

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK DÜŞÜK FREKANSLI YÜKSEK GERİLİM
İŞARETLERİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oğuz SUAK**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK DÜŞÜK FREKANSLI YÜKSEK GERİLİM
İŞARETLERİNİN ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Oğuz SUAK
(504081024)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 09 Haziran 2011**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Emel ÖNAL (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Serhat İKİZOĞLU (İTÜ)**

HAZİRAN 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Bu çalışmada son yıllarda Avrupa ve Amerika’da kullanımı yaygınlaşan ancak henüz ülkemizde gerekli ilgiyi görmeyen VLF yüksek gerilim yalıtım deneyi incelenerek VLF yüksek gerilim tekniği ile yapılan yalıtım deneylerinin farklı koşullar altında verdiği sonuçlar yorumlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca beni yönlendiren, desteğini ve bilgisini benden esirgemeyen saygıdeğer danışmanım Y. Doç. Dr. Emel ÖNAL’a ve çalışmam boyunca değerli tecrübeleriyle bana yol gösteren saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Serhat ŞEKER ve Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ’ye teşekkürlerimi sunarım. Hayatım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2011

Oğuz SUAK
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Literatür Özeti	2
2. MATEMATİKSEL YÖNTEMLER.....	5
2.1 Fourier Analizi	5
2.1.1 Fourier katsayılarının bulunması	8
2.2 Fourier Dönüşümü.....	8
2.2.1 Ayırık zamanlı Fourier dönüşümü	9
2.2.2 Ayırık Fourier dönüşümü	9
2.2.3 Pencere fonksiyonları.....	10
2.2.4 Spektral güç yoğunluğu	13
2.3 Harmonik Analizinde Kullanılan Büyüklükler	14
2.3.1 Sinüsoidal olmayan durumda temel denklemler	14
2.3.2 Güç faktörü (GF).....	15
2.3.3 Toplam harmonik bozulma (THD)	16
2.3.4 Şekil faktörü	16
2.3.5 Tepe faktörü	16
2.4 Filtreleme Tekniği	16
2.4.1 Alçak Geçiren Filtre Karakteristikleri.....	17
3. KABLO VE TRANSFORMATÖRLERDE VLF TANI YÖNTEMLERİ.....	19
3.1 Bazı Yalıtım Tanı Yöntemleri.....	19
3.1.1 Toparlanma gerilimi yöntemi (RVM).....	19
3.1.2 Kutuplanma ve geri kutuplanma akımı (PDC)	20
3.1.3 Frekans uzayı spektroskopisi (FDS)	20
3.2 VLF, 50 Hz AC ve DC Yüksek Gerilim Deneylerinin Karşılaştırılması.....	22
3.3 VLF Yüksek Gerilim Deneyleri	23
3.3.1 Dayanım deneyi	23
3.3.2 Kayıp faktörü ($\tan\delta$) ölçümü	25
3.3.3 Kısmi boşalma deneyi	28
3.4 VLF Deneyleri İle İlgili Standartlar	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI.....	31
4.1 Deney Seti	31
4.1.1 VLF üretici	32

4.1.2 Pankek deney transformatörü.....	33
4.1.3 Referans kablo.....	35
4.2 Tanı Deneylerinde 50 Hz ve 0,1 Hz Karşılaştırması.....	36
4.3 Deney Seti Ölçüm İlkesi.....	37
4.4 Deneyin Uygulanması	39
4.4.1 Kayıp faktörünün hesaplanması	41
4.4.2 Frekans – kayıp faktörü değişimi	55
4.4.3 Sıcaklığa bağlı frekans - kayıp faktörü değişimi.....	56
4.4.4 Yaşlanma - toplam harmonik bozulma ilişkisi.....	64
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	77
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

AFD	: Ayrık Fourier dönüşümü
AZFD	: Ayrık zaman Fourier dönüşümü
EPR	: Etilen propilen kauçuk
FDS	: Frekans uzayı spektroskopisi
GF	: Güç faktörü
HD	: Harmonik bozulma
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
OG	: Orta gerilim
PDC	: Kutuplanma ve geri kutuplanma akımı
PDEV	: Kısmi boşalma sönme gerilimi
PDIV	: Kısmi boşalma başlama gerilimi
PE	: Polietilen
PSD	: Spektral güç yoğunluğu
RVM	: Toparlanma gerilimi yöntemi
THD	: Toplam harmonik bozulma
VLF	: Çok düşük frekans
XLPE	: Çapraz bağlı polietilen
YG	: Yüksek gerilim

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : AC, DC ve VLF deneylerinin karşılaştırılması [12].	23
Çizelge 3.2 : IEEE Std 400.2-2004 VLF sinüsoidal deney gerilimleri	24
Çizelge 3.3 : IEEE Std 400.2-2004 VLF kosinüs-kare deney gerilimleri	25
Çizelge 3.4 : IEEE Std 433.1974 AA makineleri için deney gerilimleri.....	25
Çizelge 3.5 : IEEE Std 400-2001 Kayıp faktörü ölçütleri	28
Çizelge 4.1 : Pankek transformatörün yalıtım oranları.....	34
Çizelge 4.2 : Pankek transformatörün 100V için kayıp faktörü değerleri	46
Çizelge 4.3 : Pankek transformatörün 1-5 kV arası kayıp faktörü değerleri	47
Çizelge 4.4 : Yağ ve presbordan dielektrik sabitleri	48
Çizelge 4.5 : Faz farkından hesaplanan 1-20 kV arası kayıp faktörleri.....	50
Çizelge 4.6 : MI540 ile ölçülen kayıp faktörü değerleri[11]	51
Çizelge 4.7 : Pankek transformatör 0,1-20 kV arası kayıp faktörleri.....	51
Çizelge 4.8 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası bağıl kayıp faktörleri.....	53
Çizelge 4.9 : Pankek transformatörün 1-20 kV arası THD değerleri	65
Çizelge 4.10 : Pankek transformatörün 6 ay sonra 1-20 kV arası THD değerleri.....	66
Çizelge 4.11 : THD karşılaştırma ölçütleri.....	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : VLF deney seti	2
Şekil 2.1 : Çift simetri özelliğine sahip bir işaret	6
Şekil 2.2 : Tek simetri özelliğine sahip bir işaret	7
Şekil 2.3 : Yarım dalga simetrisi özelliğine sahip bir işaret	7
Şekil 2.4 : Üçgen pencere fonksiyonu	11
Şekil 2.5 : Blackman pencere fonksiyonu.	11
Şekil 2.6 : Hamming pencere fonksiyonu.	12
Şekil 2.7 : Hanning pencere fonksiyonu.....	12
Şekil 2.8 : Alçak geçiren filtre karakteristiği	17
Şekil 2.9 : Alçak geçiren analog filtre	18
Şekil 3.1 : Farklı transformatörler için toparlanma eğrileri[8].	20
Şekil 3.2 : Yağ iletkenliği ve nemin, FDS eğrisine etkileri [10].	21
Şekil 3.3 : RVM, PDC, FDS prensip şemaları ve ölçümleri [11].....	21
Şekil 3.4 : Kayıp faktörü fazör diyagramı.	26
Şekil 3.5 : Kayıp faktörü ölçümü için VLF deney bağlantısı.....	26
Şekil 3.6 : EPR yalıtkanlı kabloda gerilim – $\tan\delta$ eğrisi.....	27
Şekil 3.7 : Kısmi boşalmaya yol açan etkenler.....	29
Şekil 4.1 : Deney seti	32
Şekil 4.2 : Baur VLF 20 deney cihazı	32
Şekil 4.3 : Pankek deney transformatörü dış görünümü.....	33
Şekil 4.4 : Pankek deney transformatörünün kesiti	33
Şekil 4.5 : Pankek deney transformatörünün yalıtım detayı.....	34
Şekil 4.6 : Referans kablonun görünümü	35
Şekil 4.7 : XLPE yalıtkanlı OG kablo yapısı.....	35
Şekil 4.8 : Pankek transformatörün 50 Hz ve 0,1 Hz’de kayıp faktörleri	37
Şekil 4.9 : Deney seti prensip şeması	38
Şekil 4.10 : Kayıp faktörü fazör diyagramı	38
Şekil 4.11 : Gerilim ve akım arasındaki kayma.....	39
Şekil 4.12 : Filtrelenmemiş kablo akımı.....	40
Şekil 4.13 : Filtrelenmiş kablo akımı.....	41
Şekil 4.14 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş kablo ve transformatör verileri.	42
Şekil 4.15 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş veri için spektral güç yoğunluğu.	43
Şekil 4.16 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş veri için spektrogram analizi.	43
Şekil 4.17 : CH-B 1 kV filtrelenmiş veri için spektral güç yoğunluğu.	44
Şekil 4.18 : CH-B 1 kV filtrelenmiş veri için spektrogram analizi.	44
Şekil 4.19 : CH-B 1 kV için faz farkının hesaplanması.	45
Şekil 4.20 : IDA200 cihazı.	46
Şekil 4.21 : Pankek transformatörün 0,1-5 kV arası kayıp faktörü değişimi.	48
Şekil 4.22 : Presbord için farklı gerilimlerde frekans - $\tan\delta$ değişimi [18].	49
Şekil 4.23 : MI540 kayıp faktörü ölçüm seti.	50

Şekil 4.24 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası kayıp faktörü değişimi.....	52
Şekil 4.25 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası bağıl kayıp faktörü değişimi..	54
Şekil 4.26 : Pankek transformatör için frekans - kayıp faktörü değişimi.	55
Şekil 4.27 : 21°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi.....	57
Şekil 4.28 : 55°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi.....	58
Şekil 4.29 : 80°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi.....	58
Şekil 4.30 : CH-B bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi.....	60
Şekil 4.31 : DG-CH bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi.....	60
Şekil 4.32 : E-DG bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi.....	61
Şekil 4.33 : F-E bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi.	61
Şekil 4.34 : Sıcaklığa bağlı kayıp faktörü tepe değeri- frekans değişimi.	62
Şekil 4.35 : Kutuplu dielektrik malzemenin molekül yapısı.	63
Şekil 4.36 : Kutuplu dielektrik malzemenin kutuplanmış molekül yapısı.....	63
Şekil 4.37 : Kutuplanmış bir dielektrik malzemenin sıcaklık artışı ile molekül yapısı.	64
Şekil 4.38 : Arıza gerilimi - yaşlanma süresi eğrisi [18].	65
Şekil 4.39 : Pankek transformatör gerilim - THD değişimi.....	66
Şekil 4.40 : Pankek transformatörün 6 ay sonra gerilim - THD değişimi.	67
Şekil 4.41 : CH-B 1 kV ilk ölçüm için spektral güç analizi	68
Şekil 4.42 : CH-B 1 kV ilk ölçüm için frekans spektrumu ve uydurulmuş doğru.....	68
Şekil 4.43 : CH-B 1 kV 6 ay sonraki ölçüm için frekans spektrumu ve uydurulmuş doğru.....	69
Şekil A.1 : CH-B bağlantısı 1 kV gerilim.....	80
Şekil A.2 : CH-B bağlantısı 5 kV gerilim.....	80
Şekil A.3 : CH-B bağlantısı 10 kV gerilim.....	81
Şekil A.4 : CH-B bağlantısı 15 kV gerilim.....	81
Şekil A.5 : CH-B bağlantısı 20 kV gerilim.....	82
Şekil A.6 : DG-CH bağlantısı 1 kV gerilim.....	82
Şekil A.7 : DG-CH bağlantısı 5 kV gerilim.....	83
Şekil A.8 : DG-CH bağlantısı 10 kV gerilim.....	83
Şekil A.9 : DG-CH bağlantısı 15 kV gerilim.....	84
Şekil A.10 : DG-CH bağlantısı 20 kV gerilim.....	84
Şekil A.11 : E-DG bağlantısı 1 kV gerilim.....	85
Şekil A.12 : E-DG bağlantısı 5 kV gerilim.	85
Şekil A.13 : E-DG bağlantısı 10 kV gerilim.....	86
Şekil A.14 : E-DG bağlantısı 15 kV gerilim.....	86
Şekil A.15 : E-DG bağlantısı 20 kV gerilim.....	87
Şekil A.16 : F-E bağlantısı 1 kV gerilim.	87
Şekil A.17 : F-E bağlantısı 5 kV gerilim.	88
Şekil A.18 : F-E bağlantısı 10 kV gerilim.	88
Şekil A.19 : F-E bağlantısı 15 kV gerilim.	89
Şekil A.20 : F-E bağlantısı 20 kV gerilim.	89

ÇOK DÜŞÜK FREKANSLI YÜKSEK GERİLİM İŞARETLERİNİN ANALİZİ

ÖZET

DC yalıtım deneyinin kablo ve transformatör yalıtkanlarına zarar vermesi, zamanından önce meydana gelen yalıtım problemleri ve deney sonuçlarının her zaman tatmin edici olmaması AC gerilim ile deney yapma ihtiyacını doğurmuştur. Buna karşılık AC yalıtım deneyinde gerekli reaktif deney gücünü karşılayabilmek için çok büyük boyutlarda ve ağırlıkta deney donanımları gereklidir. Bu büyüklükteki donanım ekonomik açıdan da pahalı olmaktadır. AC deney 50 Hz işletme frekansı yerine 0,1 Hz frekansı (çok düşük frekans, VLF) ile uygulandığında deney için gerekli reaktif güç aynı oranda azalmaktadır. Bunun sonucunda hem donanım boyutları hem de maliyeti azalmaktadır. Bu çalışmada DC yalıtım deneyine alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkan VLF yüksek gerilim deney tekniğinin incelenerek üstünlükleri ve eksiklikleri ortaya çıkarılmıştır. VLF yüksek gerilim tekniği ile yapılan yalıtım deneylerinin farklı koşullar altında verdiği sonuçlar yorumlanmıştır.

İlk olarak VLF yüksek gerilim dayanım deneyi çeşitli uluslararası yönetmeliklerde verilen deney gerilimi ve süreleri bakımından incelenerek yorumlanmıştır. DC ve AC 50 Hz dayanım deneyi ile karşılaştırılmıştır.

VLF yöntemi ile pankek deney transformatöründe yapılan kayıp faktörü ölçümü sonucunda farklı yalıtım durumlarında yani farklı eşdeğer dielektrik sabitleri altında kayıp faktörü ölçümleri alınmıştır. Yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti ile kayıp faktörü arasındaki değişim incelenmiştir.

Pankek deney transformatöründe farklı frekanslarda sabit gerilim altında kayıp faktörü değerleri kaydedilmiştir. Uygulanan gerilimin frekansı ile kayıp faktöründeki değişim incelenmiştir. Bu değişim deneyi yapılan numunenin içerdiği nem ile ilişkilendirilmiştir. Frekans – kayıp faktörü deneyi farklı sıcaklıklarda tekrarlanarak sıcaklığın frekans - kayıp faktörü eğrisine olan etkisi incelenmiştir. Pankek deney transformatörü ile yapılan ölçümlere göre yalıtım yağı için 21-80°C aralığında sıcaklığın kayıp faktörüne etkisi ortaya konulmuştur.

Yapılan son analizde ise yaşlanmanın toplam harmonik bozulma üzerindeki etkisi incelenerek yüksek gerilimde uygulanan dayanım deneyi, kısmi boşalma deneyi ve kayıp faktörü ölçümlerinde elde edilen sonuçlara ek olarak yardımcı bir değerlendirme ölçütü sunulmuştur. Yaşlanma etkisi ile sistemden ölçülen harmonik değerinin değişimini gözlemek amacıyla 6 ay ara ile aynı deney setinden pankek deney transformatörünün çeşitli bağlantılarında ölçümler alınarak THD değerleri karşılaştırılmıştır.

ANALYSIS OF VERY LOW FREQUENCY HIGH VOLTAGE SIGNALS

SUMMARY

Damages in insulation of cable and transformer caused by DC insulation test, insulation problems arisen early and not always satisfactory test results led to a need to test with AC voltage. However, in order to provide reactive power of AC insulation test, very large sized and weighted test equipments needed. This sized equipment is economically expensive. When AC test applied with 0,1 Hz instead of 50 Hz, reactive power required for the test will decrease at the same rate. As a result, both the size and cost of equipment decreases. In this study, VLF high voltage test techniques that occur as an alternative method of DC insulation test have examined; thus advantages and shortcomings have revealed. The results of VLF high voltage insulation tests that made under different conditions are interpreted.

First, the VLF high voltage withstand test interpreted by examining the various international regulations in terms of duration and test voltage. VLF test were compared with DC and AC 50 Hz withstand tests.

With the VLF technique performed on pancake experimental transformer, in case of different insulation conditions, loss factors were measured. Dielectric constant of insulation material and change of loss factor were examined.

Under the constant voltage, loss factor values at different frequencies were recorded from pancake experimental transformer. Changes in loss factor with the frequency of the applied voltage were investigated. This change is associated with moisture contained in the test sample. Frequency - loss factor test was repeated at different temperatures. Frequency and loss factor curve depend on the temperature was investigated. According to the pancake experimental transformer measurements, the effect of temperature for loss factor to insulation oil in the range of 21-80 ° C has been revealed.

The final analysis examined the effect of aging on the total harmonic distortion. In addition to high - voltage withstand test, partial discharge test and the loss factor test the total harmonic distortion results will be a helpful outcome.

In order to observe the exchange of the aging – total harmonic distortion curve, with an interval of 6 months, with the same set of pancake experimental transformer measurements based on connections to a variety of insulation situation THD values compared.

1. GİRİŞ

Çok düşük frekanslı (VLF) yüksek gerilim ilk olarak 1950'li yılların sonunda büyük dönen makinelerin yalıtım deneyinde 50/60 Hz güç kaynakları yerine daha küçük donanımlarla deney yapabilmek için kullanıldı. İlk VLF üreteçleri oldukça büyük boyutlara sahip olsa da ağırlık, maliyet ve güç gereksinimi olarak 50/60 Hz güç kaynakları ve seri rezonans sistemlerine göre avantajlıydı. VLF deneyi kullanıcıya yüksek kapasitif yüklü ve uzun kablolarda daha küçük boyut, ağırlık ve maliyet ile alternatif akımda yalıtım deneyi yapma olanağı sağlar.

80'lerin sonu, 90'ların başına gelindiğinde, bakım ve servis amaçlı yapılan DC yalıtım ve delinme deneylerinin yeraltında bulunan çapraz bağlı polietilen (XLPE) ve etilen propilen kauçuk (EPR) yalıtkanlı kablolarda zamanından önce yalıtım problemleri oluşmasına neden olduğu ortaya çıktı. DC yalıtım ve delinme deneyleri yerine yeni bir deney yöntemi gerekliydi. Tercih edilen yeni deney yöntemi AC gerilimdi. Ancak boyut sınırları, ağırlık, yüksek maliyet gibi sebeplerden yüksek frekanslı yüksek gerilim ve seri rezonans sistemleri çoğu alan uygulamaları için elverişli bulunmadı. DC deneyin yerini alacak kablo, transformatör ve elektrik makinelerinin deneyinde kullanılacak yeni deney VLF üzerinde çalışılmaya başlandı. Temel eşitliklere göre fiziksel yapısı gereği silindirik bir kondansatör gibi davranan kabloya daha düşük frekanslı gerilim uygulandığında şarj akımının düştüğü açıktır. 0,1 Hz'de şarj akımları 50 Hz'deki şarj akımlarına oranla 500 kat daha küçük olmaktadır. Bunun anlamı çok daha küçük ve taşınabilir AC deney düzeneği demektir. Ayrıca deney esnasında arızalanma riski göze alınmayan durumlarda alternatif akımın bir avantajı olarak kayıp faktörü deneyi ile yalıtım bilgisine ulaşılabilir. Böylece küçük boyutlu ve düşük maliyetli bir deney cihazı ile hem sağlıklı deney sonuçlarına ulaşıp hem de deney esnasında arızalanma riskini ortadan kaldıran kayıp faktörü deneyi ile yalıtım durumu öğrenilebilmektedir. Şekil 1.1'de örnek VLF deney seti görülmektedir. Bu set ile dayanım deneyi, kayıp faktörü ($\tan\delta$) deneyi ve kısmi boşalma deneyi yapılabilir.



Şekil 1.1 : VLF deney seti

Denenen cihaza zarar vermeden yalıtım durumu hakkında tüm bilgileri veren VLF yöntemi birçok yönden AC ve DC deneylere karşı üstünlük sağlar.

1.1 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

DC ve AC yalıtım deneylerine alternatif olarak ortaya çıkan kablo, elektrik makineleri ve transformatörlerde yalıtım durumu hakkında bilgi veren VLF deneyinin üstünlükleri ve eksiklikleri ortaya çıkarılarak VLF gerilim ile yapılan tanı deneylerinin farklı koşullar altında verdiği sonuçlar yorumlanacaktır.

Bu amaçla deney transformatörü ile farklı gerilim, yalıtım ve sıcaklık koşullarında kayıp faktörü ve toplam harmonik bozulma ölçümleri alınarak sonuçlar yorumlanmıştır. 0.1-20 kV gerilim aralığında alınan ölçümler çeşitli presbord/yağ yalıtım oranlarında ve 21°-55°-80°C sıcaklıklarda tekrarlanarak elde edilen sonuçlar ve sebepleri araştırılarak yorumlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

VLF üretici ilk olarak 1960 yılında ASEA (ABB) firması tarafından büyük güçlü turbo generatörlerin deneyinde kullanıldı. Generatörlerin büyük kapasitif yükünden dolayı düşük frekanslı alternatif gerilim üreticine ihtiyaç duyuldu. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için 0,1 Hz 500 adımlı bir üreteç yapıldı. IEEE 1974 yılında büyük AC makinelerin VLF deneyleri için bir standart yayınladı. 1985 yılına gelindiğinde Almanya'dan Seba Dynatronic'in bir parçası olan Hagenuk firması dikdörtgen dalga çıkışlı cihazı üretti. Ancak çıkış gerilimi sinüs olmadığı için kayıp faktörü ve kısmi

boşalma deneyleri yapılamıyordu. 1988 yılında Avusturya'da Baur firması 60 kV tepe gerilimli sinüs dalga çıkışlı VLF üretici imalatına başladı. 1998 yılında Amerikan High Voltage Inc. firması daha küçük, hafif ve ekonomik VLF üreteç geliştirdi. Bu gelişmeler yaşanırken Amerika ve Avrupa'da VLF deneyi ile ilgili birçok akademik çalışma yapıldı. 2001 yılında IEEE'nin kablolarda alan deneyi ve yalıtım ile ilgili yayınladığı standarda VLF deneyi eklendi. IEEE üç yıl sonra VLF deneyi için geniş kapsamlı bir kablo deney standardı yayınladı. Aynı yıllarda Almanya'da VDE standardı yayınlandı. International Electrotechnical Commission ise 2006 yılında yüksek gerilim deney teknikleri ile ilgili standartta VLF deneyine yer verdi.

Ancak literatür taraması yapıldığında Türkiye'de VLF deneyleri ile ilgili herhangi bir akademik çalışma ya da standarda rastlanmamıştır.

2. MATEMATİKSEL YÖNTEMLER

VLF yüksek gerilim deneylerinde kaydedilen verilerin filtrelenerek bozucu dış etkiler ve ölçüm sisteminden kaynaklanan bozulmaların giderilmesi, spektral güç yoğunluğunun elde edilerek çeşitli faktörler ile ortaya çıkan işaretlerin incelenmesi ve sistemdeki harmonik bileşenlerin belirlenmesinde kullanılan tekniklerin matematiksel altyapısı bu bölümde verilmiştir.

2.1 Fourier Analizi

Elektrik enerji sistemindeki yüklerin ve kaynakların özelliklerine bağlı olarak temel işaret saf sinüs biçiminden uzaklaşabilir. Sinüs biçiminden uzaklaşmış olan bu işaret saf sinüs biçiminde olan temel işaret ile frekans ve genlikleri farklı diğer sinüs işaretlerinin toplamından meydana gelir. Temel işaretin frekans ve genliğinden farklı sinüs işaretlerine harmonik denir.

Sinüs biçiminden uzaklaşmış olan periyodik işaret kendi frekansının katlarındaki sinüs işaretlerinin toplamına eşittir. Sinüs biçiminde olmayan dalga şekilleri Fourier serileri ile ifade edilebilmektedir. Analizi yapılan işaretin frekansındaki bileşen temel bileşen olarak adlandırılır. Frekansı temel bileşenin frekansının iki katı olan bileşen 2. harmonik olarak adlandırılır. Genel olarak frekansı temel bileşenin frekansının n katı olan bileşen n . harmonik olarak adlandırılır [1]. Bir fonksiyonun Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşullarını sağlaması gerekir.

