılıksal karakterli gürültüler ise geniş bantlı gürültülerdir. Gürültü içinden KB işaretini ayırmak için yukarıda da değinildiği gibi filtreleme yöntemleri kullanılabilir. Söz konusu filtreleme yöntemi ölçme devresine yerleştirilen elektronik bir devre (donanım) olabileceği gibi örneklenmiş KB işaretlerine uygulanabilecek sayısal bir yöntem de (yazılım) olabilir.

Elektriksel kısmi boşalma işaretlerinin gürültüden arındırılmasında kullanılan sayısal yöntemlerin başında Fourier Dönüşümü (Fourier Transform) yöntemi gelmektedir. Fourier Dönüşümü yöntemi durağan işaretlerin işlenmesinde oldukça verimlidir fakat değişken işaretlerde yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle Fourier dönüşümüne alternatif olarak geliştirilen Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform) yöntemi ile KB işaretlerinin gürültüden arındırılmasına yönelik çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmıştır [77-86].

#### 5.4. Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform)

Dalgacık Dönüşümü, bir işaretin zaman-frekans analizinde kullanılabilen dönüşüm yöntemlerinden biridir. Dalgacık Dönüşümü ses, elektro kardiyografi (EKG), elektro ensefalografi (EEG) vb. işaretlerin işlenmesinde oldukça iyi sonuçlar verdiği için kullanımı geniş bir alana yayılmıştır. Özellikle son yıllarda, Dalgacık Dönüşümü'nün tercih edildiği elektriksel kısmi boşalma işaretlerinin gürültüden arındırılmasını konu alan çalışma sayısı artmaktadır.

Dalgacık Dönüşümü adından da anlaşıldığı gibi dalgacık fonksiyonları yardımı ile yapılmaktadır. Bilindiği gibi Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü, bir pencere fonksiyonu yardımıyla yapılmaktadır. Dalgacık Dönüşümü'nde ise pencere fonksiyonunun görevi, dalgacık fonksiyonu ile yerine getirilmektedir. Fourier Dönüşümü'nde kullanılan pencere fonksiyonu dönüşüm boyunca sabit tutularak ötelendiğinden zaman ya da frekans domeninin çözünürlüğünden ödün verilmek zorunda kalınmaktadır. Yani pencere fonksiyonu geniş tutulduğunda frekans bilgisi daha net elde edilirken zaman bilgisinin kalitesi düşmektedir. Eğer daha dar bir pencere ile Fourier Dönüşümü yapılırsa bu sefer de zaman bilgisindeki kalite artarken frekans bilgisindeki kalite düşmektedir. Dalgacık Dönüşümü'nde ise pencere görevi gören dalgacık fonksiyonu sürekli değiştiğinden dolayı zaman ve frekans domenlerinin her ikisinde birden kaliteli çözünürlük elde edilmektedir. Bu da Dalgacık Dönüşümü'nü işaret işlemede Fourier Dönüşümü'nden üstün kılmaktadır.

Dalgacık Dönüşümü bir işarete,

$$X_w(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5.4)$$

eşitliği yardımıyla uygulanır. (5.4) eşitliğinde  $X_w(a,b)$  Dalgacık Dönüşümü sonucunda elde edilen dönüşüm katsayıları fonksiyonunu,  $\psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  dalgacık fonksiyonunu simgelemektedir. Bu fonksiyonlarda,

- $a$  : ölçek parametresini,  
 $b$  : öteleme (dönüşüm) parametresini,  
 $*$  : karmaşık eşlenikliği,  
 $x(t)$  : incelenen işareti,  
 $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  : dalgacık fonksiyonunun enerjisini normalleştirme terimini,

ifade etmektedir. (5.4) eşitliğindeki Dalgacık Dönüşümü ile elde edilen katsayılar, Ters Dalgacık Dönüşümü (Inverse Wavelet Transform) yöntemi ile sentezlenerek gerçek işaret tekrar elde edilebilir. Ters Dalgacık Dönüşümü,

$$x(t) = \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} X_w(a,b) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \tilde{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) db da \quad (5.5)$$

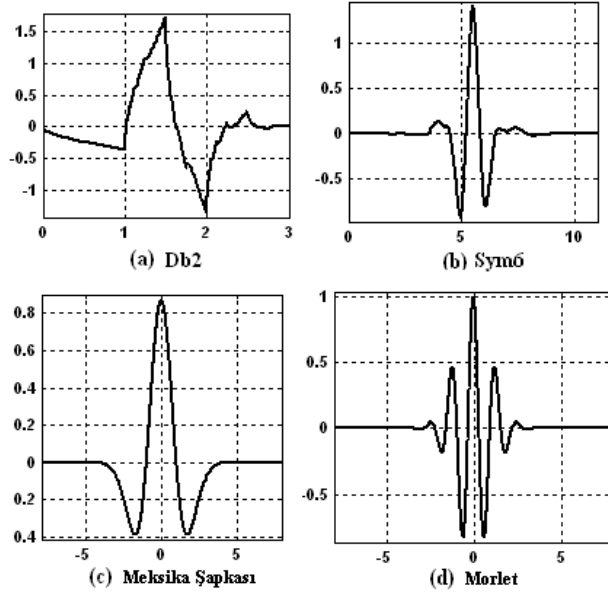
eşitliği yardımıyla gerçekleştirilebilir. (5.5) eşitliğinde  $\tilde{\psi}(t)$  fonksiyonu,

$$\tilde{\psi}(t) = C_{\psi}^{-1} \psi(t) \Rightarrow C_{\psi} = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\tilde{\psi}(\zeta)|^2}{|\zeta|} d\zeta \quad (5.6)$$

eşitliği ile belirlenir.

#### 5.4.1. Dalgacık Dönüşümü'nde Kullanılan Parametreler

Dalgacık Dönüşümü'nün en önemli parametresi dalgacıktır. Bir fonksiyonun dalgacık olabilmesi için sınırlı süreli (sönümlü) ve sıfır ortalamaya sahip olması gerekmektedir. Örneğin sinüs ve kosinüs gibi fonksiyonlar  $\pm \infty$  zaman aralığında sürekli salınım yaptıklarından ve sönümlü olmadıklarından dolayı her iki fonksiyon da birer dalga fonksiyonudur ve dalgacık fonksiyonu olamazlar. Dalgacık Dönüşümü'nde kullanılan ana dalgacık fonksiyonlarından bazıları Şekil 5.4'de görülmektedir.



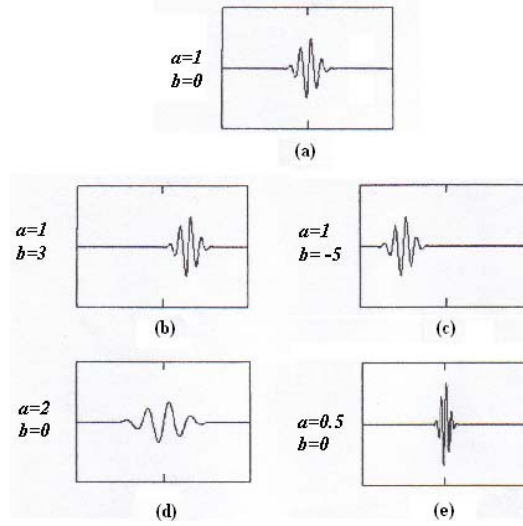
Şekil 5.4: Ana dalgacık fonksiyonu örnekleri.

Şekil 5.4'deki dalgacıklar, Dalgacık Dönüşümü'nün başlangıcında kullanılan referans dalgacığı ifade ettiklerinden dolayı ana dalgacık olarak ifade edilirler. Referans ana dalgacıklardan ölçek ve öteleme parametreleri yardımıyla, diğer dalgacıklar elde edilir ve Dalgacık Dönüşümü'ne bu dalgacıklar ile devam edilir. Bu dalgacıklarda sönümlü ve sıfır ortalama değere sahiptirler.

Ölçek parametresi (a) yardımıyla ana dalgacık sıkıştırılarak ya da genişletilerek yeni dalgacıklar elde edilir. Ölçek parametresini haritalarda kullanılan ölçekleme işlemine benzetmek mümkündür. Harita büyük bir ölçekle hazırlanmış ise ayrıntıları seçmek zorlaşır, eğer küçük bir ölçekle hazırlanmış ise haritadaki ayrıntıları seçmek daha kolay olur. Eğer Dalgacık Dönüşümü küçük bir ölçekle yapılırsa incelenen işaret içindeki yüksek frekanslı bileşenler (haritadaki ayrıntılar gibi düşünülebilir) daha rahat kestirilebilir. Ölçek değeri büyüdükçe işaret içindeki alçak frekanslı bileşenler daha rahat belirlenirken, yüksek frekanslı bileşenlerin belirlenmesi zorlaşacaktır. Ölçekleme işlemi Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ndeki pencere fonksiyonunun genişliğini değiştirme işlemi gibi düşünmek mümkündür.

Öteleme parametresi (b) ile dalgacığın kaydırılması işlemi gerçekleştirilir. Öteleme işlemi Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü'ndeki pencerenin kaydırılması işlemine benzetilebilir. Herhangi bir  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  ana dalgacık fonksiyonuna ait (a) ölçekleme ve

(b) öteleme parametrelerinin değişik değerleri için ana dalgacığın şekli ve konumu (türetilen dalgacıklar) Şekil 5.5’de verilmiştir.



Şekil 5.5: Ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacıklar [87].

Şekil 5.5.(a)’da  $a = 1$  ölçeğinde ve  $b = 0$  konumunda bir referans yani ana dalgacık verilmiştir. Şekil 5.5.(b) ve Şekil 5.5.(c)’de ana dalgacığın aynı ölçekte fakat farklı konumlardaki şekilleri görülmektedir. Şekil 5.5.(b) ve Şekil 5.5.(c) durumunda ana dalgacık aynı konumdadır fakat ölçekleme parametresine bağlı olarak şekli değişmiştir. Ölçeklenmiş ve ötelenmiş bir ana dalgacık enerjisini daima korur. (5.4)

eşitliğindeki  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  terimi, ötelenmiş ve ölçeklenmiş ana dalgacığın enerjisini ilk durumundaki ile aynı tutmak için kullanılmaktadır.

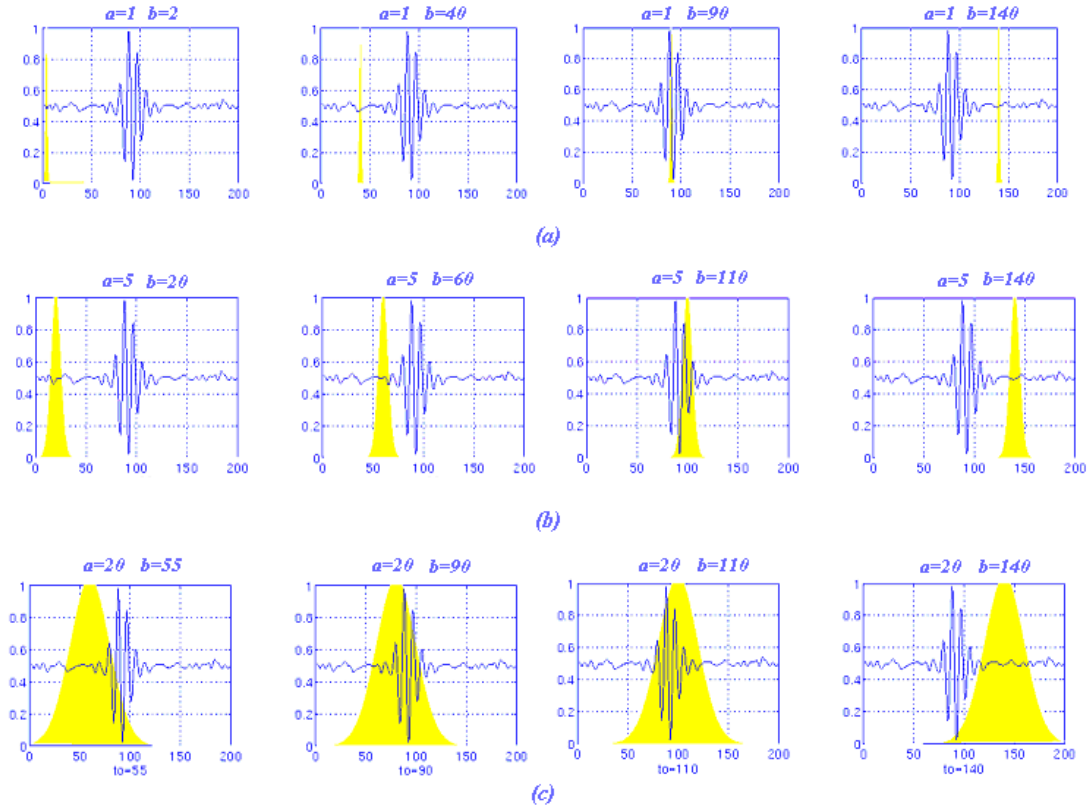
Dalgacık katsayısı parametresi  $X_w(a,b)$ , işaretin incelenen kısmı ile ölçeklenmiş ve ötelenmiş ana dalgacık arasındaki benzerlik boyutunu temsil eder. İşaretin incelenen kısmı ile dalgacığın birbirine benzerliği arttıkça, dalgacık katsayılarının değeri büyür.

#### 5.4.2. Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD)

Sürekli Dalgacık Dönüşümü’nde incelenecek olan  $x(t)$  işareti için öncelikle uygun bir ana dalgacık seçilir. Ana dalgacığın seçimi, uygulamaya bağlı olarak değişir. Ana dalgacık seçiminden sonra dönüşüm katsayılarının hesaplanması işlemine (genel olarak  $a = 1$  ölçeği ile) başlanır. Sürekli Dalgacık Dönüşümü, gerçekte 1’den büyük



ya da küçük mümkün olan tüm ölçek değerleri için hesaplanır, fakat işarete bağlı olarak bu işleme genellikle gereksinim duyulmaz. Uygulamada karşılaşılan işaretler genel olarak sınırlı bant genişliğine sahip olduğu için, dönüşüm işlemi de sınırlı ölçek aralığında yapılır. Sürekli Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanışı Şekil 5.6'da ayrıntılı olarak görülmektedir.



Şekil 5.6: Sürekli Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması [88].

Seçilen ana dalgacık fonksiyonu,  $a=1$  ölçeği için incelenen işaretin başına ( $t=0$ ) konumlandırılır ve ana dalgacık fonksiyonu, incelenen işaret ile çarpılarak  $\pm \infty$

aralığında integrali alınır. Elde edilen integral sonucu  $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$  terimi ile çarpılarak

dönüştürülmüş işaretin her ölçekte aynı enerjiye sahip olması sağlanır. Elde edilen sonuç, dönüşümün  $t=0$  anında ve  $a=1$  ölçeğindeki dalgacık katsayısının değeridir.

Bu işlemin ardından dalgacık (b) öteleme parametresi ile  $t=b$  anına kadar sağa doğru kaydırılır. Yukarıdaki hesaplama süreci,  $a=1$  ve  $t=b$  değerleri için tekrar edilir. Bu süreçlere, dalgacığın işaret sonuna ulaşmasına kadar devam edilir. İşlemler sona erdiğinde,  $a=1$  ölçeği için Dalgacık Dönüşümü gerçekleştirilmiş ve dalgacık katsayıları elde edilmiş olunur. Daha sonra, (a) ölçek değeri arttırılarak tüm dönüşüm

işlemi artan ölçek için tekrar edilir. Uygulamaya bağlı olarak (a) ölçek değeri, istenilen aralıkta seçilerek Sürekli Dalgacık Dönüşümü gerçekleştirilir. Küçük ölçek değerlerinde yüksek frekanslı bileşenler, büyük ölçek değerlerinde de alçak frekanslı bileşenler incelenebilir.

#### 5.4.3. Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) - Çoklu Çözünürlük Analizi

Sürekli Dalgacık Dönüşümü bir işarete uygulandığında işaretle ilgili olarak elde edilen dalgacık katsayılarının miktarı, işareti incelemek ve tekrar Ters Dalgacık Dönüşümü ile geri elde etmek için gerekenden çok fazladır. Bu nedenle sürekli Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması, hem fazla zaman alır hem de kullanılmayan çok fazla veri üretilmesine neden olur. Bu nedenle sürekli Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması kullanışlı değildir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü, Dalgacık Dönüşümü'nü daha kullanışlı bir hale getirmek için geliştirilmiştir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü, bir işaretin incelenmesi ve tekrar geri sentezlenmesi (birleştirilmesi) için gerekli bilgiyi sağlayabildiğinden çalışmalarda başarıyla uygulanabilmektedir.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü,  $a_1$  ölçeğinde  $N_1$  örnekleme frekansı ile örneklenen bir işaretin,  $a_2$  ölçeğinde  $N_2$  örnekleme frekansı ile örneklenebileceği temeline dayanır.  $a_1$  ölçeğinin  $f_1$  frekansına,  $a_2$  ölçeğinin de  $f_2$  frekansına karşılık geldiğini ve  $a_1 < a_2$  ( $f_1 > f_2$ ) olduğunu düşünürsek.  $N_1$  ve  $N_2$  arasındaki ilişki,

$$N_2 = \frac{a_1}{a_2} \cdot N_1 \text{ veya } N_2 = \frac{f_2}{f_1} \cdot N_1 \quad (5.7)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (5.7) eşitliğine dayanılarak düşük frekanslarda örnekleme frekansının da daha düşük seçilebileceği söylenebilir. Fakat burada Nyquist örnekleme teoremine bağlı kalınmalıdır.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nde ölçekleme parametresi, genellikle ikili (diyadik) logaritmik şekilde artırılır. Yani ölçekleme parametresi,  $a = 2^m$  şeklinde (2, 4, 6, 8, 16, 32, ...) seçilir, buna bağlı olarak da öteleme parametresi,  $b = n \cdot 2^m$  şeklinde seçilir. Bu durumda Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulanan bir işareten elde edilen

dalgacık katsayıları indirgenmiş olduğundan hem fazla hesaplama yapılmamış hem de zamandan kazanılmış olunur. Ayrık dalgacık katsayıları sentezlenerek yani birleştirilerek, gerçek işaret tekrar bir araya getirilebilir. Şekil 5.7’de 32 örnekten oluşmuş bir işarete Ayrık Dalgacık Dönüşümü uygulanırken her ölçekte kullanılan örnekleme sayısı görülmektedir.

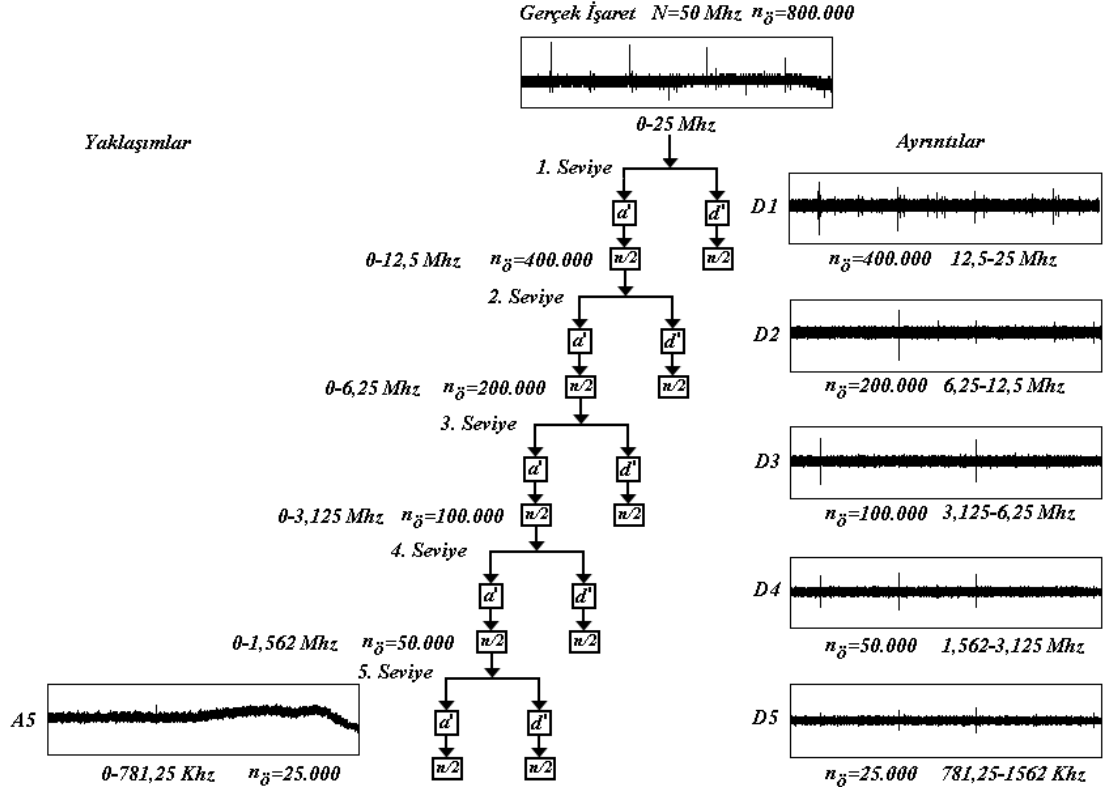


Şekil 5.7: Ayrık Dalgacık Dönüşümü’nde kullanılan örnekleme sayılarının dağılımı [88].

Şekil 5.7’deki işaretin en düşük ölçekteki ( $a = 2$ ) Ayrık Dalgacık Dönüşümü zaman eksenindeki 32 örnek ile yapılır. Daha sonra  $a = 4$  ölçeğinde 16,  $a = 8$  ölçeğinde 8 örnek kullanılarak Dalgacık Dönüşümü gerçekleştirilir. Sürekli Dalgacık Dönüşümü’nde her ölçek için tüm örnekleme noktaları kullanılırken, ayrık Dalgacık Dönüşümü’nde ölçek arttıkça daha az örnekleme noktası kullanılmakta ve böylece dönüşüm işlemi çok daha hızlı olmaktadır.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü’nün uygulanmasında kullanılan algoritma Şekil 5.8’de görülen gerçek bir KB işareti üzerinde verilmiştir. İşaret, 50 MHz örnekleme frekansı ile örneklenmiş ve toplam 800.000 örnekten oluşmuştur. Nyquist örnekleme teoremine göre örneklenmiş bir işaret içindeki en yüksek frekanslı bileşen, örnekleme frekansının yarısı kadar frekansa sahip olacaktır. Bu nedenle gerçek işaret, 0-25 MHz arasında bir frekans bandına sahip olacaktır. Söz konusu gerçek işaret, alçak geçiren ( $a^1$ ) ve yüksek geçiren ( $d^1$ ) filtrelerden geçirilir. Böylece işaretin alçak ve yüksek frekans bileşenleri elde edilmiş olunur. Daha sonra bu içeriklere Dalgacık Dönüşümü uygulanır. Elde edilen katsayılardan, alçak frekanslı bileşenlerin

oluşturduğuna “yaklaşımlar ya da yaklaşım katsayıları”, yüksek frekanslı bileşenlerin oluşturduğuna ise “ayrıntılar ya da ayrıntı katsayıları” denir.



Şekil 5.8: Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nün uygulanması.

Şekil 5.8’de her üç seviyeye ait ayrıntılar verilirken, yaklaşımlardan sadece üçüncü seviyedekiler verilmiştir. İşaretin 0-25 MHz frekans bandına sahip olduğu düşünülürse yüksek geçiren filtreden elde edilen 1. seviyedeki ayrıntıların frekans bandı 12,5-25 MHz arasında olurken, alçak geçiren filtreden elde edilen yaklaşım katsayılarının frekans bandı ise 0-12,5 MHz arasında olacaktır. İşaret, kendini oluşturan iki frekans bandına bölündükten sonra, aşağı örnekleme (down sample) ile her iki frekans bandındaki örnek sayısı yarıya düşürülür. Çünkü başlangıç seviyesindeki örnek sayısı ( $n_g = 800.000$ ) ile her iki frekans bandı da temsil edilebilmektedir. Bu bağlamda ayrılan frekans bantlarını da toplam örnek sayısının yarısı ile ( $n_g = 400.000$ ) temsil etmek mümkündür. Daha sonra 1. seviyedeki alçak frekanslı içeriğe yukarıda anlatılan süreç tekrar uygulanır. Bu sürecin 1. seviyedeki alçak frekanslı içeriğe uygulanmasının nedeni, işaretin alçak frekans bileşenleri içinde önemli bilgileri saklamasıdır. Yukarıda anlatılan süreçler istenilen seviyeye kadar devam ettirilir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü'nün kaç seviye uygulanacağı

işaretin örnekleme frekansına ve toplam örnek sayısına göre değişir. Uygulanan seviye sayısı gereğinden çok fazla olursa, son seviyelerdeki içerikler artık işareti temsil etmekten uzaklaşabilir.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile bir işaret kendini oluşturan frekans bantlarına ayrılabilir. Daha sonra bu frekans bantlarını temsil eden ayrıntı ve yaklaşım katsayıları, Ters Dalgacık Dönüşümü yöntemi ile birleştirilerek (sentezlenerek) gerçek işaret tekrar geri kazanılabilir. Şekil 5.8'deki gerçek işaret teorik olarak,

$$\text{Gerçek İşaret} = D1 + D2 + D3 + D4 + D5 + A5 \quad (5.8)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ayrık Dalgacık Dönüşümü ve Ters Dalgacık Dönüşümü'nde kullanılan alçak-yüksek geçiren filtreler, dört bölgeli ayna filtreleri (Quadrature Mirror Filters) olarak adlandırılmaktadır [87-90].

Sayıllaştırılan işaretlerin Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile frekans bantlarına ayrılabilmesi, sayısal filtreleme işlemi için Dalgacık Dönüşümü yöntemini kullanışlı kılmaktadır. Ayrık Dalgacık Dönüşümü ile sayısal filtreleme işleminde öncelikle KB işareti frekans bantlarına ayrılır. KB ile ilişkisi olmayan yani gürültü ile ilintili olan bileşenler tüm frekans bantlarından eşiklendirme (thresholding) yöntemi ile yok edilir. Sonra frekans bantları tekrar Ters Dalgacık Dönüşümü yardımıyla sentezlenerek, KB işaretleri yeniden gürültüden arındırılmış bir şekilde elde edilir.

Dalgacık Dönüşümü'nde eşiklendirme yöntemleri yumuşak (soft) ve sıkı (hard) eşiklendirme şeklinde iki ana kısma ayrılabilir.

➤ Sıkı eşiklendirme,

Eğer bir dalgacık katsayısının değeri, belirli bir eşik değerden küçük ise dalgacık katsayısının değeri sifıra eşitlenir. Eğer katsayı değeri eşik değer üzerinde ise olduğu gibi bırakılır. Sıkı eşiklendirme,

$$y = \begin{cases} x, & |x| \geq \sigma \\ 0, & |x| < \sigma \end{cases} \quad (5.9)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (5.9) eşitliğinde  $\sigma$  eşik değeridir.

➤ Yumuşak eşiklendirme,

Eğer bir dalgacık katsayısının değeri, belirli bir eşik değerden küçük ise, dalgacık katsayısının değeri sifıra eşitlenir. Eğer katsayı değeri, eşik değerinin üzerinde ise aşağı ölçeklenir. Yumuşak eşiklendirme,

$$y = \begin{cases} \text{işaret}(x) * (|x| - \sigma), & |x| \geq \sigma \\ 0, & |x| < \sigma \end{cases} \quad (5.10)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (5.10) eşitliğinde  $\sigma$  eşik değeridir. Yumuşak eşiklendirmede, her bir katsayının kısmen gürültüden ve kısmen de ilgilenilen (KB işareti gibi) gerçek işarettten oluştuğu kabul edildiğinden, işaretin gürültüden arındırılması gerektiği fikri vardır [79]. Eşiklendirme yönteminde belirlenmesi gereken en önemli bileşen eşik  $\sigma$  değeridir. Çünkü seçilen eşik değerinin, KB işareti ile değil gürültü ile ilişkili olması gerekmektedir [77-81].

Elektriksel kısmi boşalma işaretlerinin sayısal olarak değerlendirilmesi sırasında karşılaşılabilecek gürültülerin bastırılabilmesi için Dalgacık Dönüşümü tabanlı bir sayısal filtre geliştirilmiştir. Geliştirilen sayısal filtre, Bölüm 6.2’de ele alınan faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm yazılımı içine adapte edilmiştir. Sayısal filtrede dalgacık seçimi ve Dalgacık Dönüşümü seviyesi tamamen kullanıcının kontrolüne bırakılmıştır. Bunun nedeni KB ölçümleri sırasında karşılaşılabilecek gürültü türünün önceden kestirilememesi ve yukarıda da anlatıldığı gibi her gürültü türünün farklı bir karakteristiğe sahip olmasıdır. Sayısal filtrede öncelikle KB işareti kullanıcının belirlediği seviyede frekans bantlarına ayrıştırılmaktadır. Daha sonra her bir seviye için ayrı ayrı eşik değeri belirlenmektedir. Belirlenen eşik değeri ile sıkı eşiklendirme yöntemine göre eşiklendirme gerçekleştirilmektedir.

Eşik değerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemi,

$$\sigma_i = \max(\max|D_i|, \min|D_i|) \quad (5.11)$$

eşitliği ile açıklamak mümkündür. (5.11) eşitliğinde,

$\sigma_i$  : i. seviyedeki eşik değerini

$D_i$  : i. seviyedeki ayrıntı katsayıları dizisini

simgelemektedir.

## **6. FAZ ÇÖZÜNÜMLÜ KISMİ BOŞALMA ÖLÇÜM SİSTEMİ TASARIMI VE YAPIMI**

Harmoniklerden kaynaklanan gerilim dalga şeklindeki bozulmaların, elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerinin incelenebilmesi için doğrudan ölçme yöntemini temel alan bir ölçme sistemi geliştirilmiştir. Ölçme sistemi KB işaretlerini sayısal olarak işleyebilmekte ve KB işaretlerinin faz çözünümlü örüntülerini çıkartarak kaydedebilmektedir. Geliştirilen ölçme sistemini temel olarak, iki kısımda incelemek mümkündür. Birinci kısım KB ölçme sistemi için geliştirilen aygıtlardan ikinci kısım ise faz çözünümlü KB yazılımından oluşmaktadır. Bu kısımlar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

### **6.1. Kısmi Boşalma Ölçüm Sistemi İçin Geliştirilen Aygıtlar**

Deneysel çalışmaları gerçekleştirebilmek için geliştirilen KB ölçüm sistemini oluşturan temel aygıtlar, tamamen yerli olanaklar ile tasarlanmış ve yapılmıştır. Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen bu aygıtlara, farklı yüksek gerilim laboratuvarlarında, çeşitli deneyler uygulanmış ve işlevlikleri sınanmıştır. KB ölçüm sistemi için tasarlanan ve yapımı gerçekleştirilen aygıtlar,

- Kuplaj kondansatörü (1 nF - 50 kV),
- Sivri ön direnç,
- Yüksek gerilim bölücüsü,
- Kısmi boşalma kalibratörü,
- Kısmi boşalma ölçü aleti,
- Sivri uç-yarı küre elektrot düzeni,
- Rogowski profiline sahip elektrot düzeni ve deney kabından,

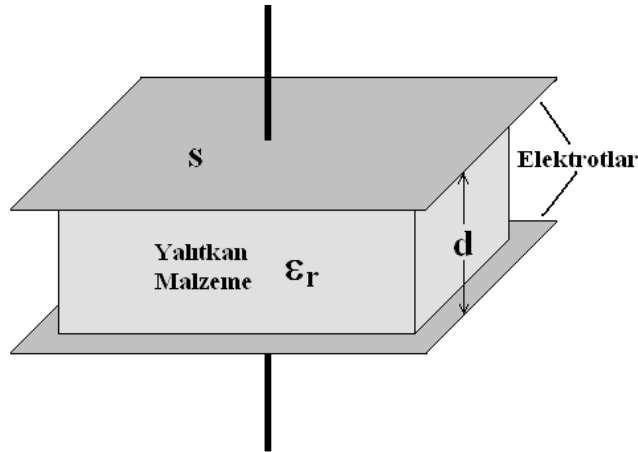
oluşmaktadır.