Bu koşullar,

- Sonlu sayıda maksimum ve minimum noktası olmalı,
- Sonlu sayıda süreksizlik barındırmalı,
- Ortalaması sonlu değer almalıdır.

Dirichlet koşullarını sağlayan sinüs biçiminden uzaklaşmış olan periyodik işaret Fourier analizi sonrasında zaman uzayında denklem (2.1)'deki gibi gösterilebilir [2].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nt + b_n \sin nt) \quad (2.1)$$

Elektrik mühendisliğinde bu ifadede t değişkeni wt değişkenine dönüştürülerek denklem (2.2)'deki gibi olur.

$$f(wt) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (2.2)$$

Burada katsayılar denklem (2.3), (2.4) ve (2.5)'deki gibi belirlenir.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(wt) dw \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(wt) \cdot \cos(nwt) \cdot dw \quad (2.4)$$

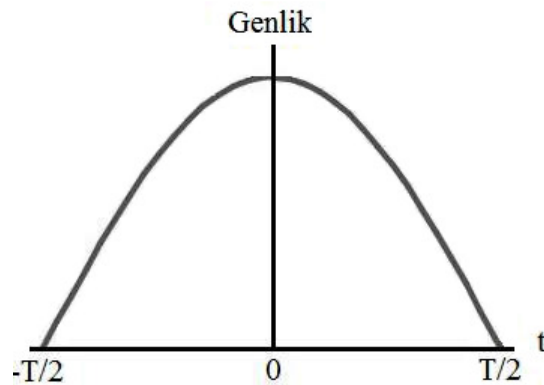
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(wt) \cdot \sin(nwt) \cdot dw \quad (2.5)$$

Analizi yapılan işaretin özelliğine göre katsayıların bazıları sıfır olabilir [2]. Gereksiz yere işlem yapmamak için analizi yapılacak olan işaretin simetrisine bakılarak serinin hangi terimleri içerdiği tespit edilir. Başlıca simetri türleri çift simetri, tek simetri ve yarım dalga simetrisidir.

Çift simetri, $f(-wt) = f(wt)$ özelliği ile tanımlanır. Fourier serisinde sadece kosinüslü terimler bulunur [3].

$$f(wt) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt) \quad (2.6)$$

Çift simetri özelliğine sahip bir işaret Şekil 2.1'de gösterilmiştir.

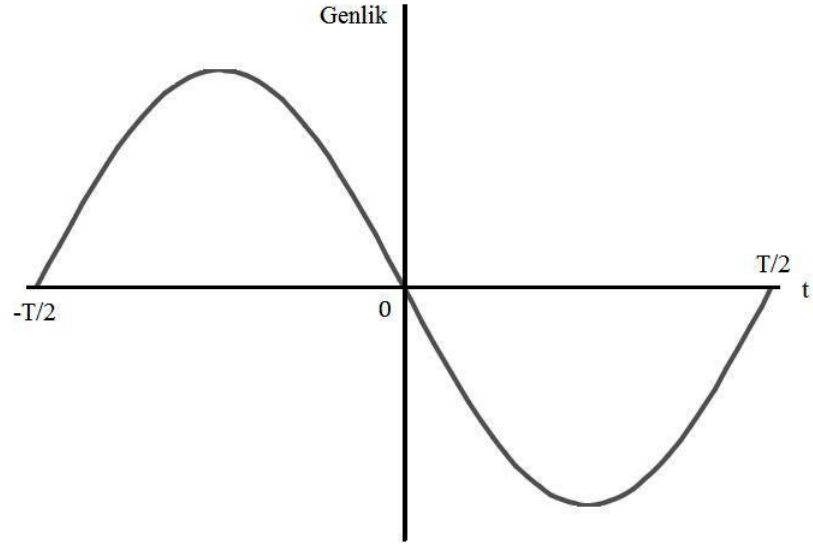


Şekil 2.1 : Çift simetri özelliğine sahip bir işaret

Tek simetri, $f(-wt) = -f(wt)$ özelliği ile tanımlanır. Fourier serisinde sadece sinüslü terimler bulunur [3].

$$f(wt) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \sin nwt) \quad (2.7)$$

Tek simetri özelliğine sahip bir işaret Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

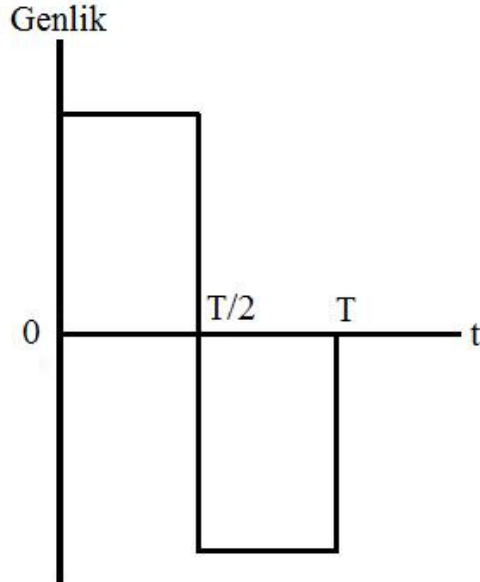


Şekil 2.2 : Tek simetri özelliğine sahip bir işaret

Yarım dalga simetrisi, $f(wt) = -f(wt + \frac{T}{2})$ özelliği ile tanımlanır. Fourier serisinde sabit terim yoktur ve tek harmoniklerden oluşur [3].

$$f(wt) = \sum_{n(tek)=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (2.8)$$

Yarım dalga simetrisi özelliğine sahip bir işaret Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Yarım dalga simetrisi özelliğine sahip bir işaret

2.1.1 Fourier katsayılarının bulunması

Fourier katsayılarının hesaplanmasında başlıca yöntemler analitik yöntem, grafik yöntem ve ölçme yöntemidir.

Analitik yöntem ile Fourier katsayıları denklem (2.3), (2.4) ve (2.5)'deki eşitlikler ile analitik olarak hesaplanır [2].

Grafik yöntemde osiloskop çıktısı alınan işaretin yarım periyodu grafik üzerinde m parçaya bölünür zaman eksenindeki parçaların orta noktaları α , genlik eksenindeki parçaların orta noktaları y ile gösterildiğinde katsayılar denklem (2.9) ve (2.10)'daki gibi hesaplanır [2].

$$a_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \cos n\alpha_i) \quad (2.9)$$

$$b_n = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (y_i \sin n\alpha_i) \quad (2.10)$$

Ölçme yönteminde ise dar bant genişliğine sahip bir filtre ile harmoniklerin süzülerek ölçülmesi temeline dayanır. Bu yöntemde harmonikler dijital harmonik analizörleri ile de ölçülebilmektedir [2].

2.2 Fourier Dönüşümü

Periyodik bir sinyalin çeşitli genlik ve frekanstaki sinüs işaretlerinin toplamı şeklinde ifade edilmesi Fourier analizi olarak bilinmektedir. Sürekli zaman işaretleri devamlı değer almakta, ayırık zaman işaretleri ise sadece belirli anlar için değer almaktadır.

Bir sürekli zaman işaretinin alabileceği değerler sınırlandırılmamış ise bu işaret analog işaret olarak adlandırılır. Analog işaretler hem zaman ekseninde, hem de değer bakımından süreklidir. Bir ayırık zaman işaretinin alabileceği değer sayısı sınırlı ise bu işaret sayısal işaret olarak adlandırılır.

Analog işaretin sayısal işarete çevrilmesi için önce sürekli zamanda tanımlı analog işaret bir ayırık zamanlı işarete çevrilir (yani ayırık zamanlı Fourier serisi/örnekleme) ancak sonsuz sayıda örneğin sınırlandırılması gerekir daha sonra ise ayırık zaman işaretin alabileceği değerleri sınırlandırıp sayısal bir işaret elde edilerek ayırık Fourier dönüşümü yapılır. Bir işaretin alabileceği değerlerin sınırlı olması işaretin bilgisayarla işlenmesi için şarttır [1].

2.2.1 Ayırık zamanlı Fourier dönüşümü

Genel ayırık zamanlı bir dizi $x(n)$ için frekans bölgesine geçiş ayırık zaman Fourier dönüşümü (AZFD) yolu ile olmaktadır. $x(n)$ için AZFD tanımı denklem (2.11)'deki gibidir.

$$X(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-jwn} \quad (2.11)$$

Ayrık zamanlı Fourier dönüşümü $X(e^{jw})$ 'dan $x(n)$ 'e dönüş ise ters AZFD tanımı denklem (2.12)'deki gibidir.

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{jw}) e^{jnw} dw \quad (2.12)$$

$X(e^{jw})$, $x(n)$ ayırık zamanlı dizisinin frekans içeriğini vermektedir. Ayırık zamanlı Fourier dönüşümü ile analog işaretlerin Fourier dönüşümü önemli bir yönden farklıdır. Analog işaretin Fourier dönüşümü $(-\infty, \infty)$ frekans aralığında tanımlı iken, ayırık zamanlı Fourier dönüşümü $(-\pi, \pi)$ frekans aralığında bağımsız olarak tanımlanmaktadır. Ayırık zaman Fourier dönüşümü 2π ile periyodiktir, yani $X(e^{jw}) = X(e^{j(w+k2\pi)})$ olmaktadır. Bunun nedeni, ayırık zamanlı işaretler için $(-\pi, \pi)$ frekans aralığının dışında kalan tüm frekans değerlerinin bu aralıkta yer alan bir frekansa eşdeğer olmalarıdır [4].

2.2.2 Ayırık Fourier dönüşümü

Bir $x(n)$ dizisinin ayırık zamanlı Fourier dönüşümünün z -dönüşümü $X(z)$ 'nin birim daire üzerindeki $z = e^{jw}$ değerlerinde hesaplanması yöntemiyle bulunabileceği belirtilmişti. Ancak, sayısal işaret işlemenin uygulaması sayısal donanımlar ile yapıldığından, bu donanımlar üzerinde sonsuz bir $x(n)$ dizisinin saklanması ve sürekli w frekansının değerlendirilmesi olanaksızdır.

Bu nedenle, sayısal işaretler için ayırık zamanlı Fourier dönüşümünün kullanılması uygun değildir. Frekansın analog olarak gösterilmesi ve sonsuz sayıda örneğin gerekmesi, bu uygunsuzluğun temel nedenleridir [4].

$x(n)$, sadece $0 \leq N \leq M-1$ aralığında sıfırdan farklı değerler alan sınırlı uzunluklu ayırık zamanlı bir işareti belirtsin. $x(n)$ için N noktalı ayırık Fourier dönüşümü (AFD)

ve N noktalı ters ayırık Fourier dönüşümü sırasıyla denklem (2.13) ve (2.14)'deki gibi ifade edilir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.13)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N}, \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.14)$$

$W_N = e^{-j2\pi kn/N}$ tanımının yapılmasıyla, yukarıdaki dönüşüm ikilisi denklem (2.15) ve (2.16)'daki gibi tekrar yazılabilir.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.15)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{-nk}, \quad k = 0,1,2, \dots, N-1 \quad (2.16)$$

Burada hesaplanan N tane X_k değeri, $x(n)$ sayısal işaretinin N noktalı ayırık Fourier dönüşümü olarak adlandırılır. $x(n)$ ise X_k dizisinin N noktalı ters ayırık Fourier dönüşümü olarak adlandırılır.

2.2.3 Pencere fonksiyonları

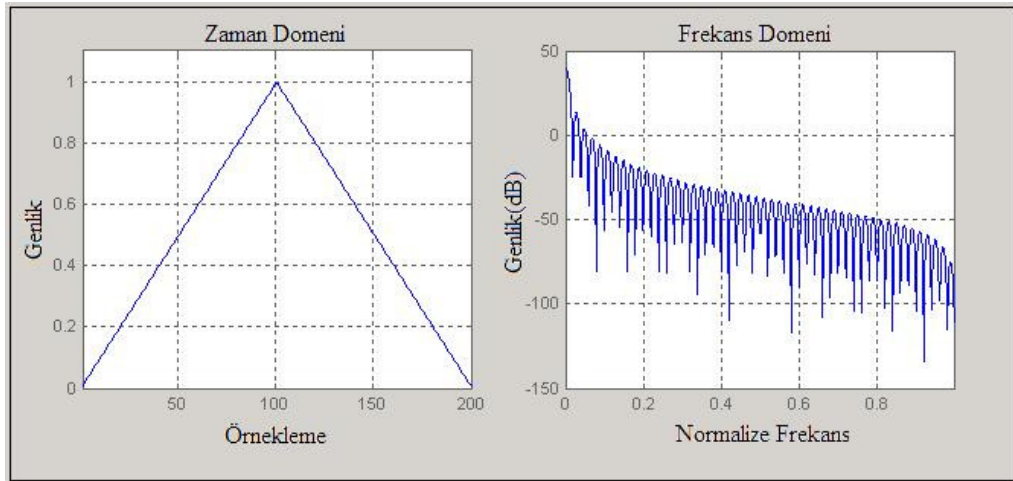
Ayrık Fourier dönüşümü yapılırken periyodunu tamamlamış bir işaretin ayırık Fourier dönüşümü beklenen frekansa karşılık gelen tek bir işaret olarak karşımıza çıkar. Ancak ayırık Fourier dönüşümü yapılacak olan işaret periyodunu tamamlamamış ise, işarete süreksizlik olduğundan bu işaretin ayırık Fourier dönüşümünde beklenen frekansın dışında, işaretin yapısında bulunmayan frekanslarda işaretler karşımıza çıkar. Bu durumu bir örnekle açıklayacak olursak bir sinüs dalgasının örnekleri alınıp ayırık Fourier dönüşümü yapıldığında ortaya çıkacak frekans spektrumunda sadece işaretin frekansı değil sahip olduğu frekansa yakın frekansları da örten bir eğri ile karşılaşılır. Bir periyottaki enerjinin sonraki periyoda aktarılmasından kaynaklanan bu duruma *spektral sızma* denir.

Spektral sızmanın önüne geçmek için işaretin periyottaki son değerleri ile ilk değerleri arasındaki devamsızlığın giderilmesi gerekir. Bu amaçla ayırık Fourier dönüşümü yapılacak olan işaret uygun bir pencere fonksiyonu ile çarpılır. Pencere fonksiyonu ile çarpmak, bir veri dizisindeki her bir veri noktasını bir ağırlaştırma katsayısı ile çarpmak anlamına gelir. Fourier dönüşümünün anlamlı sonuçlar

verebilmesi için, teorik olarak dönüşümün sonsuz uzunlukta bir çerçeve üzerinde hesaplanması gerekir. Ancak ayırık Fourier dönüşümü sonlu uzunlukta çerçevelerle yapılmaktadır ve eğer pencere fonksiyonları ile gerçekleştirilmezse, çok fazla bozulma oluşur ve spektrum yanlış ölçülmüş olur.

Başlıca pencere fonksiyonları Üçgen pencere, Blackman penceresi, Hamming penceresi, Hanning penceresidir.

Üçgen pencere fonksiyonu ve frekans yanıtı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.

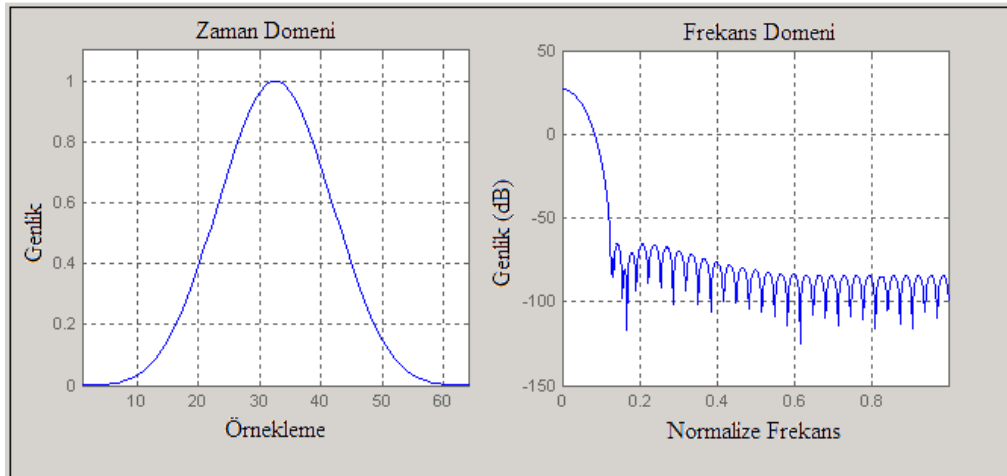


Şekil 2.4 : Üçgen pencere fonksiyonu

Üçgen pencere fonksiyonunun zaman bölgesi gösterimi denklem (2.16)’daki gibidir.

$$w_T(k) = \begin{cases} 1 - \left(\frac{2|k|}{N}\right) & , \text{diğer} \\ 0 & , |k| \leq N/2 \end{cases} \quad (2.16)$$

Blackman pencere fonksiyonu ve frekans yanıtı Şekil 2.5’de gösterilmiştir.

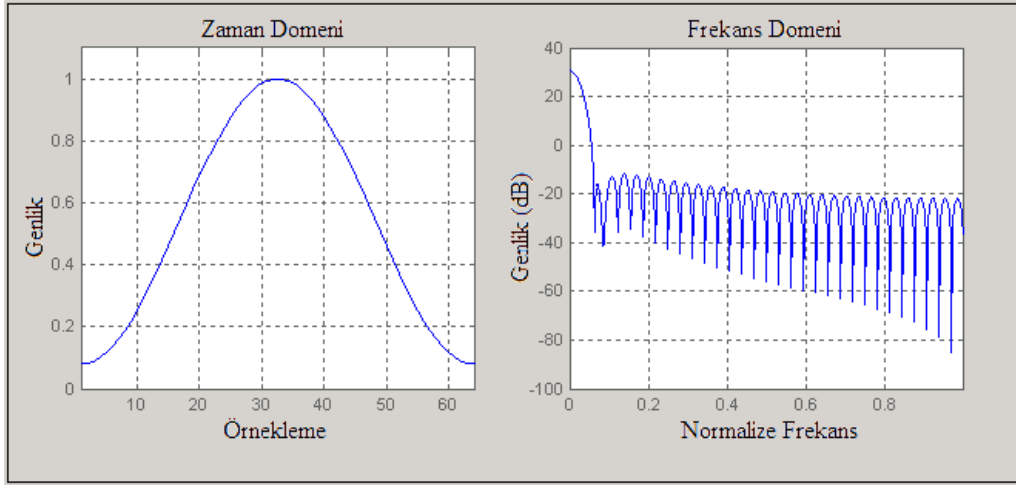


Şekil 2.5 : Blackman pencere fonksiyonu.

Blackman pencere fonksiyonunun zaman bölgesi gösterimi denklem (2.17)'deki gibidir.

$$w_B(k) = \begin{cases} 0.42 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + 0.08\cos\left(\frac{4\pi k}{N}\right) & , |k| \leq N/2 \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (2.17)$$

Hamming pencere fonksiyonu ve frekans yanıtı Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

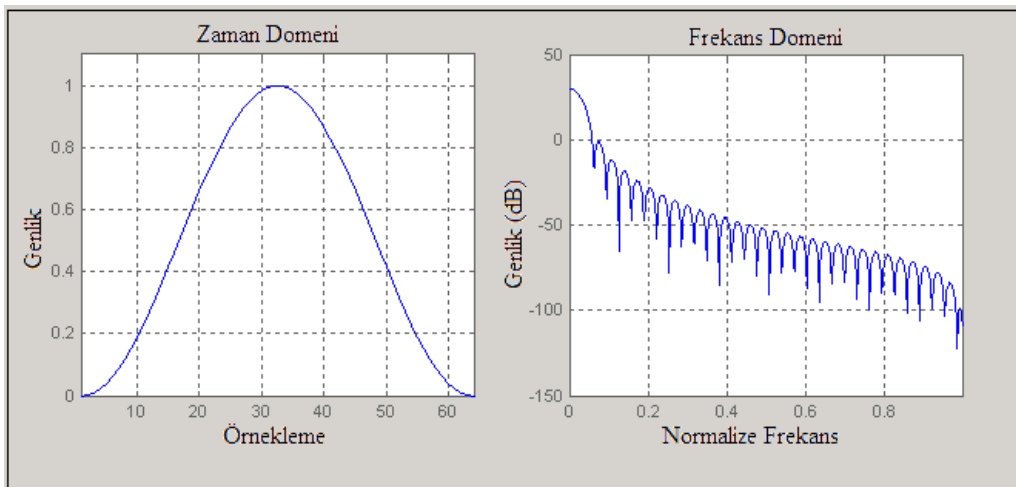


Şekil 2.6 : Hamming pencere fonksiyonu.

Hamming pencere fonksiyonunun zaman bölgesi gösterimi denklem (2.18)'deki gibidir.

$$w_H(k) = \begin{cases} 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) & , |k| \leq N/2 \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (2.18)$$

Hanning pencere fonksiyonu ve frekans yanıtı Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 : Hanning pencere fonksiyonu.

Hanning pencere fonksiyonunun zaman bölgesi gösterimi denklem (2.19)'daki gibidir.

$$w_H(k) = \begin{cases} 0.5 - 0.5\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) & , |k| \leq N/2 \\ 0 & , \text{diğer} \end{cases} \quad (2.19)$$

Ayrık Fourier dönüşümü yapılacak olan işaret spektral sızmanın önüne geçmek için uygun bir pencere fonksiyonu ile çarpılır. Kullanılacak olan pencere fonksiyonun çeşidi uygulamaya göre değişmektedir [4].

2.2.4 Spektral güç yoğunluğu

Bir $x(wt)$ fonksiyonunun spektral güç yoğunluğu genellikle Fourier analizine dayanan yöntemler ile elde edilir.

Ayrık Fourier analizi bölümünde bir $x(wt)$ işareti için $x(n)$, sadece $0 \leq N \leq M-1$ aralığında sıfırdan farklı değerler alan sınırlı uzunluklu ayrık zamanlı bir işareti belirtirse, $x(n)$ için N noktalı ayrık Fourier dönüşümü (AFD) ve N noktalı ters ayrık Fourier dönüşümü sırasıyla denklem (2.20) ve (2.21)'deki gibi ifade edileceği söylenmişti.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.20)$$

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2.21)$$

$x(wt)$ işaretinin ayrık şekli olan $x(n)$ fonksiyonu için elde edilen ilgileşim (korelasyon) fonksiyonu denklem (2.22)'de verilmiştir.

$$r_{xx}(n) = \sum_{k=1}^M x(k+n)x(k) \quad (2.22)$$

Burada k ayrık sistem örnekleme indeksini, M işaretin uzunluğunu göstermektedir. Doğal olarak ilgileşim fonksiyonunun $k = 0$ değerini alması durumuna karşılık gelen ve sıfır gecikmeli ilgileşim olarak bilinen değeri, bu fonksiyonun alabileceği en yüksek değerdir. İlgileşim fonksiyonu, genellikle bu değeri 1 yapacak şekilde hesaplanan normalize edilmiş terimlerle oluşturulur [5].

Elde edilen ilgileşim fonksiyonunun Fourier analizi $x(wt)$ işaretinin spektral güç yoğunluğu olarak tanımlanır.

Spektral güç yoğunluğu hesabında yukarıda anlatılan yönteme alternatif yöntemler de kullanılır. Analog bir $x(t)$ işaretinin taşıdığı enerji denklem (2.23) ile ifade edilirse,

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (2.23)$$

Bu eşitliğin Parseval teoremine göre ifadesi denklem (2.24)'de gösterilir.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (2.24)$$

Burada $|X(f)|^2$ frekans eksenini boyunca enerjinin dağılımını gösteren yoğunluk fonksiyonudur. Bu fonksiyon literatürde güç spektrumu (power spectrum) veya spektral güç yoğunluğu (power spectral density, PSD) şeklinde tanımlanmaktadır [5].

Doğrudan hesaplamada ise spektral güç yoğunluğu, analizi yapılacak olan işaretin Fourier dönüşümünün genliğinin karesi alınarak denklem (2.25)'deki gibi hesaplanır [5].

$$PSD(f) = |X(f)|^2 \quad (2.25)$$

2.3 Harmonik Analizinde Kullanılan Büyüklükler

Fourier analizi bölümünde elektrik enerji sistemindeki yüklerin ve kaynakların özelliklerine bağlı olarak temel işaretin saf sinüs biçiminden uzaklaştığından bahsedilmiştir. Temel işareti bozan, farklı frekans ve genliklerdeki sinüs işaretlerine harmonik denir. Harmonikli işaret saf sinüs biçiminden uzaklaştığı için temel denklemler harmonikli bileşenleri içerecek şekilde yeniden düzenlenmelidir.

2.3.1 Sinüsoidal olmayan durumda temel denklemler

Gerilim ve akımın zamana bağlı değişimini harmoniklerin toplamı olarak denklem (2.26) ve (2.27)'deki gibi ifade edebiliriz.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (2.26)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2.27)$$

V_n ve I_n sırasıyla, n . harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 ise temel işarete ait açısal frekanstır. θ_n ile φ_n ise sırasıyla n . harmonik için gerilim ve akıma ait faz açılarıdır[6].

Harmonikli gerilim ve akım eşitliklerinden aktif gücü denklem (2.28)'deki gibi elde ederiz.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos (\theta_n - \varphi_n) \quad (2.28)$$

Denklem (2.26) ve (2.27)'deki gerilim ve akımın etkin değerleri sırasıyla denklem (2.29) ve (2.30)'daki gibidir.

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.29)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.30)$$

Elde edilen gerilim ve akımın etkin değerleri ile görünür güç ifadesi denklem (2.31) ile ifade edilir.

$$S = V \times I = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.31)$$

Bozulma (distorsiyon, D) gücü denklem (2.32)'deki gibidir.

$$D = \sqrt{S^2 - Q^2 - P^2} \quad (2.32)$$

2.3.2 Güç faktörü (GF)

Güç faktörü, alternatif akımda aktif gücün görünür güce oranıdır. Burada P temel bileşen ve harmonik bileşen aktif güçlerinin toplamıdır. Güç faktörü ifadesi denklem (2.33)'de verilmiştir.

$$GF = \cos \varphi = P/S \quad (2.33)$$

2.3.3 Toplam harmonik bozulma (THD)

Harmonik bozulma, harmonik bileşenlerin etkin değerlerinin, temel bileşen etkin değerine oranı şeklinde tanımlanabilir. Literatürde *total harmonic distortion* (THD) ifadesi sıklıkla karşımıza çıkar. Gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma denklem (2.34)'deki gibi hesaplanır.

$$THD_V = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} / V_1 \quad THD_I = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (2.34)$$

Ayrıca, gerilim ve akımın n. harmonik mertebesi için tekil harmonik bozulma (HD) denklem (2.35)'deki gibi hesaplanır.

$$HD_V = V_n / V_1 \quad HD_I = I_n / I_1 \quad (2.35)$$

2.3.4 Şekil faktörü

Şekil faktörü, bir alternatif gerilim işaretinde etkin değerlerin ortalama değere oranı olarak tanımlanır. Sinüsoidal bir işaret için bu faktör 1,11'dir.

$$k_f = V_{ef} / V_{ort} \quad (2.36)$$

2.3.5 Tepe faktörü

Tepe faktörü, bir alternatif gerilim işaretinde tepe değerlerin temel işaretin etkin değerine oranı olarak tanımlanır. Sinüsoidal bir işaret için bu faktör $\sqrt{2}$ 'dir.

$$k_c = V_{tepe} / V_{1ef} \quad (2.37)$$

2.4 Filtreleme Tekniği

Elektrik devrelerinde analog filtreler sık kullanılan ve kullanışlı yapılardır. Filtreler frekans uzayında elektriksel işaretin şeklini belirlemek amacıyla kullanılan devrelerdir. Filtre devreleri R, L, C gibi pasif devre elemanları ile yapılabileceği gibi

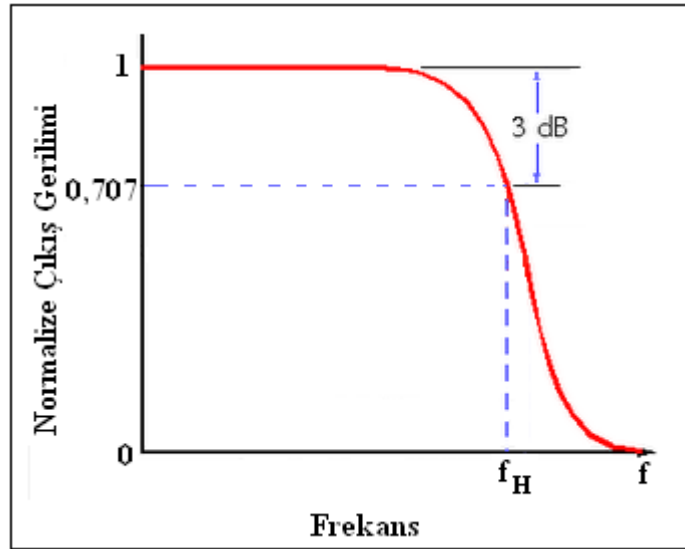
opamp, transistör gibi aktif devre elemanları ile pasif devre elemanlarının bir arada kullanılmasıyla da yapılabilir. Filtreler alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren, bant söndüren olarak tasarlanabilir.

Pasif filtreler direnç, kapasite ve bobin kullanılarak yapılır. Ancak düşük frekanslarda kullanılacak bobin indüktanslarının büyük olması devrenin boyut ve maliyetini artırır. Bu nedenle düşük frekanslarda daha çok aktif filtreler tercih edilir. Aktif filtrelerin en önemli avantajları küçük ve hafif olmalarıdır. Ayrıca güvenilirlikleri yüksek, fiyatları ucuzdur. Küçük boyutları sayesinde de parazitleri düşüktür. Aktif filtrelerde ayrıca bir besleme devresi gerekir[7].

Bu çalışmada Matlab programında alçak geçiren Butterworth tipi filtre tasarlanarak filtreleme gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle diğer filtrelerden söz edilmeyecektir.

2.4.1 Alçak Geçiren Filtre Karakteristikleri

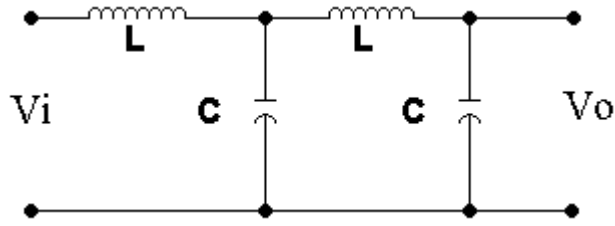
Alçak geçiren filtre yapısında 0 Hz ile kesim frekansı (f_H) arasında sabit bir kazanç bulunur. Kesim frekansında, alçak frekans kazancı 3 dB azalır. 0 Hz ile kesim frekansı (f_H) arasındaki frekanslar band geçirme frekansı, (f_H)'dan büyük frekanslar ise bant söndürme frekansıdır. Alçak geçiren filtre karakteristiği Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 : Alçak geçiren filtre karakteristiği

Birçok aktif filtre yapısı filtrenin kazancını belirleyen kazanç katsayısı içerirler. Düz bant geçirme kazancına sahip filtreler sıklıkla kullanılır. Bu karakteristiğe sahip filtreler, *Butterworth* filtre olarak adlandırılır. Diğer bir sınıf olan *Chebyshev* filtreler

ise bant geçirme kazancında dalgalanmaya sebep olurlar. Alçak geçiren analog filtrenin prensip şeması ekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9 : Alçak geçiren analog filtre

Bu alışmada *Butterworth* alçak geçiren analog filtre fiziksel olarak gerçekleştirilmemiştir. MATLAB programında tasarlanarak kaydedilen veriler filtrelenmiştir. N. derece analog alçak geçiren *Butterworth* filtrenin transfer fonksiyonu denklem (2.38)’de verilmiştir.

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2N}} \quad (2.38)$$

3. KABLO VE TRANSFORMATÖRLERDE VLF TANI YÖNTEMLERİ

DC dayanım deneyinin kablo yalıtımında öngörülmeven hasarlara yol açması ve deney sonuçlarının anlamının sınırlı olmasından dolayı bir alternatif deney olarak çok düşük frekanslı (VLF) yüksek gerilim deneyi ortaya çıkmıştır. Açık sebeplerden dolayı her zaman dayanım ve tanı deneylerini alternatif akım ile yapmak isteriz. Ancak VLF yüksek gerilim deneyi ortaya çıkana kadar boyut, ağırlık ve yüksek maliyet sebeplerinden dolayı alternatif akım deneyi elverişli değildi. VLF yüksek gerilim deneyi tüm bu dezavantajları ortadan kaldırdı.

Bu bölümde yalıtım deneyi için kullanılan bazı yalıtım tanı yöntemleri açıkladıktan sonra VLF yüksek gerilim tanı yöntemleri incelenecektir.

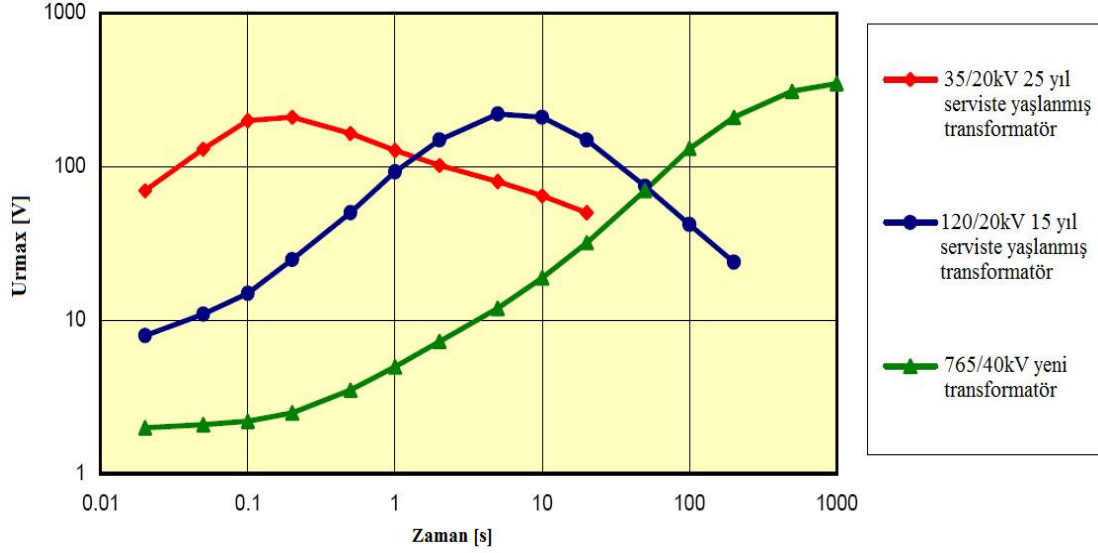
3.1 Bazı Yalıtım Tanı Yöntemleri

Yalıtım durumu hakkında bilgi edinmek için birçok tanı yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden başlıcaları toparlanma gerilimi yöntemi (*RVM, recovery voltage method*), kutuplanma ve geri kutuplanma akımı (*PDC polarization and depolarization current*), frekans uzayı spektroskopisi (*FDS frequency domain spectroscopy*) olarak sıralanabilir.

3.1.1 Toparlanma gerilimi yöntemi (RVM)

DC yüksek gerilim kaynağı ile yalıtım bilgisi öğrenilmek istenen yağ-kağıt yalıtkanlı kablo veya transformatöre t_c süresince gerilim uygulanır. Daha sonra kablo veya transformatörün uçları t_d süresince kısa devre edilerek yük boşaltılır. Ancak uçlar arasında tekrar bir gerilim ortaya çıkar bu gerilime toparlanma gerilimi diyoruz. Bu gerilim yalıtım malzemesindeki moleküler kutuplanmadan meydana gelmektedir. DC gerilim ile yalıtım malzemesinin içindeki su molekülleri enerji kazanarak kutuplanır ve elektrik alan yönünde hareket etmeye çalışır. Uçlar kısa devre edilse dahi moleküllerde biriken enerjiden dolayı tekrar bir gerilim oluşur.

Toparlanma gerilimi eğrisi yalıtım durumu hakkında bilgi verir. Şekil 3.1’de farklı yaşlardaki transformatörler için toparlanma gerilimi eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.1 : Farklı transformatörler için toparlanma eğrileri[8].

3.1.2 Kutuplanma ve geri kutuplanma akımı (PDC)

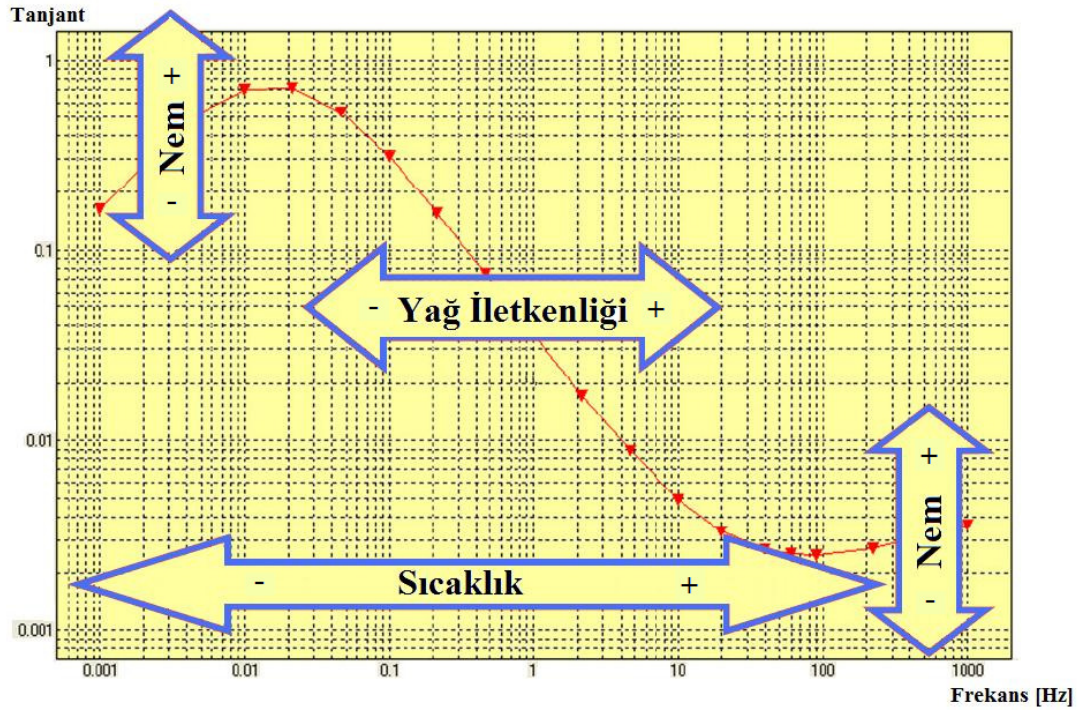
DC yüksek gerilim kaynağı ile yalıtım bilgisi öğrenilmek istenen yağ-kâğıt yalıtımlı kablo veya transformatöre t_c süresince gerilim uygulanır. Bir ampermetre ile şarj akımı yani kutuplanma akımı ölçülür. Akım sabitlendiği anda DC kaynak çıkarılarak deneyi yapılan kablonun uçları kısa devre edilir ve ters yönde meydana gelen geri kutuplanma akımı t_d süresince ampermetre ile ölçülür.

Kutuplanma ve geri kutuplanma akımı eğrileri yağ ve kâğıdın yalıtım durumu hakkında bilgi verir. Geri kutuplanma başlangıç akım değeri yağın yalıtım durumunu gösterirken, sabit akım değeri kâğıdın yalıtım durumunu gösterir. Şekil 3.3’de örnek bir kutuplanma ve geri kutuplanma akımı eğrisi görülmektedir [9].

3.1.3 Frekans Uzayı Spektroskopisi (FDS)

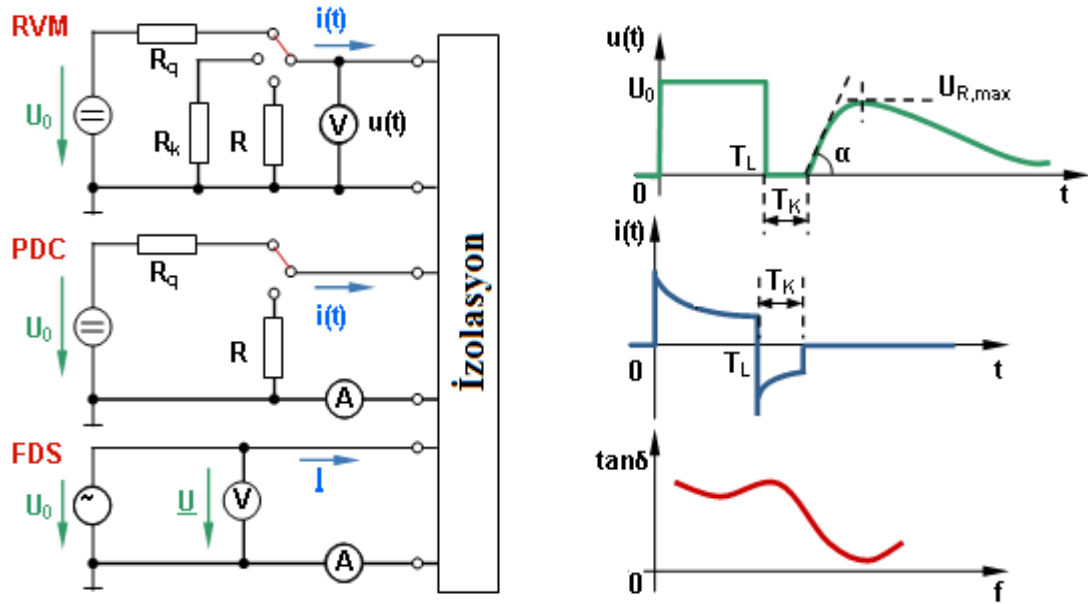
Geniş bir frekans ekseninde sinüsoidal uyarım için tasarlanan yöntemde yalıtım bilgisi öğrenilmek istenen yağ-kâğıt yalıtkanlı kablo veya transformatörün $\tan\delta$ değişimi yalıtım durumu hakkında bilgi verir.

Yağ iletkenliği ve nemin, frekans - $\tan\delta$ eğrisindeki etkileri Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2 : Yağ iletkenliği ve nemin, FDS eğrisine etkileri [10].

Yukarıdaki sayfalarda açıklanan RVM, PDC ve FDS yöntemleri ile yalıtım durumunun öğrenilmesi için kurulacak deney setlerinin prensip şemaları ve deney setindeki ölçü cihazları ile kaydedilen eğriler Şekil 3.3’de görülmektedir.



Şekil 3.3 : RVM, PDC, FDS prensip şemaları ve ölçümleri [11].

3.2 VLF, 50 Hz AC ve DC Yüksek Gerilim Deneylerinin Karşılaştırılması

Yaşlı kabloların yüksek gerilim saha deneyinde DC ve AC deney cihazlarının bazı dezavantajlarının olması VLF deneyini doğurmuştur. AC yüksek gerilim transformatörü rezonans deneyinde bile çok büyük boyutlu, ağır ve pahalıdır. DC yüksek gerilim deneyinde ise çok yüksek gerilime ihtiyaç duyulması kablo yalıtkanında hasara yol açabilmektedir.

VLF yüksek gerilim deneyinde çok düşük frekans, 0,1 Hz ve daha düşük frekansları ifade eder. VLF yüksek gerilim deneyleri genellikle 0,1 Hz frekansında uygulanmaktadır. Ancak kablonun uzunluğu ve kapasitif yükü arttıkça deney frekansı 0,01 Hz değerine kadar düşürülmektedir. Frekansın azalması deney gücü gereksiniminin azalması anlamına gelir.

Kablolar fiziksel yapılarından dolayı silindirselsel birer kondansatör gibi davranırlar. Bu sebeple AC deney transformatörleri kablonun kapasitif yükünü karşılayacak güçte ve boyutta olmalıdır. Bilindiği gibi Ohm yasasına göre sabit gerilim altında direnç artarsa akım azalacaktır.

$$U = I_c \cdot X_c \quad (3.1)$$

Kapasitif akımın azalması ile deney için gerekli olan güç gereksinimi de aynı oranda azalacaktır.

$$Q_c = U \cdot I_c \quad (3.2)$$

Denklem (3.1) ve (3.2)'ye göre sabit deney gerilimi altında kapasitif reaktans ile kapasitif güç birbirine ters orantılıdır.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3.3)$$

Kapasitif reaktans ise frekans ile ters doğru orantılı olarak değişmektedir. Denklem (3.1), (3.2) ve (3.3) birlikte incelendiğinde frekans ile kapasitif gücün birbirine orantılı değiştiği açıkça ortadadır. Sonuç olarak dayanım deneyi 50 Hz yerine 0,1 Hz frekansı ile uygulandığında kapasitif deney gücü 500 kat azalmaktadır. Güç gereksiniminin azalmasıyla cihaz boyutları ve maliyeti de çok büyük oranda azalmaktadır.

AC 50 Hz deneyinden güç gereksinimi bakımından üstün olan VLF deneyi, DC yüksek gerilim deneyi karşısında ise dayanım deneyinin daha düşük gerilim uygulanarak yapılması konusunda üstündür. Ayrıca polaritesinin zamanla değişmesi sayesinde DC yüksek gerilim deneyindeki gibi yalıtıma zarar veren büyük güçlü şarj akımları meydana gelmemektedir. Bu avantajların yanında VLF deneyinde $\tan\delta$ ölçümü yapılarak yalıtım genel durumu hakkında bilgi sahibi olunabilir. Kısacası VLF yüksek gerilim deneyi her iki deneyin avantajlı yönlerini barındırmaktadır. Çizelge 3.1’de AC, DC ve VLF deneyleri donanım büyüklüğü, sulu ağaç tespiti ve deney doğruluğu bakımından incelenmiştir.

Çizelge 3.1 : AC, DC ve VLF deneylerinin karşılaştırılması [12].

Dalga Şekli	Ekipman Büyüklüğü	Sulu Ağaç Tespiti	Doğruluk
AC	☹	☺	☺
DC	☺	☹	☹
VLF	☺	☹	☺

Ağaçlanma katı yalıtkanlardaki yabancı parçacıklar, hava boşlukları, nem, sıcaklık ve basınç gibi etkiler ile ortaya çıkan kısmi boşalma olayıdır. Ağaçlanma yalıtımı zayıflatan bir etkidir, zamanla yukarıda sayılan etkiler ile büyüyerek delinmeye dahi yol açabilmektedir.

3.3 VLF Yüksek Gerilim Deneyleri

VLF yüksek gerilim ile uygulanan en basit yalıtım deneyi kablo ve transformatör yalıtımı için sağlam ya da hasarlı (*go / no go*) sonucunu veren yalıtım dayanım deneyidir.

Bir sinüs dalga VLF yüksek gerilim kaynağı kullanılarak kablo ve transformatör yalıtım dayanım deneyi haricinde tanı deneyleri de yapılabilir. Dayanım deneyinde arıza riskini almak istemediğimizde, kablonun sağlamlığı ile ilgili bilgi sahibi olmak için iki tanı yöntemi vardır. Bunlar $\tan\delta$ ve kısmi boşalma deneyleridir.

3.3.1 Dayanım deneyi

Polietilen (PE), çapraz bağlı polietilen (XLPE) ve kauçuk (EPR) yalıtkanlı kablolar üzerinde sağlam ya da hasarlı (kablonun işletmede kalması ya da değiştirilmesi)

ifadesinin yer aldığı yalıtım dayanım deneyi, kablo yalıtımındaki zayıf noktaların ortaya çıkması için uygulanır. Bu deney kablo döşendikten sonra, onarımdan sonra veya işletmedeyken şebekenin güvenle çalıştığından emin olabilmek için yapılır. Eğer VLF yüksek gerilim deneyi doğru bir şekilde yapılır ise deney sadece deforme olmuş bölgeye zarar verir, sağlam yalıtımlı bölgeye ve küçük deformasyonlu bölgelere zarar vermez [13].

Küçük deformasyonlar ve sağlam bölgeler deney geriliminden etkilenmezler. Ancak uygulanacak olan uygun deney gerilimi ve deney süresinin belirlenmesi önemlidir. Eğer kablo deney esnasında arıza veriyor ise deney sonlandırılmalıdır çünkü kablo hasarlıdır ve muhtemelen işletme esnasında kısa süre içinde arıza verecektir. Deney seti kapatıldıktan sonra kablo yükü boşaltılmalı ve kablo topraklanmalıdır. Çizelge 3.2’de IEEE 400.2-2004 standardında güç kablolarında VLF sinüs dalga biçimi için belirlenen deney gerilimleri, Çizelge 3.3’de IEEE 400.2-2004 standardında güç kablolarında VLF kosinüs-kare dalga biçimi için belirlenen deney gerilimleri verilmiştir. Kablonun anma gerilimine göre belirlenen deney gerilimleri için önerilen uygulama süresi 15-60 dakika arasındır. Eğer bakım amaçlı veya onarım sonrası deney yapılıyor ise önerilen süre 15 dakikadır[14].