## 6.1.1. Kuplaj kondansatörü (1 nF - 50 kV) yapımı

### 6.1.1.1. Yüksek gerilim kondansatörleri

Temel olarak basit bir kondansatör, iletken iki elektrot arasına yerleştirilen yalıtkandan meydana gelmektedir. Kondansatör seçiminde göz önünde bulundurulması gereken önemli iki büyüklük vardır. Bu büyüklükler kondansatörün kapasitesi ve çalışma gerilimidir. Kondansatörün kapasitesinin ve çalışma geriliminin belirlenmesi ve optimizasyonu, kullanım amacına bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Yüksek gerilim devrelerinde kullanılan kondansatörlerin kapasitelerinin ve çalışma gerilimlerinin optimizasyonu, alçak gerilim devrelerinde kullanılanlara oranla daha zordur. Şekil 6.1’de düzlemsel elektrot sistemi kullanılarak oluşturulan basit bir kondansatör iç yapısı verilmiştir.



Şekil 6.1: Düzlemsel elektrot sisteminden oluşan basit bir kondansatör iç yapısı.

Şekil 6.1’deki sistemin kapasitesi,

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilebilir. (6.1) eşitliğinde,

$\epsilon_0$  : boşluğun dielektrik sabitini ( $8,86 \cdot 10^{-12}$  F/m),

$\epsilon_r$  : yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik katsayısını,

$S$  : elektrotların yalıtkana temas eden yüzey alanını (kesitini) ( $m^2$ ),

$d$  : elektrotlar arası mesafeyi (m),

ifade etmektedir [91,92].

(6.1) eşitliği dikkate alındığında, düzlemsel elektrot sisteminden oluşan bir kondansatör kapasitesinin, elektrotların yalıtıkana temas eden yüzeyinin alanı ve yalıtıkannın bağıl dielektrik katsayısı ile doğru orantılı, elektrotlar arası mesafe ile ters orantılı değişeceği açıktır. Bağıl olarak elektrotların yüzey alanının büyük veya elektrotlar arası mesafenin küçük seçilmesi ile kondansatör kapasitesinin yükseltilmesi mümkündür. Fakat bu durumda kondansatörün fiziksel boyut uyumu sorunları ile karşılaşılabilir. Kapasite artışı sağlamak için yüksek bağıl dielektrik katsayısına sahip yalıtıkaları tercih etmek mümkündür. Tablo 6.1’de bazı yalıtıkalara ilişkin bağıl dielektrik katsayıları verilmiştir.

Tablo 6.1: Bazı yalıtık malzemelere ilişkin bağıl dielektrik katsayıları [93].

<i>Yalıtık Malzeme</i>	<i>Bağıl Dielektrik Katsayısı</i>	<i>Yalıtık Malzeme</i>	<i>Bağıl Dielektrik Katsayısı</i>
Hava	1,0	Mika	4,0-9,0
Bakalit (amyant tabanlı)	5,0-22,0	Naylon	3,4-22,4
Balmumu	2,4-2,8	Kağıt (kuru)	1,5-3,0
Ebonit	2,7	Pleksiglas	2,6-3,5
Epoksi Reçine	3,4-3,7	Polietilen	2,5
Fiber	5,0	Porselen	5,0-6,5
Formika	3,6-6,0	Quartz	5,0
Cam	3,8-14,5	Kauçuk	2,0-4,0
Saf su	34,0-78,0	Teflon	2,1
Elektriksel Yağ	2,0-4,0	Delrin	3,7

Tablo 6.1’e göre, elektrotları arasında gaz (hava) bulunan bir kondansatör kapasitesinin, gaz yerine fiber kullanılması ile 5 kat veya saf su kullanılması ile yaklaşık 78 kat arttırılması mümkün olabilir. Fakat bu durumda da fiber malzemenin elektrot yüzeylerine tam ve sıkı teması, saf suyun ise elektrotlar arasında tutulabilmesi gibi yapısal uyum sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Kapasite tasarımında fiziksel sorunlara ek olarak elektriksel sorunlar da ortaya çıkabilmektedir. Düzlemsel elektrot sisteminden elde edilmiş bir kondansatörün

elektrotları arasındaki mesafenin (d) küçük seçilmesi durumunda, istenilen çalışma geriliminin elde edilebilmesi sorunu ortaya çıkabilir. Bu durumda çalışma gerilimini büyük oranda yalıtkan malzemenin elektriksel dayanımı (delinme gerilimi) belirlemektedir. Havanın delinme dayanımı normal koşullar altında yaklaşık 30 kV/cm olarak kabul edildiğinde elektrotlar arası açıklığı 1 cm olan düzlemsel kondansatörün (kenar etkileri göz ardı edildiğinde) çalışma gerilimi yaklaşık 30 kV olarak elde edilebilir. Fakat elektrotlar arası mesafenin 1 cm'den daha düşük seçilmesi düzlemsel kondansatörün kapasitesini arttırırken çalışma gerilimini düşebilir. Uygulamada yüksek gerilim kondansatörlerinin elektrot yüzeyleri ve kenar etkileri çalışma gerilimi üzerinde etkili olabilir. Bu nedenle istenmeyen delinmelerin ve boşalmaların engellenebilmesi için elektrot yüzeylerinin pürüzsüz, düz olması ayrıca elektrot kenarlarının düzgün alan dağılımına sahip biçimde sonlandırılması gerekmektedir. Yukarıda anlatılanlar dikkate alındığında, yüksek gerilim kondansatörlerinin kapasitesine, çalışma gerilimine, fiziksel boyutlarına ve mekanik yapısına etki eden tüm bileşenlerin en uygun biçimde seçilmesi gerektiği ortaya çıkmaktadır.

Alçak gerilimlerde çalışabilen kondansatör yığınlarının seri ve paralel bağlanması ile yüksek gerilim kondansatörü elde edilmesi mümkündür. Bu yöntemde ise kondansatörlerin birbirine bağlanması sırasında ortaya çıkabilecek eğrilik yarıçapı küçük bağlantı kısımları KB'lara neden olabilir. Ayrıca kondansatör yığınlarının birbirine, yüksek gerilim ve toprak elektrotlarına karşı kaçak kapasite ve endüktans etkisi göstermesi söz konusudur. Özellikle KB ölçümlerinde kullanılan kuplaj kondansatörlerinin düşük endüktans etkisine sahip olması gerekliliği dikkate alınmalıdır [1]. Uygulamada alçak gerilim kondansatörlerinde meydana gelebilecek bir arızanın giderilme zorluğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

#### **6.1.1.2. Kuplaj kondansatörü tasarımı**

Elektrot sistemleri ile yüksek gerilim kondansatörü yapımında düzlemsel sistemin yanı sıra eş eksenli küresel ve silindrsel elektrot sistemleri de kullanılabilir. Düzlemsel sistemin kullanımına ilişkin sorunlardan bazıları yukarıda ele alınmıştır. Benzer olarak eş eksenli küresel elektrot sisteminin uygulama zorluğu söz

konusudur. Eş eksenli silindrsel elektrot sisteminin diğerlerine göre daha uygulanabilir olmasından dolayı, kuplaj kondansatörünün yapımında temel alınması uygun görülmüştür.

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçümünde kullanılan kuplaj kondansatörlerinin kısmi boşalmasız olması ve ölçüm duyarlılığı için deney cisminden daha büyük kapasiteye sahip olması gerekmektedir. Genel olarak kısmi boşalma ölçüm devrelerinde kullanılan kuplaj kondansatörlerinin 1 nF ya da daha büyük değerde seçilmesi önerilmektedir [1]. Yüksek gerilim kondansatörleri için 1 nF değeri oldukça büyük bir değer sayılabilir. Kullanılabilir boyutlarda eş eksenli silindrsel elektrot sistemi ile 1 nF değerinin elde edilebilmesi, önemli ölçüde elektrotlar arasında kullanılan yalıtkanın bağıl dielektrik katsayısına bağlı olacaktır. Aynı zamanda, yalıtkanın zarar görmesi durumunda yenilebilir olması, kuplaj kondansatörüne geri dönüşüm ve kesintisiz hizmet verebilme yeteneği kazandıracaktır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda kullanılması düşünülen kuplaj kondansatörünün yağ yalıtımlı olarak tasarlanması öngörülmüştür.

Silindrsel elektrot düzeni kullanılarak elde edilen bir sistemin kapasitesi,

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. (6.2) eşitliğinde,

$\epsilon_0$  : boşluğun dielektrik sabitini ( $8,86 \cdot 10^{-12}$  F/m),

$\epsilon_r$  : yalıtkan malzemenin bağıl dielektrik katsayısını,

$r_1$  : iç silindir yarıçapını,

$r_2$  : dış silindir yarıçapını,

$l$  : silindirlerin uzunluğunu,

ifade etmektedir. Kuplaj kondansatörüne uygulanabilecek gerilimin belirlenmesi için eş eksenli silindrsel elektrot sisteminin delinme bakımından incelenmesi

gerekmektedir. Eş eksenli silindrsel elektrot sistemlerinde maksimum elektriksel alanın eğrilik yarıçapı küçük olan iç elektrotta (silindir), minimum elektrik alanının ise dış elektrotta (silindir) meydana gelmesi beklenir.

Eş eksenli silindrsel elektrot sisteminde maksimum elektrik alan,

$$E_{\max} = \frac{U}{r_1 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.3)$$

eşitliği ile, minimum elektrik alan,

$$E_{\min} = \frac{U}{r_2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (6.4)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (6.3) ve (6.4) eşitliklerinde U elektrot sistemine uygulanan gerilimi temsil etmektedir.

Kuplaj kondansatörünün boyutları, hem (6.2), (6.3), (6.4), eşitliklerine göre hem de elde edilebilen silindrsel elektrot ve yalıtım malzemelerinin özelliklerine göre şekillendirilmiştir. Bunlara bağlı olarak kuplaj kondansatörünün iç elektrotu için 40 mm (0,040 m) yarıçapında, dış elektrotu için 48 mm (0,048 m) yarıçapında elektrotlar kullanılmıştır. Kondansatör kapasitesine etki eden elektrot uzunluğunun da 1555 mm seçilmesi uygun görülmüştür. Yalıtkan malzeme olarak kullanılması düşünülen yağın seçiminde Shell Diala Oils AX marka transformatör yağı tercih edilmiştir. Bu yağın bağıl dielektrik katsayısı yaklaşık  $\epsilon_r = 2,2$  civarındadır. 1,02 mm elektrot açıklığı için delinme dayanımı 28 kV/mm'den büyük olarak ifade edilmiştir [94]. Belirlenen değerler (6.2) eşitliğine uygulandığında kondansatörün kapasitesi,

$$C_{ky} = \frac{2 \times \pi \times 8,86.10^{-12} \times 2,2 \times 1,555}{\ln\left(\frac{48}{40}\right)} = 1,0438.10^{-9} \text{ Farad}$$

olarak elde edilir. Yalıtkan yağ yerine bağıl dielektrik katsayısı 1 olan gaz (hava) kullanılması durumunda kondansatörün kapasitesi,

$$C_{kh} = \frac{2 \times \pi \times 8,86.10^{-12} \times 1 \times 1,555}{\ln\left(\frac{48}{40}\right)} = 474,48.10^{-12} \text{ Farad}$$

olarak bulunur. Kısmi boşalma ölçüm sisteminde kullanılması düşünülen kuplaj kondansatörünün çalışma geriliminin 50 kV etkin değer olması hedeflenmiştir. Bu nedenle (6.3) ve (6.4) eşitliklerinde U değeri belirlenirken maksimum zorlanmayı oluşturacak tepe değer ( $50\sqrt{2}$  kV) % 40 güvenlik payı ile birlikte düşünülmüş ve 100 kV kabul edilmiştir. Bu durumda elektrotlarda meydana gelecek maksimum ve minimum elektrik alan şiddetleri (6.3) ve (6.4) eşitlikleri yardımıyla,

$$E_{\max} = \frac{100 \text{ kV}}{40 \cdot \ln\left(\frac{48}{40}\right)} = 13,712 \text{ kV/mm} , E_{\min} = \frac{100 \text{ kV}}{48 \cdot \ln\left(\frac{48}{40}\right)} = 11,426 \text{ kV/mm}$$

olarak belirlenebilir. Maksimum ve minimum elektriksel alanlar yalıtım yağının delinme dayanımını aşmadığı için teorik hesaplamalar kuplaj kondansatörünün 50 kV besleme geriliminde güvenle çalışabileceğini göstermektedir.

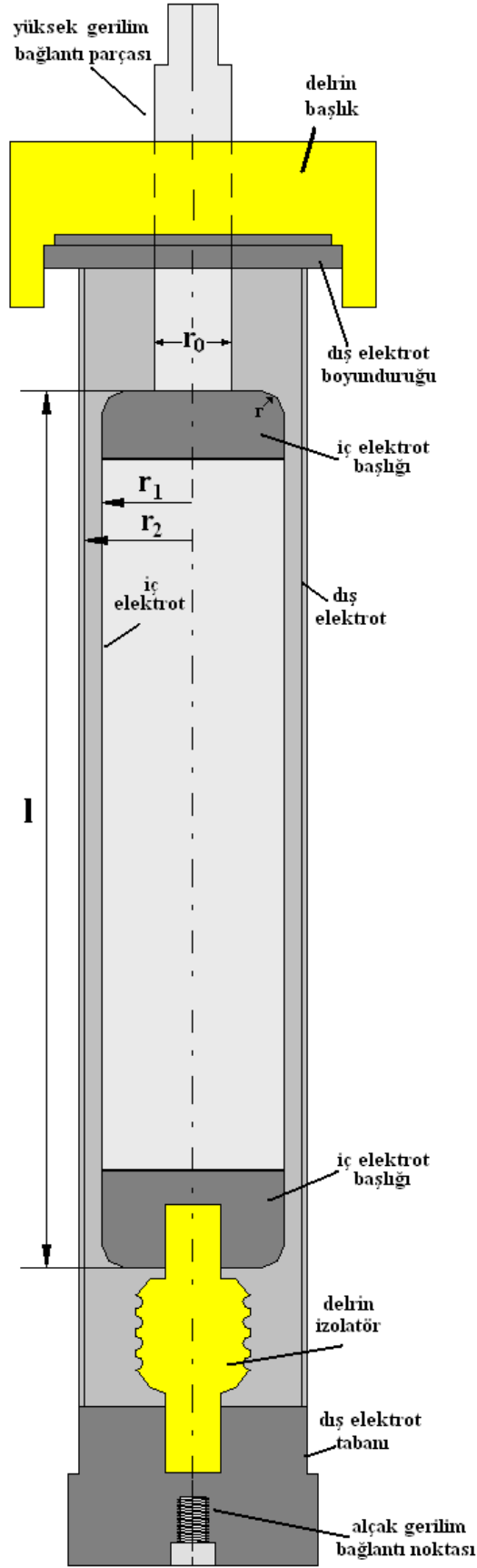
### 6.1.1.3. Kuplaj kondansatörü uygulaması

Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen kuplaj kondansatörünün elektrot iç yapısının Şekil 6.2'deki gibi olması uygun görülmüştür. İç ve dış silindrsel elektrotların aynı ekseninde olmasını sağlayan izolatör ve başlığın yapımında delrin malzeme kullanılmıştır. Delrin malzemenin delinme dayanımı 50 kV/mm'den büyük olup, bağıl dielektrik katsayısı yaklaşık 3,7 civarındadır. Ayrıca malzemenin iç yapısında

boşluklara rastlanmadığı için kısmi boşalma oluşturma riski düşüktür. Delrin malzeme torna ve frezede kesilerek işlenmeye olanak tanıyan mukavemetli bir yapıya sahiptir.

Kuplaj kondansatörü elektrotlarının yapımında alüminyum borular kullanılmıştır. Dış elektrot için kullanılan alüminyum borunun dış çapı 100 mm olup et kalınlığı 2 mm'dir. Dış elektrotun kondansatör kapasitesine etkide bulunan etkin iç yarıçapı 48 mm'ye karşılık gelmektedir. İç elektrot için kullanılan alüminyum boru çapı 80 mm olup et kalınlığı 2,5 mm'dir. İç elektrotun kapasiteye etkide bulunan etkin dış yarıçapı ise 40 mm'dir. Her iki elektrotun kapasiteye etki eden yüzeyleri, yani dış elektrotun iç yüzeyi ve iç elektrotun dış yüzeyi torna ve zımpara yardımıyla tamamen pürüzsüz hale getirilmiştir. Daha sonra her iki elektrotun söz konusu yüzeyleri polisaj tekniği ile parlatılmıştır. Dış elektrotun sonlandırılmasını sağlayan taban ve boyunduruk parçaları ile iç elektrotun sonlandırılmasını sağlayan başlıklar sertleştirilmiş özel alüminyum malzemedен yapılmıştır. Taban ve boyunduruk parçaları dış elektrotta alüminyum kaynak ile sabitlenmiştir. Elektrotlarının yapımında alüminyum kullanılarak elektrotların korozyona karşı dayanımı artırılmış ve kondansatörün hafif olması sağlanmıştır. Yalıtımı sağlayan yağ yalnızca elektrotlar arasında bulunmakta olup toplam hacmi 5,5 litredir. Kondansatörün yağ değişimi süresi yaklaşık 30 dakikadır.

Kuplaj kondansatörüne yüksek gerilim bağlantısı iç elektrot üzerinden yapılmıştır. Dış elektrot toprak potansiyeline bağlanarak kuplaj kondansatörünün gerilim altında iken ekranlanması sağlanmıştır. Buna bağlı olarak da yüksek gerilim elektrotunda meydana gelen maksimum elektrik alanın ölçme sistemine ve diğer aygıtlara etkisinin azaltılabileceği düşünülmüştür.



Şekil 6.2: Tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilen kondansatörün iç yapısı.



Kuplaj kondansatörünün kısmi boşalmasız olabilmesi için iç ve dış elektrotların kenar etkilerinin yok edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle iç elektrotun her iki kenarının dış elektrottan yaklaşık 120 mm kısa tutulması uygun görülmüştür. Ayrıca iç ve dış elektrot kenarları yuvarlak biçimde yapılarak eğrilik yarıçapları arttırılmıştır. İç elektrota yüksek gerilimin sorunsuz biçimde uygulanabilmesi için bağlantıyı sağlayan parçanın da silindirik şeklinde olması uygun görülmüştür. Bu parça çapının ( $r_0$ ) belirlenmesinde ise delinme bakımından en elverişli düzen kriterine bağlı kalınmıştır. Eş eksenli silindirsiz elektrot sistemlerinde delinme bakımından en elverişli düzen,

$$r_0 = \frac{r_2}{e} \quad (6.5)$$

eşitliği yardımıyla bulunabilir. (6.5) eşitliğinde  $r_0$ , iç elektrota yüksek gerilimi aktaran parçanın yarıçapını ve  $e$ , doğal logaritma tabanını simgelemektedir. Dış elektrot yarıçapı 48 mm olduğu için,  $r_0$  yarıçapı (6.5) eşitliği yardımıyla yaklaşık 17,5 mm olarak belirlenmiştir. Yapımı gerçekleştirilen kondansatör hareketli plastik bir gövde içine oturtulmuş ve yağ sızdırmazlığı özel bir polisiloksan (silikon) yardımıyla sağlanmıştır. Kondansatörün gerçek boyutları hakkında Şekil 6.3 yardımıyla fikir edinilmesi mümkündür.



Şekil 6.3: Kuplaj kondansatörünün gerçek boyutları.

Kuplaj kondansatörünün yüksek gerilim bağlantılarının uygun biçimde yapılabilmesi için Şekil 6.4'deki görülen başlık yapılmıştır. Ayrıca söz konusu bağlantı başlığı yüksek gerilim uygulanan kısımda elektrik alan dağılımının düzenlenmesine de yardımcı olmaktadır.



Şekil 6.4: Kuplaj kondansatörü bağlantı başlığı.

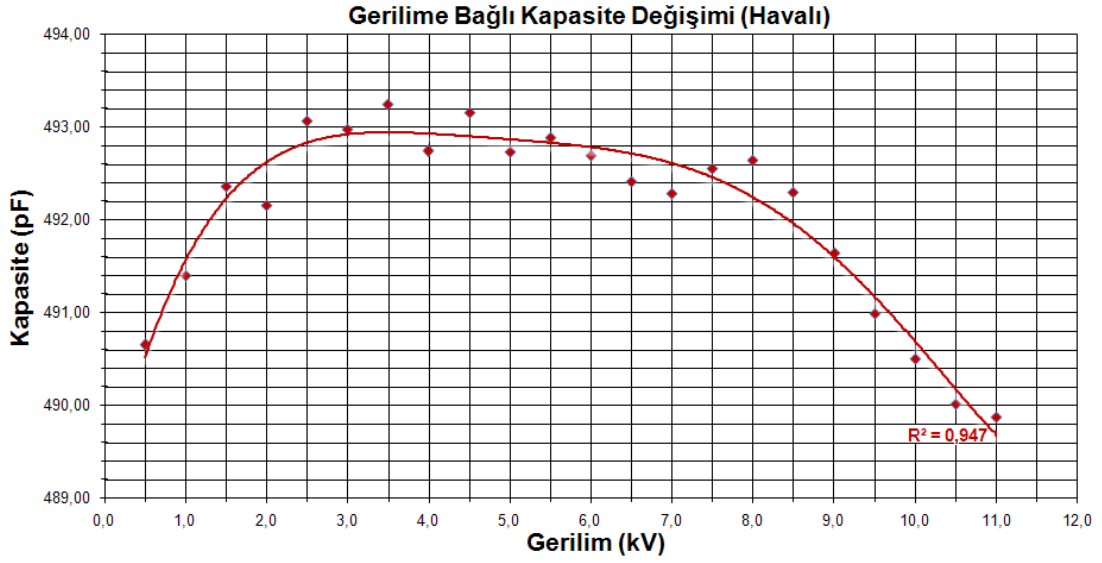
#### 6.1.1.4. Kuplaj kondansatörüne ilişkin deneysel sonuçlar

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere gerçekleştirilen kuplaj kondansatörü AREVA ve TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarlarında test edilmiştir.

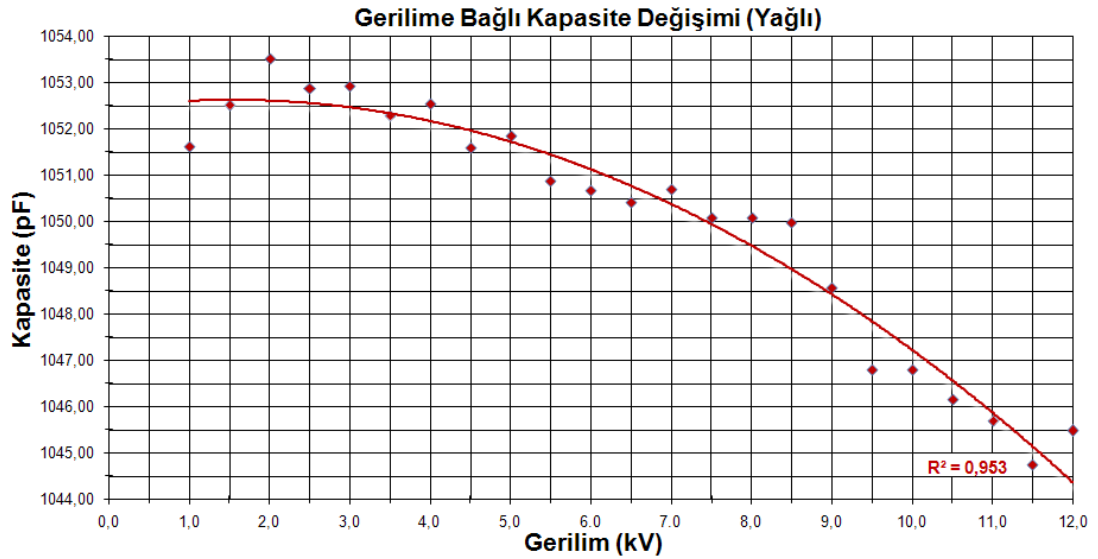
AREVA kuruluşunun yüksek gerilim laboratuvarında kondansatörün hava ve yağ yalıtkanlı olarak kapasite ve kısmi boşalma ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kapasite ölçümleri 0,5 - 11 kV arasında 0,5 kV artımlarla gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları Tablo 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'daki grafiklerde kuplaj kondansatörünün kapasitesinin gerilime bağlı değişimi verilmiştir. Deneysel sonuçlarına göre kondansatörün hava yalıtkanlı kapasitesi ortalama 492 pF, yağ yalıtkanlı kapasitesi ortalama 1050 pF olarak belirlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların yukarıda bulunan teorik hesaplarla yaklaşık olarak örtüştüğü görülmektedir. Hava yalıtımlı durumda yapılan KB ölçümlerinde 8 kV etkin değer seviyesine kadar KB oluşmamıştır. Yaklaşık 10 kV seviyesinde kondansatör elektrotları arasında atlama meydana gelmiştir. Yağ yalıtımlı durumda gerçekleştirilen kısmi boşalma ölçümlerinde maksimum 40 kV gerilim seviyesine kadar çıkılabilmiş ve kuplaj kondansatörü bu seviyede herhangi bir boşalma oluşturmamıştır.

Tablo 6.2: Kuplaj kondansatörünün farklı gerilimlerdeki kapasite ölçüm sonuçları.

Ortam Sıcaklığı: 28,5 <sup>0</sup> C - Bağıl Nem: % 42 - Basınç: 746 mmHg			
YAĞ (Diala Oil AX)		GAZ (Hava)	
Gerilim (kV)	Kapasite (pF)	Gerilim (kV)	Kapasite (pF)
0,5	1044,00	0,5	490,65
1,0	1051,62	1,0	491,40
1,5	1052,52	1,5	492,36
2,0	1053,52	2,0	492,16
2,5	1052,88	2,5	493,07
3,0	1052,94	3,0	492,98
3,5	1052,29	3,5	493,25
4,0	1052,55	4,0	492,74
4,5	1051,59	4,5	493,16
5,0	1051,86	5,0	492,73
5,5	1050,88	5,5	492,89
6,0	1050,68	6,0	492,70
6,5	1050,42	6,5	492,41
7,0	1050,69	7,0	492,28
7,5	1050,08	7,5	492,56
8,0	1050,08	8,0	492,65
8,5	1049,99	8,5	492,30
9,0	1048,57	9,0	491,65
9,5	1046,80	9,5	490,99
10,0	1046,79	10,0	490,50
10,5	1046,15	10,5	490,01
11,0	1045,70	11,0	489,88
11,5	1044,74		
12,0	1045,48		



Şekil 6.5: Kuplaj kondansatörünün gerilime bağlı kapasite değişimi (havalı).



Şekil 6.6: Kuplaj kondansatörünün gerilime bağlı kapasite değişimi (yağlı).

TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda yapılan kapasite ölçümleri 10 kV, 20 kV ve 30 kV gerilim seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sırasında kondansatör yağ yalıtkanlı durumda olup kapasite değeri 1041 pF olarak belirlenmiştir. Yine yağ yalıtımlı olarak yapılan KB ölçümlerinde 64 kV (etkin) seviyelerine kadar kısmi boşalma görülmemiştir. 65 kV gerilim seviyesinde değeri çok hızlı ve sürekli olarak artan kısmi boşalmalar görülmüş ve aniden elektrotlar arasında atlama meydana gelmiştir. Tüm deney sonuçları dikkate alındığında kuplaj kondansatörünün kapasitesinin yaklaşık 1 nF olduğu ve 50 kV etkin alternatif gerilim seviyesinde kısmi boşalmaz olarak güvenli biçimde kullanılabileceği ispatlanmıştır.

### 6.1.2. Sıvı direnç yapımı

Yüksek gerilim ölçme sistemlerinde deneysel çalışmalar sırasında kısa devre oluşabilme riski her zaman söz konusudur. Bu nedenle yüksek gerilim elemanlarının kısa devre sırasında aşırı akımdan korunması gerekmektedir. Kısa devrelerin sisteme verebileceği hasarın aşırı akım kesicileri yardımıyla önlenmesi sık kullanılan yöntemler arasındadır. Fakat aşırı akıma karşı koruma yöntemi genelde yüksek gerilim transformatörünün primer sargılarını besleyen hat üzerinde kullanılmaktadır. Deneysel malzemesinde ya da diğer aygıtlarda oluşabilecek kısa devre sırasında yüksek gerilim devresinden geçen aşırı akımı sınırlandırmak da bir diğer koruma önlemidir. Aşırı akımı sınırlandırmak için, yüksek gerilim transformatörü ile deney devresi arasına seri bağlı bir ön direnç yerleştirmek mümkündür. Ayrıca bu direncin şebekeden ve yüksek gerilim transformatöründen kaynaklanabilecek gürültülerin zayıflatılmasına katkısı olduğu söylenebilir.

Kısmi boşalma ölçüm sistemlerinde kullanılan tüm devre elemanları gibi ön direncin de deney gerilimi seviyelerinde ölçüm sonuçlarını bozabilecek gürültü ve kısmi boşalma oluşturmaması gerekmektedir. Belirli bir değerde yüksek gerilim direnci elde etme yöntemlerinden birisi uygun sayıda ve dayanımda alçak gerilim direncini seri olarak bağlamaktır. Fakat bu yöntemde alçak gerilim dirençlerinin birbirlerine bağlantıları ve bir mahfaza içine yerleştirilmeleri oldukça zordur. Alçak gerilim dirençleri kullanılarak yapılan yüksek gerilim dirençlerinin, özellikle kısmi boşalma ölçümlerinde kullanılması sakıncalı olabilir. Çünkü bağlantı ve montajdan kaynaklanan eğrilik yarıçapı küçük kısımlar istenmeyen boşalmalara ve elektriksel gürültüye neden olabilirler. Ayrıca alçak gerilim dirençlerinden kaynaklanabilecek kısmi boşalmaları önceden kestirmek de zordur.

Yüksek gerilim direnci elde etmek için kullanılan ikinci bir yöntem ise belirli direnç değerine sahip Ni-Cr tel kullanmaktır. İstenilen direnç değerinin elde edilebilmesi için belirli öz dirence sahip telden uzun ölçülerde kullanmak gerekebilir. Metrelerce uzunluktaki telin sarılarak bir muhafaza içine yerleştirilmesi de oldukça zor bir işlemdir. Ayrıca eğrilik yarıçapının küçük olmasının doğuracağı sakıncalar, bu yöntemde de söz konusudur. Her iki yöntemle yapılan dirençler, yağ yalıtımlı bir

mahfaza içine alındığında, eğrilik yarıçapı küçük kısımların meydana getirdiği sorunları azaltmak mümkün olabilir. Ancak bu durumda direncin içine yerleştirildiği mahfazanın sızdırmazlık sorunu ile karşılaşmak olasıdır. Ek olarak yağ yalıtımlı bir direncin ağırlığı dikkate alındığında laboratuvar ortamında kullanımı zor olabilir. Benzer olarak her iki yöntemle elde edilen dirençlerin endüktif ve kapasitif bileşenlerinin göz ardı edilemeyecek biçimde ortaya çıkması söz konusu olabilir.

Yukarı da açıklanan nedenlerden dolayı deney gerilimi seviyesinde kısmi boşalma oluşturmeyen homojen yapıya sahip sıvı direnç yapım yöntemi geliştirilmiştir. Yöntemin uygulanmasına yönelik ayrıntılar aşağıda ele alınmıştır.

#### 6.1.2.1. Sıvı direnç tasarımı

Temel olarak iletken malzemelerin elektriksel direnci,

$$R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (\Omega) \quad (6.6)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (6.6) eşitliğinde,

$\rho$  : iletkenin öz direncini ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ),

$l$  : iletkenin uzunluğunu (cm),

$s$  : iletken kesitini ( $\text{cm}^2$ ),

temsil etmektedir. (6.6) eşitliğindeki ( $\rho$ ) öz direnç ile, ( $\chi$ ) öz iletkenlik arasındaki ilişki,

$$\rho \ (\Omega \cdot \text{cm}) = \frac{1}{\chi} \ (\text{S} / \text{cm})^{-1} \quad (6.7)$$

eşitliği ile ifade edilebilir. (6.7) eşitliğinden yararlanılarak elektriksel direncin öz iletkenliğe bağlı ifadesi,

$$R = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{l}{s} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (6.8)$$

şeklinde elde edilebilir. Belirli iletkenliğe sahip olan bir sıvı (elektrolit), Şekil 6.7'deki gibi boru biçimindeki bir mahfazanın içine doldurulup, uçları metal elektrotlar ile kapatılarak, sıvı direnç elde edilebilir. Bu nedenle (6.8) eşitliğinin sıvı malzeme ile yapılan bir direnç için de kullanılması mümkündür. Elektrolit kullanılarak gerçekleştirilecek bir direnç için (6.8) eşitliğindeki bileşenler,

$\chi$  : sıvının öz iletkenliği (S /cm),

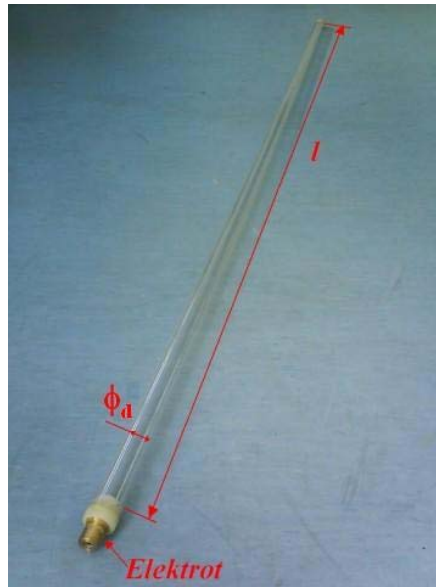
$l$  : elektrotlar arasındaki uzaklık (cm),

$s$  : sıvının yerleştirildiği boru biçimindeki mahfazanın iç kesiti (cm<sup>2</sup>),

şeklinde kabul edilebilir. Şekil 6.7'de gösterilen mahfazanın ( $s$ ) iç kesitini,

$$s = \pi \cdot \left( \frac{\phi_d}{2} \right)^2 \quad (6.9)$$

eşitliği ile belirlemek mümkündür. (6.9) eşitliğindeki  $\phi_d$  ifadesi mahfazanın iç çapını simgelemektedir.



Şekil 6.7: Sıvı direnç yapımında kullanılan boru biçimindeki saydam PVC mahfaza.

(6.8) eşitliğine göre, elektrolitin (sıvının) ( $\chi$ ) öz iletkenliği değiştirilerek istenilen değerlerde sıvı direnç elde etmek mümkündür. Söz konusu elektrolitin hazırlanmasında tuz ve saf su çözeltileri tercih edilebilir. Saf su ve tuzdan oluşan çözeltilerde öz iletkenlik, çözeltinin molar derişimine (molarite) bağlıdır. Çözeltinin molar derişimi kullanılan tuz ve saf su oranına bağlı olarak değişir. Çalışmada iletkenliği sağlaması için  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (bakır (II) sülfat penta hidrat) tuzu tercih edilmiştir.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzu ve saf su kullanılarak hazırlanan çözeltinin molaritesi,

$$n_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} = \frac{m}{M_{A(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}} \quad (6.10)$$

$$M_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} = \frac{n_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}}{V_d} \quad (6.11)$$

eşitlikleri ile tanımlanabilir. (6.10) ve (6.11) eşitliklerinde,

$n_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}$  : çözünen  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzunun mol sayısını (mol),

$M_{A(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}$  :  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzunun molekül kütlesini (249,69 g/mol),

$m$  :  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzunun kütlesini (miktarını) (g),

$M_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})}$  : çözeltinin molar derişimini (Molar = mol/L),

$V_d$  : çözeltinin hacmini (litre),

temsil etmektedir.

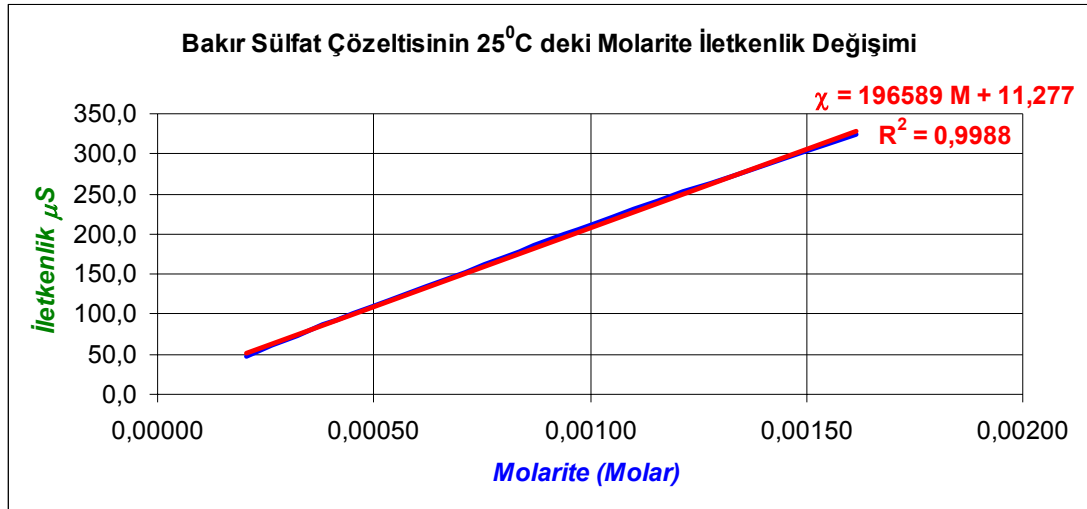
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin molar derişimi ve öz iletkenliği arasındaki bu ilişkiyi belirlemek için değişik molar derişimlerde on farklı  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltiler hazırlanırken kullanılan saf su şebeke suyundan, saflaştırma (distillation) yöntemi ile elde edilmiştir. İşlem sonucunda elde edilen saf suyun  $25^\circ\text{C}$  deki öz iletkenliği  $2,4 \mu\text{S}/\text{cm}$  olarak ölçülmüştür. Değişik molar derişimlerde hazırlanan on farklı  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin iletkenlikleri ölçülmüştür. (Öz iletkenlik ölçümleri, Lovibond Senso Direct Con 200 Conductivity Meter ile gerçekleştirilmiştir). Elde edilen veriler yardımıyla molariteye bağlı iletkenlik



değişimini gösteren, Şekil 6.8'deki grafik elde edilmiştir. Grafik incelendiğinde eğrinin değişiminin yaklaşık doğrusal olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu bu grafik, eğri uydurma (regresyon) yöntemi ile tam doğrusal hale getirilmiş ve denklemi belirlenmiştir. Şekil 6.8'de görülen grafik gerçek değerlere ve eğri uydurma yöntemine bağlı olarak elde edilen her iki eğriyi de içermektedir.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin molaritesi ile  $25^\circ\text{C}$ 'deki iletkenliği arasındaki bağıntı,

$$\chi = 196589 \cdot M + 11,277 \quad (6.12)$$

eşitliğindeki gibi belirlenmiştir. Bu eşitlikte M, çözeltinin molaritesini ifade etmektedir. Belirli değere sahip bir sıvı direnç elde etmek için kullanılması gereken  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzu ve saf su miktarlarının (6.8), (6.10), (6.11) ve (6.12) eşitlikleri yardımıyla bulunması mümkündür.



Şekil 6.8: Bakır sülfat çözeltisinin  $25^\circ\text{C}$  deki molariteye bağlı iletkenlik değişimi.

Sıvı direncin elektrotlarının yapımında kullanılması gereken metalin cinsi seçilen çözeltiliye bağlıdır. Çünkü seçilen çözelti ile elektrotlar tepkimeye girmemelidir. Çözelti ile elektrotlar arasında herhangi bir tepkime olması durumunda çözeltinin iletkenliği değişebileceğinden tasarlanan direncin değeri, kısa bir süre içinde önemli ölçüde değişebilir. Ayrıca elektrotlar korozyon nedeni ile zamanla aşınarak bozulmaya uğrayabilir.  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ve saf su kullanılarak hazırlanan çözeltiler için bakır ve bakır alaşımli pirinç, bronz gibi metallerin seçilmesi gerektiği,



tepkime denklemi ile anlaşılabilir. (6.13) tepkime denklemine göre,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi ile bakır elementinin tepkimeye girebilmesi için gerekli olan elektron alışverişinin gerçekleşmediği açıktır [95,96].

#### 6.1.2.2. Sıvı direnç uygulaması

Kısmi boşalma ölçümlerinde kullanılmak üzere yaklaşık 300 k $\Omega$  değerinde sıvı yüksek gerilim direnci yapılmıştır. Sıvı direncin yapımında Şekil 6.7’de görülen ve 10 mm iç yarıçapında olan boru biçimindeki saydam PVC mahfaza kullanılmıştır. Sıvının yerleştirildiği mahfazanın saydam olması, elektrolitin çalışma sırasındaki fiziksel davranışlarını incelemeye olanak tanımaktadır.

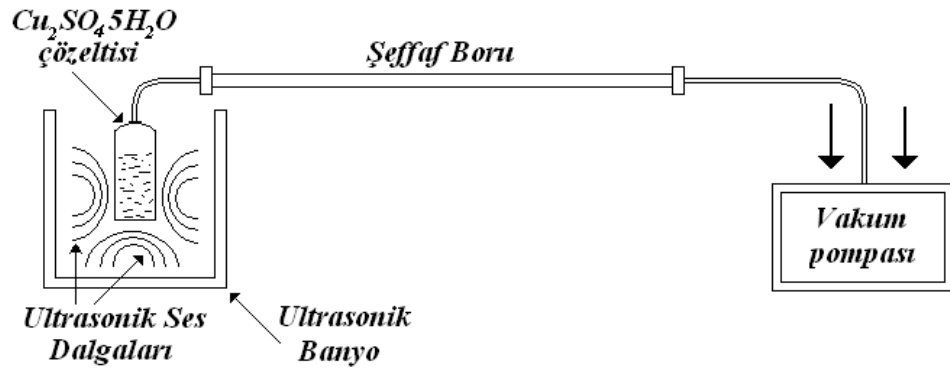
Yüksek gerilim direncinin bağlantı elektrotlarını oluşturan bakır elemanların montajından sonra PVC mahfazanın kullanılabilir uzunluğu 197,7 cm olarak belirlenmiştir. Yaklaşık 210  $\mu\text{S}/\text{cm}$  öz iletkenliğe sahip bir çözelti kullanıldığında elde edilecek olan direnç değeri (6.8) eşitliği ile,

$$R = \frac{1}{\chi} \cdot \frac{1}{s} = \frac{1}{210} \cdot \frac{197,7}{(\pi \cdot 1^2)} \cdot 10^3 \cong 300 \text{ k}\Omega$$

olarak belirlenmiştir. Öz iletkenliği yaklaşık 210  $\mu\text{S}/\text{cm}$  olan bir çözeltinin molaritesi, (6.12) eşitliği ile  $1,0108551 \times 10^{-3}$  molar olarak elde edilmiştir. Bu molariteye sahip bir çözelti hazırlamak için 1,5 litre saf su kullanılmıştır. Bu durumda (6.10) ve (6.11) eşitlikleri yardımıyla kullanılması gereken  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzunun ağırlığı  $n_{(\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O})} = 378,6 \text{ mg}$  olarak bulunmuştur.

Hesaplanan miktarlarda  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzu ve saf su karıştırılarak sıvı direnç için çözelti hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti Şekil 6.9’da görülen ultrasonik banyo ve vakum pompası sisteminde saydam PVC mahfaza içine doldurulmuştur. Ultrasonik banyo,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi hazırlanırken, çözelti içinde çözünen hava moleküllerini ortamdan uzaklaştırmak için kullanılmıştır. Söz konusu hava

moleküllerinin tamamının çıplak gözle görülebilmesi mümkün değildir. Fakat bu hava moleküllerinin zamanla birleşerek gözle görülen hava kabarcıklarını oluşturması beklenir. Direnç içinde bulunabilecek hava kabarcıkları, yüksek gerilim altında çalışma sırasında farklı zorlanmalara neden olabileceğinden dolayı oluşumları engellenmelidir. Bu amaçla ultrasonik banyo içine yerleştirilen  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisine, 36 kHz frekansa sahip ses dalgaları uygulanmıştır. Ultrasonik ses dalgaları  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi içinde çözünmüş hava moleküllerine çarparak kinetik enerjilerini artırır, böylece çözelti içinde çözünmüş olan havanın difüzyonu kolaylaştırılmış olur. Sisteme ultrasonik dalgalar ile eş zamanlı uygulanan vakum etkisiyle de sistemde açığa çıkan hava kabarcıklarının ortamdaki uzaklaştırılması sağlanmıştır.



Şekil 6.9:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  çözeltisinin saydam mahfaza içine yerleştirilmesi.

Yukarıda anlatılan yöntem ile 14 mm çapında PVC ve 17 mm çapında akrilik malzemeler kullanılarak iki farklı sıvı direnç daha yapılmıştır. Bu dirençlerin değerleri de yaklaşık 300 k $\Omega$  olacak biçimde tasarlanmıştır. Uygulama sonucunda hedeflenen direnç değerleri,  $\pm$  % 3 hata ile elde edilebilmiştir. Yapılan sıvı dirençlere doğru gerilim uygulandığında zamanla değerlerinin değiştiği görülmüştür. Bunun nedeni, doğru gerilim altında  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  tuzu moleküllerinin çözelti içinde kutuplanarak madde kaybına neden olmasıdır. Fakat alternatif gerilim için böyle bir etki söz konusu değildir. Sıvı direnç tamamen homojen bir çözeltiden oluştuğu için endüktif etki ortaya çıkartabilecek herhangi bir özelliği yoktur. Aynı şekilde elektrotları arasındaki sıvının belirli bir iletkenliğe sahip olması kapasitif etkisini de minimize etmektedir. Yapımı tamamlanan sıvı dirençlerin AREVA ve TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Laboratuvarları'nda gerçekleştirilen KB ölçümlerinde, 65 kV etkin değere kadar herhangi bir KB oluşturmadığı saptanmıştır [97-99].

### 6.1.3. 100 kV ohmik gerilim bölücü yapımı

Yüksek gerilim deneyleri sırasında deney gerilimi seviyesinin doğru olarak belirlenebilmesi, deneylerin duyarlılığı açısından çok önemlidir. Ölçüm işlemi sırasında, deney devresinin karakteristiğinin değişmemesi ve ölçüm belirsizliğinin düşük olmasına dikkat edilmelidir. Yüksek gerilimlerin ölçülmesi alçak gerilimlere göre daha zordur. Ölçülmek istenen yüksek gerilimin genliği ölçülebilir bir alçak gerilim seviyesine indirgendikten sonra veya ölçü küreleri ya da elektrostatik yöntemler yardımıyla, belirlenebilmektedir. Yüksek gerilimlerin ölçülebilecek alçak gerilim seviyesine indirgenerek ölçülmesi en sık tercih edilen ölçme yöntemidir. Bu yöntem, genelde gerilim ölçme transformatörleri ya da gerilim bölücüler yardımıyla uygulanmaktadır. Gerilim ölçme transformatörlerinin endüktif yapısı dikkate alındığında doğru gerilimde kullanılması mümkün değildir. Benzer olarak darbe gerilimlerine vereceği tepkiler de ölçme sırasında sorunlara neden olabilir. Bu bağlamda ölçü transformatörlerinin yalnız alternatif gerilim deneylerinde kullanılması daha doğrudur. Fakat transformatörlerin endüktif karakterleri, yüksek ve düşük frekanslı deney gerilimlerinde sorunlara neden olabileceğinden dolayı, farklı frekanslar için farklı tasarımlar gerektirebilirler. Bu gibi nedenlerden dolayı yüksek gerilim deneylerinde genel olarak gerilim bölücüler tercih edilmektedir.

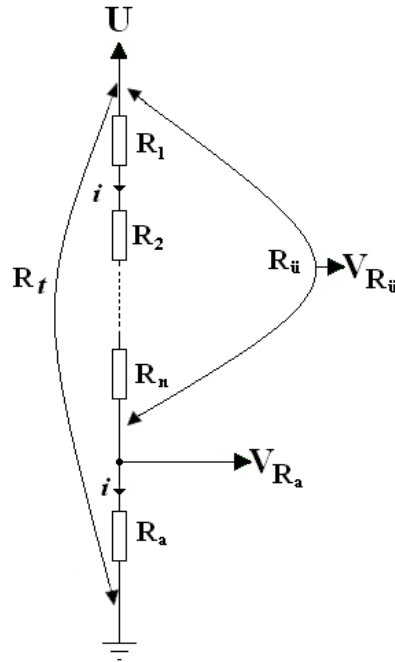
Gerilim bölücüler adından da anlaşıldığı gibi gerilim bölme kuralına göre çalışmaktadırlar. Kapasitif ve ohmik gerilim bölücüler olmak üzere iki sınıfa ayrılabilirler. Her iki gerilim bölücü tipinde de düşük çalışma gerilimine sahip kapasite veya dirençlerin seri bağlanması ile yüksek gerilimde çalışabilen kapasite veya direnç grupları elde etme yöntemi kullanılabilir. Ölçülmek istenen yüksek gerilim, bölücünün tümüne uygulanır. Bölücünün bütünüyle arasında belirli bir oran olan (dönüştürme oranı) ölçme kısmından, (yüksek gerilimle orantılı) alçak gerilim ölçülür. Belirlenen alçak gerilim dönüştürme oranıyla çarpılarak, ölçülmek istenen yüksek gerilim değeri elde edilebilir.

Kısmi boşalma deneylerinde kullanılan gerilim bölücülerde aranan temel özellikler, deneyler sırasında kısmi boşalma oluşturmamaları, devreyi fazla akım çekerek yüklememeleri, dönüştürme oranlarının kararlı olmasıdır. Bu nedenle gerilim

bölücüler tasarlanırken ohmik gerilim bölücülerin çalıştıkları gerilim seviyesine göre büyük dirence, kapasitif gerilim bölücülerin de düşük kapasiteye sahip olmalarına dikkat etmek gerekmektedir. Ek olarak birbirine bağlanan direnç veya kapasitelerin bağlantı noktalarında eğrilik yarıçapı küçük bölgelerin bulunmaması kısmi boşalma oluşturmamaları açısından önemlidir. Harmonik bileşenlere sahip yüksek deney gerilimleri ile yapılan KB ölçümlerinde, kapasitif gerilim bölücülerin ölçme sistemini fazla yükleyebileceği düşünülmüştür. Bu nedenle deneysel olarak yapılan faz çözünümlü KB ölçümleri sırasında gerilim bilgisi tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen ohmik bir gerilim bölücü yardımıyla elde edilmiştir. Ohmik gerilim bölücüyü ilişkin ayrıntılara aşağıda değinilmiştir.

### 6.1.3.1. 100 kV ohmik gerilim bölücü tasarımı

Ohmik gerilim bölücülerin alternatif, doğru ve darbe gerilimlerinin ölçülmesinde kullanılması mümkündür. Ohmik gerilim bölücülerin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi ölçme sistemini fazla akım çekerek yüklememesidir. Bu nedenle ohmik gerilim bölücülerin yüksek dirence sahip olmalarında fayda vardır. Ohmik gerilim bölücülerin çalışma prensibi Şekil 6.10'daki eşdeğer devre yardımıyla açıklanabilir.



Şekil 6.10: Ohmik gerilim bölücü eşdeğer devresi.

Şekil 6.10'daki sistemden geçen (i) akımı,

$$i = \frac{U}{R_{\bar{u}} + R_a} = \frac{U}{R_t} \quad (6.14)$$

ifadesi ile bulunabilir. (6.14) eşitliğinde,

$R_{\bar{u}}$  : yüksek gerilim kısmındaki toplam direnci ( $R_1 + R_2 + \dots + R_n$ ),

$R_a$  : alçak gerilim kısmındaki direnci (ölçme kısmı direnci),

$R_t$  : gerilim bölücünün toplam direncini ( $R_t = R_a + R_{\bar{u}}$ ),

$U$  : gerilim bölücüye uygulanan yüksek gerilimi,

ifade etmektedir. Gerilim bölücünün ( $D_o$ ) dönüştürme oranını,

$$D_o = \frac{V_{R_a}}{U} = \frac{R_a}{R_{\bar{u}} + R_a} = \frac{R_a}{R_t} \quad (6.15)$$

eşitliğindeki gibi ifade etmek mümkündür.

Yapımı gerçekleştirilen 100 kV gerilim bölücünün ölçme sistemini fazla yüklememesi için 100 kV gerilim altında en fazla 1 mA akım çekmesi öngörülmüştür. Bu durumda 100 kV gerilim bölücünün toplam direnci (6.14) eşitliği yardımıyla,

$$R_t = \frac{100.000 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = 100 \times 10^6 \Omega = 100 \text{ M}\Omega$$

olarak bulunmuştur. 100 kV gerilim bölücünün yüksek gerilim kısmının ( $R_{\bar{u}}$ ) direncinin 99.900.000  $\Omega$  ve alçak gerilim kısmının ( $R_a$ ) direncinin 100.000  $\Omega$  şeklinde olması uygun görülmüştür. 100 kV gerilim altında bölücünün  $V_{R_a}$  ölçü ucundaki gerilim 100 V olarak elde edilir. Bu durumda gerilim bölücünün dönüştürme oranı (6.15) eşitliği dikkate alındığında,

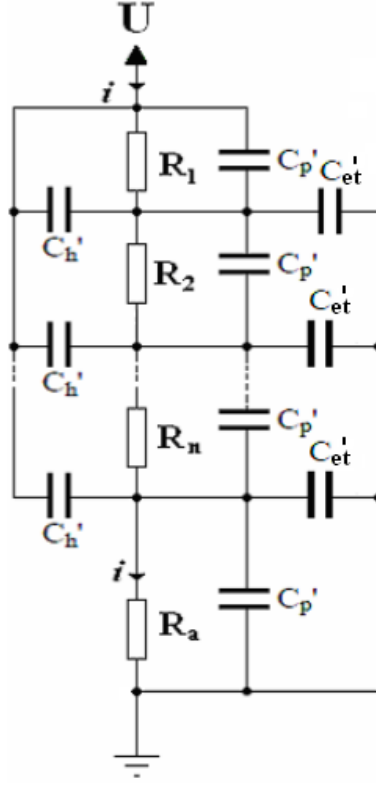
$$D_o = \frac{V_{R_a}}{U} = \frac{100 \text{ V}}{100.000 \text{ V}} = \frac{100 \text{ k}\Omega}{99.900 \text{ k}\Omega + 100 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{1000}$$

olarak belirlenir.  $R_{\bar{u}}$  direncini oluşturan direnç sayısının belirlenmesi  $V_{R_{\bar{u}}}$  gerilimine ve dirençlerden geçen (i) akımına bağlı olarak bulunur. Gerilim bölücünün  $R_{\bar{u}}$  kısmını oluşturan seri dirençlerin üzerine düşen toplam  $V_{R_{\bar{u}}}$  gerilimi  $100.000 - 100 = 999.900 \text{ V}$  'dur.  $R_1, R_2, \dots R_n$  dirençlerinin her birisinin  $470 \text{ k}\Omega$  olarak alınması uygun görülmüştür. Bu durumda yaklaşık 212 adet  $470 \text{ k}\Omega$  direnç seri bağlanarak  $99.900 \text{ k}\Omega$  civarında bir direnç değeri elde edilebilecektir. Son olarak  $R_a$  direncinin  $100 \text{ k}\Omega$  seçilmesi ile toplam gerilim bölücü direnci  $100 \text{ M}\Omega$  olarak elde edilebilecektir. 212 adet direncin her biri üzerine düşen gerilim yaklaşık  $471 \text{ V}$  civarında olacaktır. İçlerinden geçen  $1 \text{ mA}$ 'lik akım dikkate alındığında her bir direncin üzerinde harcanan güç  $1 \text{ mA} \times 471 \text{ V} = 0,471 \text{ W}$  olacaktır. Bu durumda  $470 \text{ k}\Omega$ 'luk her bir direncin  $2 \text{ W}$  gücünde seçilmesi uygun bulunmuştur. Ayrıca  $2 \text{ W}$  gücündeki dirençlerin bağlantı (uç) kısımları arasındaki mesafenin  $471 \text{ V}$  gerilim seviyesine de uygun olduğuna karar verilmiştir. Gerilim bölücünün yapımında  $\pm \% 5$  toleransa sahip karbon dirençler kullanılmıştır.

### 6.1.3.2. 100 kV ohmik gerilim bölücü uygulaması

Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesinde kullanılan ohmik gerilim bölücülerin ölçüm duyarlılığı açısından kısmi boşalmaya ve gürültüye neden olmaması gerekmektedir. Aynı zamanda gerilim bölücülerin yüksek gerilim altında çalışırken dönüştürme oranının sabit kalması da önemli bir husustur. Dönüştürme oranı kaçak kapasite, ortam sıcaklığı, gerilim seviyesi, frekans vb. bileşenlere bağlı olarak değişebilir. Gerilim bölücülerin tasarımı ve yapımı, bu bileşenlerin, ölçüm sonuçlarına etkisini azaltacak şekilde gerçekleştirilmelidir.

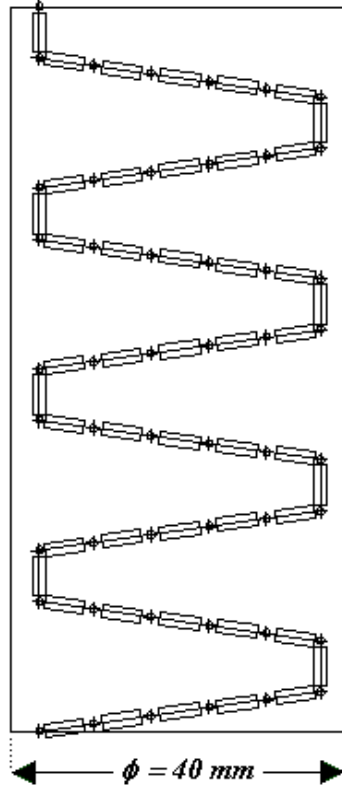
Dönüştürme oranını etkileyen kaçak kapasiteler, bölücüdeki her bir dirence paralel kaçak kapasite ( $C_p'$ ), her bir potansiyel noktasından yüksek gerilim elektrotuna kaçak kapasite ( $C_h'$ ) ve her bir potansiyel noktasından toprağa kaçak kapasite ( $C_{et}'$ ) şeklinde ifade edilebilir [100]. Söz konusu kaçak kapasiteler Şekil 6.11'de gösterilmiştir.



Şekil 6.11: Dönüştürme oranını etkileyen kaçak kapasiteler [100].

Kaçak kapasitelerin dönüştürme oranını en az biçimde etkilemesini sağlamak için gerilim bölücüyü oluşturan dirençlerin yerleşim şekli çok önemlidir. Ayrıca söz konusu dirençlerin yerleşiminde, dirençlerin birbirine bakan noktalarındaki potansiyel farkının herhangi bir boşalmaya neden olmamasına dikkat edilmelidir. Bu nedenle gerilim bölücüyü oluşturan dirençlerin yerleşimi için 40 mm çapında, yalıtkan boru şeklinde bir yapı kullanılmıştır. Dirençlerin yalıtkan boru üzerine yerleşimi Şekil 6.12'deki gibi gerçekleştirilmiştir. Dirençlerin yerleşiminde V biçiminde bir yapı izlenmiştir. Böylece potansiyel farkının büyük olduğu bağlantı noktaları birbirinden uzak biçimde konumlandırılarak kısmi boşalma oluşturma riskleri azaltılmıştır. Dirençlerin birbirine bağlantısı lehimlenerek sağlanmıştır. Lehimleme işlemleri sırasında eğrilik yarıçapı küçük, sivri uçların oluşmasından kaçınılmıştır. Montajı tamamlanan gerilim bölücü basınca dayanıklı ve boru şeklinde hareketli plastik bir gövde içine yerleştirilmiştir.





Şekil 6.12: 100 kV ohmik gerilim bölücüyü oluşturan dirençlerin yerleşim şekli.

Çalışma sırasında gerilim bölücünün eğrilik yarıçapı küçük kısımlarının boşalmalara neden olmaması için gerilim bölücü yağ içine alınmasına karar verilmiştir. Bu nedenle gerilim bölücünün içine yerleştirildiği gövdenin vakum ve yağ sızdırmazlığı özel bir silikon yardımıyla sağlanmıştır. Gerilim bölücünün içinde bulunduğu gövdeye yağ doldurulmadan önce, gövde içindeki hava vakum yardımıyla alınmıştır. Sonra tekrar vakum altında gerilim bölücüyü yağ doldurulmuştur. Gerilim bölücünün üst kapağı ile yağ seviyesi arasında yaklaşık 10 cm genleşme boşluğu bırakılmıştır. Böylece herhangi bir arıza sonucu yağın açığa çıkarabileceği gazın, iç basıncı arttırarak gövdeyi patlatma riski azaltılmıştır. Ek güvenlik önlemi olarak da gerilim bölücünün üst kısmına bir vakum ölçer yerleştirilmiştir. Gerilim bölücünün yağ değişimini kolaylaştırmak için alt kısmına bir yağ tahliye vanası yerleştirilmiştir. Böylelikle gerilim bölücünün yağ değişimi 15 dk gibi kısa bir sürede gerçekleştirilebilmektedir.

Şekil 6.13’de bitmiş hali görülen gerilim bölücünün deneyleri Kocaeli Üniversitesi Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda yapılmıştır. Gerilim bölücü AA 100 kV etkin (50 Hz) gerilim altında 60 dakika boyunca bekletildiğinde herhangi sorunla

karşılaşılmanıştır. Gerilim bölücünün dönüştürme oranı, başka bir gerilim ölçme transformatörü ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Karşılaştırmada kullanılan gerilim ölçme transformatörünün dönüştürme oranı 34,5 kV / 100 V ve doğruluk sınıfı 0,5'dir. Gerilim bölücünün dönüştürme oranı 40 kV'a kadar 1/1017 olarak belirlenmiştir. Geliştirilen kısmi boşalma ölçme sistemi yardımıyla yapılan deneylerde AA 50 kV etkin gerilim seviyelerinde herhangi bir KB oluşturmadığı belirlenmiştir.

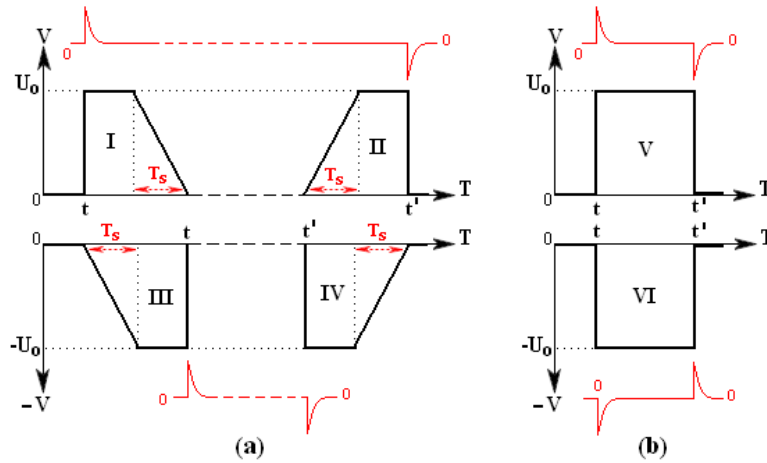


Şekil 6.13: Yapımı gerçekleştirilen 100 kV ohmik gerilim bölücü.