Çizelge 3.2 : IEEE Std 400.2-2004 VLF sinüsoidal deney gerilimleri

Kablo anma gerilimi (faz-faz)	Yükleme (faz-toprak)	Kabul (faz-toprak)	Bakım (faz-toprak)
rms gerilim [kV]	rms ve (tepe) [kV]	rms ve (tepe) [kV]	rms ve (tepe) [kV]
5	9 (13)	10 (14)	7 (10)
8	11 (16)	13 (18)	10 (14)
15	18 (25)	20 (28)	16 (22)
25	27 (38)	31 (44)	23 (33)
35	39 (55)	44 (62)	33 (47)

Çizelge 3.2 ve 3.3’de geçen **yükleme** deneyi kablonun işletmeye alınacağı yere yerleştirildikten sonra ek ve sonlandırma yapılmadan önce yapılan deneydir. Yüklemeye deneyi ile depolama, taşıma ve yerleştirme esnasında oluşabilecek hasarlar belirlenir. **Kabul** deneyi kablonun işletmeye alınacağı yere yerleştirilip, ek ve sonlandırmalarının yapıp sistem devreye alınmadan önce yapılan deneydir. Kabul deneyi ile kabloda veya herhangi bir sistem donanımında yerleştirme esnasında oluşabilecek hasarlar belirlenir. **Bakım** deneyi ise kablo işletmede iken yapılan

deneydir. Bakım deneyi ile işletmedeki kablo yalıtımında meydana gelebilecek hasarlar ve servis zamanı belirlenir [14].

Çizelge 3.3 : IEEE Std 400.2-2004 VLF kosinüs-kare deney gerilimleri

Kablo anma gerilimi (faz-faz)	Yükleme (faz-toprak)	Kabul (faz-toprak)	Bakım (faz-toprak)
rms gerilim [kV]	rms/tepe [kV]	rms/tepe [kV]	rms/tepe [kV]
5	12	14	10
8	16	18	14
15	25	28	22
25	38	44	33
35	55	62	47

Büyük dönen alternatif akım makinelerinin dayanım deneyi için IEEE'nin yayınladığı IEEE 433-1974 standardına göre 60 Hz ve 0,1 Hz deney gerilimleri birbirine eşit değildir. Standartta göre VLF sinüsoidal deney gerilimi 60 Hz deney geriliminden %15 daha fazladır. Çizelge 3.4'de IEEE 433-1974 standardına göre büyük dönen alternatif akım makinelerinin dayanım deneyinde uygulanması gereken gerilim oranları verilmiştir [15]. 0,1 Hz deney gerilimi tepe değeri olarak verilmiştir bunun sebebi 0,1 Hz deneyinin kosinüs-kare dalga ile de yapılıyor olmasıdır.

Çizelge 3.4 : IEEE Std 433.1974 AA makineleri için deney gerilimleri

	AC 60 Hz (rms)	DC	VLF 0,1 Hz (tepe)
Deney gerilimi	1V	1,7V	1,63V

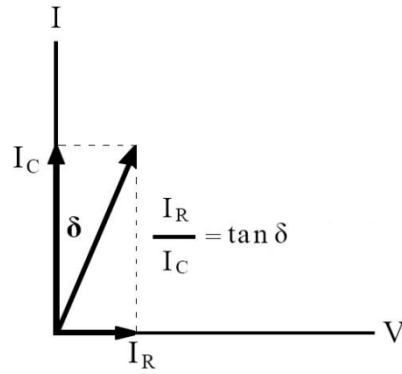
Uygulanacak gerilim VLF 0,1 Hz sinüs geriliminin etkin (rms) değeri ise 1,63V değeri $\sqrt{2}$ ' ye bölüldüğünde yaklaşık olarak 1,15V bulunacaktır. Gerilim uygulama süreleri ise aynıdır [13].

3.3.2 Kayıp faktörü ($\tan\delta$) ölçümü

Kayıp açısı veya $\tan\delta$ deneyi olarak da adlandırılır. Genel olarak kablodaki sulu ağaçlar ve diğer boşalmaların varlığını belirlemede uygulanır. Ayrıca diğer ek, sonlandırma gibi parçaların durumu hakkında bilgi verir. Kayıp faktörü deneyi kablounun genel yalıtım kalitesi hakkında bilgi verir ve böylece kablolar arasında

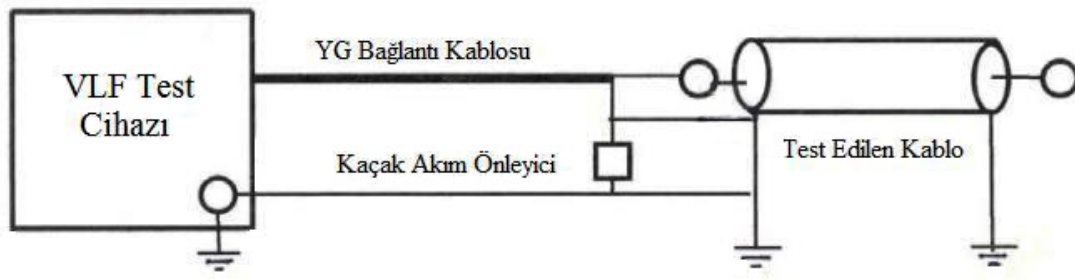
karşılaştırma yapılarak öncelikli değiştirilmesi gereken kabloların belirlenmesi sağlanır. Ayrıca bu deney sonucuna göre ilave deney stratejileri belirlenebilir.

Daha önce de söz edildiği gibi kablo fiziksel yapısından dolayı bir kapasite gibi davranır. Eğer kablonun yalıtımı sorunsuz ise neredeyse sorunsuz bir kondansatördür. Bir kondansatöre uygulanan gerilim ve akım arasında 90 derecelik bir kapasitif kayma vardır. Deneyi yapılan cihazdan ölçülen dirençsel akımın kapasitif akıma oranı bize kayıp faktörünü $\tan \delta$ verir. Yalıtım üzerinden toprağa akan akım dirençsel özelliklidir. Eğer yalıtım iyi durumda değil ise dirençsel akımın artması ile gerilim ve akım arasındaki faz açısı küçülür dolayısıyla kapasitif akım ile kablo akımı arasındaki açı olan kayıp açısı büyür. Şekil 3.4’de kayıp faktörü fazör diyagramı görülmektedir.



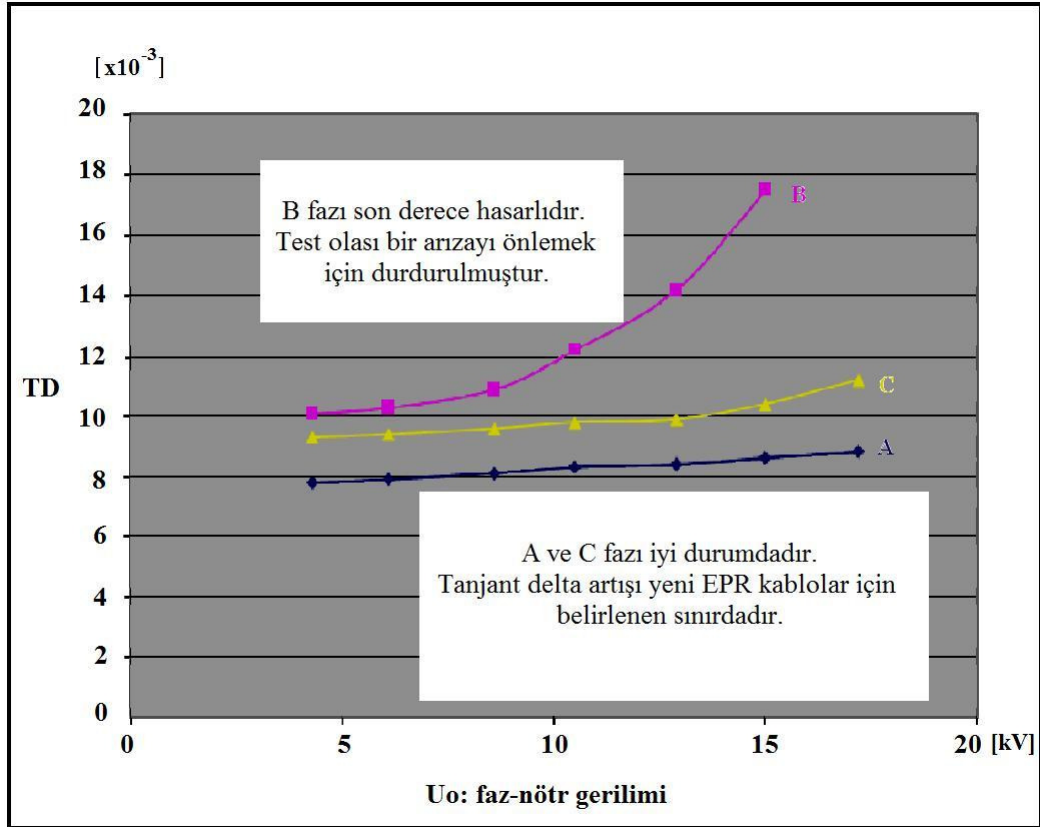
Şekil 3.4 : Kayıp faktörü fazör diyagramı.

Kayıp faktörü deneyi uygulanarak kablo yalıtımındaki ve aksesuarlarındaki kalite ölçülebilir. Ancak bu deneyin bir dezavantajı, kablonun başından sonuna kadar genel bir bilgi verir. Diğer bir dezavantajı ise en iyi sonucu sadece bir tip yalıtım kullanılan kablolarda vermesidir, çünkü farklı malzemelerin kayıp faktörü karakteristikleri farklılıklar gösterir. Şekil 3.5’de IEEE400-2001’de kayıp faktörü ölçümü için önerilen VLF deney bağlantısı verilmiştir.



Şekil 3.5 : Kayıp faktörü ölçümü için VLF deney bağlantısı

Çeşitli kablolarda yapılan kayıp faktörü deneyleri sonucunda önemli veriler elde edilmiştir. İyi, orta hasarlı ve son derece hasarlı kablolar için kayıp faktörü farklı değerler alır. Deney $0,5U_0$ (U_0 : faz-nötr gerilimi) deney gerilimiyle başlayıp ölçüm alınır. Gerilim $1U_0$ ’a yükseltip ölçüm alınır. Daha sonra $1,25U_0$, $1,5U_0$ ve kabloun durumuna göre $1,75U_0$ ve $2,0U_0$ değerine artırılabilir. Şekil 3.6 iyi durumdaki ve son derece hasarlı yalıtkan numunelerin kayıp faktörü ($\tan\delta$) eğrisindeki değişimi gösterir. Deney esnasında kablo arızasına neden olup kabloya zarar vermemek için eğer kayıp faktörü ($\tan\delta$) eğrisi endişe verici bölgedeyse deney geriliminde duruma göre $1,5U_0$ veya $1,6U_0$ değeri aşılmamalıdır. Kablo yalıtımındaki elektriksel ağaçların kablo yalıtımına hasar verdiği zaten öğrenilmiştir. Bu deney sonucunda kablo için son derece hasarlı, orta hasarlı, iyi veya diğer kullanılışlarıyla önlem gerekli, ileride müdahale gerekli, müdahaleye gerek yok gibi sonuçlar ortaya çıkar.



Şekil 3.6 : EPR yalıtkanlı kabloda gerilim – $\tan\delta$ eğrisi

VLF sinüsoidal 0,1 Hz kayıp faktörü deneyi bakım programında uygulanarak deney sonucuna göre kablo değişimi yapılır ya da tekrar hizmete açılır. Bakım programında uygulanan kayıp faktörü deneyi öncelikli olarak değiştirilmesi gereken hatların belirlenmesini sağlar [14].

Kayıp faktörü deneyi yeni cihazdan (kablo, transformatör gibi) alınan ya da bilinen kayıp faktörü ölçümleri ile yalıtım durumu incelenecek olan cihazın kayıp faktörü değişimi karşılaştırılarak ve yukarıda anlatılan $0,5U_0 - 2,0U_0$ aralığında kayıp faktörü artışı incelenerek yapılır. Ayrıca XLPE yalıtkanlı kablolar için IEEE400-2001’de bir ölçüt çizelgesi bulunmaktadır. XLPE yalıtkanlı kablolar için hangi kayıp faktörü aralığında iyi, orta hasarlı ve son derece hasarlı gibi değerlendirme yapılabileceğini belirten IEEE400-2001’de yayınlanan kayıp faktörü ölçütleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : IEEE Std 400-2001 Kayıp faktörü ölçütleri

Tan δ ($2V_0$)	Tan δ Farkı Tan δ ($2V_0$) - Tan δ (V_0)	Değerlendirme
$1,2 \times 10^{-3}$ ’den küçük	$0,6 \times 10^{-3}$ ’den küçük	İyi
$1,2 \times 10^{-3}$ ’den büyük-eşit	$0,6 \times 10^{-3}$ ’den büyük-eşit	Orta Hasarlı
$2,2 \times 10^{-3}$ ’den büyük-eşit	$1,0 \times 10^{-3}$ ’den büyük-eşit	Son Derece Hasarlı

Çizelgede verilen değerlendirme ölçütleri farklı yalıtkanlı kablo veya farklı cihazlar için farklılık gösterir dolayısıyla kayıp faktörü deneyi yapılacak cihaz için aynı şartlarda daha önceki çalışmalarda elde edilen yaygın kullanılan eğri ve ölçütlere göre değerlendirme yapmak en doğru sonuca ulaşılmasını sağlayacaktır [16].

3.3.3 Kısmi boşalma deneyi

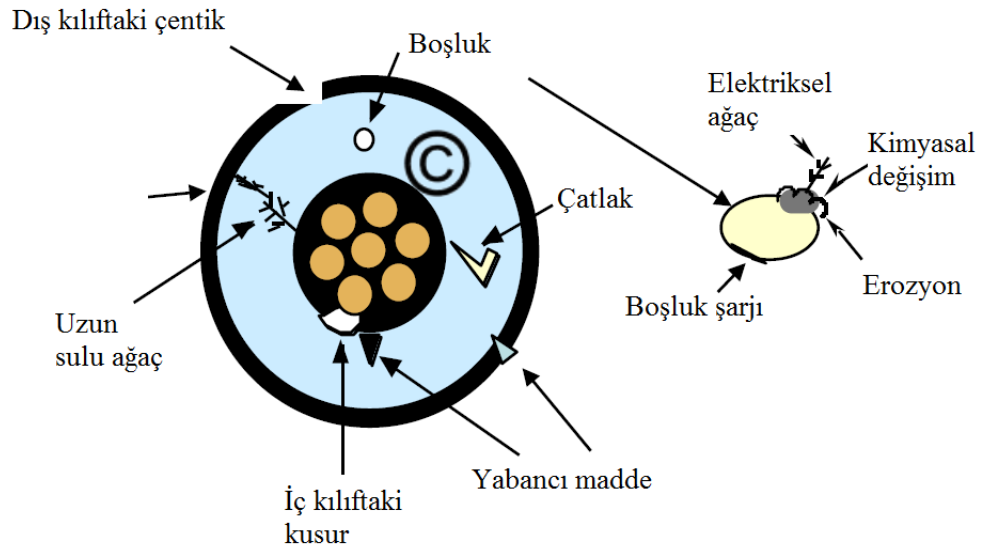
VLF kısmi boşalma deneyi yalıtılmış kablo sistemine VLF saf ve kısmi boşalmaz bir sinüs gerilimi verilerek uygulanır. Deney gerilimi kabloda hasara yol açmayacak bir değerde seçilir. Genellikle $1U_0$ ile $2U_0$ arası seçilen gerilim en fazla 10 dakika boyunca uygulanır. İlk kısmi boşalmanın meydana geldiği gerilim ‘*kısmi boşalma başlama gerilimi (PDIV)*’ olarak adlandırılır. PDIV aşıldıktan sonra herhangi bir elektriksel ağaç dakikalar içinde gelişip arızaya neden olabilir. Gerilim tekrar düşürülürken kısmi boşalmaların sona erdiği gerilime ise ‘*kısmi boşalma sönme gerilimi (PDEV)*’ denir. Deney esnasında üretilen tüm kısmi boşalmaların konumu ve büyüklüğü kaydedilir. Kaydedilen boşalmalar ile kısmi boşalma haritası oluşturulur. Bu harita sayesinde yalıtımdaki çeşitli hasarların şiddeti ve konumu belirlenir.

Kısmi boşalmaların meydana gelmesindeki etkenler aşağıdaki gibi sıralanabilir,

- Yalıtımdaki boşluk, kesik ve çentikler,
- Yaşlı kablolarda sulu ağaçlar ve elektriksel ağaçların etkisi,
- Zayıf mekanik bağlantı noktaları,
- Yüksek işletme sıcaklığıdır.

Şekil 3.7’de kabloda kısmi boşalmaya yol açan etkenler görülmektedir. Kısmi boşalmaların tespit edilmesinde sık kullanılan üç yöntem vardır. Bunlar akustik, elektromanyetik ve optik yöntemlerdir. En yaygın olanı elektromanyetik yöntemdir. Kablo iletkenine deney donanımı bağlanarak tespit edilir.

Yeraltı kablolarında kısmi boşalma yerinin tespitinde kullanılan en yaygın yöntem ise darbe yansıma (*reflectometry*) yöntemidir. Kısmi boşalma sinyalinin kablonun yakın ucuna ulaşması ile diğer uca gidip geri dönen işaretin yakın uca ulaşma süreleri tespit edilerek boşalmanın hangi noktada gerçekleştiği bulunabilir. Aynı yöntemde kablonun iki ucuna detektör konularak kısmi boşalma işaretinin detektörlere ulaşma sürelerine göre de tespit yapılabilir. Uzun iletim hatlarında ise kısmi boşalmanın en çok ortaya çıktığı ek ve bağlantı noktalarına tespit sensörü konulabilir.



Şekil 3.7 : Kısmi boşalmaya yol açan etkenler

Ancak tüm kısmi boşalma deneylerinde olduğu gibi VLF kısmi boşalma deneyi de tek başına yeterli değildir. Deney sonucunda yoğun kısmi boşalma gözlenen bölgede

herhangi bir arıza meydana gelmeyebilir veya kısmi boşalmasız bir bölgede yalıtım arızası meydana gelebilir [14].

3.4 VLF Deneyleri İle İlgili Standartlar

1960'lı yıllarda büyük dönen makinelerin VLF yekniği ile yalıtım deneyi yapılmaya başlanmıştır. Deneyin ilerleyen yıllarda yaygınlaşmasının sonucu olarak 1974 yılında IEEE büyük dönen alternatif akım makinelerinin VLF ile yalıtım deneyi için bir standart yayınladı. '*IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency*' IEEE Std 433-1974.

1990'lı yıllara gelindiğinde DC dayanım deneyinin katı yalıtkanlı kablolarda yalıtım problemlerine yol açtığı ortaya çıktı. DC deneyin alternatifi VLF yöntemi idi. 1998 yılında *High Voltage Inc.* firması ilk taşınabilir VLF üretici imal etti. 2001 yılında IEEE'nin kablolarda alan deneyi ve yalıtım ile ilgili yayınladığı standarda VLF dâhil edildi. '*Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems*' IEEE Std 400-2001. IEEE üç yıl sonra VLF deneyi için geniş kapsamlı bir kablo deney standardı yayınladı. '*Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)*' IEEE Std 400.2-2004. Aynı yıllarda Almanya'da *VDE DIN 0276-620/62* standardı yayınlanmıştı[13]. International Electrotechnical Commission ise 2006 yılında yüksek gerilim deney teknikleri ile ilgili standardında VLF deneyine yer verdi. '*Definitions and requirements for on-site testing*' IEC 60060-3-2006.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

Deneysel çalışmamızda 0,1 Hz sinüsoidal gerilim ile pankek deney transformatörünün çeşitli yalıtım durumlarını denemek amacıyla *Stuttgart Üniversitesi, Enerji İletimi ve Yüksek Gerilim Teknolojisi Enstitüsü*'nde 2006-2007 yıllarında kaydedilen veriler analiz edilmiştir. VLF yüksek gerilim ile pankek deney transformatöründe farklı gerilimlerde ve farklı presbord/yağ kademelerinde kaydedilen gerilim ve akım verileri kullanılarak kayıp faktörü hesaplanmış, sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca sıcaklığa bağlı kayıp faktörü – frekans değişimi eğrileri elde edilerek sıcaklığın kayıp faktörüne etkisi farklı frekanslarda incelenmiştir.

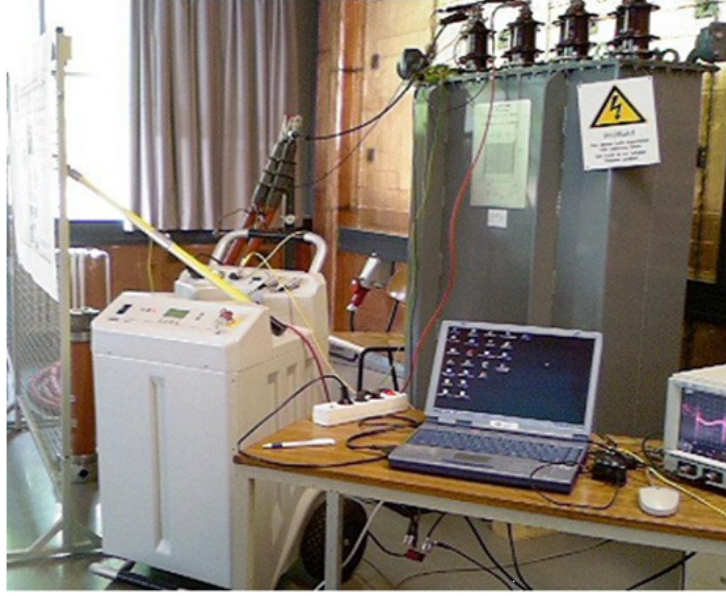
Pankek deney transformatöründe farklı gerilimlerde ve farklı presbord/yağ kademelerinde THD değerleri hesaplanarak kayıp faktörü ile arasında bir bağıntının olup olmadığı incelenmiştir.

Yeni ve yaşlı deney transformatöründe harmonik analizi yapılarak yaşlanmanın etkileri incelenmiştir. Ayrıca farklı gerilimlerde ve farklı presbord/yağ kademelerinde toplam harmonik bozulma eğrileri 6 ay süreli yaşlanma etkisi ile elde edilmiştir.

4.1 Deney Seti

Deney seti 0,1 Hz üreteç, pankek deney transformatörü, XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu, osiloskop, kayıp faktörü ölçüm cihazları ve bilgisayardan oluşmaktadır. Deney seti Şekil 4.1'de görülmektedir.

0,1 Hz üreteç olarak, *Baur* marka '*Portable High Voltage VLF Tester VLF 20*' model deney cihazı kullanılmıştır. Pankek deney transformatörü, *ALSTOM* marka '*5300-98 FOR RVM 5461*' model olup farklı yağ ve presbord kademelerinde deney yapma olanağı sağlar. XLPE yalıtkanlı yüksek gerilim kablosu 1 x 180/25 mm² kesitinde, 20,3/35 kV gerilim kademesindedir. Çalışmada ayrıca osiloskop, ölçü aletleri, bilgisayar ve bilgisayar programları kullanılmıştır.



Şekil 4.1 : Deney seti

4.1.1 VLF üretici

VLF yüksek gerilim deney cihazı Baur VLF 20 modelidir. Orta gerilim kablolarının yalıtım deneyinde kullanılmak üzere tasarlanan cihaz 20 kVrms değerine kadar deney gerilimi sağlayabilmektedir. Deney frekansı 0,01 Hz - 1 Hz aralığındadır. VLF deney cihazı 0,1 Hz frekans ve 20 kVrms geriliminde 3 μF kapasiteye sahip bir kabloyu deneyebilir. Şekil 4.2’de Baur VLF 20 deney cihazı görülmektedir.