#### **6.1.4. Kısmi boşalma kalibratörü yapımı**

Kısmi boşalma ölçüm sistemlerinin ölçeklenmesi genel olarak KB kalibratörleri yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bilinen bir  $q_0$  yükünün ifadesi önceki bölümde (4.24) eşitliği ile verilmiştir. (4.24) eşitliğine bağlı olarak  $q_0$  yükü üretilirken  $U_0$  gerilimi, basamak gerilimi üretici (BGÜ) ile sağlanır. Basamak gerilimi Şekil

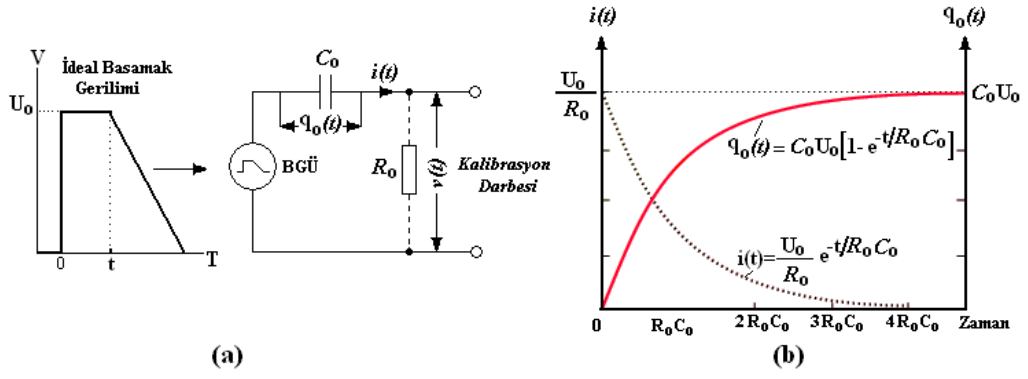
6.14'deki gibi tek ya da çift yönlü olarak üretilebilir. Eğer kalibrasyon darbeleri, tek yönlü olarak üretilmek isteniyorsa basamak gerilimi Şekil 6.14.(a)'daki gibi tek yönlü (yükselen veya düşen kenarda), çift yönlü üretilmek isteniyorsa basamak gerilimi Şekil 6.14.(b)'deki gibi çift yönlü (kare dalga) olarak üretilmelidir. Gerçeğe yakın KB darbelerinin üretilebilmesi, ancak ideal (yükselme veya düşme süresi sıfır olan) basamak gerilimleri ile mümkündür. Uygulamalarda ideal basamak gerilimi üretmek mümkün değildir. Fakat basamak geriliminin  $10.U_0$ 'dan  $90.U_0$ 'a yükselme süresinin 60 ns'den kısa olması sağlanarak, ideal durumdakiyle özdeş miktarda yük üretilmesi mümkün olabilir. Tek yönlü basamak gerilimleri üretilirken basamak gerilimin başlangıç durumuna yumuşak bir şekilde (daha uzun sürede) geri dönmesi sağlanmalıdır ( $T_s = 10 - 50 \mu s$ ). Aksi takdirde istenmeyen darbelerle karşılaşılabilmesi mümkündür.



Şekil 6.14: a) Tek yönlü, b) Çift yönlü basamak gerilimlerine bağlı kalibrasyon darbeleri.

Kalibrasyon darbeleri,  $U_0$  basamak geriliminin, (kapasitesi bilinen) seri bir  $C_0$  kondansatörü üzerinden deney cisminin uçlarına (ölçme sistemine) uygulanmasıyla üretilir.  $C_0$  kondansatörü  $U_0$  gerilimi ile dolarken, sistemden  $q_0$  yükünün geçmesine neden olur.  $q_0$  yükünün neden olduğu kısa süreli akım darbeleri yardımıyla da KB ölçüm sisteminin ölçeklenmesi (kalibrasyonu) gerçekleştirilir.

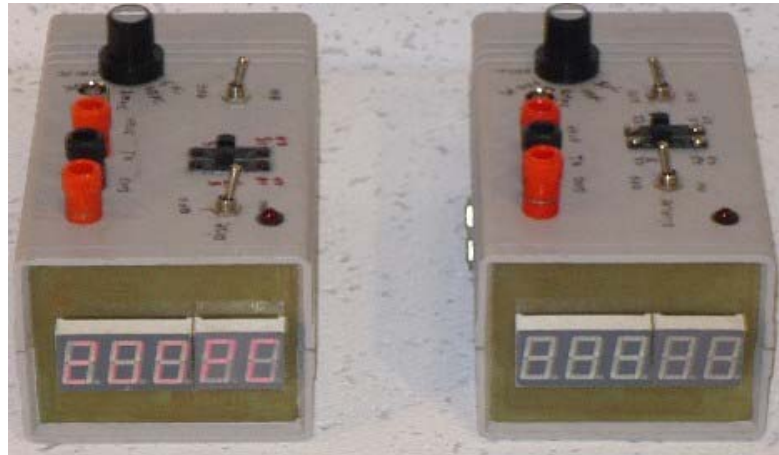
Şekil 6.15.(a)'da kalibrasyon darbelerinin üretilmesinde kullanılan eşdeğer devre görülmektedir. Basamak gerilimi üreticinin ürettiği tek yönlü basamak geriliminin ideal olduğu ve kalibrasyon darbelerinin bir  $R_0$  direncine uygulandığı kabul edilirse, sistemden geçen akım ve yük değişimleri Şekil 6.15.(b)'deki gibi olacaktır.



Şekil 6.15: a) Kalibrasyon darbesinin üretilmesi, b) Akım ve yük değişimleri.

Kalibrasyon darbelerinin üretilmesinde kullanılan  $C_0$  kondansatörünün, yüksek frekanslı işaretlerde kullanılabilen, düşük gürültülü ve kararlı bir kapasiteye sahip olmasına özen gösterilmelidir. Deneysel çalışmalarda kullanılan  $C_0$  kondansatörleri bu özelliklere sahip olup, kapasiteleri 100 pF değerinde ve toleransı  $\pm \% 1$ 'dir.  $C_0$  kondansatörü seçilirken 50 adet kondansatör içinden kapasitesi tam 100 pF olan iki kondansatör seçilmiştir.

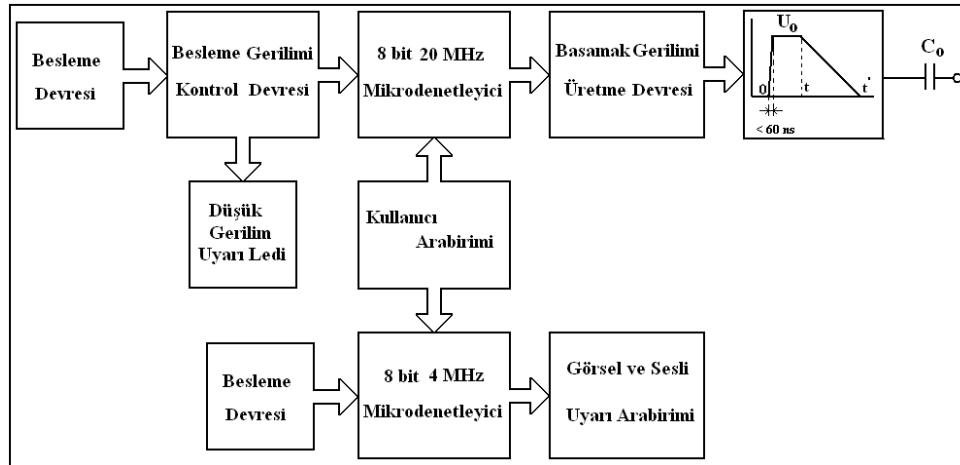
Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilen kalibratörler Şekil 6.16'da görülmektedir. Her iki kalibratör de çıkışında 5-10-20-50-100-200 pC kalibrasyon darbeleri üretebilmektedir. Çıkıştaki kalibrasyon darbelerinin genliği kademe anahtarı yardımıyla değiştirilebilmektedir. Kalibratörlerin ön kısmında görülen 7 parçalı led göstergeler yardımıyla kalibrasyon darbelerinin genliği uzaktan takip edilebilmektedir. Bu özellik, büyük deney alanlarında yapılan çalışmalarda üstünlük sağlamaktadır. İsteğe bağlı olarak bu göstergelerin kapatılması mümkündür.



Şekil 6.16: Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere geliştirilen KB kalibratörleri.

Kalibratörler, açık bırakılmayı ya da yüksek gerilim devresine bağlı unutulmayı engellemek için, sesli ikaz sistemiyle donatılmışlardır. Periyodik olarak çıkardıkları “bip” sesi ile kullanıcıyı sürekli olarak ikaz etmektedirler.

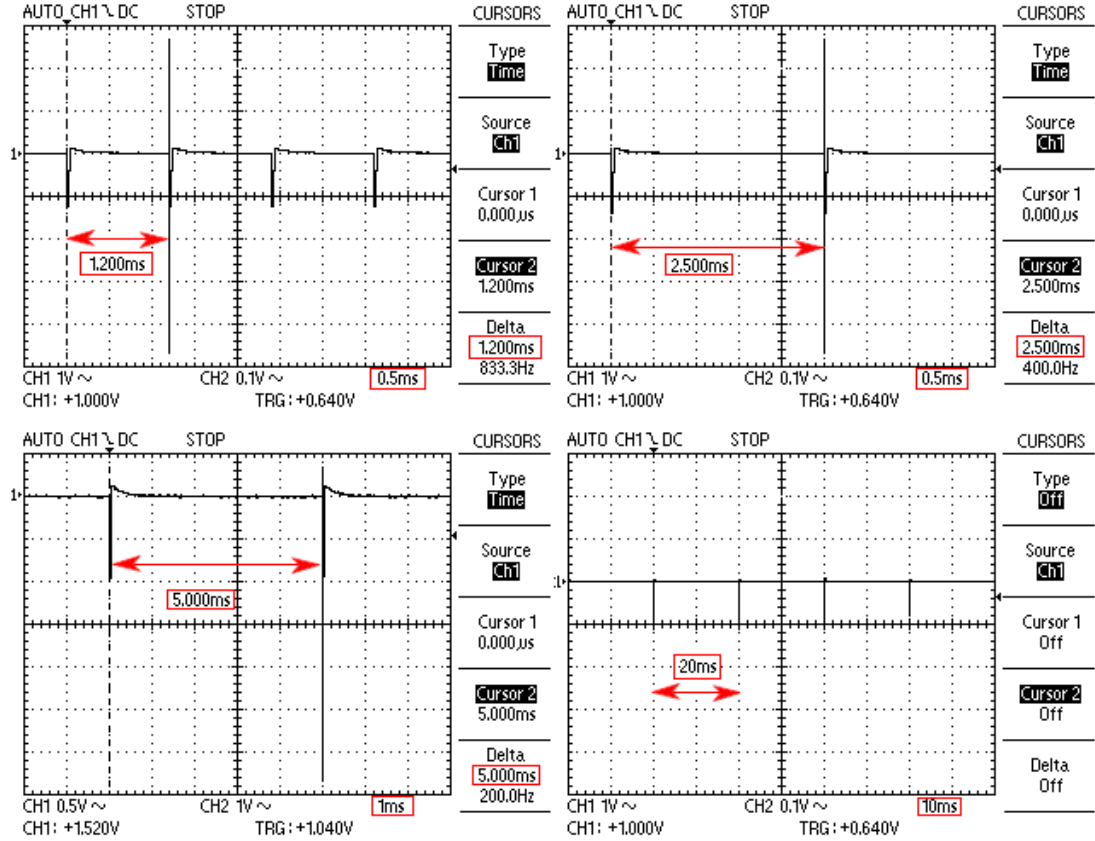
Geliştirilen KB kalibratörüne ilişkin blok şema Şekil 6.17’de verilmiştir. Şekil 6.17’den de anlaşıldığı gibi kalibratör iki temel kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda basamak geriliminin üretimi, ikinci kısımda çevresel arabirimlerin kontrolü yapılmaktadır. Basamak gerilimi üretme işlemi 8 bit veri yoluna ve 20 MHz frekansa sahip mikrodenetleyici ile kontrol edilmektedir. 20 MHz mikrodenetleyici, kullanıcı arabiriminden (darbe sıklığı ve genliği kademe anahtarlarından) aldığı komuta bağlı olarak basamak gerilimi üretme devresini sürmektedir. Böylece kalibrasyon darbelerinin sıklığı ve genliği kullanıcı isteğine göre ayarlanabilmektedir.



Şekil 6.17: Geliştirilen KB kalibratörünün blok şeması.

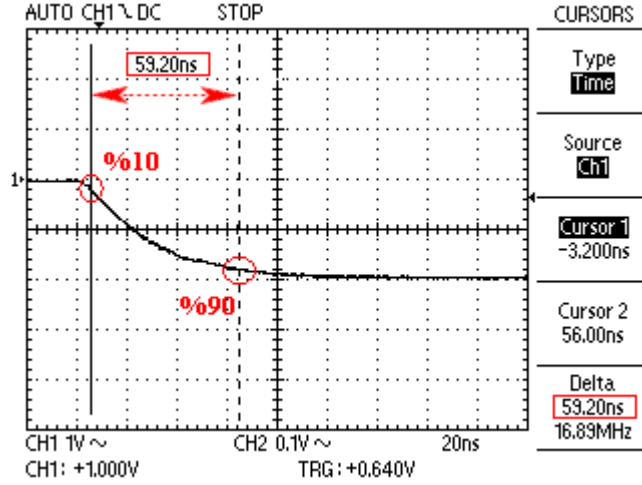
Geliştirilen kalibratörlerin, ürettiği basamak gerilimleri Şekil 6.14.(a)’daki IV numaralı dalga şekline benzemektedir. Kalibratörlerin basamak gerilimleri ve kalibrasyon darbesi üretme sıklığı (N) birinci kalibratör için 1,2 ms – 2,5 ms - 5 ms - 20 ms ve ikinci kalibratör için 5 ms - 10 ms - 15 ms - 20 ms olacak biçimde ayarlanmıştır. Kalibratörlerin darbe sıklığı, mikrodenetleyici yazılımı ile güncellenebilecek biçimde tasarlanmıştır. Böylece istenilen darbe sıklığını elde etmek için, kalibratörler üzerinde donanımsal bir değişiklik yapma zorunluluğu ortadan kaldırılmıştır. Mikrodenetleyicinin işlem döngü süresi, hassas bir kristal osilatör yardımıyla kontrol edildiği için darbeler arasındaki süre kesinlikle değişmemektedir. Kalibratörlerin ürettiği 1,2 ms – 2,5 ms - 5 ms ve 20 ms

sıklığındaki basamak gerilimleri Şekil 6.18’de görülmektedir. Üretilen basamak gerilimleri kalibratörler üzerindeki BNC soketler yardımıyla dışarıya alınabilmektedir. Böylece farklı değerdeki  $C_0$  kondansatörleri ile ölçekleme yapılabilmesine olanak sağlanmıştır.



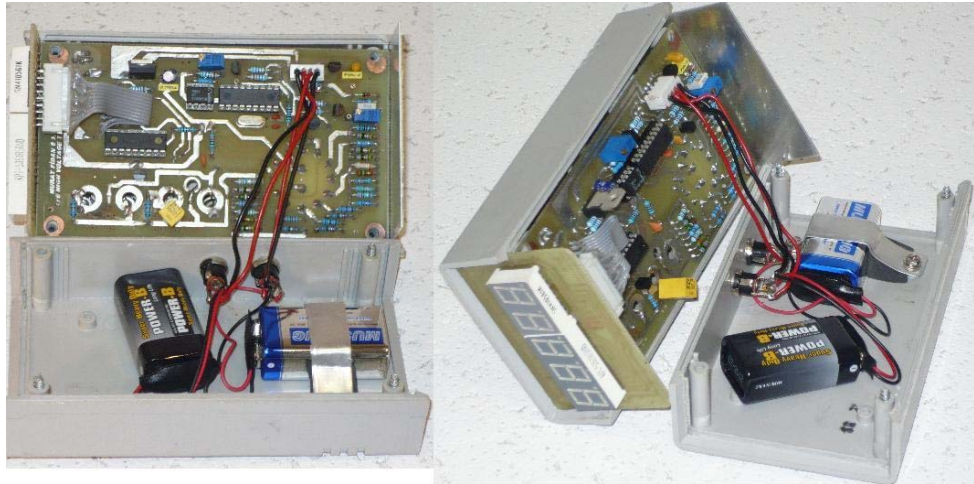
Şekil 6.18: Kalibratörlerin ürettiği farklı periyotlardaki bazı basamak gerilimleri.

Kalibratörlerin ürettiği en büyük basamak geriliminin tepe değeri ( $U_0$ ) 2 V’dir. En büyük basamak gerilimi için, % 10. $U_0$ ’dan % 90. $U_0$ ’a yükselme süresi Şekil 6.19’da görüldüğü gibi, 59,2 ns olarak ölçülmüştür. Ölçümün gerçekleştirildiği kademe en büyük basamak gerilimi değeri olduğu için 59,2 ns değeri maksimum yükselme süresi olarak kabul etmek mümkündür. Diğer basamak gerilimi kademeleri 1 V - 500 mV – 200 mV – 100 mV – 50 mV şeklindedir. Basamak geriliminin tepe değeri  $\pm 20$  değiştirilmeye olanak tanıyan biçimde tasarlanmıştır. Bu özellik KB kalibratörüne, herhangi bir nedenle kalibrasyonunun bozulması durumunda, tekrar kalibre edilebilme olanağı sağlamaktadır [75,76,101].



Şekil 6.19: Kalibratörlere ilişkin 2 V basamak gerilimindeki yükselme süresi.

Çevresel arabirimlerin kontrol edildiği ve basamak geriliminin üretildiği devrelerin besleme devreleri birbirinden bağımsızdır. Her iki kısım da 9 V pil ile çalışabilmekte ve şarjlı pil kullanımına olanak tanımaktadır. Şarjlı pil kullanımı durumunda, piller kalibratörlerin yan taraflarındaki soket üzerinden doğrudan şarj edilebilmektedir. Basamak gerilimi üretim kısmının besleme gerilimi seviyesi sürekli kontrol edilmektedir. Pil gerilimi 6 voltun altına düştüğünde kırmızı bir led yardımıyla düşük pil seviyesi uyarısı verilmektedir. Şekil 6.20’de geliştirilen KB kalibratörlerinin iç yapısı görülmektedir.



Şekil 6.20: Geliştirilen KB kalibratörlerinin iç yapısı.

### 6.1.5. Kısmi boşalma ölçü aleti yapımı

Elektriksel kısmi boşalmaların değerlendirilebilmesi için bir büyüklük olarak ifade edilmesi gerekmektedir. Kısmi boşalmaların ifade edilmesinde kullanılan

büyüklikler 2. Bölüm’de verilmiştir. Bu büyüklüklerden, görünen yük KB’ların ifade edilmesinde kullanılan temel büyüklüktür. KB’larla ilişkili diğer büyüklüklerin hepsini görünen yük büyüklüğü esas alınarak türetmek mümkündür. Bu nedenle genel olarak KB ölçüm sistemlerinde, belirli gerilim altında meydana gelen görünen yük değeri ölçümü gerçekleştirilmektedir. KB işaretlerini görünen yük değerine dönüştürmeye ilişkin yöntemlerden birisi Bölüm 4.3’de ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu yöntemle göre, (4.11) eşitliğinden de anlaşıldığı üzere, KB akım darbelerinin integrali alınarak görünen yük değeri elde edilebilir. KB akım darbelerinin yaklaşık integralini (quasi-integration), frekansın sıfır bileşenine (DA) yanıt verebilen bir sistem yardımıyla almak mümkündür. Bant geçiren filtrelerin, yaklaşık integrasyon işlemi için kullanılabilmesi mümkündür. RLC devresi şeklinde bant geçiren filtre olarak tasarlanan ölçü dört uçluları ile KB darbesi akımlarının integrali alınabilir. Bu ölçü dört uçlularının, girişindeki KB darbesi akımına bağlı olarak, çıkışında elde edilen işaretlerin tepe değeri, görünen yük ile orantılıdır.

Deneysel çalışmalarda Haefely firmasının ürettiği Passive Coupling Quadripole Type 565 model pasif tipte ölçü dört uçlusu kullanılmıştır. Ölçü dört uçlusunun çıkışından alınan KB darbelerine ilişkin işaretler  $75 \Omega$  karakteristik empedansa sahip koaksiyel kablo yardımıyla, deneysel çalışmalar için geliştirilen KB ölçü aletine aktarılmaktadır. Analog ve sayısal elektronik devreler yardımıyla işlenen KB işaretleri, görünen yük büyüklüğü olarak, ölçü aletinin ekranından yansıtılmaktadır.

Geliştirilen KB ölçü aleti deney cisminde sürekli olarak meydana gelen en büyük görünen yük değerini ölçebilmektedir. Ölçü aleti doğrudan ölçme yönteminin yanı sıra dengelenmiş devre yöntemi ile de KB ölçümü gerçekleştirebilmektedir. KB ölçü aleti içine yerleştirilen kuru tip şarj edilebilir bataryalar yardımıyla şebeke beslemesine gereksinim duyulmadan yaklaşık bir saat KB ölçümü yapılabilmektedir. Bu özelliği sayesinde KB ölçü aletini mobil olarak saha ölçümlerinde de kullanmak mümkündür. Ayrıca bu özellik ile şebeke ile besleme devresinden gelen bozucu etkiler engellenebilmektedir. Kısmi boşalma ölçü aletinin ön panelinde bulunan göstergeler yardımıyla, batarya şarj durumu kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen KB ölçü aleti Şekil 6.21’de görülmektedir.





Şekil 6.21: Deneysel çalışmalar için geliştirilen KB ölçü aleti.

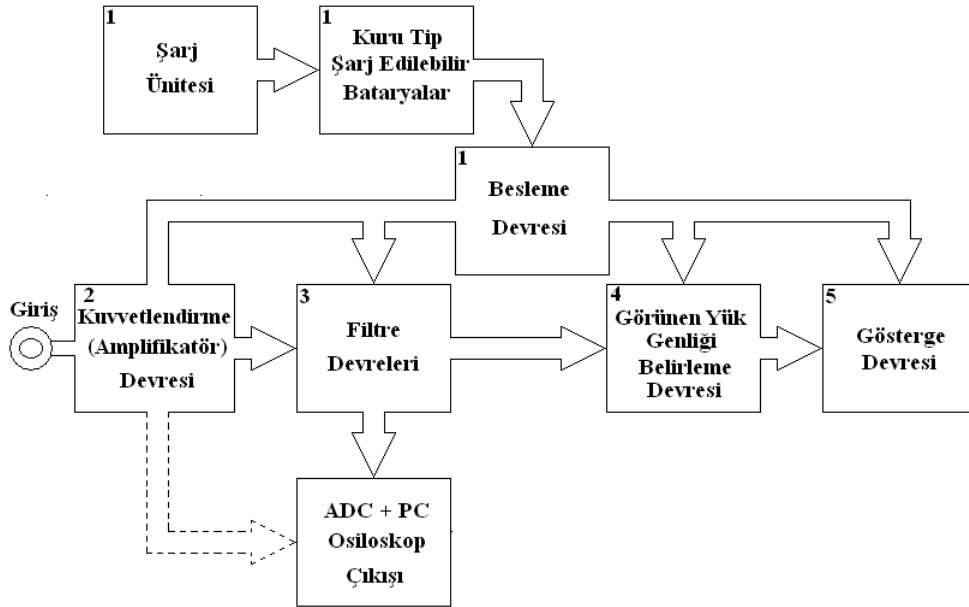
- 1- KB işareti girişleri
- 2- Kazanç ayarı
- 3- Led gösterge (görünen yük)
- 4- Batarya şarj durumu göstergeleri
- 5- Osiloskop veya faz çözünümlü KB yazılımı bağlantısı için PC çıkışı
- 6- Filtre seçimi
- 7- Gösterge ayarı
- 8- Ölçüm aralığı aşım göstergesi
- 9- Ölçme hassasiyet ayarı
- 10- Açma-kapama anahtarı
- 11- Şarj ünitesi

KB ölçü aleti temel olarak beş birimden meydana gelmektedir. Bu birimlere ilişkin blok şeması Şekil 6.22’de görülmektedir.

#### 6.1.5.1. Şarj ünitesi ve besleme devresi

KB ölçü aletinin içindeki tüm devrelerin besleme gerilimleri kuru tip şarj edilebilir bataryalar üzerinden sağlanmaktadır. Şarj edilebilir bataryaların kontrollü biçimde şarj edilmesi şarj ünitesi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bataryaların devre dışı bırakılması durumunda ölçü aletinin enerji ihtiyacı doğrudan şarj ünitesi ile karşılanabilmektedir. Ayrıca şarj ünitesinde bulunan  $\pm 12$  V çıkışlar ile başka 12 Volt bataryaların kontrollü biçimde şarj edilmesi de mümkündür. Besleme devresi, bataryalardan ya da doğrudan şarj ünitesinden sağlanan gerilimin, regüle ve filtre edildiği birimdir. Bataryaların doluluk oranı besleme devresi içinde bulunan şarj

kontrol bölümü ile belirlenmektedir. Şekil 6.21’de görülen 4 numaralı göstergeler üzerinden şarj durumu kontrol edilebilmektedir. Tam şarj durumunda sarı, normal şarj durumunda yeşil, düşük şarj durumunda kırmızı uyarı ledi yanmaktadır.

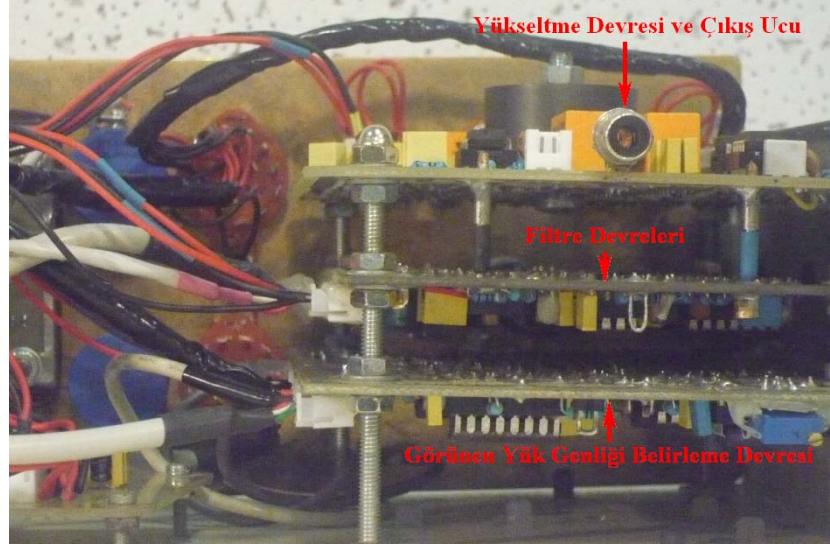


Şekil 6.22: Deneysel çalışmalar için geliştirilen KB ölçü aletinin blok şeması.

### 6.1.5.2. Kuvvetlendirme (Amplifikatör) devresi

Ölçü dört uçlusundan alınan işaretler ölçü aletine kuvvetlendirme devresinden girmektedir. Düşük genliğe sahip işaretlerin işlenmesi oldukça zordur. Bu nedenle düşük genlikli işaretlerin kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Ters durumda büyük genlikli KB işaretlerinin işlenebilecek seviyelere indirgenmesi gerekebilir. Söz konusu bu kuvvetlendirme ve zayıflatma işlemlerinin yapıldığı birim kuvvetlendirme devresidir. Kuvvetlendirme devresinde KB işaretleri 80 dB kazanç seviyesine kadar kuvvetlendirilebilmekte ve -40 dB kazanç seviyesine kadar zayıflatılabilmektedir.

KB işaretlerinin kuvvetlendirme işlemi, işlemsel kuvvetlendirici (operasyonel amplifikatör) yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Kuvvetlendirme devrelerinde, 250 MHz frekansa ve 1000 V/ $\mu$ s yetiştirme hızına (slew rate) sahip düşük gürültülü işlemsel kuvvetlendiriciler tercih edilmiştir. Kuvvetlendirilen KB işaretlerinin osiloskop ya da PC ortamına aktarılabilmesi için kuvvetlendirme devresinden çıkış alınabilmesini mümkündür. Şekil 6.23’de yükseltme, filtre ve görünen yük genliği belirleme devrelerinin yapısı görülmektedir.

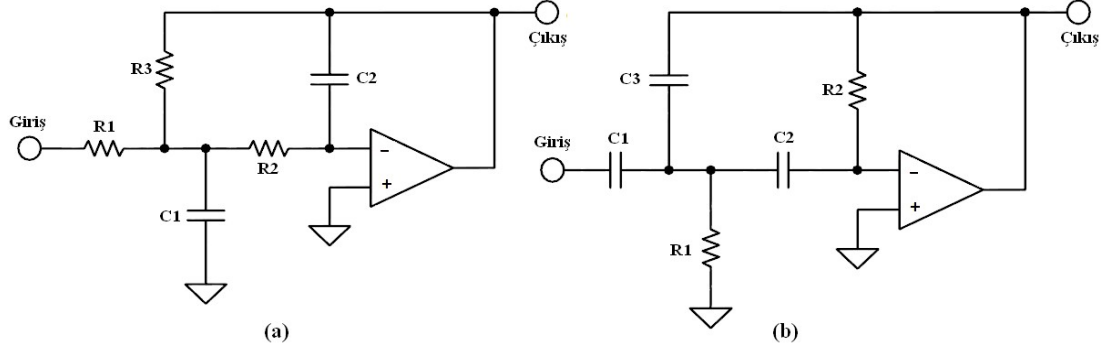


Şekil 6.23: Yükseltme, filtre ve görünen yük genliği belirleme devreleri.

### 6.1.5.3. Filtre devreleri

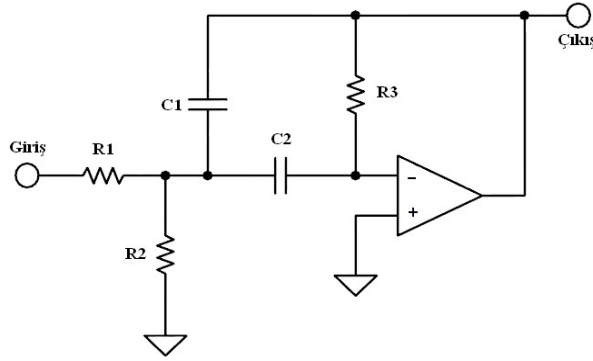
KB işaretleri ölçü dört uçlusundan yükseltme katına aktarılırken beraberinde, gürültü ve deney gerilimi bileşenlerinin de bulunması mümkündür. Kuvvetlendirme devresinde KB işaretleri ile birlikte kuvvetlendirilen bu işaretlerin KB işaretlerinden filtre edilmesinde fayda vardır. Bu nedenle KB ölçü aleti için aktif elektronik filtre devreleri tasarlanmıştır. Filtre devreleri 40-400 kHz, 135-165 kHz ve 75-85 kHz olmak üzere üç farklı bant genişliğine sahip aktif filtreden meydana gelmektedir.

40-400 kHz bant genişliğine sahip aktif filtre, 400 kHz kesme frekansında alçak geçiren (low pass) ve 40 kHz kesme frekansında yüksek geçiren (high pass) olmak üzere iki farklı filtrenin bileşiminden oluşmaktadır. 400 kHz kesme frekansına sahip alçak geçiren filtre tasarlanırken Şekil 6.24.(a)'da görülen çoklu geri beslemeli alçak geçiren (Multiple feedback lowpass) filtre tipinden faydalanılmıştır. Bu filtre aynı zamanda KB işaretlerine integral alıcı bir etkide göstermektedir. Filtrenin gösterdiği integral alıcı etkinin ölçü dört uçlusunun gösterdiği integral alıcı etkiyi bozmadığı gibi destekleyici etki gösterdiği de söylenebilir. Bu bağlamda filtre çıkışındaki KB işaretinin tepe değerinin görünen yük ile doğru orantılı olduğunu söylemek mümkündür. Benzer olarak 40 kHz kesme frekansına sahip yüksek geçiren filtrenin tasarımında da Şekil 6.24.(b)'de görülen çoklu geri beslemeli yüksek geçiren filtre (Multiple feedback highpass) tipi kullanılmıştır.



Şekil 6.24: Çoklu geri beslemeli a) alçak geçiren, b) yüksek geçiren filtre [102].

135-165 kHz ve 75-85 kHz bant genişliğindeki her iki filtrenin tasarımında Şekil 6.25’de verilen (Multiple feedback bandpass) filtre yapısından faydalanılmıştır. Bant genişliği daha dar olan bu iki aktif filtre, farklı karakteristiğe sahip gürültülerin elimine edilebilmesini sağlamaktadır.



Şekil 6.25: Çoklu geri beslemeli bant geçiren filtre [102].

Bir ölçme sisteminin girişindeki, birbirine eşdeğer ardışık iki darbe arasında olabilecek en kısa zaman aralığını, darbe çözünürlük süresi ( $t_r$ ) olarak tanımlamak mümkündür. Aktif elektronik filtrelerin darbe çözünürlük süresi üzerinde, önemli etkisinin olduğu söylenebilir. Filtrelerin bant genişliği azaldıkça, KB işaretlerinde daha geniş bir frekans spektrumunun zayıflamasına neden olur. Böylece dar bantlı filtre çıkışındaki KB işareti geniş bantlı filtreye oranla daha uzun periyoda sahip olur. Buradan yola çıkarak filtre bant genişliği ile darbe çözünürlük süresinin birbirine ters orantılı olduğu söylenebilir [42,102,103].

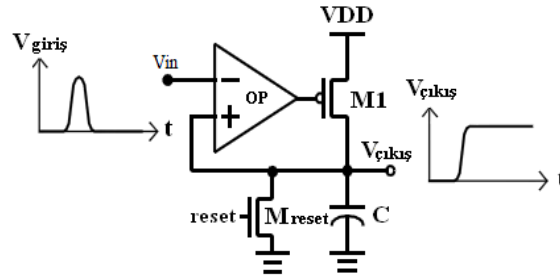
Elektronik filtrelerden geçen kısmi boşalma işareti Şekil 6.21’de görülen 5 numaralı BNC soket yardımıyla osiloskop veya PC’ye aktarılabilir. PC’ye aktarılan KB

işaretleri geliştirilen faz çözünümlü KB ölçüm yazılımı ile işlenerek, KB örüntüleri elde edilmektedir.

#### 6.1.5.4. Görünen yük genliği belirleme ve gösterge devresi

Görünen yükün genliği filtre çıkışındaki KB işaretinin tepe değeri ile doğru orantılıdır. Filtre çıkışındaki işaretin tepe değerini belirleyen bir devre ile görünen yükün genliğinin belirlenmesi mümkündür. Bu nedenle görünen yük genliği belirleme devresi geliştirilmiştir.

Filtre devrelerinin çıkışındaki KB işaretlerinin darbe şeklinde olduğu dikkate alınrsa, bu darbelerin tepe değerinin örnekleyici ve tutucu (sample and hold circuit) bir devre ile belirlenmesi mümkündür. Örnekleyici ve tutucu devreler darbe şeklindeki işaretlerin incelenmesinde, analog sayısal dönüştürme işlemlerinde vb. sık olarak tercih edilmektedirler [104-107]. Şekil 6.26’da örnekleyici ve tutucu devrelere ilişkin eşdeğer devre görülmektedir. Şekil 6.26’dan da anlaşıldığı gibi örnekleyici ve tutucu devrenin girişindeki işaretin genlik artışıyla doğru orantılı olarak, çıkışındaki işaretin genliği de artmaktadır.



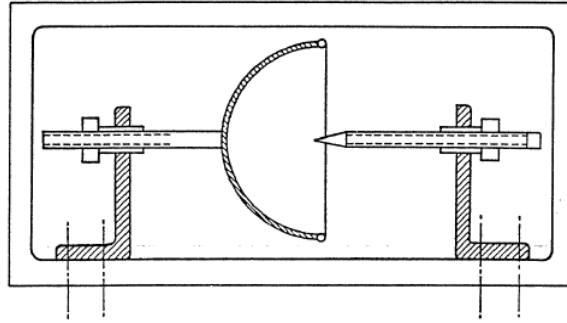
Şekil 6.26: Örnekleyici ve tutucu eşdeğer devresi [105].

Görünen yük genliği belirleme devresi KB işaretlerinin tepe değeriyle orantılı sabit bir gerilim üretmektedir. Bu devrede 250 ns örnekleme süresine sahip, hızlı bir örnekleyici ve tutucu entegre kullanılmıştır. Görünen yük genliği belirleme devresinde üretilen gerilimin genliği, gösterge devresinde görünen yük ile ilişkilendirilerek, Şekil 6.21’deki 3 numaralı led göstergelere yansıtılmaktadır. Led göstergelerin ayarı, aynı şekil üzerinde görülen 7 numaralı gösterge ayar kısmı ile gerçekleştirilebilmektedir. Ölçme sistemine gönderilen kalibrasyon darbelerinin genliği, gösterge ayar kısmı ile ölçü aletine girilmektedir.

### 6.1.6. Sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot düzeni

Deneysel çalışmaların birinci kısmında öncelikle yüksek gerilim altında kararlı KB darbeleri üreten bir kaynakla çalışılması öngörülmüştür. Bilimsel çalışmalar üzerinde yapılan literatür taramasında kararlı boşalma kaynağı olarak genelde Trichel darbeleri üreten sivri uç düzlem elektrot sistemi kullanıldığı belirlenmiştir. Daha önce yapılan bilimsel çalışmalara farklı bir katkı olması amacıyla literatürde kararlı boşalma kaynağı olarak tanımlanan SYK düzenin kullanılması uygun bulunmuştur. Bu nedenle kararlı boşalma kaynağı olarak bir SYK elektrot sistemi yapılmıştır.

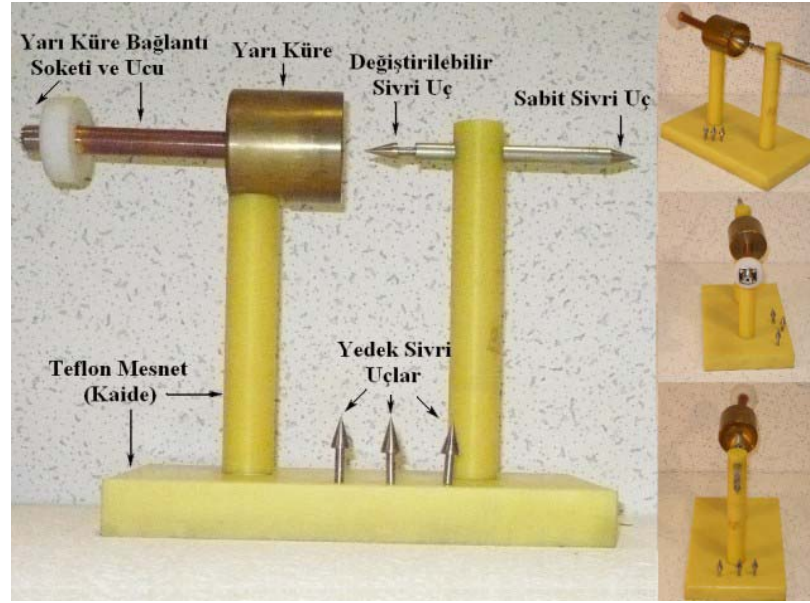
SYK elektrot sistemi, sivri uçta korona boşalmaları oluşturan fiziksel bir boşalma kaynağıdır. SYK elektrot sisteminde sivri uç Şekil 6.27'deki gibi içi boş bir kürenin karşısına merkezi biçimde yerleştirilir. Böylece sivri uç etrafında simetrik bir alan dağılımı elde edilir. Sivri uçta meydana gelen boşalmalardaki küçük yer değişmeler, boşalmayı meydana getiren elektrik alanı fazla değiştirmeyeceği için, sabit ve düzenli boşalma darbeleri elde etmek mümkündür. SYK elektrot sisteminde boşalma başlama gerilimine ulaşıldığında, boşalmalar öncelikle her negatif yarı dalgada bir-iki adet olarak görülür. Gerilimin genliği arttırıldığında boşalmaların sayısı artar fakat genlikleri sabit kalır [5].



Şekil 6.27: Sivri uç-yarı küre (SYK) elektrot sistemi yerleşim şekli [5].

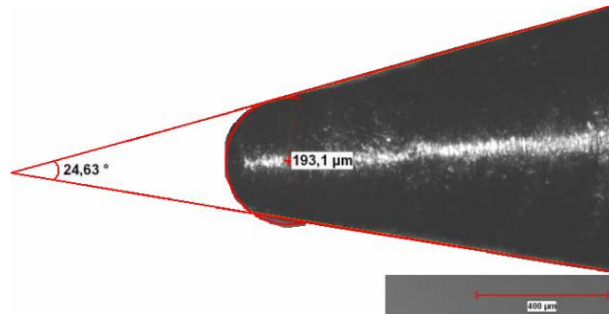
Deneysel çalışmalar için yapımı gerçekleştirilen SYK elektrot sistemi Şekil 6.28'de görülmektedir. Yarı küre yapımı için 60 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda silindir şeklinde pirinç malzeme kullanılmıştır. Pirinç malzemenin merkezi 50 mm çapındaki bir yarı küre biçiminde, CNC torna tezgahı yardımıyla boşaltılmıştır. Yarı kürenin ölçü dört uçlusuna ya da doğrudan toprağa bağlanabilmesi için arkasına soket ve bağlantı ucu yerleştirilmiştir. Soket ve bağlantı ucu yarı küreye civata şeklinde

bağlandığı için kolaylıkla ayrılabilir biçimdedir. Sivri ucu oluşturan elektrot, 10 mm çapında paslanmaz çelikten yapılmıştır ve her iki ucu da kullanılabilir biçimde tasarlanmıştır. Uçlardan birisi sabit nitelikte olup diğeri değiştirilebilir özelliğine sahiptir. Böylece deneysel çalışmalar sırasında SYK düzenini sistemden ayırmadan sivri ucu değiştirmek mümkündür.



Şekil 6.28: Yapımı gerçekleştirilen sivri uç-yarı küre elektrot sistemi.

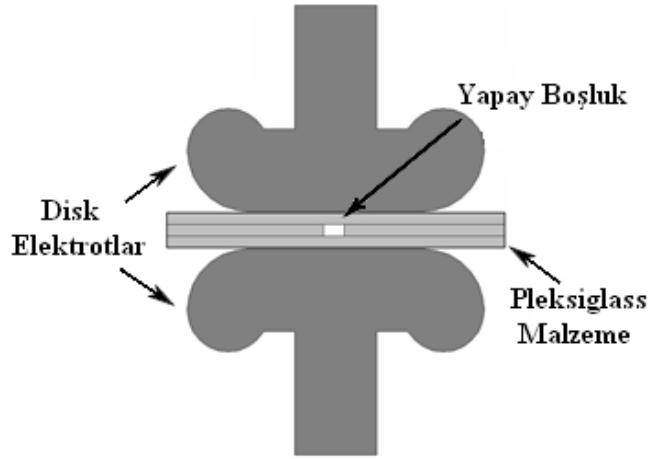
KB ölçümlerinde kullanılan sivri ucun metal mikroskopundaki 50 kat büyütülmüş görüntüsü Şekil 6.29'da verilmiştir. Sivri ucun eğrilik yarıçapı yaklaşık 193,1  $\mu\text{m}$ , koniklik açısı yaklaşık 24,63  $^{\circ}$  olarak ölçülmüştür. Ölçümlerde Nikon MA 100 metal mikroskobu ve Clemex Captiva görüntü analiz programı kullanılmıştır.



Şekil 6.29: Deneylerde kullanılan sivri ucun metal mikroskopundaki görüntüsü (50:1).

### 6.1.7. Disk elektrot düzeni, yağ yalıtımlı deney kabı ve deney cismi yapımı

Deneysel çalışmaların ikinci kısmında yapay boşluk içeren deney cisimlerinin harmonikli gerilimler altındaki davranışları incelenmiştir. Deneylede kullanılan, yapay boşluklu deney cismi oluşturulurken Şekil 6.30'daki yapı tercih edilmiştir. Yapay boşluğun bulunduğu kısmın yapımında polimetil meta krilat (PMMA) esaslı termoplastik bir malzeme olan saydam pleksiglas malzeme tercih edilmiştir.



Şekil 6.30: Yapay boşluk içeren deney cismi yapısı.

Yapay boşluk elde edilirken, 3 mm et kalınlığındaki pleksiglas malzemeler tornalanarak 190 mm çapında disk şekli verilmiştir. Disk şeklindeki 3 adet pleksiglas üst üste yerleştirilmiş ve ortada kalan katmanın merkezine yapay boşluk oluşturmak için delik açılmıştır. 3 katmandan oluşan yapı preslenerek çevresi özel bir silikon ile kaplanmıştır. Şekil 6.31'de deney numunelerinin yapımı görülmektedir.

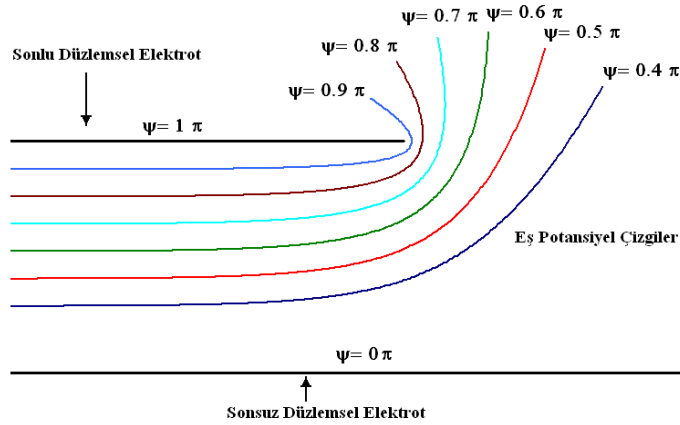


Şekil 6.31: Yapay boşluk içeren deney numunelerinin yapımı.



Yapay boşluk içeren malzemeye yüksek gerilim uygulanırken kullanılan elektrotların Şekil 6.30'daki gibi disk şeklinde olması uygun görülmüştür. Disk elektrotların birbirine bakan yüzeyleri düzlem şeklindedir. Bu nedenle elektrotların arasında kalan bölgede elektrik alan dağılımının düzgün olduğu kabul edilebilir. Kenar etkilerinin indirgenebilmesi için elektrot kenarları Rogowski profiline çok yakın bir şekle sahip olan küresel biçimde sonlandırılmıştır.

Biri sonlu diğeri sonsuz uzunluktaki ve farklı potansiyele sahip düzlemsel iki elektrotun arasında kalan eş potansiyel yüzeyler Şekil 6.32'de görülmektedir. Bu eş potansiyel yüzeyler Rogowski profili olarak tanımlanmaktadır. Rogowski profiline sahip elektrotlarda kenar etkisi olmadığından delinme olayları elektrotlar arasındaki bölgede meydana gelmektedir.



Şekil 6.32: Sonlu ve sonsuz düzlem arasındaki eşpotansiyel yüzeylerin dağılımı.

Şekil 6.32'deki sonlu ve sonsuz bu iki elektrotun oluşturduğu sistemin alanına Maxwel analizi uygulandığında, eş potansiyel yüzeyleri ifade eden koordinatları,

$$X = \frac{d}{\pi} (\Phi + e^{\Phi} \cdot \text{Cos}\psi) , \quad Y = \frac{d}{\pi} (\psi + e^{\Phi} \cdot \text{Sin}\psi) \quad (6.16)$$

şeklinde ifade elde edilebilir. (6.16) eşitliğinde,

$\psi$  : eş potansiyel yüzeyleri (çizgileri),

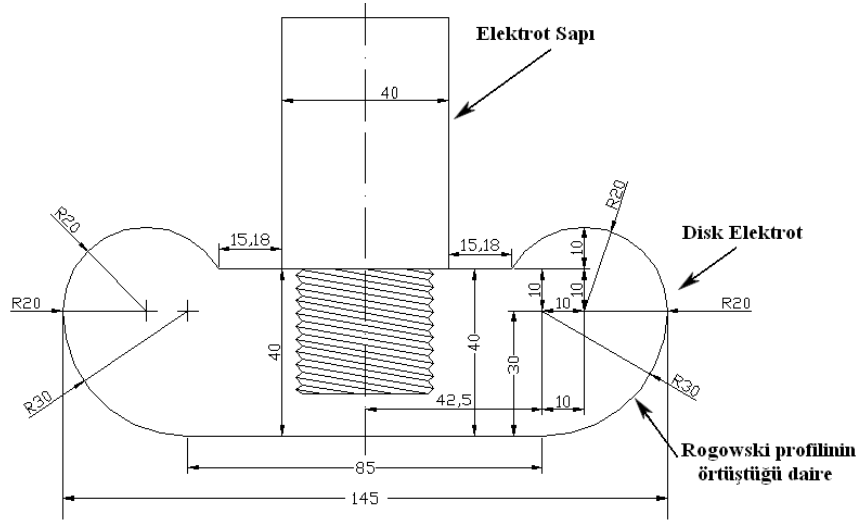
$\Phi$  : elektrostatik kuvvet çizgilerini,

$d$  : iki elektrot arasındaki açıklığı,

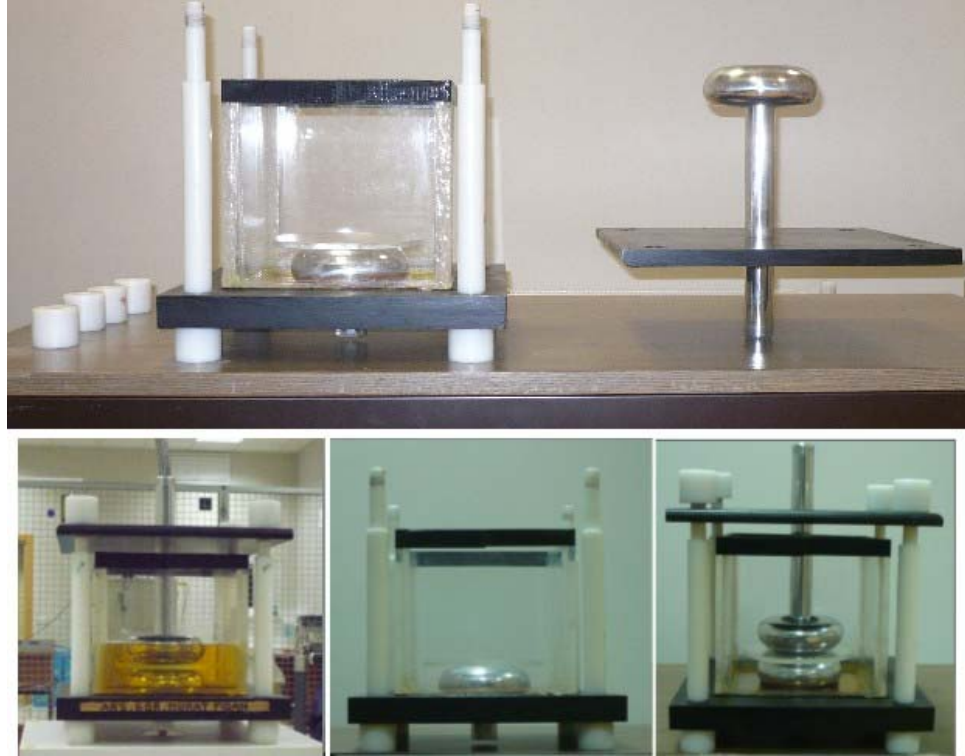
ifade etmektedir [91,108]. Deneysel çalışmalarda kullanılan disk elektrotların boyutları belirlenirken, elektrotlar arasındaki açıklığın en fazla  $d = 40$  olması öngörülmüştür. Bu durumda (6.16) eşitliği yardımıyla elde edilen koordinatlara karşılık gelen, Rogowski profiline sahip eğri, bir bilgisayar destekli tasarım programında (CAD: Computer Aided Design) çizdirilmiştir. Çizimi yapılan Rogowski profilindeki eğrinin, 30 mm yarıçaplı bir daire ile yaklaşık olarak örtüştüğü belirlenmiştir. 30 mm daireye teğet 20 mm bir başka daire ile de disk elektrotların üst kısımları (sap kısımları) sonlandırılmıştır. Elektrot saplarının disk ile birleştiği noktanın alan dağılımına etkisini önlemek için, bu nokta diskin üst kısmından içeride bırakılmıştır. Disk elektrotlara ilişkin ölçüler Şekil 6.33'de verilmiştir.

Disk elektrotlar uçak gövdesi yapımında kullanılan, darbeye dayanıklı, setleştirilmiş 7000 serisi alaşımlı alüminyum malzemeden yapılmıştır. Elektrotlar CNC tornada özel bir program yardımıyla işlenmiş ve yüzeyleri polisajlama tekniği ile parlatılmıştır. Elektrotların sap kısımları elektrotlara dişli biçimde bağlanmaktadır. Bu özelliği sayesinde disk elektrotları farklı bağlantılarda kullanmak mümkündür.

Kısmi boşalma ölçümleri sırasında elektrotlarda veya deney cisminde meydana gelebilecek istenmeyen boşalmaları (yüzeysel, korona vb.) engellemek için elektrotların ve deney numunelerinin yağ içine alınması öngörülmüştür. Bunun için de sızdırmaz bir yağ kabı geliştirilmiş ve disk elektrotlar bu kabın taban ve kapak kısmına monte edilmiştir. Deneyler sırasında elektrotlar arasına konulan deney numunesinin elektrot yüzeylerine tam ve sıkı biçimde temas etmesini sağlamak gerekmektedir. Bu nedenle sızdırmaz yağ kabı her iki elektrot arasındaki malzemeyi sıkıştırarak biçimde tasarlanmıştır. Boşluk içeren deney numunesi, disk elektrotlar ve sızdırmaz yağ kabı Şekil 6.34'de görülmektedir.



Şekil 6.33: Deneysel çalışmalarda kullanılan disk elektrotların önden görünüşü.



Şekil 6.34: Sızdırmaz yağ kabı içindeki disk elektrotlar ve boşluk içeren deney numunesi.

## 6.2. Faz Çözünümlü Kısmi Boşalma Ölçüm (FÇKBÖ) Yazılımı

Faz çözünümlü kısmi boşalma ölçüm yöntemi ile yalıtkanlarda meydana gelen KB genliğinin yanı sıra, KB aktivitelerinin sebebi ve gelişimi hakkında fikir edinilebilmektedir. Bu yöntemde KB işaretlerine ilişkin ( $q$ ) görünen yük genliği, ( $\phi_i$ ) faz açısı (gerilime göre) ve ( $n_i$ ) darbe sayısı değerleri yardımıyla  $D(q, \phi_i, n_i)$  KB

örüntüleri elde edilir. KB örüntüleri kullanılarak KB olaylarının gelişimi gözlemlenmekte ve KB'lara neden olan kusurlar ayrıntılı olarak teşhis edilebilmektedir. Bu nedenle deneysel çalışmaların sayısal olarak değerlendirilebilmesi için faz çözünümlü KB ölçümü gerçekleştirebilen bir sistem ve yazılım geliştirilmiştir.

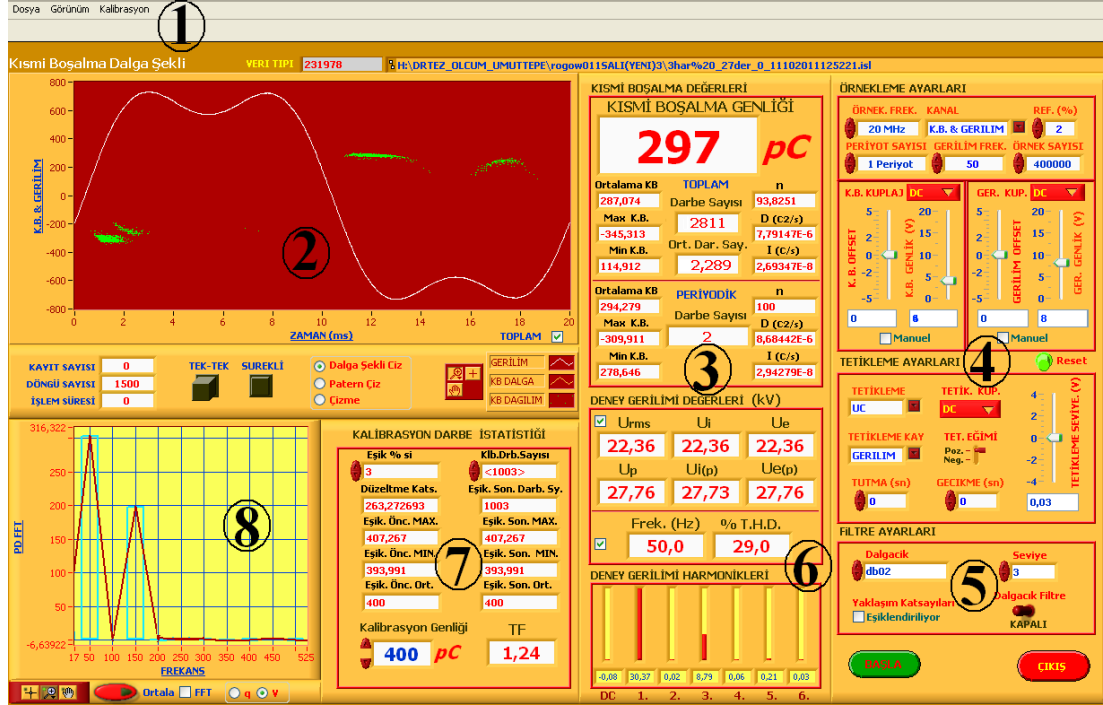
Bölüm 6.1.5'de ayrıntıları verilen KB ölçü aletinin filtre katından alınan KB darbesine ilişkin integrasyon işareti bir ASD yardımıyla örneklenmektedir. Yüksek frekansa sahip KB işaretlerinin sayısallaştırılması için National Instrument firmasının ürettiği NI 5112 modeli ASD tercih edilmiştir. NI-5112, 100 MHz (100 MS/s) frekansa kadar örnekleme yapabilen, toplam 16 MB dahili belleğe sahip, iki analog giriş kanalı olan sayısallaştırıcı bir karttır. Ayrıca 8-16-32 bit örnekleme çözünürlüğünde çalışabilmektedir. Bilgisayarın PCI yuvasına gömülü biçimde çalışabilen NI 5112 ASD kartının görünüşü Şekil 6.35'de verilmiştir.



Şekil 6.35: NI 5112 sayısallaştırıcı kart.

KB işaretlerinin ASD ile bilgisayar ortamına aktarılması ve işlenmesi için yine National Instrument firması tarafından geliştirilen LabVIEW yazılımı kullanılmıştır. LabVIEW, grafiksel kullanıcı ara yüzü (GUI- Graphical User Interface) oluşturabilen bir yazılım dili olup mühendislik uygulamalarında oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. LabVIEW ile gerçekleştirilen yazılımlar ön panel (front panel) ve blok diyagram (block diagram) olmak üzere iki ana bölümden oluşmaktadır. Grafiksel kullanıcı ara yüzünün tasarımı ön panel bölümünde, kod yazım işlemi de blok diyagram bölümünde gerçekleştirilmektedir. LabVIEW dilinde kod yazma işlemi komutlar yerine blok diyagramlar ile gerçekleştirildiğinden, diğer yazılım dillerinden farklı bir yapıya sahiptir. LabVIEW dili ile geliştirilen faz çözünümlü KB ölçüm yazılımına ilişkin grafiksel kullanıcı arayüzü Şekil 6.36'da görülmektedir. LabVIEW

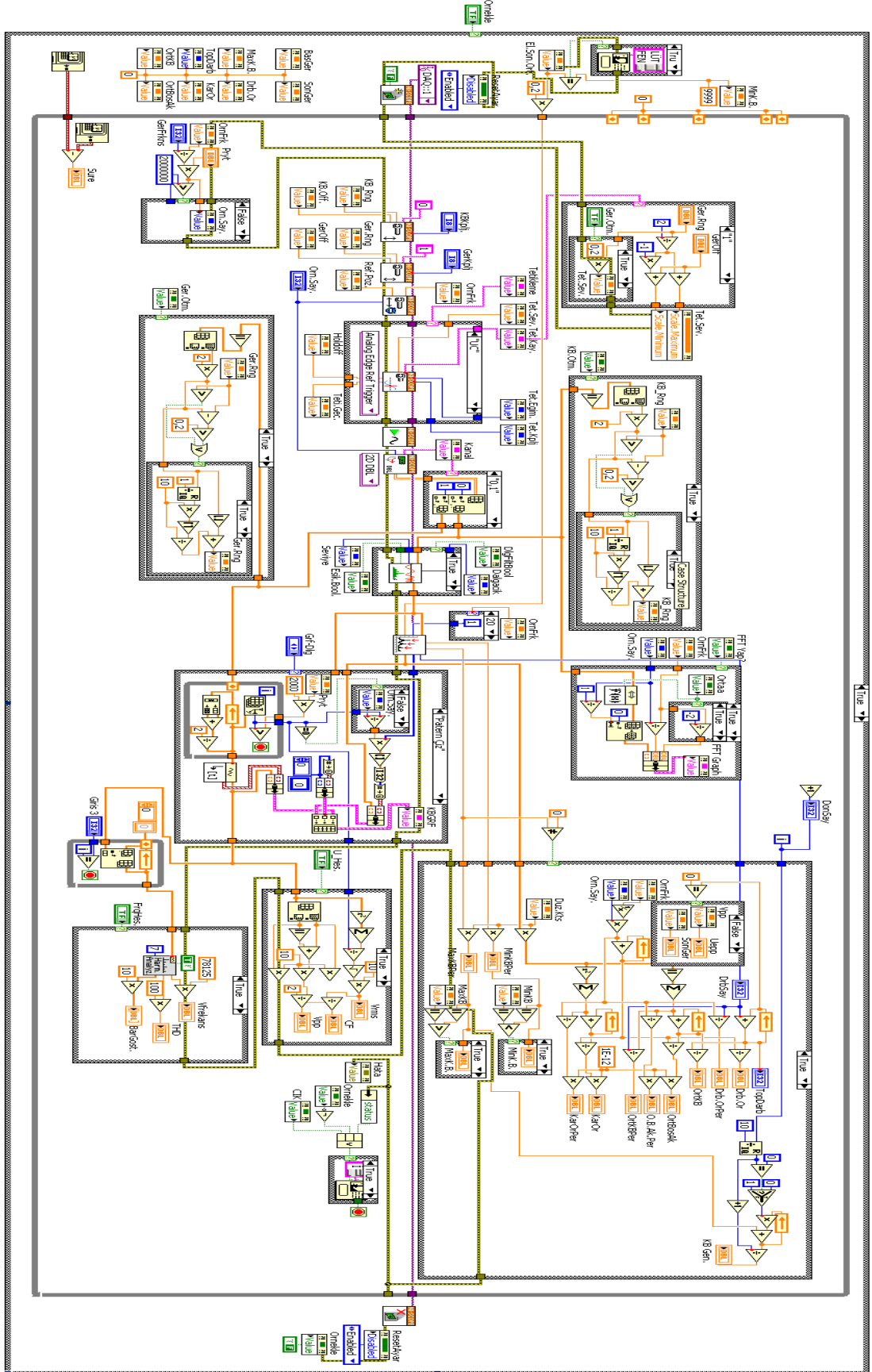
yazılım dilinin yapısı hakkında fikir vermesi amacıyla, geliştirilen KB ölçüm yazılımına ilişkin blok diyagramlardan birisi Şekil 6.37’de verilmiştir.