Şekil 4.2 : Baur VLF 20 deney cihazı

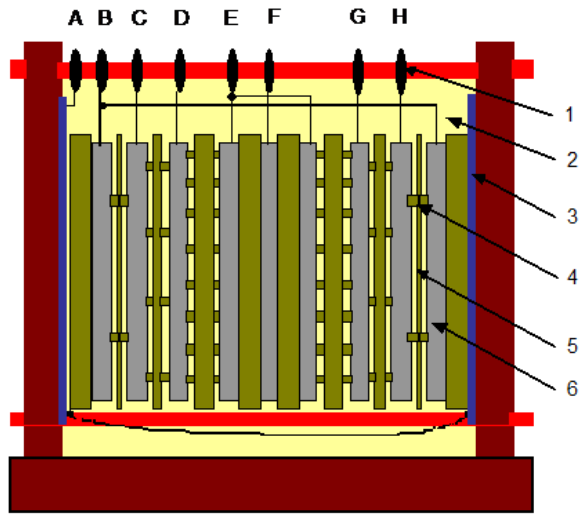
4.1.2 Pankek deney transformatörü

Transformatöre verilen pankek ismi sargıların şeklinden gelmektedir. Transformatör deneysel amaçlı üretilmiş olan ALSTOM marka ‘5300-98 FOR RVM 5461’ modelidir. Şekil 4.3’de pankek deney transformatörünün dış görünümü verilmiştir.



Şekil 4.3 : Pankek deney transformatörü dış görünümü

Pankek deney transformatöründe sargıların arasındaki presbord bariyer ve yağ kanalları çeşitli oranlarda düzenlenmiş olup, farklı presbord/yağ oranları ile bağlantı yapmaya olanak sağlar. Şekil 4.4’de pankek deney transformatörünün kesiti verilmiştir.

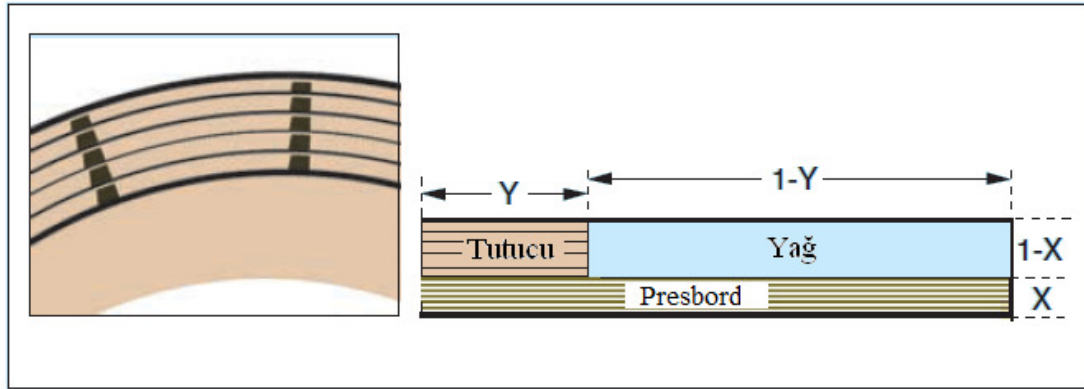


Şekil 4.4 : Pankek deney transformatörünün kesiti

Şekil 4.4’de numaralanmış olan pankek deney transformatörünün bölümleri şöyledir;

- 1- Bağlantı terminali
- 2- Yalıtım yağı
- 3- Bakır topraklama levhası
- 4- Tutucu destek
- 5- Presbord
- 6- Pankek biçimli sargı

Transformatörün farklı presbord/yağ oranları ile tutucu/yağ oranları çizelge 4.1’de verilmiştir. Transformatör kesitinde görülen 8 bağlantı ucu ile farklı geometrik bağlantılar oluşturulabilir. Şekil 4.5’de pankek deney transformatörünün presbord, yağ ve tutucu konfigürasyonları görülmektedir.



Şekil 4.5 : Pankek deney transformatörünün yalıtım detayı.

Presbord, yağ ve tutucu ile çeşitli oranlarda geometrik bağlantı şekilleri oluşturularak farklı eşdeğer dielektrik sabitleri elde edilebilmektedir. Pankek deney transformatörünün kesitini gösteren Şekil 4.4’deki harflerle gösterilmiş olan bağlantı uçlarının farklı kombinasyonları ile elde edilen presbord/yağ ve tutucu/yağ oranları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Pankek transformatörün yalıtım oranları

	CH-B	DG-CH	E-DG	F-E
Presbord/Yağ	17/83	28/72	50/50	100/0
Tutucu/Yağ	15/85	28/72	55/45	100/0

Farklı geometrilerdeki bağlantılar bize yalıtım geometrisinin kayıp faktörü üzerindeki etkisini inceleme olanağı sağlar.

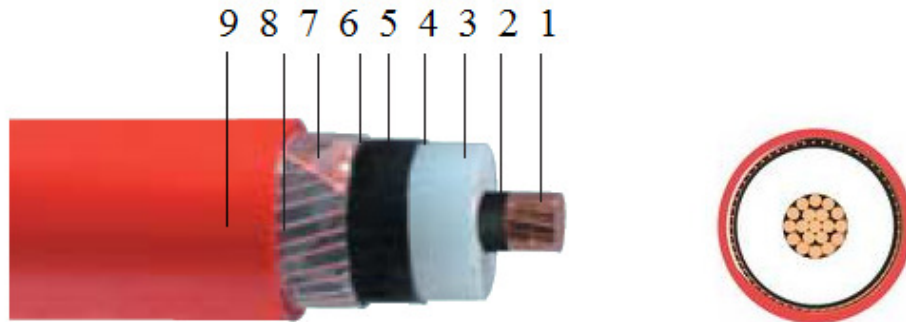
4.1.3 Referans kablo

Referans kapasite olarak bakır iletkenli $1 \times 185\text{ş}/25\text{mm}^2$ kesitinde, işletme gerilimi $U_0/U : 20,3/35$ kV olan çapraz bağlı polietilen (XLPE) yalıtkanlı, boyu $l:4,65\text{cm}$ olan orta gerilim kablosu kullanılmıştır. Şekil 4.6'da referans kapasite olarak kullanılan kablo görülmektedir.



Şekil 4.6 : Referans kablonun görünümü

Kablo uçlarında, silikon-kauçuk malzemeden, 315 mm uzunlukta, orta gerilim kablo başlıkları kullanılmıştır. Şekil 4.7'de XLPE yalıtkanlı örnek orta gerilim kablo yapısı verilmiştir.



Şekil 4.7 : XLPE yalıtkanlı OG kablo yapısı.

Şekil 4.7’de numaralanmış biçimde gösterilen kablo katmanları içten dışa doğru sırasıyla şöyledir,

1. Bakır iletken
2. İç yarı iletken tabaka
3. XLPE yalıtkan
4. Dış yarı iletken tabaka
5. Yarı iletken krep kâğıdı
6. Bakır tel ekran
7. Tutucu bakır bant
8. Koruma bandı
9. Dış kılıf

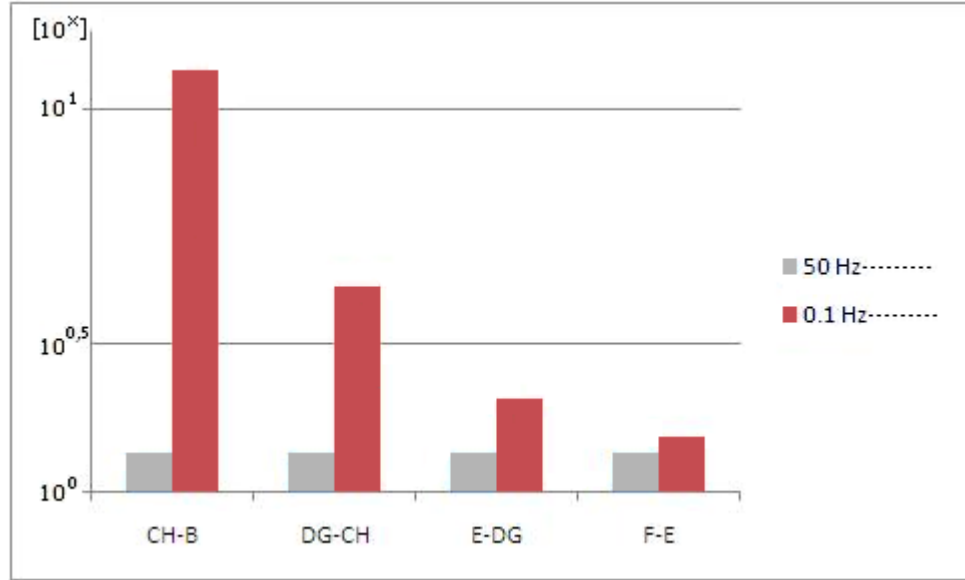
Bilindiği gibi iyi yalıtımlı bir kablo neredeyse tam bir kapasite gibi davranır. Referans kabloya deney esnasında faz-nötr işletme gerilim değeri olan 20,3 kV’un altında gerilim uygulanmıştır. İşletme gerilimi değerine kadar uygulanan gerilimlerde kablo kayıpları küçük olmaktadır.

4.2 Tanı Deneylerinde 50 Hz ve 0,1 Hz Karşılaştırması

Geçmişte yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre 0,1 Hz frekansındaki dayanım deneyi sonuçları 50 Hz frekansındaki dayanım deneyi sonuçlarıyla yaklaşık olarak aynıdır [17]. 50 Hz ve 0,1 Hz dayanım gerilimi deney sonuçları DC dayanım deneyi sonuçlarının çok altındadır. Bu demek oluyor ki, 50 Hz ve 0,1 Hz dayanım deneyleri DC dayanım deneyine göre daha düşük gerilimlerde uygulanır.

Üçüncü bölümde açıklanan nedenlerden dolayı alternatif akım 50 Hz deney donanımları 0,1 Hz deney donanımlarına göre çok daha büyük ve maliyetli olmaktadır. AC 50 Hz ve DC deneylerin bu dezavantajlarının yanında 0,1 Hz deneyi bir adım öne çıkmaktadır. Ayrıca dayanım deneyi dışında alternatif gerilimde yapılabilen kayıp faktörü deneyi ile herhangi bir arızaya neden olmadan yalıtım kalitesi hakkında bilgi edinilebilir.

Deney yapılacak numunenin 50 Hz frekansındaki kayıp faktörü değeri ile 0,1 Hz frekansındaki kayıp faktörü değerleri birbirinden çok farklıdır. 0,1 Hz frekansında kayıp faktörü yüksektir. Tanı deneyi yapılırken farklı frekanslarda alınan kayıp faktörlerinin birbiri ile karşılaştırılması doğru olmayacaktır. Şekil 4.8’de pankek deney transformatörünün 50 Hz ve 0,1 Hz’deki kayıp faktörü değerleri verilmiştir.



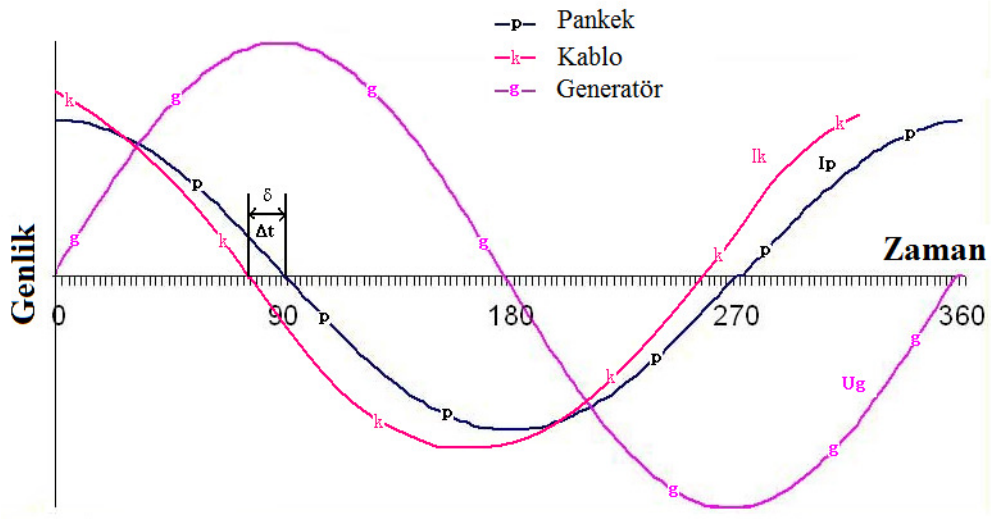
Şekil 4.8 : Pankek transformatörün 50 Hz ve 0,1 Hz’de kayıp faktörleri

Pankek deney transformatörünün çeşitli bağlantılarında 0,1 Hz frekansında alınan kayıp faktörü ölçümleri 50 Hz’de alınan ölçümlerin çok üstündedir.

4.3 Deney Seti Ölçüm İlkesi

VLF yüksek gerilim deney cihazı 0,1 Hz üreteç olarak kullanıldı. Kablo ise referans kapasite olarak kullanıldı. Bilindiği gibi yalıtımı iyi olan bir kablo neredeyse tam bir kapasite gibi davranır. Giriş direnci 50 Ω olan osiloskop ile iki ayrı kanaldan eş zamanlı olarak transformatör ve referans kablodan ölçümler alınarak kaydedildi. Transformatör ile kablo akımı arasındaki faz farkından kayıp faktörü hesaplandı. Şekil 4.9’da deney seti prensip şeması görülmektedir.

ile kablo akımı arasında yer alacaktır. Şekil 4.11’de gerilim ve akım arasındaki kayma verilmiştir.



Şekil 4.11 : Gerilim ve akım arasındaki kayma

Eğer bir periyot derece cinsinden 360° alınır ise derece cinsinden δ kayıp açısı denklem (4.1)’deki gibi bulunur.

$$\delta = \frac{360 \times \Delta t}{T} \quad (4.1)$$

Burada,

δ : kayıp açısı [derece]

Δt : kayma süresi [s]

T : periyot [s] olarak alınacaktır.

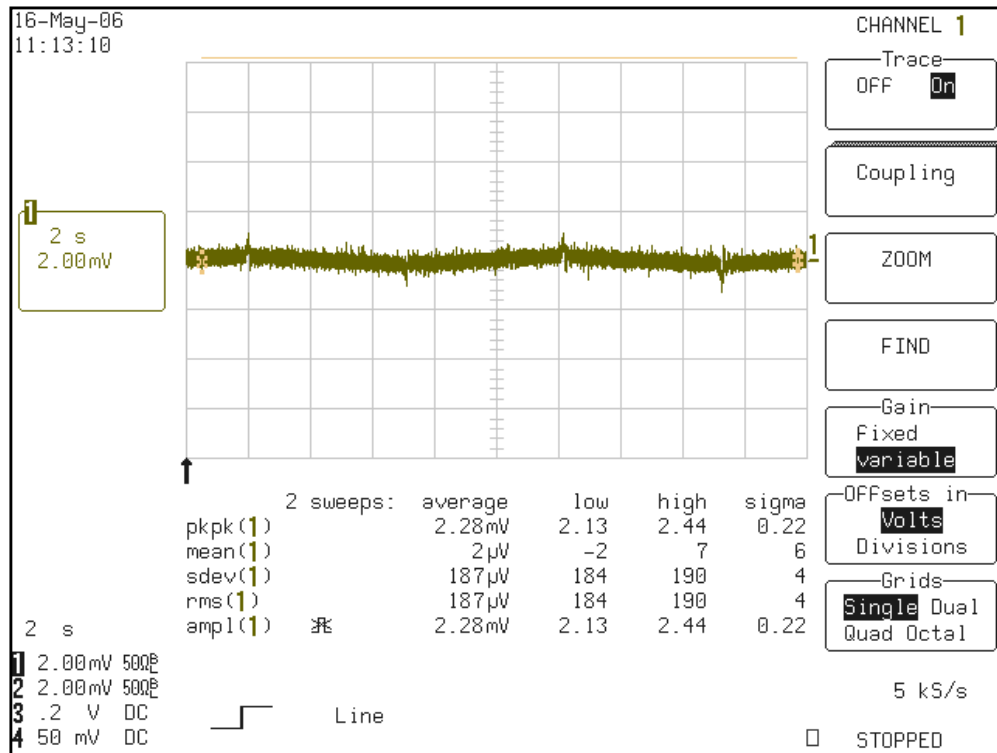
Kayıp açısı δ ’nın tanjantı hesaplanarak kayıp faktörü bulunur. Farklı gerilim seviyelerinde aynı yöntem uygulanarak gerilim-tan δ eğrisi çizilir. Kayıp faktörünün değişimine göre deneyi yapılan cihazın yalıtım durumunun hangi seviyede olduğu belirlenir.

4.4 Deneyin Uygulanması

Yukarıda teorik olarak açıklanan yöntem uygulamada biraz daha karmaşıktır. Üreteç tarafından uygulanan gerilim ile birlikte, kablo ve transformatörden akım akmaya başlar. Ölçülen veriler sürekli zamanlı ve sınırlandırılmamış genlikler içerir. İkinci

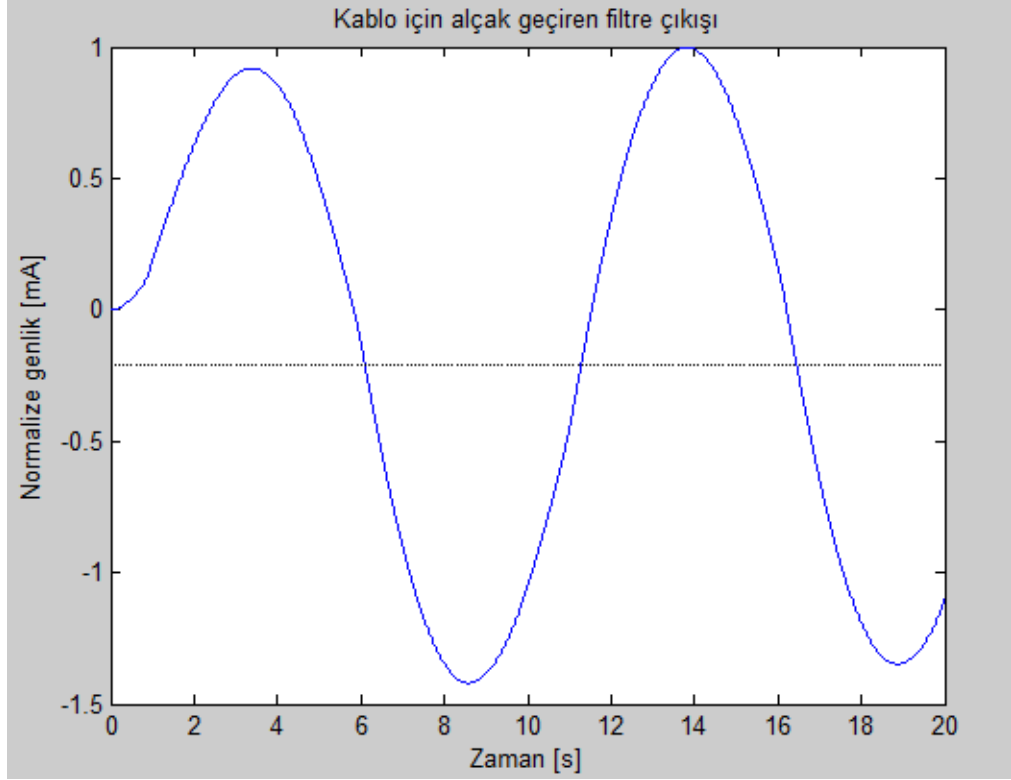
bölümde bir sürekli zaman işaretinin alabileceği değerler sınırlandırılmamış ise bu işaretin analog işaret olarak adlandırıldığından, bir ayrık zaman işaretinin alabileceği değer sayısı sınırlı ise bu işaretin sayısal işaret olarak adlandırıldığından söz etmiştik. Ölçülen verileri sayısal ortamda inceleyebilmek için sayısal işarete dönüştürmemiz gerekir. Dolayısıyla akım değerleri belirli bir örnekleme frekansı ile kaydedilerek sayısal işarete dönüştürülür.

Ancak kaydedilen veriler ölçü aletlerinin ölçüm hatalarından ve sistemdeki diğer bozucu etkilerden dolayı gürültü içermektedir. Verinin analiz edilebilmesi için asıl işaret dışındaki bozucuların filtrelenmesi gerekir. Çoğu zaman bozucu etkiler asıl işaretin görülmesini engelleyecek seviyededir. Kablo üzerinden kaydedilen gürültülü veriler için bir örnek Şekil 4.12’de görülmektedir. Çalışmamızda kaydedilen gürültülü verileri temizlemek için bilgisayar üzerinde ‘MATLAB’ programında ‘Butterworth’ tipi alçak geçiren filtre tasarlanmıştır. Analizi yapılacak olan veriler filtrelenerek elde edilen asıl işaret üzerinde çalışmalar yürütülmüştür.



Şekil 4.12 : Filtrelenmemiş kablo akımı.

Şekil 4.13’de işaretin filtrelenmiş hali görülmektedir. Bu durumda rahatlıkla kayıp faktörü hesaplanabilecektir.

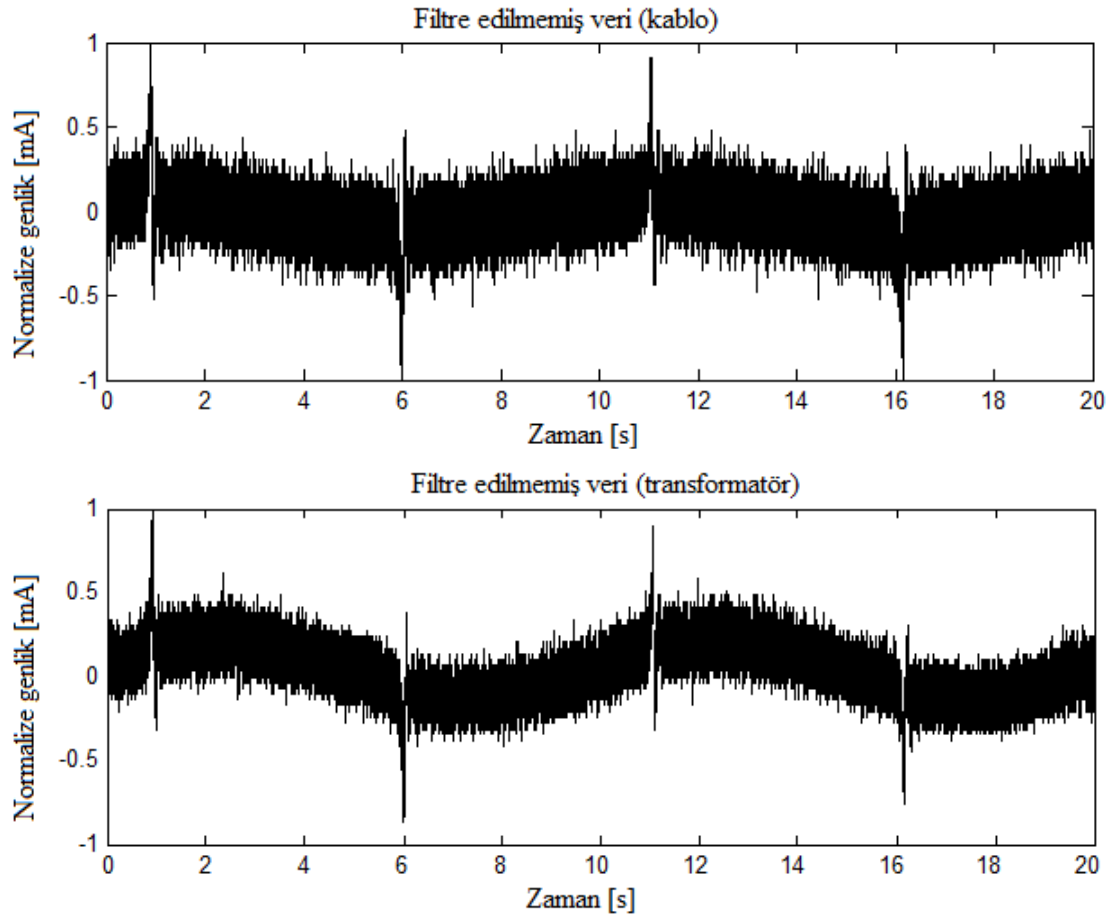


Şekil 4.13 : Filtrelenmiş kablo akımı.