Şekil 6.36: FÇKBÖ yazılımının kullanıcı arayüzü.

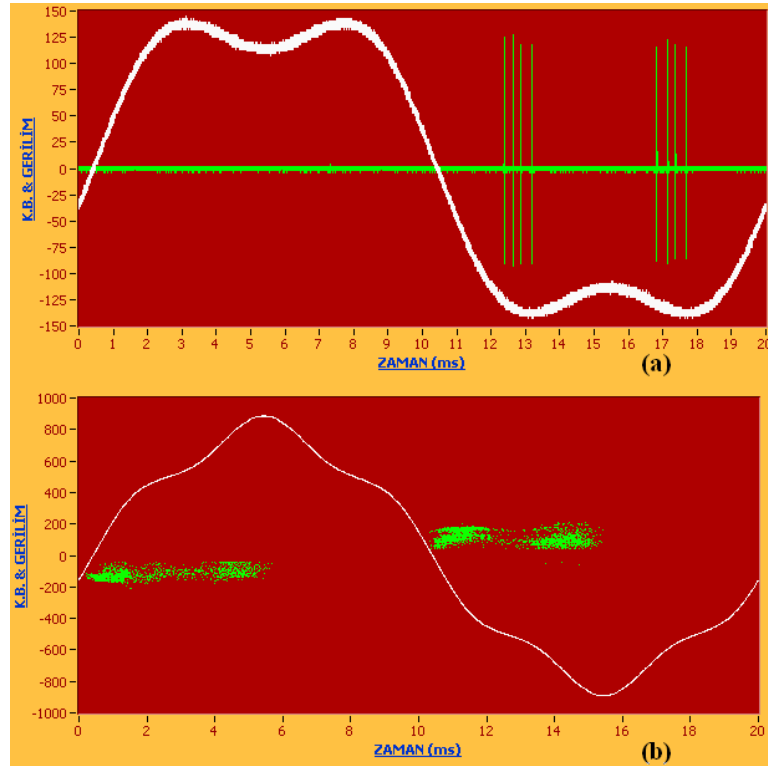
Deneysel çalışmalar için tasarlanan faz çözünümlü KB ölçüm yazılımı temel olarak sekiz ana kısım da incelenebilir.

- 1- Ana menü bölümü,
- 2- KB örüntülerinin  $D(q, \phi_i, n_i)$  ve ham KB grafiklerinin görüntülediği bölüm,
- 3- KB'lara ilişkin ölçülen büyüklüklerin görüntülediği bölüm,
- 4- ASD kart örnekleme ayar bölümü,
- 5- Dalgacık Dönüşümü tabanlı sayısal filtre bölümü,
- 6- Deney gerilimine ilişkin ölçülen büyüklüklerin görüntülediği bölüm,
- 7- Ölçeklemeye (kalibrasyon) ilişkin istatistiksel verilerin görüntülediği bölüm,
- 8- FFT grafiği bölümü.



Şekil 6.37: FÇKBÖ yazılımı için geliştirilen bir blok diyagram örneği.

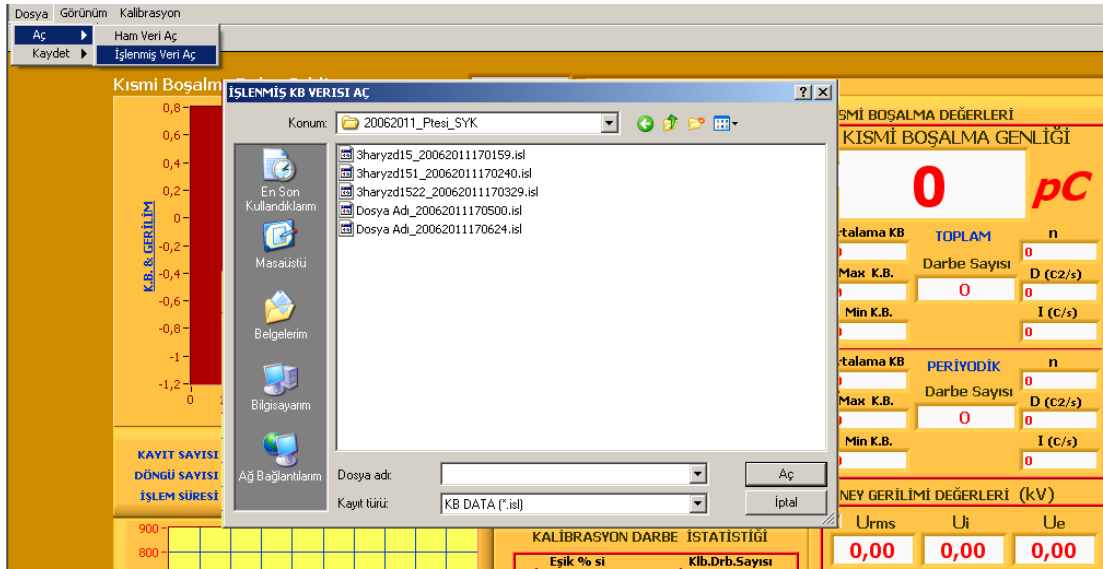
Geliştirilen FÇKBÖ yazılımı Windows tabanlı yazılımlara benzer bir kullanıma sahiptir. Veri dosyası açma, kaydetme, ölçekleme ve yazılımın görünümüne ilişkin işlemler Şekil 6.36'da 1 ile gösterilen ana menü bölümü üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Yazılım ile KB darbeleri iki farklı biçimde (formatta) ölçülebilmektedir. İlk biçim, KB darbelerinin ve deney geriliminin ham hali ile gerçekleştirilen ölçüm yöntemidir. Bu ölçüm yönteminde integrasyonu gerçekleştirilmiş KB darbelerinin şekli ve pozisyonu (faz açısı) deney gerilimi ile birlikte Şekil 6.36'da 2 ile gösterilen grafik bölümünde görüntülenebilmektedir. İkinci ölçüm biçiminde ise KB darbeleri, işlenerek görünen yük genlikleri ve faz açıları belirlenmektedir. Belirlenen yük değerleri ve faz açısı noktasal olarak deney geriliminin bir tam periyodu ile birlikte gösterilir. Aynı şekilde elde edilen diğer grafikler de bir önceki grafik silinmeden üst üste çizilerek KB örüntüleri elde edilmektedir. Benzer olarak KB örüntüleri de Şekil 6.36'da 2 ile gösterilen bölümde görüntülenebilmektedir. FÇKBÖ yazılımı ile elde edilen ham KB grafiği Şekil 6.38.(a)'da ve KB örüntüsü örneği Şekil 6.38.(b)'de görülmektedir.



Şekil 6.38: FÇKBÖ yazılımı ile elde edilen a) Ham KB grafiği, b) KB örüntüsü.

KB ölçümlerine ilişkin verilerin daha sonra tekrar kullanılmak üzere kaydedilmesi mümkündür. Ham KB verileri \*.dat uzantılı, KB örüntüleri \*.isl uzantılı veri

dosyaları şeklinde binary formatta saklanmaktadır. İsteğe bağlı olarak ham KB verilerinin tekrar bellekten geri çağırılarak işlenmesi ve KB örüntülerine dönüştürülmesi mümkündür. KB verilerinin kaydedilme ve tekrar bellekten okunma işlemleri Şekil 6.39’da görüldüğü gibi Dosya menüsü üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. \*.dat uzantılı ham veri dosyaları daha fazla ayrıntı barındırdıkları için bellekte, \*.isl uzantılı işlenmiş veri dosyalarına göre büyük yer kaplamaktadır. 20 MHz örnekleme frekansında 30 saniye süreyle örneklenmiş \*.isl uzantılı bir KB örüntü dosyası yaklaşık 18 MB boyutunda iken aynı dosya, ham veri dosyası biçiminde \*.dat uzantılı olarak yaklaşık 1,2 GB boyutunda yer kaplamaktadır.



Şekil 6.39: FÇKBÖ yazılımına ilişkin Dosya menüsü görünümü.

FÇKBÖ yazılımı ile gerçekleştirilen KB ölçüm sonuçları Şekil 6.36’da 3 numara ile gösterilen bölümden takip edilebilmektedir. Bu bölümde ölçüm sonuçları toplam ve periyodik olmak üzere iki farklı biçimde gösterilmektedir. Toplam olarak ifade edilen bölümde, ölçüm başından sonuna kadar elde edilen tüm veriler kullanılarak belirlenen sonuçlar verilmektedir. Periyodik olarak ifade edilen bölümde ise, yalnızca bir deney gerilimi periyodu boyunca elde edilen veriler kullanılarak belirlenen sonuçlar ekrana yansıtılmaktadır, bu sonuçlar bir sonraki periyottaki yeni sonuçlar ile değiştirilerek yenilenmektedir. Ölçümlerde KB darbelerine ilişkin, ortalama boşalma akımı (I), karesel oran (D), darbe tekrarlama oranı (n), ortalama



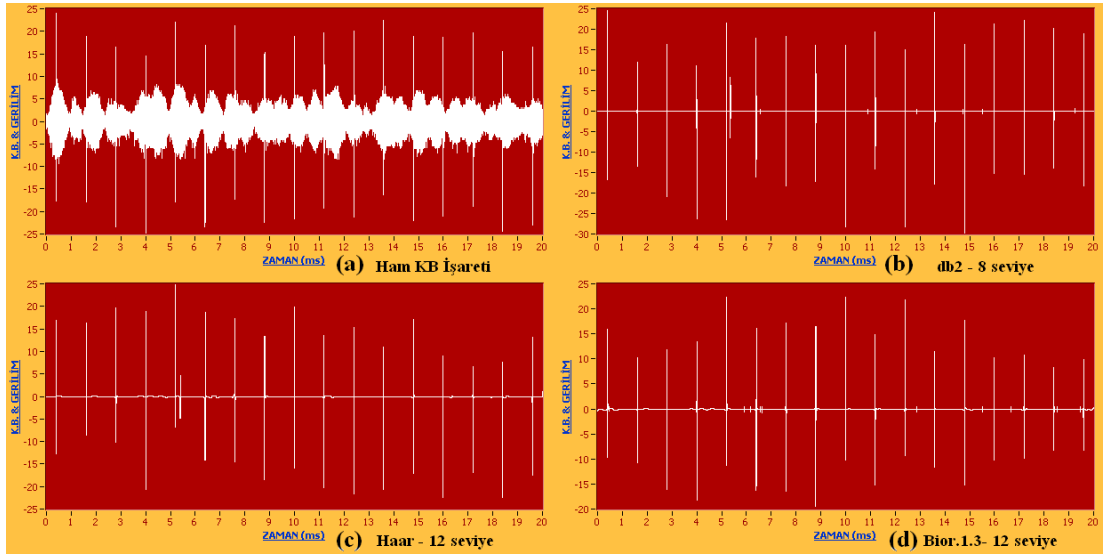
darbe sayısı, görünen yükün en büyük, en küçük ve ortalama değerleri hesaplanmaktadır.

KB darbelerinin örneklenmesinde kullanılan NI 5112 ASD karta ilişkin ayarlar Şekil 6.36'da 4 ile gösterilen bölümden yapılmaktadır. Bu ayarlar yardımıyla kartın tetikleme biçimi, örnekleme frekansı, örnekleme sayısı vb. çalışma koşulları düzenlenebilmektedir. Ayarların kullanıcı tarafından (manuel) ya da yazılım tarafından (otomatik) yapılabilmesi mümkündür. KB darbelerinin ve gerilim dalga şeklinin birlikte veya tek olarak görüntülenebilmesi için gerekli seçim yine bu bölümden yapılabilir. Ayrıca FÇKBÖ yazılımını, bu bölümden yapılan ayarlar ile 100 MHz çözünürlüğe sahip bir osiloskop olarak kullanmak mümkündür.

Elektriksel KB ölçümlerinin sağlıklı biçimde gerçekleştirilebilmesi, gürültünün mümkün olabildiği kadar önlenmesine bağlıdır. Geliştirilen KB ölçü aletine, farklı bant genişliğine ve kesme frekanslarına sahip 3 adet elektronik aktif filtre donanımı yerleştirilmiştir. Söz konusu bu filtrelerin yetersiz kaldığı, örneğin beyaz gürültü, bilgisayarı besleyen şebekeden gelen parazitler, farklı genlik ve karakterdeki harici gürültü işaretleri gibi durumlarla karşılaşılabilmesi mümkündür. Şekil 6.36'da 5 ile gösterilen bölümden kontrol edilebilen sayısal bir filtre bu gibi gürültülerden KB işaretlerini süzmek için yazılıma eklenmiştir. Sayısal filtrenin çalışma prensibi Ayrık Dalgacık Dönüşümü temeline dayanmaktadır ve ayrıntıları Bölüm 5.4.3'de verilmiştir.

Dalgacık Dönüşümü temeline dayanarak çalışan sayısal filtrenin, dalgacık seçimi ve ayrıştırma seviyesi kontrolü tamamen kullanıcıya bırakılmıştır. Filtrenin istenildiği zaman devre dışı bırakılması da yine kullanıcısının kontrolündedir. Sayısal filtrenin, KB'lar üzerinde Dalgacık Dönüşümü yöntemi ile yapılacak farklı akademik çalışmalarda önemli kolaylıklar sağlanabileceği düşünülmektedir. Şekil 6.40'da Dalgacık Dönüşümü tabanlı sayısal filtreden geçirilmiş KB işaretleri görülmektedir. Şekil 6.40.(a)'da kısmi boşalma kalibratörleri yardımıyla elde edilen ve tekrarlama sıklığı 1,2 ms olan gürültülü KB işaretlerinin ham hali verilmiştir. Şekil 6.40.(b)'de bu ham KB işaretleri, Daubechies'in 2. dalgacığı kullanılarak 8 seviye ayrıştırılmış ve filtrelenmiştir. Şekil 6.40.(c)'deki işaretler aynı KB işaretinin Haar dalgacığı ile

12 seviyede ve Şekil 6.40.(d)'de Biorthogonal 1.3 dalgacığı ile 12 seviyede ayrıştırılarak filtrelenmiş halini temsil etmektedir. Farklı dalgacıklar ile farklı seviyelerde gerçekleştirilen sayısal filtreleme sonuçlarından da görüldüğü gibi, KB işaretinin gürültüden arındırılması sırasında, işaretle bazı kayıplar oluşabilmektedir. Bu nedenle yapılan çalışmalarda kullanılan dalgacığın, ayrıştırma seviyesinin ve eşikleme yönteminin seçilmesi gibi kriterlerin doğru olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.



Şekil 6.40: Dalgacık Dönüşümü tabanlı sayısal filtreden geçirilmiş KB işaretleri örnekleri.

Faz çözünümlü KB ölçümlerinde deney geriliminin dalga şekli ve genliğinin belirlenmesi önemlidir. Deney gerilimine ilişkin veriler ohmik gerilim bölücü üzerinden NI 5112 ASD kartın diğer analog girişine aktarılmakta ve örneklenebilmektedir. KB darbeleri ile eş zamanlı olarak sayısallaştırılan deney geriliminin örnekleme frekansı ve örnek sayısı yine KB darbelerinininki ile aynıdır. KB örüntüleri elde edilirken deney gerilimine ilişkin veriler Ayrık Dalgacık Dönüşümü tabanlı bir sayısal filtre ile filtrelenmekte ve alt örnekleme yöntemiyle örnek sayısı indirgenmektedir. Deney geriliminin filtrelenmesine ilişkin sayısal filtre yazılım içine gömülü olarak, kullanıcının kontrolü dışında, sürekli biçimde çalışmaktadır.

KB ölçümleri sırasında deney geriliminin harmonik analizde eş zamanlı olarak yapılmaktadır. Deney geriliminin THB değeri, frekansı DA ve 6. harmoniğe kadar olan bileşenleri belirlenebilmektedir. Deney gerilimine ilişkin analizler yine kullanıcı

kontrolünde olup istenirse devreden çıkartılması mümkündür. Şekil 6.36'da 6 numara ile gösterilen bölüm üzerinden deney gerilimine ilişkin etkin, tepe ve harmonik bileşen değerleri görüntülenebilmektedir. Aynı zamanda harmonik bileşenlerin bar grafik biçiminde ayrıntılı olarak görüntülenmesi de mümkündür. Deneyler sırasında KB başlama ve sönme gerilimlerinin etkin ve tepe değerleri yazılım tarafından belirlenebilmektedir.

Geliştirilen FÇKBÖ yazılımının ölçeklenmesi Kalibrasyon menüsü yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ölçme sistemine verilen kalibrasyon darbelerinin genliği Şekil 6.36'da 7 numara ile gösterilen kalibrasyon darbe istatistiği bölümünden yazılıma bildirilmektedir. Ölçekleme işlemi için kullanılan, varsayılan darbe sayısı 1000 adettir. İstenildiği takdirde varsayılan bu değer aynı bölüm üzerinden değiştirilmesi mümkündür. Ölçeklemede kullanılan kalibrasyon darbelerinin birbirine eşdeğer olması gerekmektedir. Fakat ölçme sistemine etkiyen gürültüler kalibrasyon darbeleri üzerinde etkili olabilmektedir. Benzer olarak aynı gürültülerin KB ölçüm sonuçları üzerinde etkili olması da söz konusudur. FÇKBÖ yazılımı, belirlenen sayıdaki kalibrasyon darbeleri arasından bir birine eşdeğer genlikte olanları belirlemekte ve ölçekleme işlemi için bu darbeleri kullanmaktadır. Yazılım varsayılan ayar olarak bir birinden en fazla % 3 farklılığa sahip darbeleri eşdeğer sınırı içinde kabul etmektedir. Eşdeğer darbeler belirlenirken darbelerin birbirinden izin verilen farklılık yüzdesi kullanıcı tarafından değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda bu yüzde değer ile KB ölçümlerinin hassasiyeti de belirlenebilmektedir. Gürültünün tam anlamıyla bastırılmadığı durumlarda eşik yüzdesi arttırılarak ölçüm hassasiyeti düşürülebilir.

Kalibrasyon darbeleri daha sonra kullanılmak üzere bellekte \*.klb uzantılı veri dosyaları şeklinde saklanabilmektedir. Deney sırasında ölçeklemenin farklı bir genliğe değiştirilebilmesi için, deneyin başında kaydedilen ölçekleme dosyasının bellekten geri çağırılması yeterlidir. Böylece deney başında izlenen ölçekleme prosedürünü tekrar izleme zorunluluğu ortadan kaldırılarak zamandan tasarruf sağlanabilir.

KB ölçümleri sırasında KB darbelerinin veya deney geriliminin frekans analizi Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT – Fast Fourier Transform) yöntemi ile yapılabilmektedir. Şekil 6.36’da 8 numara ile gösterilen bölüm üzerinden deney geriliminin veya KB darbelerinin frekans spektrumuna ilişkin grafikler görüntülenmektedir.

### **6.3. Geliştirilen Kısmi Boşalma Ölçme Sistemine İlişkin Karakteristikler**

Geliştirilen KB ölçme sisteminin karakteristikleri ve ölçüm doğruluğu ölçme sistemini oluşturan aygıtlar ile bağlantılıdır. Ölçme sisteminin alt ve üst sınır frekansları, orta bant frekansı ve çözünürlük süresi KB ölçü aletinde bulunan aktif filtrelere bağlıdır. KB ölçü aletinde 40-400 kHz, 135-165 kHz ve 75-85 kHz kesme frekanslarına sahip 3 farklı aktif filtre bulunmaktadır. Uygulamalı çalışmalar sırasında kullanılan 40-400 kHz aktif filtre ile darbe çözünürlük süresi yaklaşık 10 µs olarak belirlenmiştir.

Gerilim bilgisinin okunduğu gerilim bölücünün çevirme oranı, 40 kV gerilim seviyesine kadar, doğruluk sınıfı 0,5 olan gerilim ölçü transformatorü ile karşılaştırılmıştır ve 1/1017 olarak belirlenmiştir. Karşılaştırma sırasında kullanılan ölçü aletinin doğruluk sınıfı  $\pm \% 0,5$ ’dir.

Geliştirilen KB kalibratörleri, ALCE Firmasının Yüksek Gerilim Laboratuvarı’nda Omicron firmasının ürettiği MPD 600 model KB ölçüm sistemi ile kalibre edilmiştir. MPD 600 KB ölçme sisteminin doğruluk sınıfı ürün kataloğunda  $\pm \% 2$  pC olarak verilmiştir.

KB işaretleri ASD kart ile örneklendiği için 8 bit örnekleme sırasında kuantalama işleminden kaynaklanan ötelemeler ölçme hatalarını arttırmaktadır. Bu nedenle ölçümler sırasında ASD kartın örnekleme genlik ayarları yazılım yardımıyla otomatik biçimde gerçekleştirilmiştir.

## 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Harmoniklerden kaynaklanan gerilim dalga şeklindeki bozulmaların, elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkileri, deneysel olarak iki kısımda incelenmiştir. Deneysel çalışmaların birinci kısmında literatürde kararlı bir kısmi boşalma kaynağı olarak tanımlanan sivri uç-yarı küre elektrot sistemi kullanılmıştır. Harmonikli yüksek gerilimlerin kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerinin kararlı bir boşalma kaynağı yardımıyla daha net belirlenebileceği düşünülmüştür. Deneysel çalışmaların ikinci kısmında yapay kusurlar içeren katmanlı numunelerin Rogowski profiline sahip disk elektrotlar arasına yerleştirilmesiyle elde edilen deney cisimleri üzerinde çalışılmıştır. İkinci deney yöntemi ile harmonikli gerilimlerin gerçeğe yakın bir deney cisminde oluşan KB olayları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan gerilim dalga şekilleri 50 Hz temel bileşen ve 3. veya 5. harmonik bileşenlerden elde edilmiştir.

### 7.1. SYK Elektrot Sistemi ile Yapılan Deneysel Çalışmalar

Sivri uç-yarı küre elektrot sistemi ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada, aynı etkin değere sahip, fakat farklı THB'deki sabit gerilimlerden oluşan KB aktiviteleri incelenmiştir. İkinci aşamada farklı THB'lerin KB başlama gerilimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

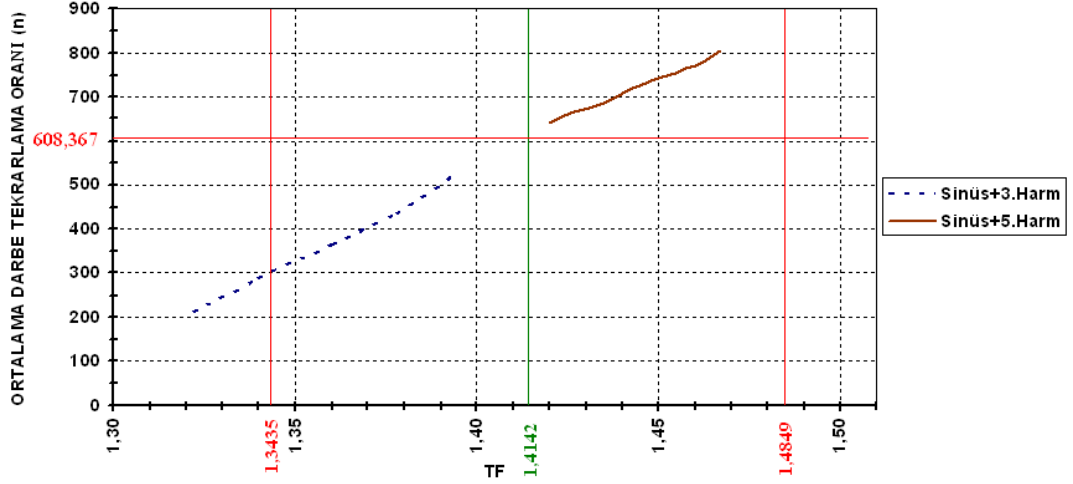
Yarıçapı yaklaşık 193,1  $\mu\text{m}$ , koniklik açısı yaklaşık  $24,63^\circ$  olan sivri ucun kullanıldığı SYK elektrot sistemine Tablo 7.1'de ayrıntıları verilen gerilimler uygulanmıştır. 50 Hz sinüsoidal temel bileşen ve 3. veya 5. harmonik bileşenler ile elde edilen gerilimlerin etkin değeri 4,02 kV'da sabit tutulmuştur. Temel bileşen ile harmonik bileşenler arasında faz farkı bulunmamaktadır. Söz konusu deney gerilimleri ile elde edilen 30 saniye (1500 periyot) süreli ölçüm sonuçları yine Tablo 7.1'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 7.1: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,02 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB ölçüm sonuçları.

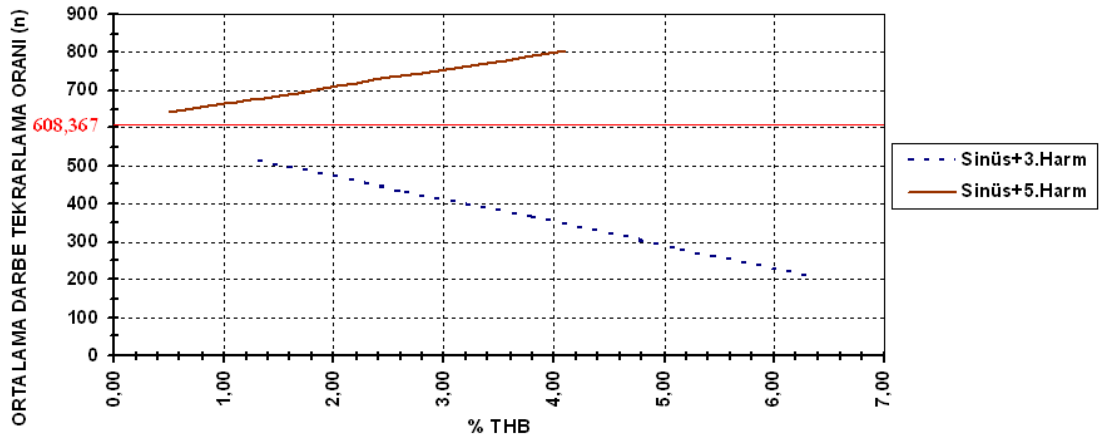
No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ (kV)	$U_p$ (kV)	THB (%)	TF	Ortalama Darbe Sayısı	Toplam Darbe Sayısı	Ortalama Görünen Yük (pC)	Ortalama Darbe Tekrarlama Oranı (n)
S3H15	Sinüs + 3.Harm.	4,02	5,32	6,3	1,322	4,2267	6340	123,737	211,333
S3H14	Sinüs + 3.Harm.	4,02	5,39	5,1	1,340	5,7287	8593	122,735	286,433
S3H13	Sinüs + 3.Harm.	4,02	5,46	3,8	1,360	7,3213	10982	122,391	366,067
S3H12	Sinüs + 3.Harm.	4,02	5,53	2,6	1,378	8,6887	13033	121,678	434,433
S3H11	Sinüs + 3.Harm.	4,02	5,60	1,3	1,393	10,352	15528	120,981	517,6
S11	Sinüs	4,02	5,69	0	1,414	12,167	18251	120,533	608,367
S5H11	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,71	0,5	1,420	12,814	19221	119,862	640,7
S5H12	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,74	1	1,427	13,293	19939	119,733	664,633
S5H13	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,76	1,5	1,435	13,745	20618	119,613	687,267
S5H14	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,80	2,2	1,443	14,409	21613	119,395	720,433
S5H15	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,82	2,8	1,450	14,882	22323	119,032	744,1
S5H16	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,86	3,4	1,460	15,387	23080	118,784	769,333
S5H17	Sinüs + 5.Harm.	4,02	5,90	4,1	1,467	16,109	24163	118,277	805,433

Tablo 7.1'in ilk sütunu deney gerilimlerinin numarasını ikinci sütunu bu gerilimleri oluşturan bileşenleri içermektedir. Deney gerilimlerinin etkin değeri üçüncü, tepe değeri dördüncü sütunlarda toplam harmonik bozulma ve tepe faktörü değerleri sırasıyla beşinci ve altıncı sütunlarda verilmiştir. Tablo 7.1'in yedi, sekiz, dokuz ve onuncu sütunlarında, deneysel çalışmalardan elde edilen KB'lara ilişkin sonuçlar aktarılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında ortamın basıncı 730 mmHg sıcaklığı 27<sup>0</sup>C, bağıl nem değeri % 82 olarak ölçülmüştür.

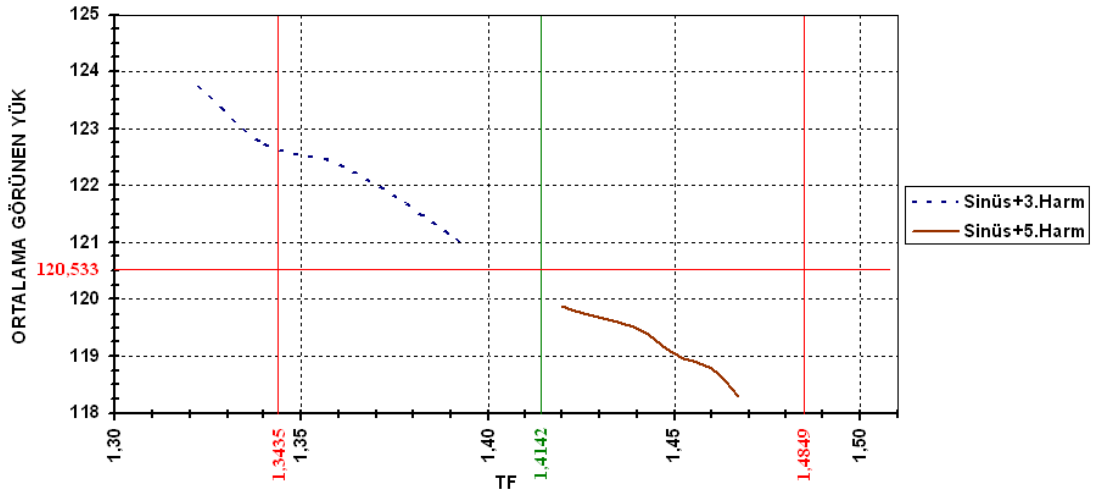
Alternatif gerilim ile yapılan KB ölçümlerinde, deney cismine uygulanan gerilimin tam sinüsoidal ya da tepe değeri ile etkin değeri arasındaki oranın  $\sqrt{2} \pm \%5$  ( $1,3435 < TF < 1,4849$ ) sınırları içinde olması gerekmektedir [3]. Tablo 7.1'de verilen deney gerilimlerine ilişkin THB değerleri seçilirken, TF değeri için yukarıda anılan sınırlar göz önünde bulundurulmuştur. Tablo 7.1'deki ölçüm sonuçlarının Şekil 7.1, Şekil 7.3, Şekil 7.2 ve Şekil 7.4'deki grafikler yardımıyla irdelenmesi mümkündür.



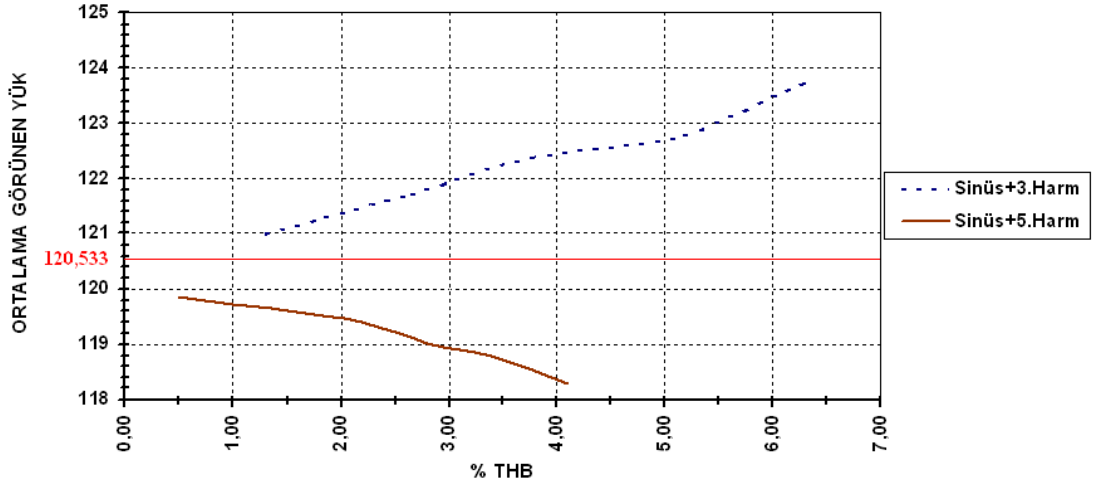
Şekil 7.1: Ortalama darbe tekrarlama oranının TF'ye bağlı değişimi.



Şekil 7.2: Ortalama darbe tekrarlama oranının % THB'ye bağlı değişimi.



Şekil 7.3: Ortalama görünen yük genliğinin TF'ye bağlı değişimi.



Şekil 7.4: Ortalama görünen yük genliğinin % THB'ye bağlı değişimi.

Tablo 7.1'de verilen ortalama darbe tekrarlama oranı ve ortalama darbe sayısı değerleri, toplam darbe sayısı değerinin bir fonksiyonudur. Bu nedenle yalnız ortalama darbe tekrarlama oranının Şekil 7.1'de TF'ye ve Şekil 7.2'de THB'ye bağlı değişim grafikleri verilmiştir.

Şekil 7.1'den, 3. ve 5. harmonik bileşenlerin TF'yi arttıran değerlerinin, darbe tekrarlama oranını arttırdığı, TF'yi azaltan değerlerinin darbe tekrarlama oranını düşürdüğü anlaşılmaktadır.

3. harmoniğe bağlı olarak artan THB değerinin, ortalama darbe tekrarlama oranını düşürdüğü, 5. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB değerinin ise, ortalama darbe tekrarlama oranını arttırdığı Şekil 7.2'den anlaşılmaktadır.

Ortalama görünen yük genliğinin TF'ye bağlı değişimi Şekil 7.3'de, THB'ye bağlı değişimi Şekil 7.4'de verilmiştir. Şekil 7.3'den 3. ve 5. harmonik bileşenlerin, TF'yi arttıran değerlerinin, ortalama görünen yük genliğini düşürdüğü anlaşılmaktadır.

Şekil 7.4'e göre, 3. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB değeri, görünen yük genliğinde artışa neden olmaktadır. 5. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB değeri ise, 3. harmoniğin tersine, ortalama görünen yük genliğini düşürmektedir. Ayrıntıları Tablo 7.1'de verilen deney gerilimleri yardımıyla elde edilen KB örüntüleri Şekil 7.5'de verilmiştir.

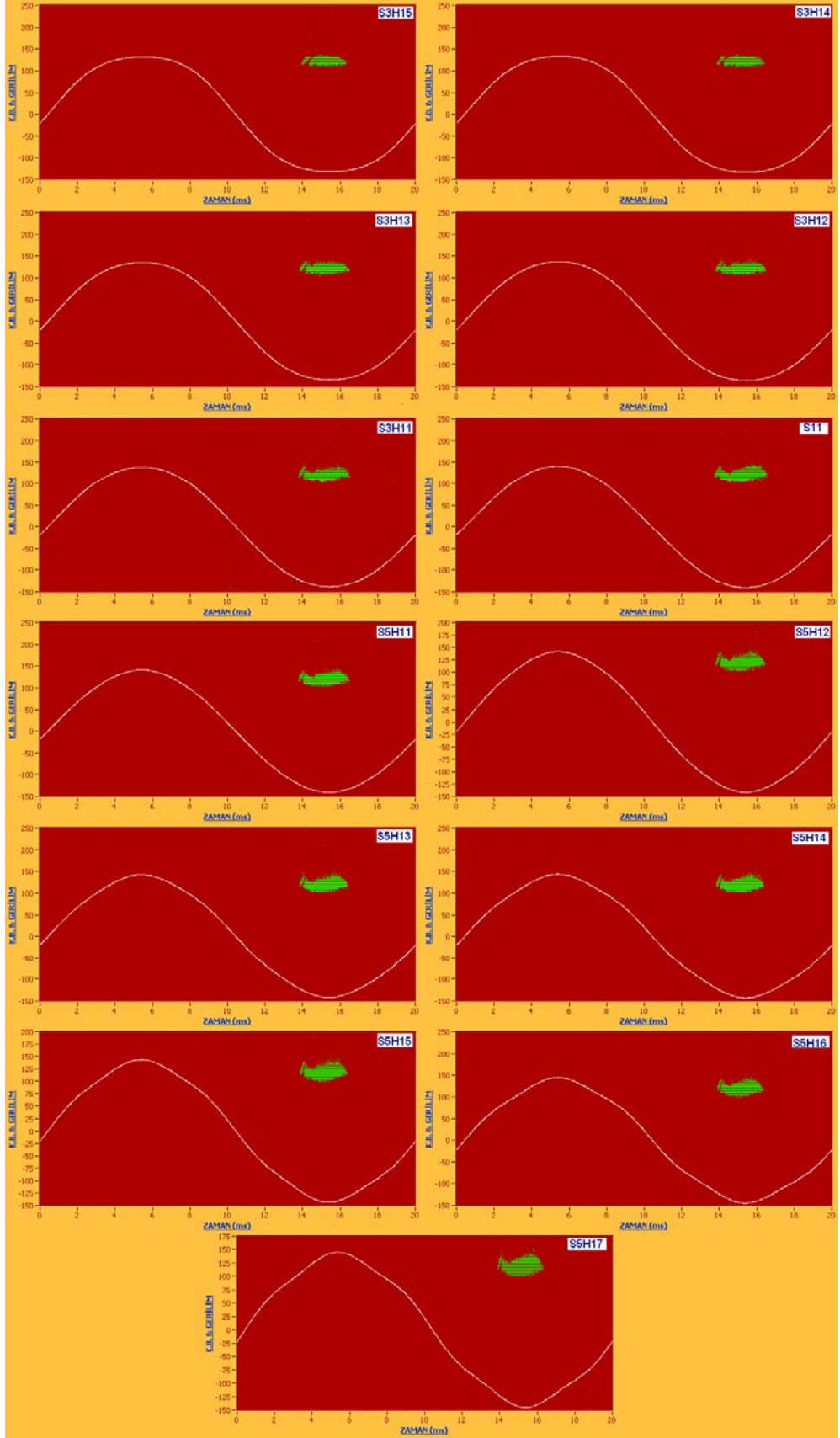


Tablo 7.2’de farklı THB’lerdeki deney gerilimleri ile aynı SYK elektrot sistemi üzerinde edilen ikinci KB ölçüm sonuçları verilmiştir. Deneyler, 22,5<sup>0</sup>C sıcaklık, 732 mmHg basınç ve % 68 bağıl nem oranına sahip ortam koşullarında gerçekleştirilmiştir. Gerilim 4,29 kV etkin değerde sabit tutulmuş ve 30 saniye (1500 periyot) uzunluğunda veri kayıtları alınmıştır. Deney gerilimini oluşturan temel ve harmonik bileşenler arasındaki faz açısı yaklaşık sıfır derecedir.

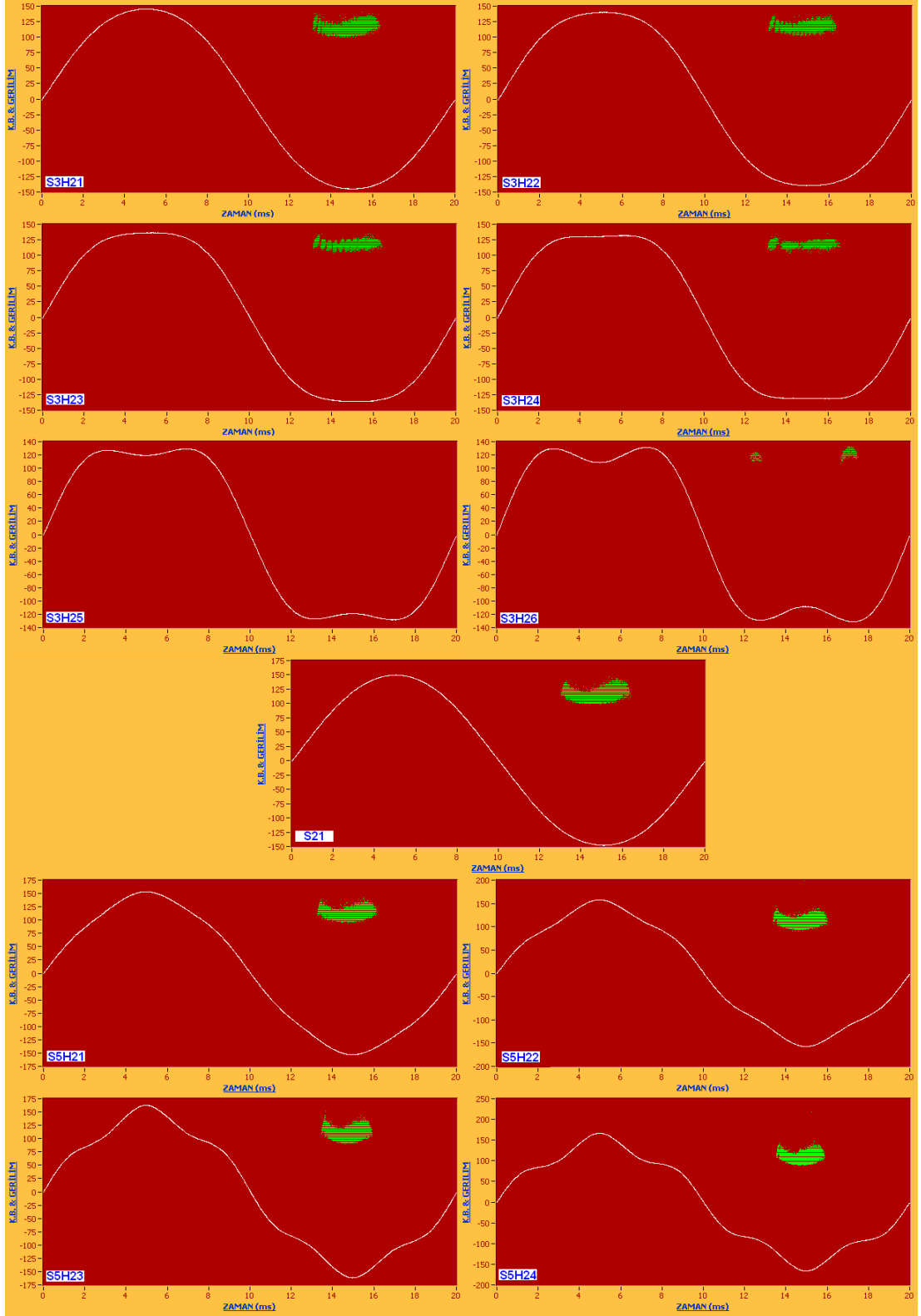
Tablo 7.2: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,29 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB ölçüm sonuçları.

No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ (kV)	$U_p$ (kV)	THB (%)	TF	Ortalama Darbe Sayısı	Toplam Darbe Sayısı	Ortalama Görünen Yük (p C)	Ortalama Darbe Tekrarlama Oranı (n)
S3H26	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,29	25,6	1,233	0,553	829	121,395	57,810
S3H25	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,21	19,2	1,214	0	0	0	0
S3H24	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,29	12,80	1,234	3,781	5672	117,816	189,067
S3H23	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,50	9,00	1,280	8,827	13240	117,163	441,333
S3H22	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,65	6,70	1,318	12,110	18165	116,316	605,500
S3H21	Sinüs + 3.Harm.	4,29	5,89	2,80	1,372	17,659	26489	114,768	882,967
S21	Sinüs	4,29	6,06	0,00	1,414	22,289	33433	114,660	1114,433
S5H21	Sinüs + 5.Harm.	4,29	6,23	2,80	1,452	22,733	34100	111,891	1136,667
S5H22	Sinüs + 5.Harm.	4,29	6,40	5,90	1,492	25,661	38491	109,712	1283,033
S5H23	Sinüs + 5.Harm.	4,29	6,59	9,10	1,536	28,185	42278	108,643	1409,267
S5H24	Sinüs + 5.Harm.	4,29	6,76	12,50	1,575	31,401	47101	107,523	1570,033

Tablo 7.2’de ayrıntıları verilen deney gerilimlerinin THB değerleri, Tablo 7.1’de verilenlere oranla daha büyük seçilmiştir. Fakat elde edilen deney sonuçları önceki sonuçlara benzerlik göstermektedir. 3. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB, ortalama görünen yük değerini arttırırken, darbe tekrarlama oranını düşürmektedir. % 19,2 THB’ya sahip S3H25 numaralı deney gerilimi SYK elektrot sistemini, KB başlama gerilimine ulaştıramadığı için KB oluşturamamıştır. THB’si % 25,6 olan S3H26 nolu deney geriliminde tekrar KB oluşturma şartı sağlanabilmiştir. 5. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB değeri ortalama görünen yük değerini düşürürken, darbe sayısını arttırmıştır. Şekil 7.6’da, Tablo 7.2’deki deney gerilimlerinden elde edilen KB örüntüleri görülmektedir.



Şekil 7.5: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,02 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri.



Şekil 7.6: SYK elektrot sistemi kullanılarak 4,29 kV sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri.

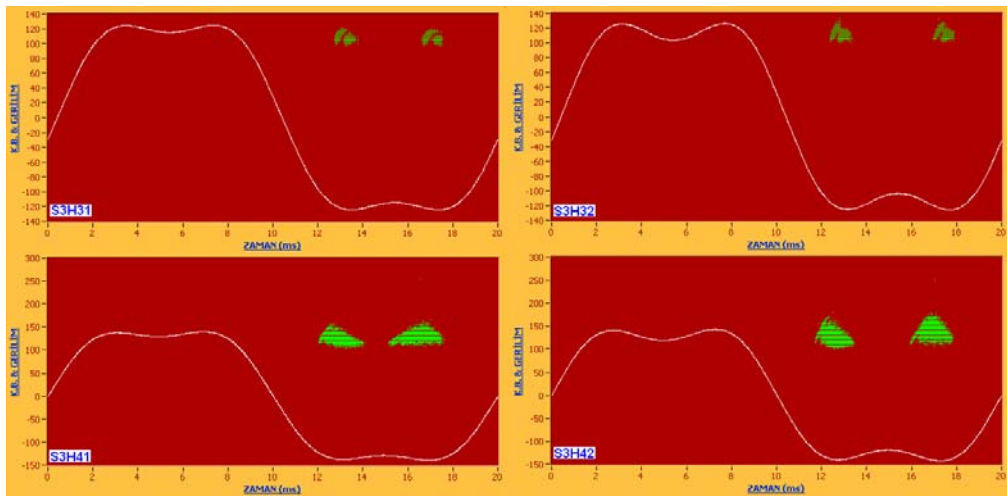
Tablo 7.3’de temel ve 3. harmonik bileşenler ile elde edilen ve yüksek THB’lere sahip deney gerilimlerine ilişkin KB ölçüm sonuçları verilmiştir. 3. harmonik

bileşene bağlı olarak THB'nin artması, TF'nin ve buna bağlı olarak darbe tekrarlama oranının düşmesine neden olmaktadır. Fakat belirli bir noktadan sonra THB'nin artışına bağlı olarak TF tekrar artmaya başlamaktadır. TF'de meydana gelen bu artış darbe tekrarlama oranının artmasına neden olmaktadır.

Tablo 7.3: SYK elektrot sistemi ile bozuk gerilimlerde elde edilen KB ölçüm sonuçları.

No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ (kV)	$U_p$ (kV)	THB (%)	TF	Ortalama Darbe Sayısı	Toplam Darbe Sayısı	Ortalama Görünen Yük (pC)	Ortalama Darbe Tekrarlama Oranı (n)
S3H31	Sinüs + 3.Harm.	4,19	5,07	19,7	1,209	3,131	4697	109,313	156,5666667
S3H32	Sinüs + 3.Harm.	4,16	5,12	26,1	1,230	3,899	5848	113,378	194,9333333
S3H41	Sinüs + 3.Harm.	4,67	5,66	19,4	1,212	8,864	13296	128,894	443,2
S3H42	Sinüs + 3.Harm.	4,7	5,78	25,4	1,230	9,945	14917	132,729	497,2333333

Şekil 7.7'deki KB örüntüleri Tablo 7.3'deki deney gerilimleri yardımıyla elde edilmiştir. 3. harmonik bileşene bağlı olarak THB'nin artması, KB darbelerinin faz açısı üzerinde etkili olmaktadır. Deney gerilimindeki 3. harmonik bileşen genliğinin artması, KB darbelerinin, sıfır geçişlerine yakın biçimde kümelenmesine neden olmaktadır. Tablo 7.3'deki S3H41 ve S3H42 numaralı deney gerilimleri Tablo 7.2'deki ortam koşullarında SYK elektrot sistemine uygulanmıştır. S3H31 ve S3H32 numaralı deney gerilimleri, 30<sup>0</sup>C sıcaklığa, 722 mmHg basınca ve % 83 bağıl nem oranına sahip ortam koşullarında SYK elektrot sistemine uygulanmıştır. Farklı ortam koşullarında elde edilen sonuçların benzer olması, yukarıda açıklanan sebep sonuç ilişkilerini kuvvetlendirmektedir.



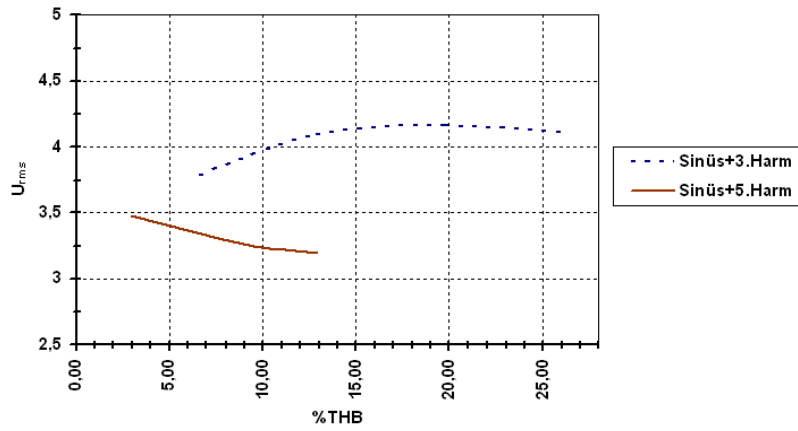
Şekil 7.7: SYK elektrot sistemi kullanılarak sabit genliğe sahip bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri.

3. ve 5. harmonik bileşenlerin KB başlama gerilimi üzerindeki etkileri Tablo 7.4’de ayrıntıları verilen deney gerilimleri ile incelenmiştir.

Tablo 7.4: Boşalma başlama gerilimlerinin THB’ye bağlı değişimi.

No	Dalga Şekli	Urms (kV)	Up (kV)	THB (%)	TF
S3H54	Sinüs + 3.Harm.	3,79	5,06	6,6	1,335
S3H53	Sinüs + 3.Harm.	4,10	5,06	12,8	1,234
S3H52	Sinüs + 3.Harm.	4,17	5,06	19,7	1,213
S3H51	Sinüs + 3.Harm.	4,11	5,06	26,1	1,231
S21	Sinüs	3,57	5,06	0,0	1,417
S5H51	Sinüs + 5.Harm.	3,47	5,06	2,9	1,458
S5H52	Sinüs + 5.Harm.	3,36	5,06	6,2	1,506
S5H53	Sinüs + 5.Harm.	3,25	5,06	9,5	1,557
S5H54	Sinüs + 5.Harm.	3,19	5,06	12,9	1,586

Deneysel çalışmaların yapıldığı ortam sıcaklığı  $28^{\circ}\text{C}$ , basıncı 724 mmHg ve bağıl nem oranı % 85 olarak ölçülmüştür. Tablo 7.4’te verilen tüm deney gerilimleri için boşalma başlama geriliminin tepe değeri yaklaşık 5,060 kV civarındadır. Buradan KB boşalma başlama geriliminin, tamamen elektrot sistemine uygulanan geriliminin tepe değerine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. Fakat değişik THB’lerden dolayı deney gerilimlerinin etkin değerleri bir birinden farklı olarak ölçülmüştür. Farklı THB’lere sahip deney gerilimlerinden elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 7.8’de grafiksel olarak verilmiştir.



Şekil 7.8: Boşalma başlama gerilimlerinin, THB ye bağlı değişim grafiği.

Şekil 7.8’de verilen grafikten 5. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB’nin KB başlama geriliminin etkin değerini düşürdüğü, 3. harmoniğe bağlı olarak artan THB’nin ise KB başlama geriliminin etkin değerini arttırdığı anlaşılmaktadır.

## **7.2. Rogowski Profili Disk Elektrot Sistemi ile Yapılan Deneysel Çalışmalar**

Deneysel çalışmaların ikinci bölümünde, polimetil meta krilat esaslı termoplastik bir malzeme olan saydam pleksiglas malzemeler ile çalışılmıştır. Tornada disk şekli verilen her biri yaklaşık 3 mm kalınlığındaki 3 adet pleksiglas malzeme bir araya getirilerek yapay kusurlu numuneler elde edilmiştir. Yapay kusur ortada bulunan pleksiglas malzemenin merkezine açılan delik yardımıyla oluşturulmuştur. Deneysel çalışmalar farklı çaplarda yapay kusur içeren 10 adet farklı numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Pleksiglas malzemede meydana gelen kısmi boşalmalar, malzemeyi çok hızlı yaşlandırdığı için 9 adet numuneden doyurucu sonuçlar elde edilememiştir. Malzemenin hızlı yaşlanması, uygulanan her bir deney geriliminde kusuru oluşturan deliğin fiziksel özelliklerini değiştirmiştir ve kısmi boşalma aktivitelerini kararsız hale getirmiştir. Örneğin delik duvarlarında meydana gelen hızlı karbonlaşma, deneylerden elde edilen kısmi boşalma büyüklüklerine ilişkin sonuçları tutarsızlaştırmış ve yorumlanabilmesini engellemiştir. Yalnızca bir deney numunesinden elde edilen sonuçlar, harmonikli gerilimlerin kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerinin sadece darbe sayısı açısından yorumlanabilmesine olanak sağlamıştır.

Tablo 7.5’de yapay kusur çapı 1,5 mm olan deney numunesine, farklı THB’ye sahip gerilimlerin uygulanmasıyla elde edilen ölçüm sonuçları verilmiştir. Tablo 7.5’de verilen deney gerilimleri, yaklaşık 24,5 kV etkin değerinde sabit tutulmaya çalışılmıştır. Temel bileşen ile harmonik bileşenler arasındaki açı yaklaşık sıfırdır.

Tablo 7.5’de verilen gerilimler deney cismine, S61, S5H62, S3H63, S62, S5H61, S3H61, S3H62, S3H64, sıralamasıyla uygulanmıştır. Uygulanan her bir deney gerilimi ortalama görünen yük miktarının giderek artmasına sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak deney cismindeki kusurlu bölgenin, giderek yaşlandığını söylemek mümkündür.

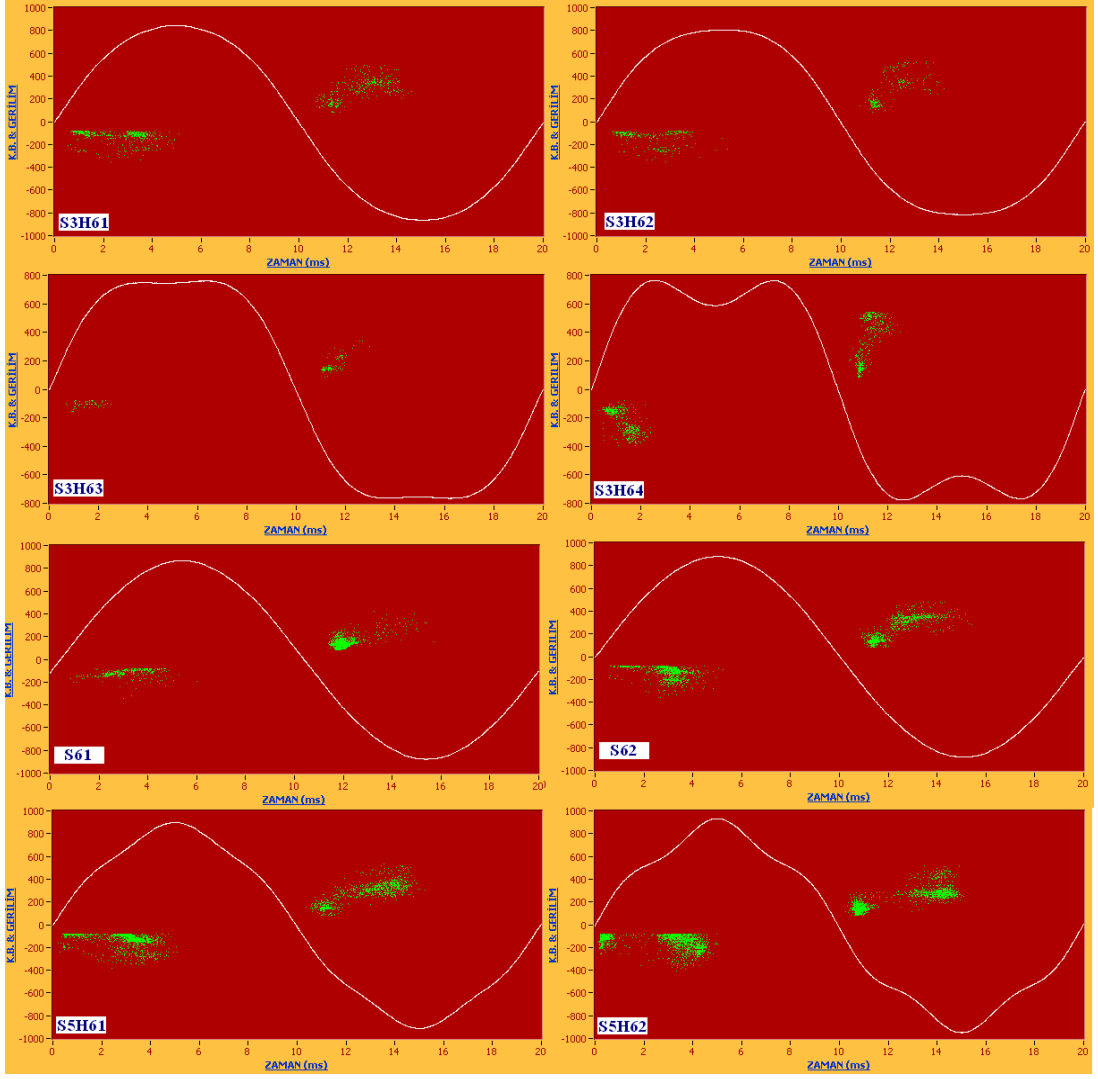
Malzemede meydana gelen yaşlanmaya rağmen, toplam KB darbe sayısının kararlı biçimde değiştiğini söylemek mümkündür. 3. harmonik bileşenin genliğine bağlı olarak artan THB değeri, % 29,72'ye kadar toplam darbe sayısında düşmeye neden olmaktadır. % 29,72 THB'ye sahip 3. harmonik içeren deney geriliminde ise darbe sayısında artış meydana gelmiştir.

5. harmonik bileşene bağlı olarak artan THB değeri ise, toplam KB darbe sayısının önemli miktarda artmasına neden olmaktadır. KB darbe sayısının artışı, malzeme ömründe çok hızlı biçimde kısalmaya neden olabilir.

Şekil 7.9'da yapay kusur içeren deney numunesine Tablo 7.5'de verilen gerilimlerin uygulanmasıyla elde edilen kısmi boşalma örüntüleri görülmektedir.

Tablo 7.5: Yapay kusurlu deney cismi ile sabit gerilimlerde elde edilen KB ölçüm sonuçları.

No	Dalga Şekli	$U_{rms}$ (kV)	$U_p$ (kV)	THB (%)	TF	Ortalama Darbe Sayısı	Toplam Darbe Sayısı	Ortalama Görünen Yük (pC)	Ortalama Darbe Tekrarlama Oranı (n)
S3H61	Sinüs + 3.Harm.	24,87	33,73	4,6	1,356	0,593	884	190,058	83,553
S3H62	Sinüs + 3.Harm.	24,50	32,03	7,5	1,307	0,329	494	202,072	76,708
S3H63	Sinüs + 3.Harm.	24,65	30,13	14,50	1,222	0,126	185	150,574	66,071
S3H64	Sinüs + 3.Harm.	24,42	30,37	29,72	1,243	0,620	930	269,546	74,758
S61	Sinüs	24,33	34,41	-	1,414	1,210	1800	137,914	62,069
S62	Sinüs	24,64	34,80	-	1,412	1,227	1825	195,919	83,257
S5H61	Sinüs + 5.Harm.	24,33	35,69	4,20	1,467	1,413	2106	202,909	89,617
S5H62	Sinüs + 5.Harm.	24,41	37,08	8,30	1,519	2,330	3441	184,122	119,231



Şekil 7.9: Yapay kusur içeren deney numunesi kullanılarak sabit genliğe sahip sinüsoidal ve bozuk gerilimler ile elde edilen KB örüntüleri.



## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sürekli olarak gelişen teknoloji, elektrik enerjisine olan bağımlılığı her geçen gün arttırmaktadır. Elektrik enerjisindeki talep artışına bağlı olarak, güç sistemlerinin beslediği doğrusal olmayan yük miktarında da artış meydana gelmektedir. Özellikle AA/DA-DA/AA dönüştürücüler, enerji tasarruflu olarak tanımlanan elektronik balastlı floresan lambalar, MOS-FET ya da IGBT gibi elektronik elemanlardan meydana gelen sistemler doğrusal olmayan yüklerin başında gelmektedir. Güç sistemlerinde meydana gelen harmoniklerin temel sebebi doğrusal olmayan bu yüklerdir. Harmonik bileşenler, alternatif gerilim dalga şeklini sinüsoidal biçimden uzaklaştırarak bozmakta ve enerji kalitesini düşürmektedir. Doğrusal olmayan yükler ile aynı şebekeden beslenen diğer tüm yükler de, işletme koşullarında söz konusu bu bozuk gerilimlere maruz kalmaktadır.