4.4.1 Kayıp faktörünün hesaplanması

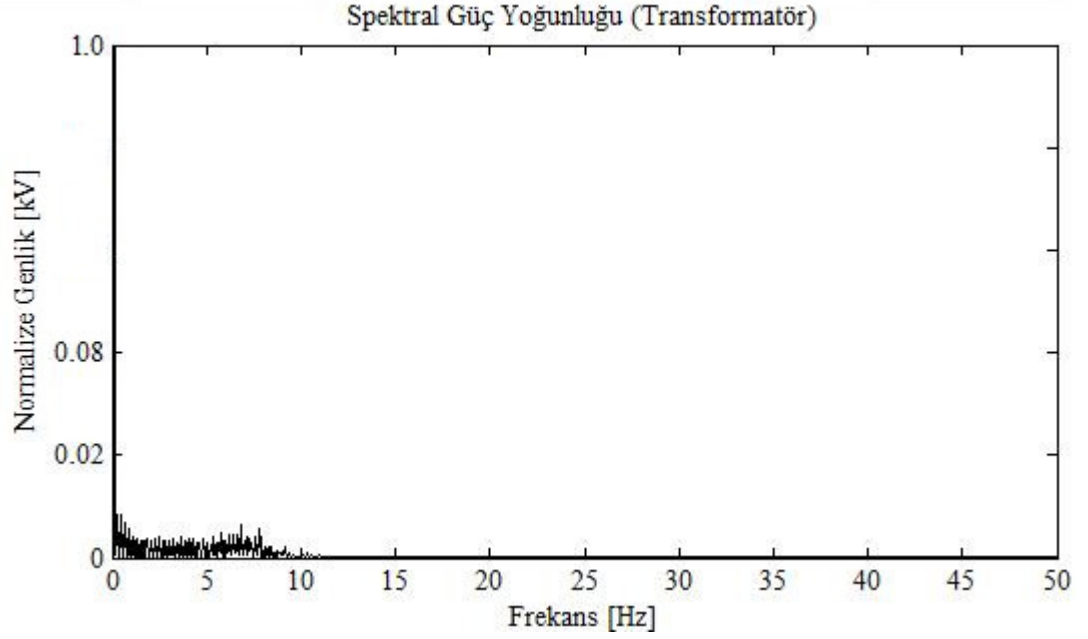
Deneyin uygulanması başlığı altında anlatılan adımlar izlenerek pankek deney transformatörünün farklı geometrik bağlantı şekillerinde ve farklı gerilim kademelerinde kayıp faktörü hesaplanmıştır.

İlk önce eş zamanlı olarak kaydedilen transformatör ve kablo (referans) verileri MATLAB programına yüklenerek genlik – zaman ekseninde çizdirilmiştir. Transformatörün CH-B bağlantısında 1 kV deney geriliminde kaydedilen filtrelenmemiş veriler Şekil 4.14’de görülmektedir. Bozucu etkiler ve ölçüm sisteminden kaynaklanan gürültüler faz farkı tespitini engellemektedir.



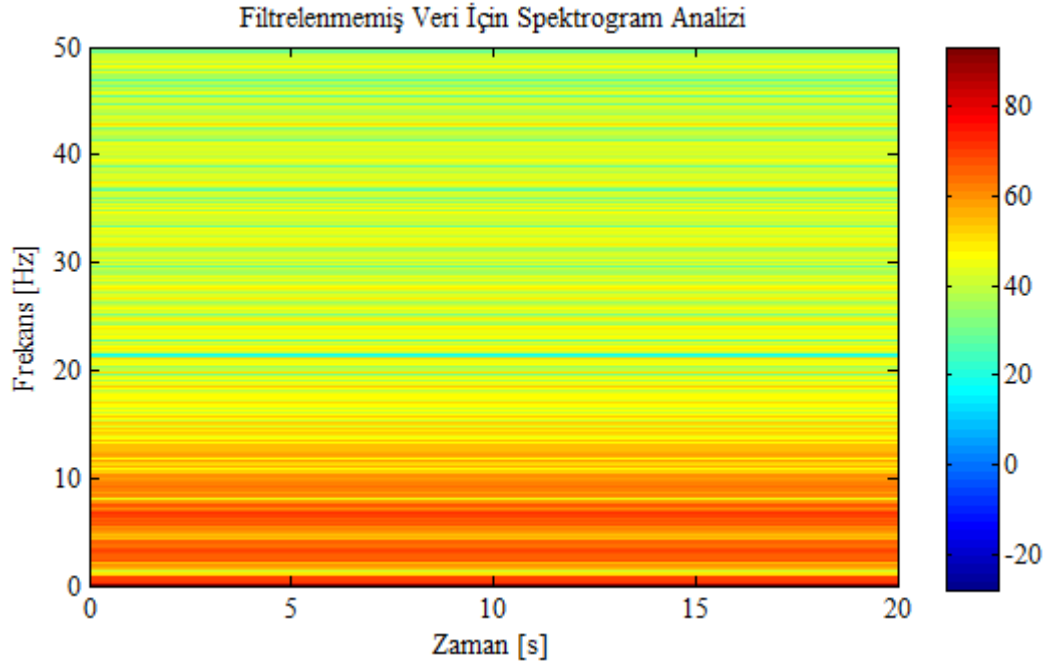
Şekil 4.14 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş kablo ve transformatör verileri.

İkinci adım olarak kaydedilen veriler filtrelenmiştir. ‘Butterworth’ tipi alçak geçiren filtre ile $n:2$ f_c : 0.175 alınarak filtreleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15’de pankek deney transformatörü CH-B bağlantısı 1 kV gerilimde filtrelenmemiş veri için spektral güç yoğunluğu verilmiştir.



Şekil 4.15 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş veri için spektral güç yoğunluğu.

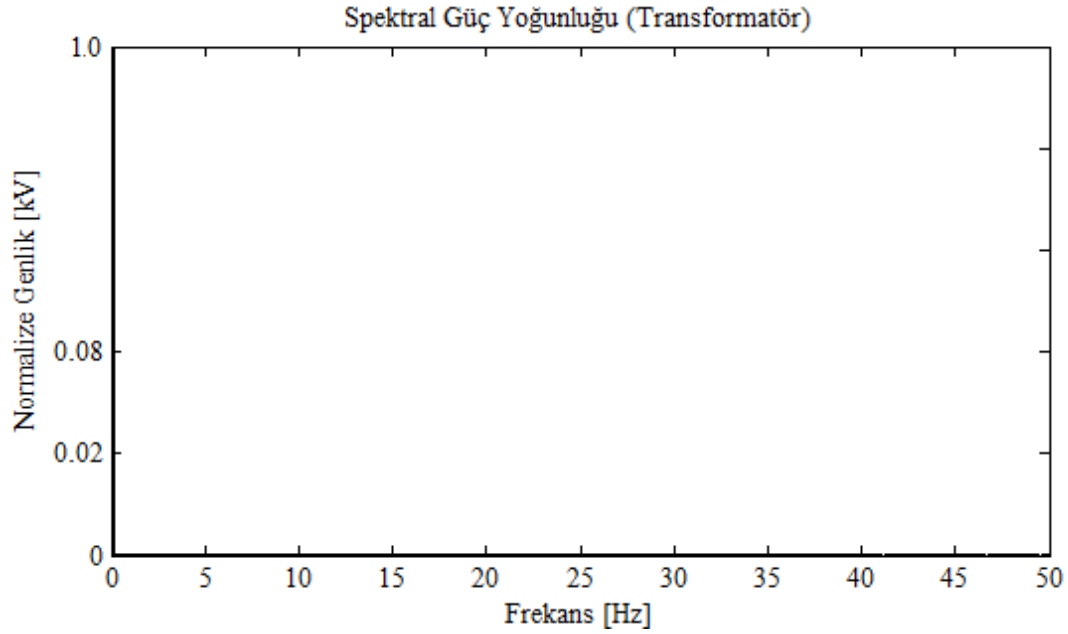
Filtrelenmemiş veri özellikle 10 Hz frekansına kadar saf işaretin %1'ine ulaşan birçok bozucu içermektedir. Bu bozucuların ölçüm süresince hangi zaman aralığında ortaya çıktığını görmek için yapılan spektrogram analizi Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 : CH-B 1 kV filtrelenmemiş veri için spektrogram analizi.

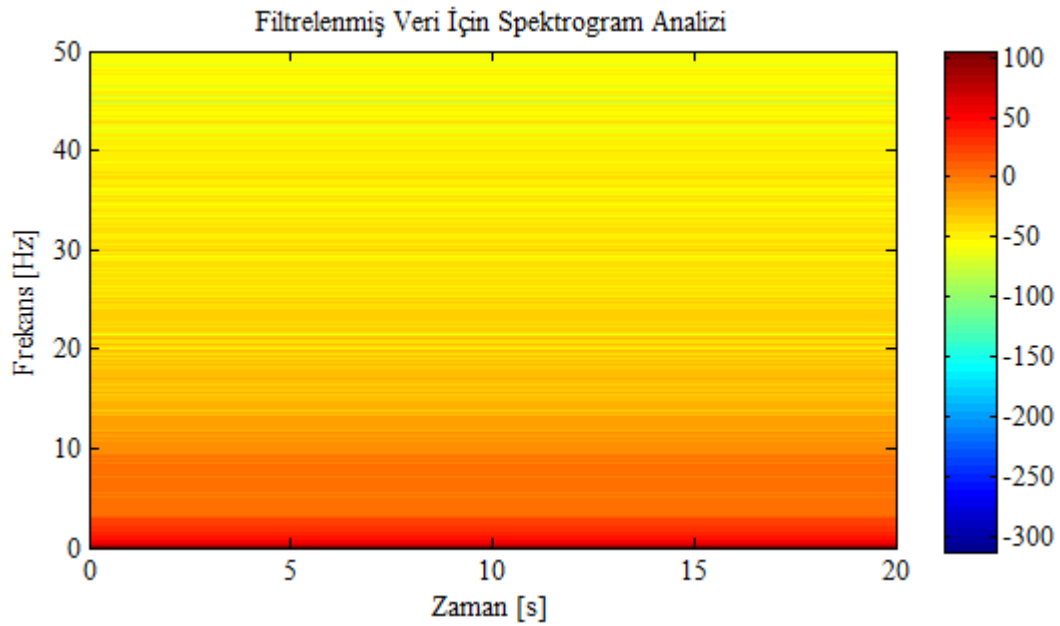
10 Hz frekansına kadar yoğun olarak görülen bozucu etkilerin 20 saniyelik veri kaydının tamamında mevcut olduğu görülmektedir. Bu sonuç bozucu etkilerin deney seti ve ölçüm hatalarından oluştuğunun bir göstergesidir.

‘Butterworth’ tipi alçak geçiren filtre ile $n:2$ $f_c: 0.175$ alınarak filtreleme işlemi gerçekleştirildikten sonra pankek deney transformatörü CH-B bağlantısı 1 kV gerilimde spektral güç yoğunluğu Şekil 4.17’de verilmiştir.



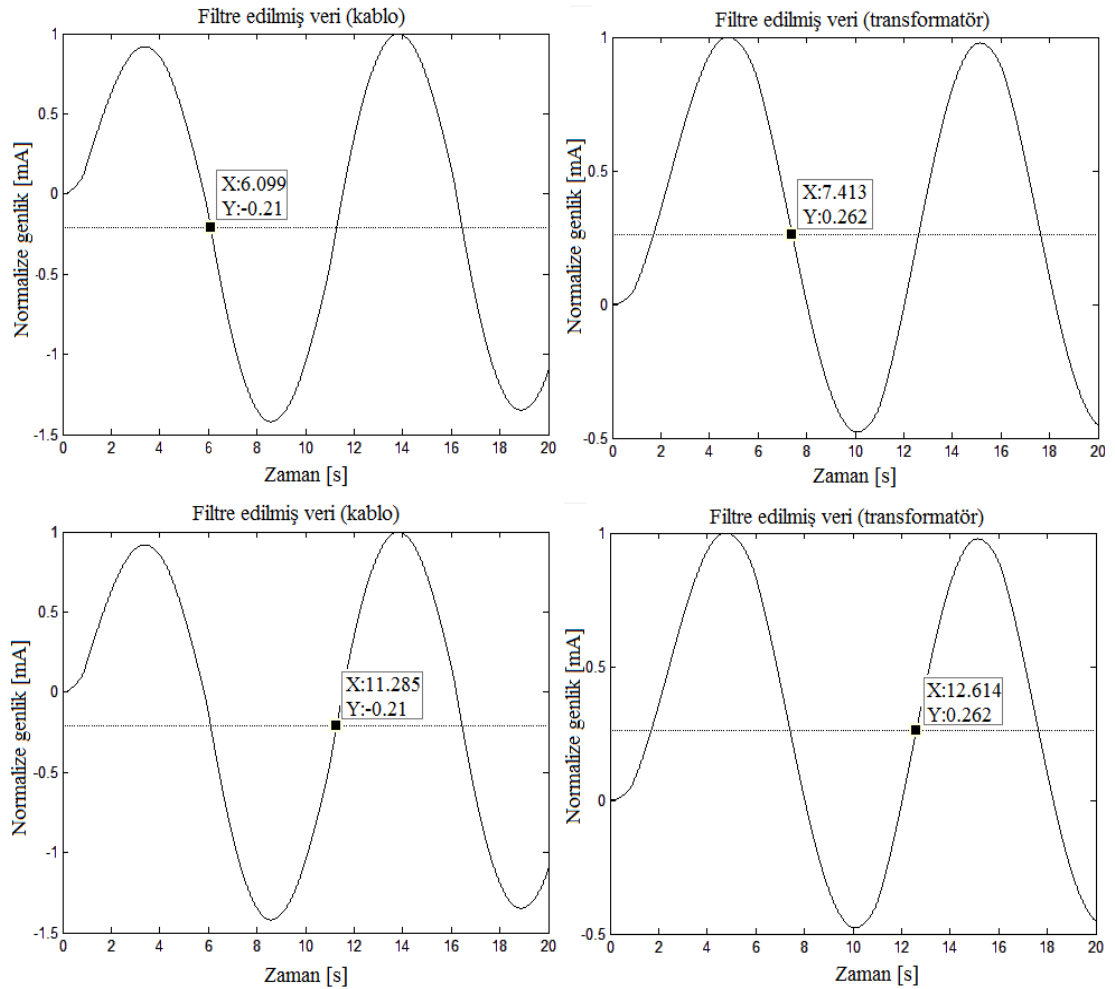
Şekil 4.17 : CH-B 1 kV filtrelenmiş veri için spektral güç yoğunluğu.

Filtreleme işlemi gerçekleştirildikten sonra pankek deney transformatörü CH-B bağlantısı 1 kV gerilimde yapılan spektrogram analizi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18 : CH-B 1 kV filtrelenmiş veri için spektrogram analizi.

Filtreleme işlemi uygulandıktan sonra spektral güç yoğunluğu ve spektrogram analizi incelendiğinde bozucu etkilerin büyük ölçüde temizlendiği görülüyor. Bozucu etkiler ancak logaritmik eksenle görülür durumdadır. Filtrelenen veriler artık faz farkı tespiti için incelenebilecek durumdadır. Faz farkının tespitinde sinüs dalgalarının eksen ile kesiştiği noktalardaki faz farkı esas alınmıştır. Hatalı hesaplamaların önüne geçmek için filtre çıkışının kararsız olabileceği ilk 5 saniyedeki eksen kesişimleri değerlendirmeye alınmamıştır. Ayrıca yine filtrelemeden oluşabilecek hataları azaltmak amacıyla her veri için iki ayrı noktadan faz farkı tespit edilerek ortalamaları kaydedilmiştir. Şekil 4.19’da transformatörün CH-B bağlantısında 1 kV deney gerilimi altında faz farkı tespitinde kullanılacak olan eksen kesişim noktaları görülmektedir.



Şekil 4.19 : CH-B 1 kV için faz farkının hesaplanması.

Ortalama zaman farkı yani faz farkı tespiti denklem (4.2)'deki gibi yapılır.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \quad (4.2)$$

Faz farkı hesaplandıktan sonra bulunan Δt değeri denklem (4.1)'de yerine konularak derece cinsinden δ kayıp açısı hesaplanır. Kayıp açısı δ 'nın tanjantı hesaplanarak kayıp faktörü $\tan \delta$ elde edilir.

Pankek deney transformatörünün değişik geometrik bağlantı şekillerinde 0,1-5 kV arasında kayıp faktörü değişimi hesaplanmıştır. 1-5 kV arası kayıp faktörleri yukarıda anlatılan yöntemle hesaplanmıştır. 0,1 kV (100 V) kayıp faktörü değerleri ise 'General Elektrik' marka 'IDA200' model tanı cihazıyla 0,1 Hz frekansında ölçülmüştür. IDA200 kapasite ve kayıp faktörünü geniş frekans aralığında (0,1 mHz-1 kHz) ölçmeye yarayan bir deney cihazıdır. Şekil 4.20'de IDA200 cihazı görülmektedir.



Şekil 4.20 : IDA200 cihazı.

Cihaz 10 V - 200 V arasında deney gerilimi verebilmektedir. Deney örneklerinden ampermetre ve voltmetre ile gerekli akım ve gerilim değerleri ölçülerek cihaz içinde sayısal işaretlere dönüştürülür. Kayıp faktörü ve kapasite ölçümü bu yol ile hesaplanır. Çalışmamızda 100 V için IDA200 ile pankek deney transformatörünün değişik geometrik bağlantı şekillerinde ölçülen kayıp faktörü değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Pankek transformatörün 100V için kayıp faktörü değerleri

Uygulanan Gerilim [RMS]	CH-B	DG-CH	E-DG	F-E
100V	1,1174	0,75915	0,40244	0,16963

Referans kablo ile pankek deney transformatörü akımlarının zaman farkından kayıp faktörü hesaplanmasında ise yukarıda açıklandığı gibi denklem (4.2) ile hesaplanan Δt değeri denklem (4.1)'de yerine konularak derece cinsinden δ kayıp açısı hesaplanır. Kayıp açısı δ 'nın tanjantı hesaplanarak kayıp faktörü ($\tan\delta$) elde edilir. Pankek deney transformatörünün değişik geometrik bağlantı şekillerinde kayıp faktörü değişimi bu yöntem ile 1-5 kV arası hesaplanmıştır.

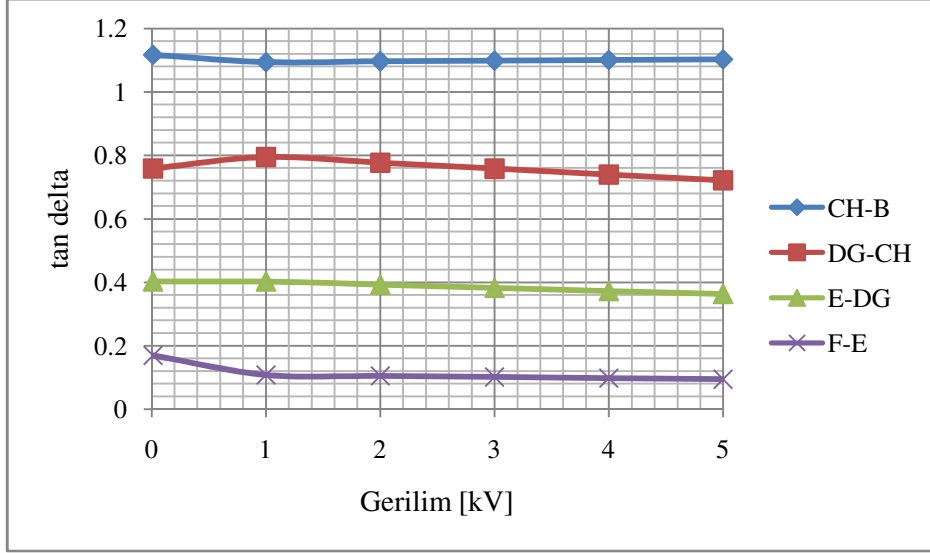
CH-B geometrik bağlantısında yağ oranının fazla olmasından dolayı kayıp faktörü değerleri diğer bağlantı şekillerine göre daha yüksek iken F-E bağlantısında kayıp faktörü değerleri diğer bağlantı şekillerine göre daha düşüktür. Bunun sebebi presbordun dielektrik sabiti ile yağın dielektrik sabitinin birbirinden farklı olmasıdır.

Referans kablo ile pankek deney transformatörü akımlarının faz farkı ile hesaplanan 1 kV - 5 kV arası kayıp faktörleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Pankek transformatörün 1-5 kV arası kayıp faktörü değerleri

Bağlantı Şekli	Gerilim[kV]	$\tan \delta$
CH-B	1	1,09414
	2	1,09640
	3	1,09865
	4	1,10090
	5	1,10316
DG-CH	1	0,79549
	2	0,77694
	3	0,75838
	4	0,73983
	5	0,72128
E-DG	1	0,40212
	2	0,39231
	3	0,38249
	4	0,37268
	5	0,36286
F-E	1	0,10849
	2	0,10500
	3	0,10151
	4	0,09802
	5	0,09453

Pankek deney transformatörünün değişik geometrik bağlantı şekillerinde 0,1-5 kV arasında Çizelge (4.2) ve Çizelge (4.3)'deki verilere göre kayıp faktörü değişimi Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.21 : Pankek transformatörün 0,1-5 kV arası kayıp faktörü değişimi.

Kayıp faktörünün gerilim ile değişimine bakıldığında 0,1 kV - 5 kV aralığında her hangi bir ilişim görülmemektedir. Bu gerilim aralığı nominal işletme geriliminin altında yer almaktadır. Ancak düşük gerilimlerde dahi yalıtım kayıplarının olduğu grafikten rahatça görülebilir. Dielektrik sabiti en büyük olan F-E bağlantısında kayıp faktörü en düşük iken, dielektrik sabiti en küçük bağlantı CH-B’de kayıp faktörü en yüksek değerleri almaktadır.

Sulu ağaçların yalıtım malzemesine verdiği zarar 0,1 kV - 5 kV aralığında gözlenebilmektedir. Yağ oranı en yüksek olan CH-B bağlantısında kayıp faktörü en yüksek seviyededir. Presbordan dielektrik sabiti yağın dielektrik sabitinden büyüktür. Çizelge 4.4’de yağ ve presbordan dielektrik sabitleri verilmiştir.

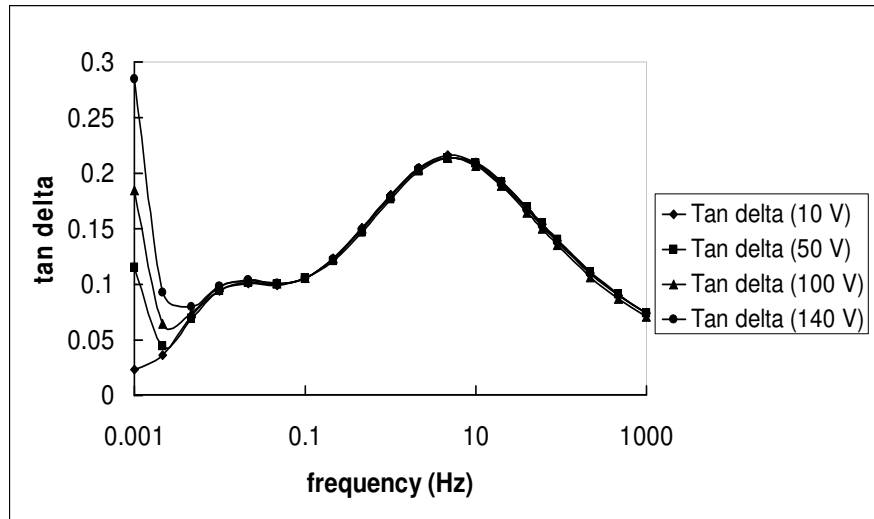
Çizelge 4.4 : Yağ ve presbordan dielektrik sabitleri

	Yağ	Presbord
Bağıl dielektrik sabiti ϵ_r	2,2-2,5	3,5

Pankek deney transformatörünün çeşitli geometrik bağlantı şekillerinde 0,1 kV-5 kV aralığında gerilim-tan δ değişimi beklenen sonuçları vermiştir. Bağıl dielektrik sabiti en küçük olan yani yağ oranı en yüksek olan durumda CH-B bağlantısında kayıp faktörü en yüksek seviyede iken bağıl dielektrik sabiti en büyük olan yani sadece presbord yalıtımlı F-E bağlantısında kayıp faktörü en düşük seviyededir. Kayıp faktörü alternatif gerilim altındaki yalıtım malzemesinin enerjiyi emerek ısı olarak

açığa çıkarma miktarını yani yalıtım kaybını belirler. Bağlı dielektrik sabiti yüksek yalıtım malzemesinde aktif kayıp gücü azdır dolayısıyla kayıp faktörü düşüktür.