Elektrik enerjisinin yüksek gerilim ile iletimi ve dağıtımı güç sistemlerinde ortaya çıkan kayıpları azaltmak için başvurulan zorunlu bir yöntemdir. Yüksek gerilim ile enerji kayıpları azaltılabilmektedir, fakat ortaya yalıtım sorunları çıkmaktadır. Yüksek gerilim sistemlerinde kullanılan aygıtların yalıtım kalitesi, aygıtlara uygulanan bazı deneyler yardımıyla değerlendirilebilmektedir. Yalıtım performansının değerlendirilmesinde en sık tercih edilen tahribatsız deney yöntemi, kısmi boşalma ölçümleridir. Üretimi tamamlanan yüksek gerilim aygıtlarının kısmi boşalma ölçümleri laboratuvar ortamında sinüsoidal gerilimler ile yapılmaktadır. Fakat bu aygıtlar işletme koşullarında, yukarıda anlatılan sebeplerden dolayı ortaya çıkan, bozuk gerilimler nedeniyle farklı biçimde zorlanabilmektedirler. Bu nedenle harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının, kısmi boşalmalar üzerindeki etkileri araştırılması gereken bir konu haline almaktadır.

Bu doktora çalışması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim bozulmalarının elektriksel kısmi boşalmalar üzerindeki etkilerini deneysel olarak belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için, faz çözünümlü kısmi boşalma ölçümü gerçekleştirebilen bir ölçme sistemi geliştirilmiştir.

Ölçme sisteminde kullanılan ön direnç, kuplaj kondansatörü, ohmik gerilim bölücü, kısmi boşalma kalibratörü, kısmi boşalma ölçü aleti ve faz çözünümlü kısmi boşalma yazılımı, yerli olanaklar ölçüsünde tasarlanmış ve yapılmıştır.

Kısmi boşalma ölçüm sistemi için geliştirilen aygıtların işlerliği farklı yüksek gerilim laboratuvarlarında yapılan deneyler ile sınanmıştır. Yapılan karşılaştırmalar, geliştirilen aygıtların yüksek fiyatlar karşılığında yurt dışından ithal edilen aygıtların yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Laboratuvar koşullarında alternatif gerilimle yapılan elektriksel kısmi boşalma ölçümlerinde, kullanılan gerilim dalga şeklinin tam sinüsoidal olması veya tepe değeri ile etkin değeri arasındaki oranın  $\sqrt{2} \pm \%5$  sınırları içinde kalması gerektiği standartlarda bildirilmiştir. Doktora çalışmasında yukarıda anılan sınırlar içerisinde kalan, 3. ve 5. harmonik bileşenleri içeren yüksek gerilimler ile deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen elektriksel kısmi boşalma ölçüm sonuçları, standartlarda belirtilen sınırların KB ölçümleri için sağlıklı olmadığını, göstermiştir. Tam sinüsoidal durumdan % 1 sapma gösteren harmonikli bozuk gerilimler, KB ölçüm sonuçlarını önemli oranda değiştirmektedir.  $\sqrt{2} \pm \%5$  sınırları içinde kalan 3. harmonik bileşene sahip deney gerilimleri, darbe tekrarlama oranını düşürürken, 5. harmonik bileşene sahip deney gerilimleri darbe tekrarlama oranını arttırabilmektedir. Darbe tekrarlama oranının artması zamanla yalıtkanın Şekil 8.1’de görüldüğü gibi karbonlaşarak özelliğini yitirmesine sebep olmaktadır.



Şekil 8.1: Kısmi boşalma darbelerinin yalıtkanında meydana getirdiği yaşlanma.

Şekil 8.1’de görülen karbonlaşmış yalıtkan, deneysel çalışmaların ikinci kısmında kullanılan yapay kusur içeren yalıtkanlardan birisine aittir.

Sonuç olarak yüksek gerilimde kullanılan aygıtların kısmi boşalma deneyleri gerçekleştirilirken, işletme koşullarında karşılaşılabilecek bozuk gerilimler dikkate alınmalıdır. Özellikle kısmi boşalma ölçümleri, harmonik analizi yapabilen ölçme sistemleri kullanılarak yapılmalı ve aygıtların harmonikli gerilimlerde oluşturduğu kısmi boşalma davranışlarında dikkate alınmalıdır. Standarlarda verilen sınırlar içindeki alternatif gerilimler ile kısmi boşalma deneyleri yapılan ve yalıtım kalitesi onaylanan aygıtların, işletme koşullarında oluşan harmonikli yüksek gerilimler altında yalıtım performansının değişebileceği dikkate alınmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] IEC 60270, “High-Voltage Test Techniques- Partial Discharge Measurements”, International Standard, *International Electrotechnical Commission*, Third Edition, 12-(2000).
- [2] TS 2051 EN 60270 “Kablolar-Yüksek Gerilim Deney Teknikleri-Kısmi Boşalma Ölçmeleri” Türk Standardı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, Nisan (2003).
- [3] IEC 60060-1 “High-Voltage Test Techniques –Part 1: General Definitions and Test Requirements”, International Standard, *International Electrotechnical Commission*, Edition 3.0, 09-(2010).
- [4] Özkaya, M., “Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları”, 2. baskı, *İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası*, 1-196, (1979).
- [5] Kreuger, F. H., “Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment”, *Butterworth & Co. Ltd.*, 1-100, (1989).
- [6] Lucas, J. R., “High Voltage Engineering”, Revised edition, (2001).
- [7] Edin, H., “Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage”, Doktora Tezi, *Kungl Tekniska Högskolan Department of Elec. Eng. Div. Electrotechnical Design*, Stockholm- Sweden, 12-90, (2001).
- [8] Kuffel, E., Abdullah, M., “High Voltage Engineering”, *Pergamon Press Ltd.*, 79-95 / 313-327, (1970).
- [9] Kuffel, J., Kuffel, E., Zaengl, W. S., “Yüksek Gerilim Mühendisliği Temelleri (Çeviri)”, Özşar, Ç., Bodur, A., *TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası*, Emo Yayın No: EG/2008/4, 348-353 / 395-456, (2008).
- [10] Weber, H. J., “Partial Discharge Measuring Techniques- Tettex 21 Information”, *Tettex AG Instruments and ETH*, Zurich.
- [11] Wenliang, C., Zhan C., “An Experimental Study of the Damaging Effects of Harmonics in Power Networks on the Capacitor Dielectrics”, *Second International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, Vol. 2, 645–648, 12-16 September (1988).
- [12] Bozzo, R., Gemme, C., Guastavino, F., Montanari, G. C., “Investigation of Aging Rate in Polymer Films Subjected to Surface Discharges Under Distorted Voltage”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Vol. 2, 435-438, 19-22 October (1997).

- [13] Hains, A. J., “Insulation Performance Under Switched Voltage Waveforms” *IEEE Colloquium on Effects of High Speed Switching on Motors and Drives*, (Ref. No. 1999/144), 2/1-2/5, 9 June (1999).
- [14] Gross, D. W., Fruth, B. A., “Distortion of Phase Resolved Partial Discharge Pattern due to Harmonics and Saturation”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Atlanta, Georgia, USA, Vol. 2, 416–419, 25-28 October (1998).
- [15] Kurihara, T., Tsuru, S., Imasaka, K., Suehiro, J., Hara, M., “PD Characteristics in an Air-Filled Void at Room Temperature Under Superimposed Sinusoidal Voltages”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 8, No. 2, 269-275, April (2001).
- [16] Boonseng, C., Chompoo-Inwai, C., Kinnares, V., Nakawiwat, K., Apiratikul, P., “Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors due to Related Harmonic Resonance Effects” *Power Engineering Society Winter Meeting*, IEEE, Vol. 3, 1003-1008, 28 January - 1 February (2001).
- [17] Duarte, L. H. S., Alves, M. F., “The Degradation of Power Capacitors Under The Influence of Harmonics”, *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Vol. 1, 334-339, (2002).
- [18] Di Lorenzo del Casale, M., Romano, P., Schifani, R., “On Investigation of PD Aging of Epoxy Resin Under Distorted Voltage”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Victoria, BC, Canada, Vol. 2, 573-576, 15-18 October (2000).
- [19] Di Lorenzo del Casale, M., Romano, P., Schifani, R., “PD Performance of Dielectric Insulations in Presence of Low Frequency Conducted Disturbances: A Life Model Approach” *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 294-297, 14-17 October (2001).
- [20] Cavallini, A., Conti, M., Montanari, G. C., Contin, A., Candela, R., Romano, P., Schifani, R., “Searching for PD-Based Indexes Able to Infer the Location of Internal Defects in Insulation” *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Mexico, 703-706, 20-24 October (2002).
- [21] Henriksen, M., Holboll, J. T., R., Rygal, “An Improved Method/Setup for Extended Testing After the CIGRÉ II Method.” *International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, Baltimore MD USA, 144-148, 7-10 June (1992).
- [22] Emanuel, A. E., “Partial Discharges Under Moderately Distorted Voltage: A Preliminary Study”, *10th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, IEEE, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, 788-792, 6-9 October (2002).
- [23] Candela, R., Romano, I., Romano, P., “Influence on PD Parameters due to Distorted Voltage”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, Albuquerque, New Mexico, USA, 593-596, (2003).

- [24] Romano, P., "Influence on PD Parameters due to Voltage Conducted Disturbances", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 1, 160–165, February (2004).
- [25] Guastavino, F., Cerutti, B., Torello, E., "About Surface Partial Discharge Tests on Samples of Polymer Films Subjected to Several Distorted Voltages", *7th International Conference on Solid Dielectrics ICSD*, IEEE, Eindhoven-Netherlands, 324-328, 25-29 June (2001).
- [26] Guastavino, F., Centurioni, L., Coletti, G., Dardano, A., Torello, E., "An Experimental Study About the Treeing Phenomena in XLPE Subjected to Distorted Voltages", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 600-603, (2003).
- [27] Guastavino, F., Centurioni, L., Dardano, A., Torello, E., "Electrical Treeing Inception and Growth in XLPE in Presence of Harmonics", *International Conference on Solid Dielectrics*, IEEE, Vol. 1, 363-366, 5-9 July (2004).
- [28] Guastavino, F., Coletti, G., Dardano, A., Ratto, A., Torello, E., "Life Prediction of XLPE Subjected to Distorted Voltages in Presence of Bush-Like Electrical Treeing", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 724-727, 15-18 Oct. (2006).
- [29] Florkowski, M., "Influence of High Voltage Harmonics on Partial Discharge Patterns", *5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, Seoul, Korea, Vol. 1, 303-306, 25-30 May (1997).
- [30] Florkowski, M., Florkowska, B., "Distortion of Partial-Discharge Images Caused by High-Voltage Harmonics", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 153, No. 2, 171–180, March (2006).
- [31] Florkowska, B., Florkowski, M., Zydron, P., "The Role of Harmonic Components on Partial Discharge Mechanism and Degradation Processes in Epoxy Resin Insulation", *International Conference on Solid Dielectrics ICSD*, IEEE, Winchester UK, 560-563, July 8-13 (2007).
- [32] Bahadoorsingh, S., Rowland, S. M., "Modeling of Partial Discharges in the Presence of Harmonics", *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP*, IEEE, 384-387, 18-21 Oct. (2009).
- [33] Bahadoorsingh, S., Rowland, S. M., Catterson, V. M., Rudd, S. E., McArthur, S. D. J., "Interpretation of Partial Discharge Activity in the Presence of Harmonics", *International Conference on Solid Dielectrics ICSD*, IEEE, Potsdam Germany, 1-4, 4-9 July (2010).
- [34] Bahadoorsingh, S., Rowland, S. M., Catterson, V. M., Rudd, S. E., McArthur, S. D. J., "The Role of Circumstance Monitoring on the Diagnostic Interpretation of Condition Monitoring Data", *International Symposium on Electrical Insulation ISEI*, IEEE, San Diego California, 1-5, 6-9 June (2010).

- [35] Bahadoorsingh, S., Rowland, S. M., “An Investigation of the Harmonic Impact on Electrical Treeing Partial Discharge Activity”, *International Symposium on Electrical Insulation ISEI*, IEEE, San Diego California, 1-5, 6-9 June (2010).
- [36] Catterson, V. M., Bahadoorsingh, S., Rudd, S., McArthur, S. D. J., Rowland, S. M., “Identifying Harmonic Attributes from Online Partial Discharge Data”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 26, No. 3, 1811-1819, July (2011).
- [37] Romano, I., Schifani, R., “Effects of 3rd-Harmonic Voltage Content on Dielectric Losses of Solid Insulating Materials”, *Electric Power Applications IEE Proceedings B*, IEEE, Vol. 128, No. 2, 119-125, March (1981).
- [38] Ward, B. H., “Digital Techniques For Partial Discharge Measurements”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, 469–479, April (1992).
- [39] Kranz, H. G., “Fundamentals in Computer Aided PD Processing, PD Pattern Recognition and Automated Diagnosis in GIS”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No. 1, 12–20, Feb. (2000).
- [40] Gulski, E., “Computer-Aided Measurement of Partial Discharges in HV Equipment”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 28, No. 6, 969-983, December (1993).
- [41] Gulski, E., Kreuger, F. H., “Computer-Aided Recognition of Discharge Sources”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 27, No. 1, February (1992).
- [42] Gulski, E., “Digital Analysis of Partial Discharges”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 2, No. 5, 822-837, October (1995).
- [43] Forssén, C., Edin, H., “Partial Discharges in a Cavity at Variable Applied Frequency Part 1: Measurements”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, 1601-1609, December (2008).
- [44] Forssén, C., Edin, H., “Partial Discharges in a Cavity at Variable Applied Frequency Part 2: Measurements and Modeling”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, 1610-1616, December (2008).
- [45] Gulski, E., “Computer-Aided Registration and Analysis of Partial Discharge in High Voltage Insulation”, *IEE International Conference on Partial Discharge*, Canterbury, UK, Invited Lecture, 28-30 September (1993).
- [46] Morshuis, P. H. F., “Partial Discharge Mechanisms in Voids Related to Dielectric Degradation”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 62-68, January (1995).
- [47] Fruth, B. A., Gross, D. W., “Partial Discharge Signal Generation Transmission and Acquisition”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 22-28, January (1995).

- [48] Gjaerde, A. C., “Measurements of Void Gas Pressure During Combined Thermal and Partial Discharge Ageing of Epoxy”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 17-21, January (1995).
- [49] Seki, Y., Fukuyama, T., Kikuchi, K., “Deterioration by Partial Discharges of Polyethylene in Oxygen Containing Gas Atmosphere”, *6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, China, 21-26 June (2000).
- [50] Wu, K., Suzuoki, Y., Dissado, L. A., “Improved Simulation Model for PD Pattern in Voids Considering Effects of Discharge Area”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 32-35, 19-22 Oct. (2003)
- [51] Meijer, S., Gulski, E., Smit, J. J., “Pattern Analysis of Partial Discharges in SF<sub>6</sub> GIS”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 5, No. 6, 830-842, December (1998).
- [52] Kaneiwa, H., Murakami, N., Sakai, M., Inoue, Y., “Detection of Partial Discharge from Stator Coil of Rotating Machine”, *8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, 451-454, 26-30 June (2006).
- [53] Nakao, K., Suzuoki, Y., Mizutani T., “PD Patterns and PD Current Shapes of LDPE Specimen with a Void”, *International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, IEEE, Västerås, Sweden, 157-160, 22-25 June (1998).
- [54] Mizutani, T., Kondo, T., “PD Patterns and PD Current Shapes of a Void in LDPE”, *6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Xi'an, China, 276-279, 21-26 June (2000).
- [55] Wu, K., Okamoto, T., Suzuoki, Y., “A Simulation Model For PD Patterns in Voids With Consideration of PD Discharge Areas”, *Conference on Electrical Insulation and Dielectric*, Vol. 2, 649-652, 15-18 Oct. (2000).
- [56] Kim, C.S., Kondo, T., Mizutani, T., “Change in PD Pattern with Aging”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 1, 13-18, February (2004).
- [57] Hikita, M., Yamada, K., Nakamura, A., Mizutani, T., Oohasi, A., Ieda, M., “Measurements of Partial Discharges by Computer and Analysis of Partial Discharge Distribution by the Monte Carlo Method”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 3, 453-468, June (1990).
- [58] Lahti, K., Kannus, K., Nousiainen, K., “Diagnostic Methods in Revealing Internal Moisture in Polymer Housed Metal Oxide Surge Arresters”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, 951-956, October (2002).



- [59] Bolhuis J. P., Gulski, E., Smit, J. J., “On-line PD Detection, Requirements for Practical Use”, *International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, Boston MA USA, 158-161, 7-10 April (2002).
- [60] Zingales, G., “The Requirements of a PD Measuring System Analyzed in the Time Domain”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, No.1, 2-5, Feb.(2000).
- [61] Abdel-Galil, T. K., El-Hag, A. H., Gaouda, A. M., Salama, M. M. A., Bartnikas, R., “De-noising of Partial Discharge Signal Using Eigen-Decomposition Technique”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, 1657-1662, December (2008).
- [62] Wenrong, S., Junhao, L., Peng, Y., Yanming, L., “Digital Detection, Grouping and Classification of Partial Discharge Signals at DC Voltage”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 6, 1663-1674, December (2008).
- [63] Vogelsang, R., Fruth, B., Frohlich, K., “Detection of Electrical Tree Propagation in Generator Bar Insulations by Partial Discharge Measurements”, *7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, IEEE, Nagoya, Vol. 1, 281-285, June 1-5 (2003).
- [64] Wang, Y., “New Method for Measuring Statistical Distributions of Partial Discharge Pulses”, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, Vol. 102, Num.5, 569-576, Sept.–Oct. (1997).
- [65] Gafvert, U., “Dielectric Response Analysis of Real Insulation Systems”, *International Conference on Solid Dielectrics ICSD*, IEEE, Vol. 1, 1-10, 5-9 July (2004).
- [66] Rivera, H. L., Sanahuja, C. M., Souto, J. A. G., “Detection and Wavelet Analysis of Partial Discharges Using an Optical Fibre Interferometric Sensor for High-Power Transformers”, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, UK, Vol. 5, No. 1, 66-72, (2003).
- [67] Pedersen, A., Crichton G. C., McAllister I. W., “Partial Discharge Detection: Theoretical and Practical Aspects”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 29-36, January (1995).
- [68] Goldman, M., Goldman, A., Gatellet, J., “Physical and Chemical Aspects of Partial Discharges and Their Effects on Materials”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 11-16, January (1995).
- [69] Kemp, I. J., “Partial Discharge Plant-Monitoring Technology: Present and Future Developments”, *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, Vol. 142, No. 1, 4-10, January (1995).
- [70] IEC 60099-4, “Metal-Oxide Surge Arresters Without Gaps for A.C. Systems”, International Standard, *International Electrotechnical Commission*, Second Edition, 05-(2004).

- [71] Fabiani, D., Montanari, G. C., “The Effect of Voltage Distortion on Ageing Acceleration of Insulation Systems Under Partial Discharge Activity”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 17, No. 3, 24–33, May-June (2001).
- [72] Cavallini, A., Loggini, M., Montanari, G. C., “Comparison of Approximate Methods for Estimate Harmonic Currents Injected by AC/DC Converters”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 41. No. 2, 256-262, April (1994).
- [73] Wagner, V. E., “Effects of Harmonics on Equipment”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, 672-680, April (1993).
- [74] Acha, E., Madrigal, M., “Power Systems Harmonics - Computer Modelling and Analysis”, *John Wiley & Sons. Ltd.*, 11-17, (2001).
- [75] Chiampi, M., Crotti, G., Hu, Y., Sardi, A., “Calibration of Partial Discharge Measuring Systems by a Reference Impulse Charge Generator”, *16th IMEKO TC4 Symposium*, Florence, Italy, 22-24 Sept. (2008).
- [76] Gunnarsson, O., Bergman, A., Rydler, K. E., “A Method for Calibration of Partial Discharge Calibrators”, *Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest*, IEEE, Washington D.C., USA, 205-206, 6-10 July (1998).
- [77] Zhang, H., Blackburn, T. R., Phung, B. T., Sen, D., “A Novel Wavelet Transform Technique for on-line Partial Discharge Measurements Part 1: WT De-noising Algorithm”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 1, 3-14, February (2007).
- [78] Zhang, H., Blackburn, T. R., Phung, B. T., Sen, D., “A Novel Wavelet Transform Technique for on-line Partial Discharge Measurements Part 2: On-Site Noise Rejection Application”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 1, 15-22, February (2007).
- [79] Agoris, P. D., Meijer, S., Gulski, E., Simit, J. J., “Threshold Selection for Wavelet De-Noising of Partial Discharge Data”, *International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, Indianapolis, USA, 62-65, 19-22 Sept. (2004).
- [80] Satish, L., Nazneen, B., “Wavelet-Based De-Noising of Partial Discharge Signals Buried in Excessive Noise and Interference”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 10, No. 2, 354-367, April (2003).
- [81] Shim, I., Soraghan, J. J., Siew, W. H., “Detection of PD Utilizing Digital Signal Processing Methods, Part 3: Open-Loop Noise Reduction”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 17, No. 1, 6-13, January-February (2001).
- [82] Jang, J. K., Kim, S. H., Lee, Y. S., Kim, J. H., “Classification of Partial Discharge Electrical Signals Using Wavelet Transforms”, *13th International Conference on Dielectric Liquids*, IEEE, Nara, Japan, 552-555, 20-25 July (1999).

- [83] Quan, Y., Gao, N., Zhang, G., Yan, Z., “Wavelet Transform Applying Partial Discharge Measurement”, *International Symposium on Electrical Insulation*, IEEE, Arlington, Virginia, USA, 428–431, June 7-10 (1998).
- [84] Donoho, D. L., “De-Noising by Soft Thresholding”, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 41, No. 3, 613-627, May (1995).
- [85] Donoho, D. L., Johstone, I. M., “Threshold Selection for Wavelet Shrinkage of Noisy Data”, *16th International Conference of the Engineering in Medicine and Biology Society*, IEEE, 24a-25a, (1994).
- [86] Ma, X., Zhou, C., Kemp, I. J., “Interpretation of Wavelet Analysis and its Application in Partial Discharge Detection”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 9, No. 3, 446-457, June (2002).
- [87] Young, R. K., “Wavelet Theory and its Application”, *Kluwer Academic Publishers*, 1-140, (1996).
- [88] Polikar, R., 2005, The Engineer's Ultimate Guide to Wavelet Analysis - The Wavelet Tutorial [online], Rowan University, <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTpart1.html>, (**Ziyaret tarihi: 12 Ocak 2007**).
- [89] Akansu, A. N., Haddad, R. A., “Multiresolution Signal Decomposition”, *Academic Press Inc*, 291-350, (1992).
- [90] Vetterli, M., Kovačević, J., “Wavelets and Subband Coding”, *Prentice Hall PTR*, 300-365, (1995).
- [91] Gönenç, İ., “Yüksek Gerilim Tekniği - Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrod Sistemleri”, Cilt 1, İTÜ Kütüphanesi Sayı 1085, *Matbaa Teknisyenleri Koll. Şti.*, 42-48, (1977).
- [92] Özkaya, M., “Yüksek Gerilim Tekniği - Statik Elektrik Alanı ve Boşalma Olayları”, *Birsen Yayınevi*, 15-71, (1996).
- [93] Parts Hangar Inc, 2009, Integrated Publishing, [online] [http://www.tpub.com/content/neets/14193/css/14193\\_138.htm](http://www.tpub.com/content/neets/14193/css/14193_138.htm). (**Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2009**).
- [94] Shell Diala Oils A&AX - Electrical insulating oil datasheet <http://www.shellusserver.com/products/pdf/DialaAX.pdf> (**Ziyaret tarihi: 20 Kasım 2009**).
- [95] Kask, U., Rawn, J. D., “General Chemistry”, *Wm. C. Brown Publishers*, (1993).
- [96] Holler, S. W., “Fundamentals of Analytical Chemistry”, Seventh Edition, *Saunders College Publishing*, (1996).

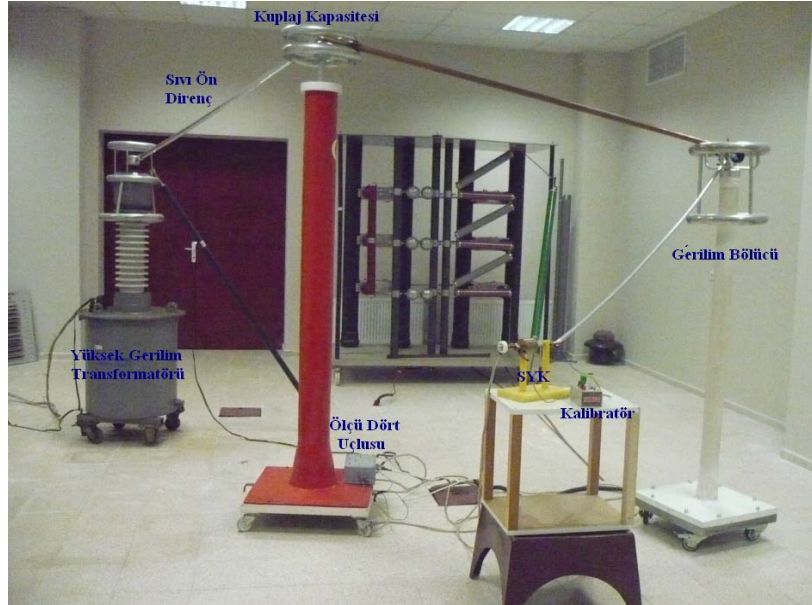
- [97] Fidan, M., İsmailoğlu, H., “Yüksek Gerilim Sıvı Direnci Tasarımı ve Uygulaması”, *TÜBİTAK UME Yüksek Gerilim Ulusal Çalıştayı*, 08-03.1-08-03.4, Kocaeli, 24-26 Ekim (2007).
- [98] Denicolai, M., Hällström, J., “A Self-Balanced, Liquid Resistive, High Impedance HV Divider”, *XIVth International Symposium on High Voltage Engineering*, Tsinghua University, Beijing, China, 25-29 August, (2005).
- [99] Racz, B., Patks, A., “Fast High-Voltage Resistive Pulse Divider”, *Measurement Science and Technology*, Vol. 3, No. 9, 926-926, UK(1992).
- [100] Merev, A., Kalenderli, Ö., “100 ppm’den Küçük Ölçüm Belirsizliğine Sahip 100 kV Yüksek Doğru Gerilim Bölücüsü”, *İTÜ Dergisi*, Mühendislik Cilt: 5, Sayı: 3, Kısım: 1, 39-50, Haziran (2006).
- [101] Fidan, M., İsmailoğlu, H., “A Novel Partial Discharge Calibrator Design via Dual Microcontroller and High Speed DAC”, *Eleco 2007 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, 169-172, 5-9 December (2007).
- [102] Zumbahlen, H., “Opamp Application Handbook Chapter 5: Analog Filters”, Jung, W. G., *Analog Devices Inc*, 5.70-5.87, (2002).
- [103] Siebert, W. M., “Circuits, Signals and Systems” Tenth printing, *Mc Graw-Hill Companies-MIT Press*, USA, 393-485, (1997).
- [104] Kruiskamp, M. W., Leenaerts, D. M. W., “A CMOS Peak Detect Sample and Hold Circuit”, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol. 41, No.1, 295-298, Feb.(1994).
- [105] Chow, H. C., Hor, Z. H., “A High Performance Peak Detector Sample and Hold Circuit for Detecting Power Supply Noise”, *Conference on Circuits and Systems APCCAS*, IEEE, 672-675, Feb.(2008).
- [106] Buckens, P. F., Veatch., M. S., “A High Performance Peak-Detect & Hold Circuits for Pulse Height Analysis”, *IEEE Transaction on Nuclear Science*, Vol. 39, No.4, 753-757, (1992).
- [107] Razavi, B., “Design of Sample and Hold Amplifiers for High Speed Low Voltage A/D Converters”, *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 59-66, (1997).
- [108] Ness Engineering Technical Data Rogowski Profile Electrodes 2009, [online], <http://www.nessengr.com/techdata/rogowski/rogowski.html>., San Diego, (Ziyaret tarihi: 16 Şubat 2009).

## EKLER

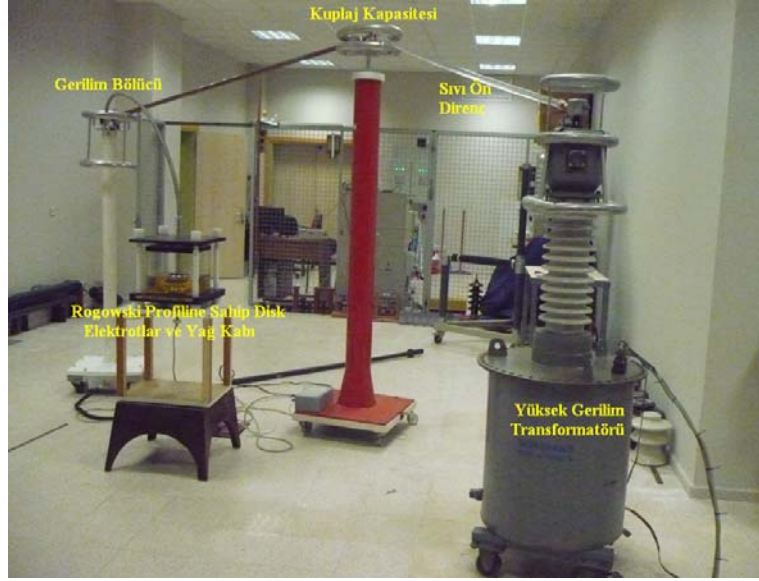
### EK-A. Deney düzeneğine ilişkin resimler



Şekil A.1: Kısmi boşalma ölçme sistemi



Şekil A.2: SYK elektrot deney düzeneği



Şekil A.3: Rogowski profiline sahip disk elektrot deney düzeneği



Şekil A.4: Yapay kusur için pleksiglas numunelerin tornada işlenmesi



Şekil A.5: Rogowski profiline sahip disk elektrotların CNC tornada yapımı

## **EK-B. DeneYlerde kullanılan aygıtların teknik özellikleri**

### **Ayarlanabilir güç kaynağına ilişkin teknik özellikler:**

Üretici Firma	: California Instrument
Marka/Model	: 4500 Lx
Besleme Gerilimi	: 3 Faz 380-400 V AA
Çıkış Gerilimi	: 0-300 V
Max. Çıkış Akımı	: 1 Faz 38,4 A – 3 Faz 12,8 A
Giriş Gücü	: 8900 VA
Çıkış Gücü	: 4500 VA
Giriş Frekansı	: 47-400 kHz
Çıkış Frekansı	: 45-1000 Hz
Güç Açısı	: 0,65
PC Haberleşme	: RS 232

### **Deny transformatorüne ilişkin teknik özellikler:**

Üretici Firma	: Bortrans
Faz Sayısı	: Tek Faz
Besleme Gerilimi	: 0 - 200 V AA
Çıkış Gerilimi	: 0 - 100.00 V AA
Max. Prim. Akımı	: 25 A
Max. Sek. Akımı	: 0,05 A
Max. Güç	: 5 kVA

### **PC'ye ilişkin teknik özellikler:**

İşlemci	: Intel Pentium IV - 3,00 GHz
Dahili Bellek	: 1,5 Gb
İşletim Sistemi	: Windows XP

## ÖZGEÇMİŞ

02.03.1978 yılında İstanbul'da doğdu. İlkokulu İstanbul Maltepe'de ortaokulu Kocaeli Darıca'da tamamladı. S.T.F.A. Anadolu Teknik Lisesi Elektrik Bölümü'nden 1996 yılında Elektrik Teknisyeni olarak mezun oldu. 1997 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 2001 yılı Eylül ayında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitime başladı. Aynı yılın aralık ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne bağlı olarak Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2003 yılında Elektrik Yüksek Mühendisi olarak mezun olduğu Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yine aynı yıl doktora eğitime başladı. Halen adı geçen bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmakta olup evli ve bir çocuk babasıdır.