Presbord gibi iyi dielektrik özelliğe sahip malzemeler tamamen kurutulursa kayıp faktörü uygulanan gerilim değiştirildiğinde sabit kalır. Ancak dielektrik malzeme nem veya iyonize bileşenler içeriyor ise kayıp faktörü uygulanan gerilim ile bağıntılı bir değişim gösterir. Ayrıca ağaç dielektrik malzemelerde yüksek frekanslarda kayıp faktörü gerilim değişimi ile sabit kalırken, düşük frekanslarda gerilim değişimi kayıp faktörünü etkiler [18]. Şekil 4.22’de presbord dielektrik malzemesinin farklı gerilimlerde frekans-kayıp faktörü değişimi verilmiştir. Daha önceki çalışmalarda elde edilen verilere göre 0,1 Hz frekansı civarında farklı gerilimlerde kayıp faktörü değişmemiştir. F-E bağlantısında presbord dielektrik malzeme deneyinde uygulanan gerilim artarken kayıp faktörü sabit kalmıştır. Şekil 4.22’deki sonuçlarla benzer sonuç vermiştir.



Şekil 4.22 : Presbord için farklı gerilimlerde frekans - $\tan\delta$ değişimi [18].

Referans kablo ile pankek deney transformatörü akımlarının zaman farkı ile hesaplanan 1 kV-5 kV arası kayıp faktörleri daha önce verilmiştir. Bu yöntem ile kayıp faktörü hesaplamada 10 kV ve üstü gerilimlerde kaydedilen verilerin yüksek miktarda gürültü içermesi ve filtreleme esnasında oluşan hatalardan dolayı sağlıklı sonuç alınamamıştır. Dolayısıyla 5 kV’tan sonra hesaplanan kayıp faktörü değerleri kullanılmayacaktır.

10 kV - 20 kV arasındaki gerilimlerde ‘Mtronix’ marka ‘MI540’ model cihaz ile ölçülen kayıp faktörü değerleri kullanılmıştır. Kayıp faktörü değerleri 10 kV - 20 kV

arasında doğrudan ölçülerek kaydedilmiştir. Şekil 4.23’de MI540 kayıp faktörü ölçme seti görülmektedir. Referans kondansatör ve pankek deney transformatöründen alınan akım ve gerilim bilgileri ile doğrudan kayıp faktörü hesaplanarak usb bağlantısı ile bilgisayara kaydedilir.



Şekil 4.23 : MI540 kayıp faktörü ölçüm seti.

Çizelge 4.5’de referans kablo ve pankek deney transformatörünün akım zaman farkından hesaplanan kayıp faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Faz farkından hesaplanan 1-20 kV arası kayıp faktörleri

Bağlantı Şekli	Gerilim [kV]	$\Delta t_{ort} = T_p - T_k$ [s]	$\tan \delta$
CH-B	1	1,322	1,09414
	5	1,328	1,10316
	10	0,324	0,20611
	15	-0,255	-0,01602
	20	0,01	0,00628
DG-CH	1	1,070	0,79549
	5	0,995	0,72128
	10	0,125	0,07870
	15	0,055	0,03457
	20	-0,094	-0,05913
E-DG	1	0,609	0,40212
	5	0,554	0,36286
	10	0,054	0,03394
	15	-0,032	-0,02011
	20	-0,038	-0,02357
F-E	1	0,172	0,10849
	5	0,15	0,09453
	10	-0,02	-0,01225
	15	-0,176	-0,11104
	20	-0,181	-0,11422

10 kV - 20 kV arasındaki gerilimlerde ‘Mtronix’ marka ‘MI540’ model cihazı ile doğrudan ölçülen kayıp faktörü değerleri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : MI540 ile ölçülen kayıp faktörü değerleri[11]

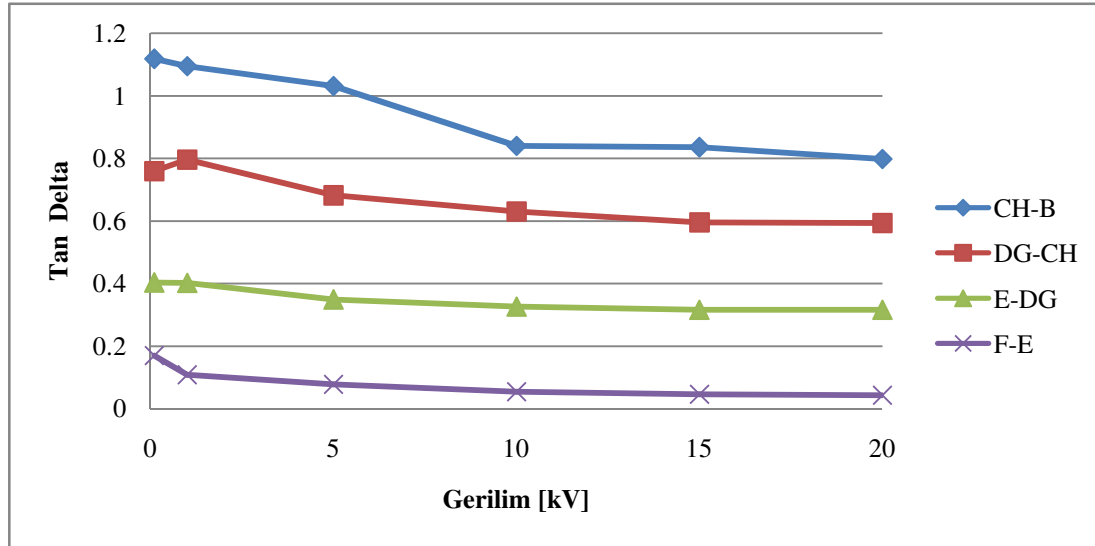
	Gerilim [KV]	CH-B	DG-CH	E-DG	F-E
tan δ	5	0,9593	0,6424	0,3334	0,06126
	10	0,8399	0,6297	0,3264	0,05426
	15	0,8352	0,595	0,3162	0,0462
	20	0,7977	0,5929	0,3161	0,04259

Çizelge 4.2, 4.5 ve 4.6’daki kayıp faktörü verileri birleştirilerek gerçek kayıp faktörü değerleri bulunmuştur. Çizelge 4.7’de 0,1 kV-20 kV arasında kayıp faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Pankek transformatör 0,1-20 kV arası kayıp faktörleri

			Kayıp Faktörü			
Bağlantı Şekli	Gerilim [kV]	$\Delta t_{ort} = T_p - T_k$ [s]	Faz Farkından	MI540	IDA200	Sonuç
CH-B	0,1	1,322	1,09414	0,9593	1,1174	1,1174
	1					1,09414
	5					1,03123
	10					0,8399
	15					0,8352
	20					0,7977
DG-CH	0,1	1,070	0,79549	0,6424	0,75915	0,75915
	1					0,79549
	5					0,68184
	10					0,6297
	15					0,595
	20					0,5929
E-DG	0,1	0,609	0,40212	0,3334	0,40244	0,40244
	1					0,40212
	5					0,34813
	10					0,3264
	15					0,3162
	20					0,3161
F-E	0,1	0,172	0,10849	0,06121	0,16963	0,16963
	1					0,10849
	5					0,07787
	10					0,05426
	15					0,0462
	20					0,04259

Çizelgede görüldüğü gibi yağ ve presbordan birlikte olduğu durumlarda 0,1 kV – 20 kV aralığında kayıp faktörü yaklaşık olarak % 25 oranında düşmüştür. Sadece presbord yalıtkanlı durumda ise kayıp faktöründeki düşüş çok daha fazladır. Daha önce yapılan çalışmalarda transformatör ve kablo kayıp faktörü deneylerinde nominal işletme geriliminin üzerindeki değerlerde gerilim artışı ile yalıtım kayıpları yani kayıp faktörü artmaktadır. Bizim çalışmamızda alınan ölçümler pankek deney transformatörünün nominal işletme geriliminin altındadır. Bu aralıkta kayıp faktörünün neredeyse sabit kalması beklenir. Kayıp faktöründeki düşüşün deney transformatörünün geometrik yapısından ve yalıtım malzemesindeki kimyasal olaylardan meydana geldiği tahmin ediliyor. Pankek deney transformatörünün değişik geometrik bağlantı şekillerinde 0,1 - 20 kV arasında kayıp faktörü değişimi Şekil 4.24’de görülmektedir.



Şekil 4.24 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası kayıp faktörü değişimi

Sonuçlar incelendiğinde presbord/yağ oranına göre kayıp faktörü değerleri değişmiştir. CH-B bağlantısında 17/83 oranı, DG-CH bağlantısında 28/72 oranı, E-DG bağlantısında 50/50 oranı ve F-E bağlantısında 100/0 oranı bulunmaktadır. Daha önce F-E bağlantısındaki kayıp faktörü düşüşünün diğer bağlantılardaki düşüşe göre oransal olarak daha fazla olduğundan bahsedilmişti. Bunun sebebi F-E bağlantısında yalıtım malzemesi olarak sadece presbordan bulunmasıdır. F-E bağlantı durumu yani sadece presbord yalıtkanlı durum referans alınarak CH-B, DG-CH ve E-DG bağlantılarındaki bağıl kayıp faktörü değişimi elde edilebilir. Bu

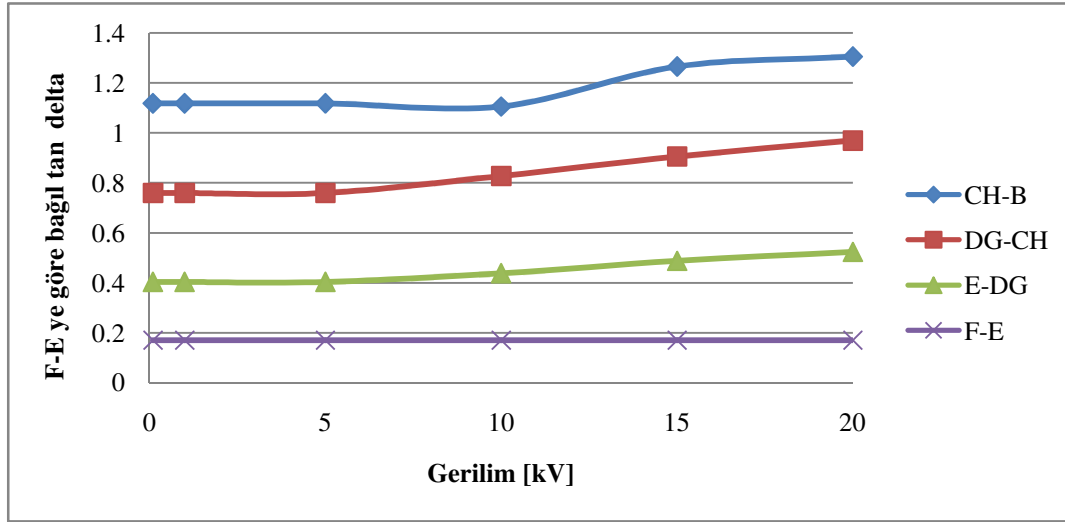
yöntem ile pankek deney transformatöründe kullanılan yalıtım yağının dielektrik durumu hakkında bilgi sahibi olacağız.

Bu amaçla F-E bağlantısında kayıp faktörünü her ölçüm noktasında sabit ilk ölçüm değerinde tutacak katsayıları elde etmemizi sağlayan bir çarpan fonksiyonu elde edildi. Tüm bağlantı şekillerindeki her ölçüm değeri aynı fonksiyonla işlem görerek bağıl kayıp faktörü değişimi elde edildi. F-E bağlantısının referans olarak seçilmesinin sebebi daha önce de söz edildiği gibi presbord gibi iyi dielektrik özelliğe sahip malzemeler tamamen kurutulursa kayıp faktörünün uygulanan gerilim değiştirildiğinde sabit kalmasıdır. Ancak dielektrik malzeme nem veya iyonize bileşenler içeriyor ise kayıp faktörü uygulanan gerilim ile bağıntılı bir değişim gösterir. Pankek deney transformatöründe kullanılan presbordun tamamen kuru olduğu ve iyonize bileşen içermediği kabul edilerek F-E bağlantısı referans olarak alınmıştır. Çizelge 4.8’de pankek transformatörün 0,1 kV-20 kV arasında bağıl kayıp faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.8 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası bağıl kayıp faktörleri

Bağlantı Şekli	Gerilim[kV]	tan δ
CH-B	0,1	1,11740
	1	1,11740
	5	1,11740
	10	1,10558
	15	1,26465
	20	1,30455
DG-CH	0,1	0,75915
	1	0,75915
	5	0,75915
	10	0,82711
	15	0,90506
	20	0,96886
E-DG	0,1	0,40244
	1	0,40244
	5	0,40244
	10	0,43725
	15	0,48797
	20	0,52334
F-E	0,1	0,16963
	.	.
	.	.
	20	0,16963

Tüm bağlantılar için 0,1 - 20 kV arasındaki kayıp faktörü artışı yağda meydana gelen dielektrik kayıpları temsil etmektedir. Kayıp faktörünün artış karakteristiği yalıtım yağının durumu hakkında bilgi vermektedir. Tüm kademelerde ortak yağ kullanıldığından kayıp faktörü artış oranı tüm kademelerde yaklaşık olarak aynıdır. Şekil 4.25’de pankek deney transformatörünün çeşitli bağlantılarında bağlı gerilim- $\tan\delta$ değişimi verilmiştir.

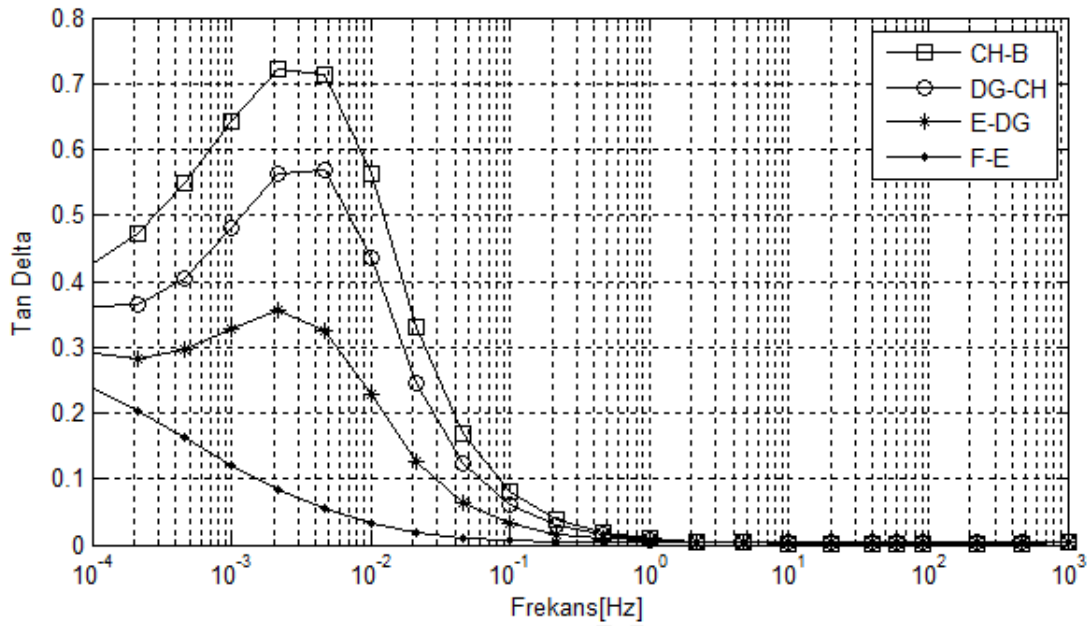


Şekil 4.25 : Pankek transformatörün 0,1-20 kV arası bağlı kayıp faktörü değişimi.

F-E bağlantısı referans alınarak elde edilen bağlı kayıp faktörü değişimi incelendiğinde 5 kV’dan sonra belirgin bir artış gözlenmiştir bu artışın büyüklüğü yalıtım kalitesini belirleyen unsurdur. Kayıp faktörü deneyi en iyi sonucu nominal gerilimin 0,5 - 2 katı gerilim aralığında vermektedir ancak nominal gerilim değerine kadar olan deney de yalıtım kalitesi hakkında önemli bilgiler verir. Çalışmamızda elde edilen sonuca göre pankek deney transformatöründe kullanılan yalıtım yağı için acil bir müdahaleye gerek yoktur, bir miktar nem içermektedir ancak aynı deney $2U_0$ gerilim değerine kadar yapılarak ve yeni yağ deneyi sonuçlarıyla karşılaştırıldığında daha kesin yargıya varılabilir. XLPE yalıtkanlı kablolar gibi standart donanımlar için kayıp faktörü değişim ölçütleri çeşitli standartlarda U_0 ve $2U_0$ gibi gerilim değerleri için verilmiştir. Bu çalışmada en doğru değerlendirme U_0 ve $2U_0$ aralığındaki kayıp faktörü artışının izlenmesi ile yapılabilir.

4.4.2 Frekans – kayıp faktörü değişimi

Pankek deney transformatöründe farklı frekanslarda sabit gerilim altında kayıp faktörü değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile kayıp faktörü deneyinin uygulanmasında hangi frekans aralığının uygun olduğu belirlenmiştir. 0,1 Hz ve daha düşük frekanslardaki bölgede kayıp faktörü en büyük değerini alır. Düşük frekanslarda kayıp faktörü hassas değişim göstermektedir. Kayıp faktörü deneyinin değişimin en hassas olduğu bölgede yapılması en sağlıklı sonuçları verecektir. 0,1 Hz üzerindeki frekanslarda kayıp faktörü çok düşük değerler almaktadır. Bu frekanslar işletme için uygunken 0,1 Hz ve altındaki frekanslar kayıp faktörü deneyi için daha elverişlidir. Ayrıca frekans – kayıp faktörü değişim karakteristiği yağ iletkenliği ve nemi hakkında bilgi vermektedir. Şekil 4.26’da pankek deney transformatörü için frekans - kayıp faktörü değişimi verilmiştir.



Şekil 4.26 : Pankek transformatör için frekans - kayıp faktörü değişimi.

F-E bağlantısında frekans azaldıkça kayıp faktörü neredeyse doğrusal bir artış göstermiştir ancak CH-B, DG-CH ve E-DG bağlantılarında kayıp faktörü yaklaşık olarak 10^{-3} Hz frekansına kadar hızlı artış gösterirken bu frekanstan daha düşük frekans bölgesinde kayıp faktörü ani düşüş gösterir. Bunun sebebi yağın içerdiği nemdir[10]. Bir önceki bölümde kayıp faktörü değişimi sonuçlarına göre pankek deney transformatörünün yalıtım yağının nem içerdiği ancak acil bir müdahale gerektirmediği tespit edilmişti. Frekans - kayıp faktörü değişimi de aynı tespiti

desteklemektedir. Yalıtım yağı nem içerirken F-E bağlantısında presbordun nem veya iyonize bileşen içermediği tespit edilmiştir. Şekil 3.2 hatırlanacak olursa kayıp faktörünün tepe değeri düşük frekans bölgesinde ise yağın dielektrik özelliği iyidir, eğer kayıp faktörünün tepe değeri daha yüksek frekanslı bölgede ise yağın iletkenliği fazladır dolayısıyla müdahale gereklidir. 10^3 Hz'den yüksek frekanslı bölgelerde nem etkisi farklı bir kayıp faktörü tepesi oluşturur ancak 10^{-3} - 10^0 Hz aralığındakine göre epey küçük kayıp faktörü tepe değeri alır. Bu çalışmada 10^{-3} - 10^0 Hz aralığındaki kayıp faktörü tepesi 10^{-3} Hz frekansına daha yakındır dolayısıyla yağın içerdiği nem endişe verici düzeyde değildir. Ancak yağ iletkenliği sıcaklık ile doğru orantılı değişen bir büyüklük olduğundan deney esnasındaki yağ sıcaklığı dikkate alınmalıdır.

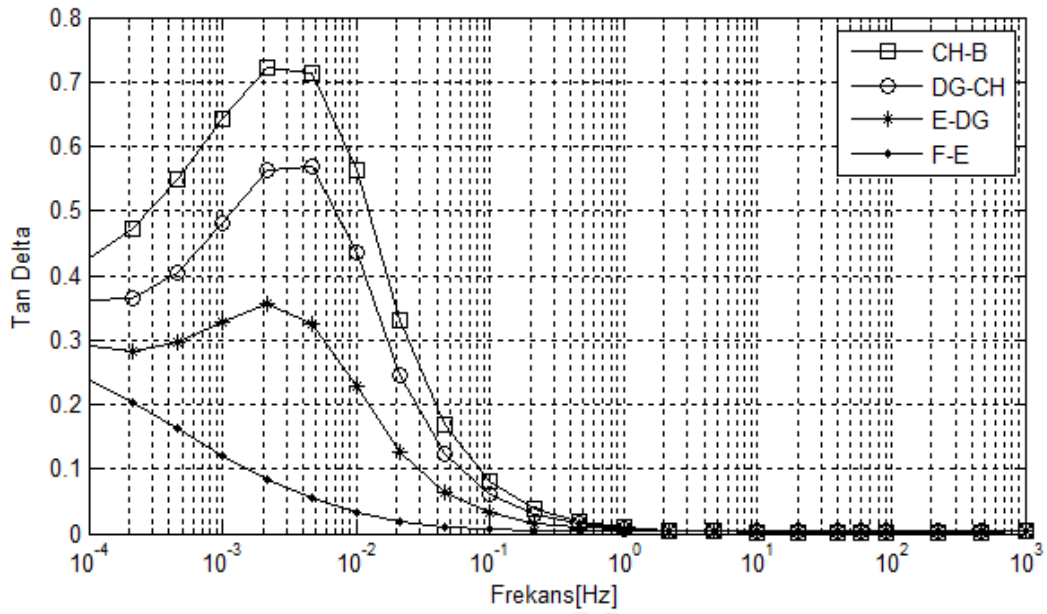
Pankek deney transformatörü ile yapılan ölçümlere göre yalıtım yağı ve presbord için 10^{-4} - 10^3 Hz aralığında frekans - kayıp faktörü değişim verileri özetlenecek olursa,

- Kayıp faktörünün en büyük değer aldığı bölge 10^{-4} - 10^0 Hz aralığıdır.
- Kayıp faktörü - frekans eğrisinde kayıp faktörünün 10^{-4} - 10^0 Hz aralığındaki tepe noktası yalıtım yağının içerdiği nem hakkında bilgi verir.
- Kayıp faktörü - frekans eğrisinde kayıp faktörünün 10^{-4} - 10^0 Hz aralığındaki tepe noktası frekansı yalıtım yağının iletkenliği hakkında bilgi verir.

Görüldüğü gibi çok düşük frekanslarda elde edilen kayıp faktörü - frekans değişimi sonuçları malzemenin dielektrik durumu hakkında önemli bilgiler verir.

4.4.3 Sıcaklığa bağlı frekans - kayıp faktörü değişimi

Yalıtım yağındaki nem ve iyonize parçacıkların yağ iletkenliğine dolayısıyla kayıp faktörü değişimine olan etkisi tespit edildi ancak kayıp faktörü değişiminde sıcaklık da önemli bir etkidir. Sıcaklığın kayıp faktörüne olan etkisini tespit etmek amacıyla pankek deney transformatörü frekans - kayıp faktörü değişim deneyi farklı sıcaklıklarda tekrarlanmıştır. Şekil 4.27'de pankek deney transformatörü için çeşitli bağlantılarda 21°C 'de frekans-kayıp faktörü değişimi verilmiştir.

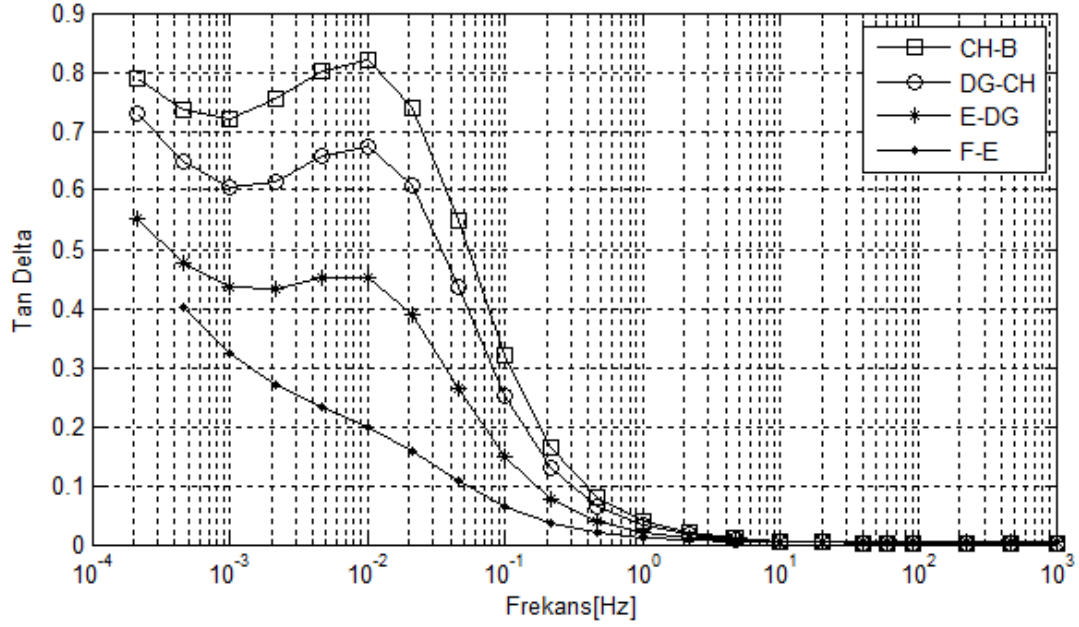


Şekil 4.27 : 21°C'de frekans - kayıp faktörü değişimi

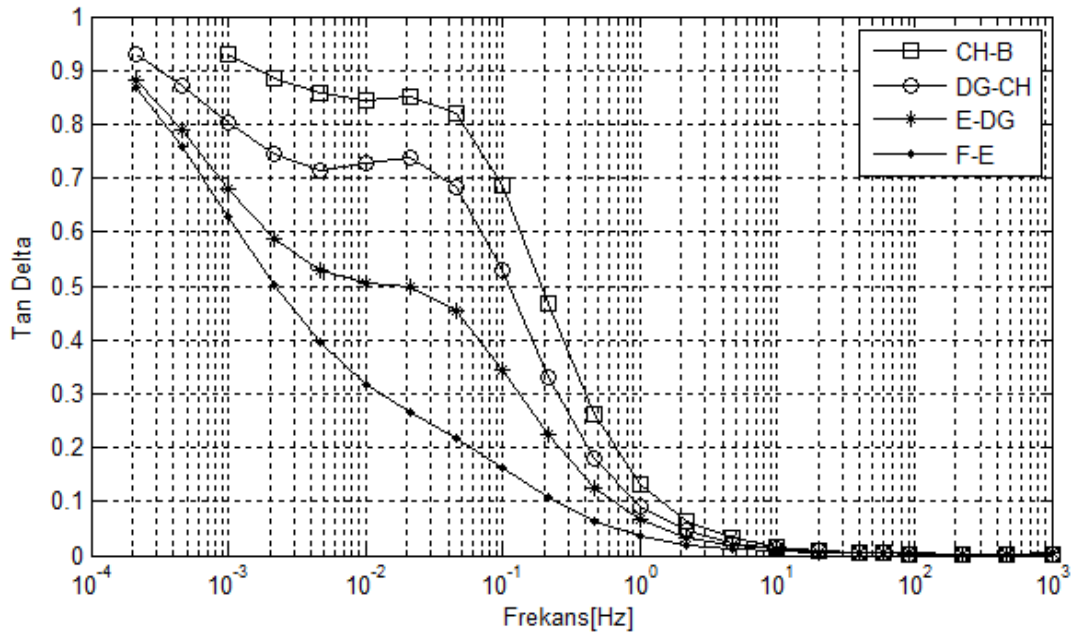
21°C için frekans - kayıp faktörü değişimi yukarıdaki eğriyi oluşturdu. Kayıp faktörü tepe değerleri CH-B, DG-CH ve E-DG bağlantılarında sırasıyla büyükten küçüğe doğru değer almıştır. Her üç bağlantıda da kayıp faktörünün en yüksek değer aldığı tepe değerinin frekansı aynıdır. Kayıp faktörü tepe değerinin frekansı yalıtım yağının iletkenlik seviyesi ile değişir[10]. Pankek deney transformatöründe tüm bağlantılar için ortak yağ kullanıldığından tüm bağlantı şekillerinde yağ iletkenliği de aynıdır dolayısıyla aynı sıcaklıkta farklı bağlantı şekillerinde de olsa kayıp faktörü tepe değerinin frekansı aynıdır. F-E bağlantısında sadece presbord yalıtkan kullanıldığından bu bağlantı farklı bir karakteristik eğriye sahiptir.

55°C ve 80°C'de sıcaklık artışı tüm bağlantı şekillerinde kayıp faktörünü artırmıştır. Şekil 4.28 ve 4.29 dikkatli incelendiğinde 10^{-3} - 10^0 Hz aralığındaki kayıp faktörü tepe değerleri hem artış göstermiştir hem de 10^0 Hz frekansına doğru yaklaşmıştır. Sıcaklık değişimi yağın iletkenliğini dolayısıyla kayıp faktörünü artırmıştır. Dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta ise F-E bağlantısında yalnızca presbord yalıtkanlı durumda sıcaklık artışı kayıp faktöründe büyük artışa neden olmuştur.

55°C ve 80°C'de frekans – kayıp faktörü değişimi sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.28 : 55°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi.



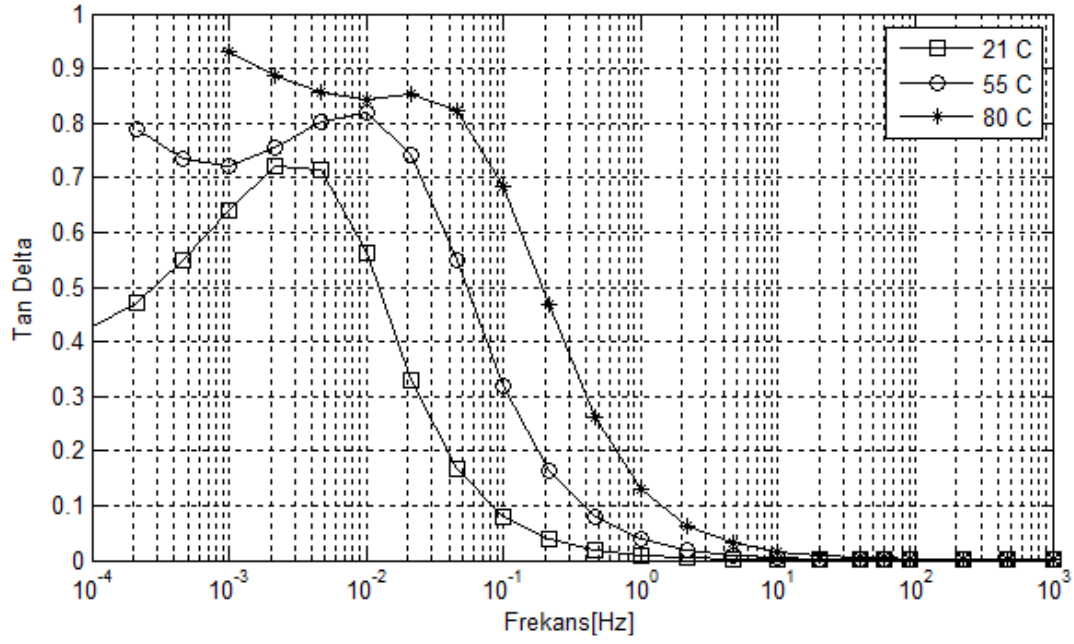
Şekil 4.29 : 80°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi.

Sıcaklık artışı tüm bağlantı şekillerinde kayıp faktörü artışına neden olmuştur. Sıcaklığın kayıp faktörüne etkisi F-E bağlantısında daha fazla olmuştur. 21°C’de F-E bağlantısındaki kayıp faktörü CH-B bağlantısındaki kayıp faktörü değerinden bir hayli küçükken 80°C’de neredeyse aynı değere yaklaşmıştır.

Kayıp faktörünün artması dielektrik kayıpların artışı ile olur. Dielektrik kayıplar genel olarak dört çeşit kayıptan oluşur. Bu kayıplar iletim kaybı, histerezis kaybı, kutuplanma kaybı ve iyonlaşma kaybı olarak sıralanabilir. İletim kaybı kaçak akımların, iyon ve elektron iletiminin yol açtığı kayıplardır. Yalıtkan malzemenin direncinden ve üzerinden geçen akımlardan oluşur. Histerezis kaybı, birbirine komşu birden fazla dielektrik malzemenin, elektrik alanı altında kaldıklarında, ara kesit yüzeylerinde yük dengesi kurulana kadar gerçekleşen yük hareketlerinden ortaya çıkan kayıplardır. Bu kayıplar, dielektrik malzemelerin elektriksel iletkenliklerine ve dielektrik sabitlerine bağlıdır. Kutuplanma kaybı dipol moleküler yapıli dielektriklerde, dipol moleküllerin kutuplarının uygulanan alanın zıt kutbuna doğru yönelme veya kayma hareketlerinden (polarizasyon akımlarından) meydana gelen kayıplardır. İyonlaşma kaybı ise bir yalıtkan ortamda kısmi boşalmaların yol açtığı kayıptır. Yalıtkanlardaki gazların, hava boşluğu gibi boşlukların iyonizasyonu ve yalıtındaki yabancı maddeler nedeniyle oluşan kayıplardır [19].

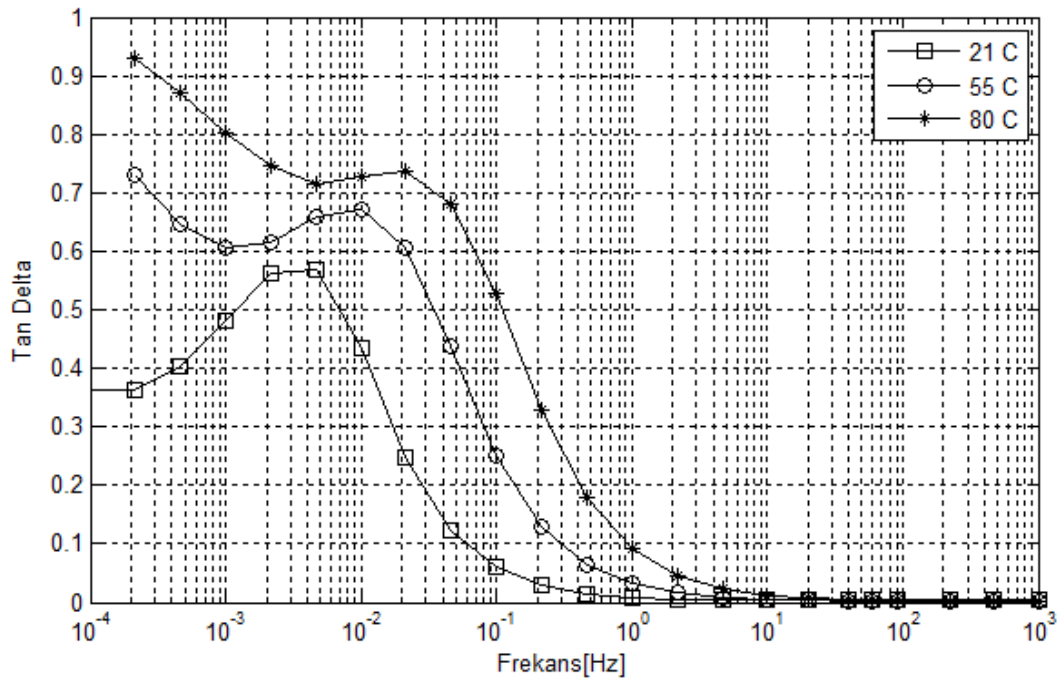
Sıcaklığın değiştirilmesi ile gerek yalıtkan malzemenin kimyasal özellikleri gerekse yalıtkan malzemenin içine karışan nem ve yabancı maddelerin etkisi ile dielektrik kayıplar artmıştır. Transformator yalıtım yağlarının katalog bilgilerine göre genellikle sıcaklık artışı ile yalıtım yağının bağıl dielektrik sabiti düşmektedir. Dielektrik sabitinin düşmesi dielektrik kayıpların artması yani kayıp faktörünün artması anlamına gelir. Ayrıca yalıtım yağının içerisindeki transformator yağ kazanındaki parçaların kimyasal ayrışma ile yağa karışması ve yağın ısı değişimi ile kimyasal olarak bozulmasından kaynaklanan çamurlaşma kayıp faktörünün artmasına neden olacağı gibi yağın dielektrik dayanımını da azaltır. Tüm bu etkilerin yanında yalıtım yağının içindeki nem ve boşluklar içinde oluşan kısmi boşalmalar sıcaklık artışıyla elektronların enerji kazanmasından dolayı daha şiddetli olmakta dolayısıyla kayıp faktörünü artırmaktadır.

Transformatorün çeşitli bağlantı şekillerinde sıcaklık kayıp faktörü değişimi ayrı ayrı incelendiğinde sıcaklık artışıyla kayıp faktöründeki artış daha iyi görülmektedir. Şekil 4.30'da CH-B bağlantısı için 21°C, 55°C ve 80°C'de frekans - kayıp faktörü değişimi verilmiştir.



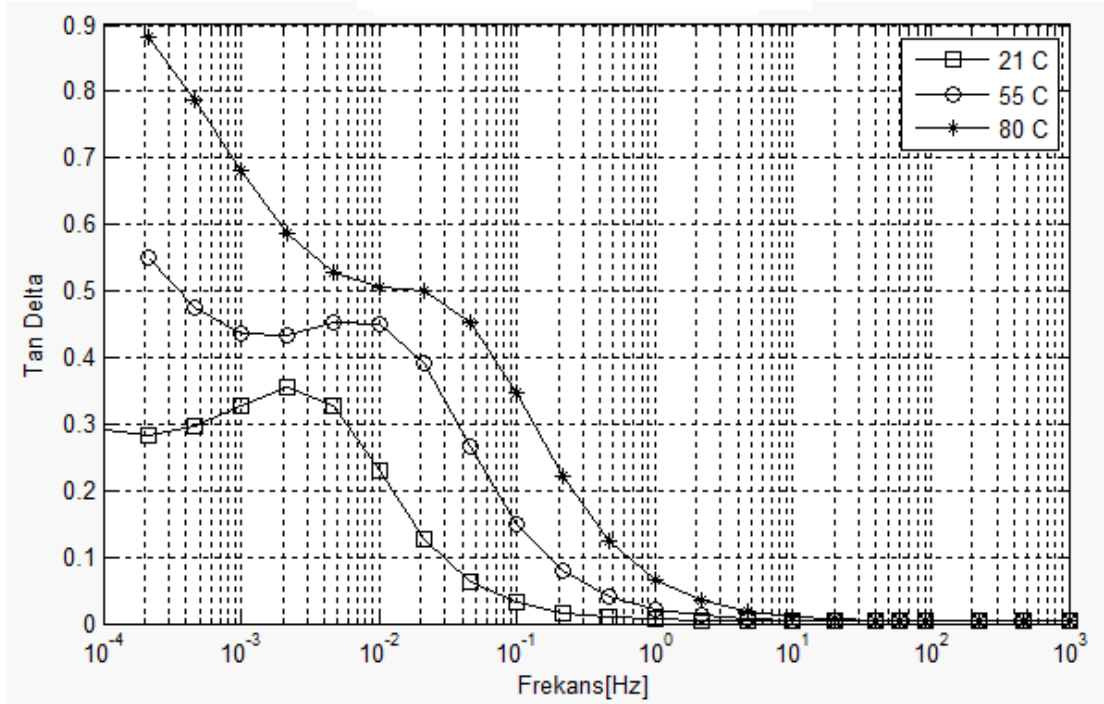
Şekil 4.30 : CH-B bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi

Şekil 4.31’de DG-CH bağlantısı için 21°C, 55°C ve 80°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi verilmiştir.



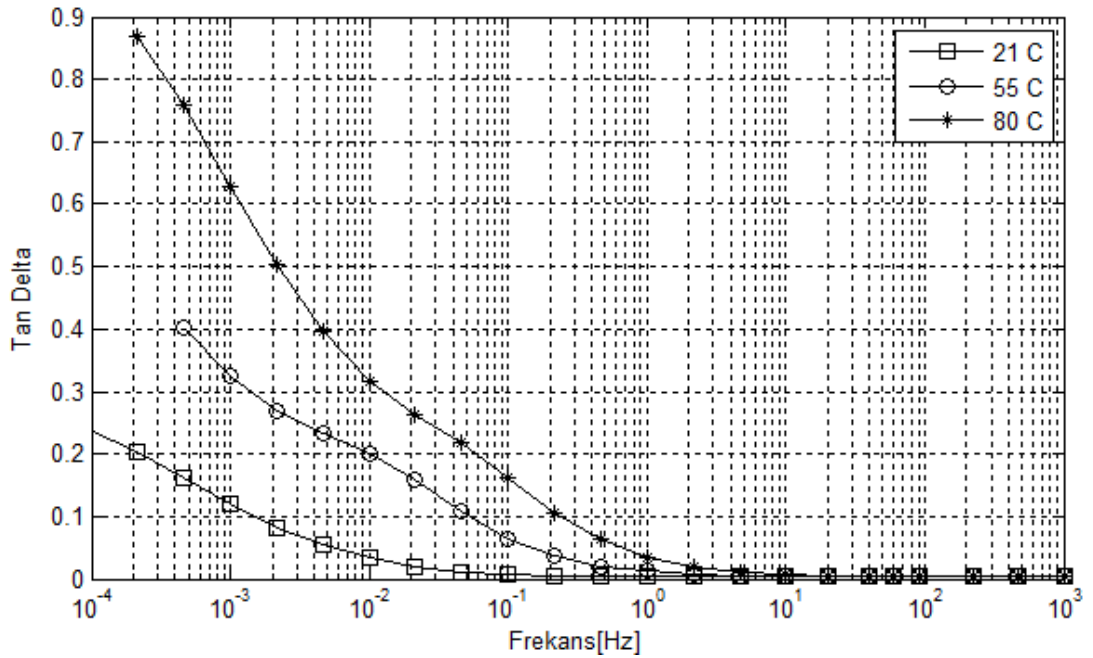
Şekil 4.31 : DG-CH bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi

Şekil 4.32’de E-DG bağlantısı için 21°C, 55°C ve 80°C’de frekans - kayıp faktörü değişimi verilmiştir.



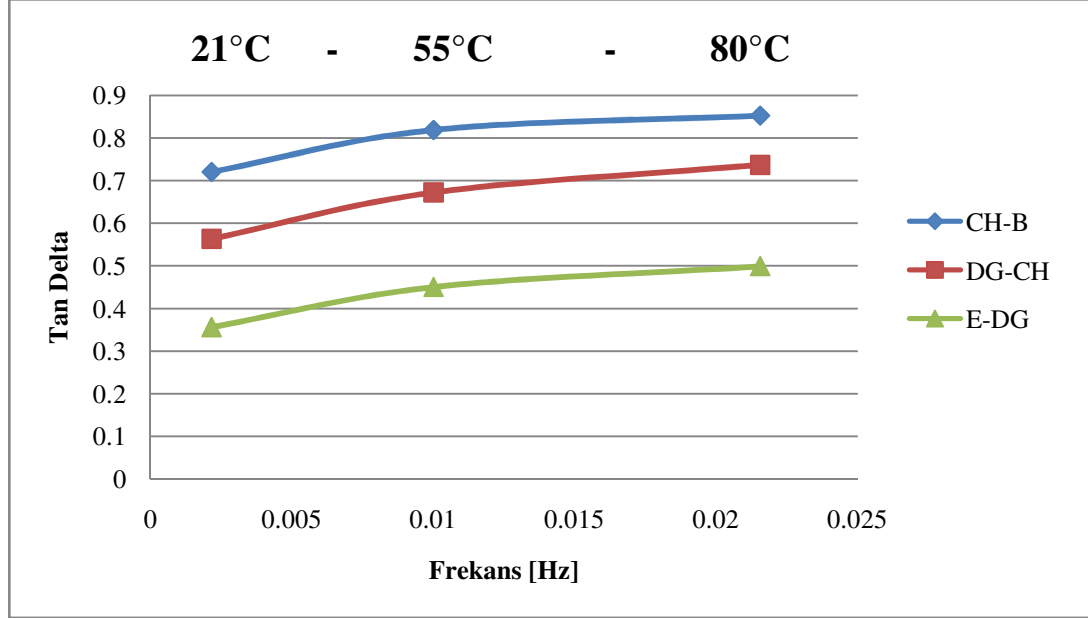
Şekil 4.32 : E-DG bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi

Şekil 4.33'de F-E bağlantısı için 21°C, 55°C ve 80°C'de frekans - kayıp faktörü değişimi verilmiştir.



Şekil 4.33 : F-E bağlantısında frekans - kayıp faktörü değişimi.

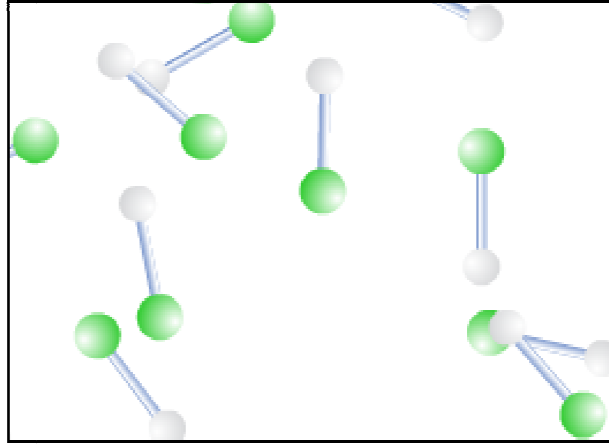
Daha önceki çalışmalarda kayıp faktörünün en yüksek değer aldığı tepe değerinin frekansının yalıtım malzemesinin iletkenliğine dolayısıyla dielektrik sabitine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir [10]. Şekil 4.30 dikkatlice incelendiğinde CH-B, DG-CH ve E-DG bağlantılarında sıcaklık artışı ile kayıp faktörünün aldığı tepe değerinin ve bu değer bulundugu frekansın arttığı görülmektedir.



Şekil 4.34 : Sıcaklığa bağlı kayıp faktörü tepe değeri- frekans değişimi.

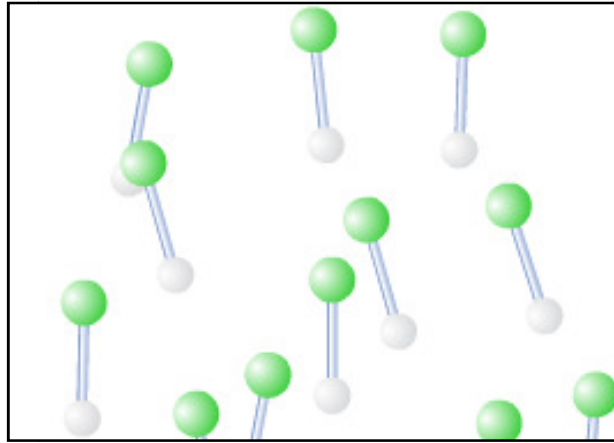
Tüm bağlantı şekillerinde sıcaklık artışı kayıp faktörünün en yüksek değer aldığı tepe değerinin büyüklüğünü ve bu noktanın frekansını artırmıştır. Çalışmamızda elde edilen veriler daha önceki çalışmalarda yapılan tespitleri desteklemekte, sıcaklık artışının yalıtım malzemesinin dielektrik kayıplarının artmasına neden olarak kayıp faktörünü artırdığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Kayıp faktörünün sıcaklıkla artışı anlamak için söz konusu dielektrik malzemenin moleküler yapısını incelemek gerekir. Herhangi bir gerilim uygulanmamış yani herhangi bir elektrik alana maruz kalmamış olan kutuplu dielektrik malzemenin moleküllerinde bir miktar enerjilenme vardır ve bu enerjinin etkisi ile moleküller rastgele olarak hareket ederler yani rastgele kutuplanırlar. Moleküllerin enerjileri kutuplanma yönleri ile birlikte toplandığında pozitif yöndeki enerji ile negatif yöndeki enerji birbirini nötrler. Şekil 4.35’de kutuplu yapıya sahip dielektrik malzemenin herhangi bir elektrik alana maruz kalmadığı yani kutuplanmadığı durum için molekül yapısı verilmiştir.



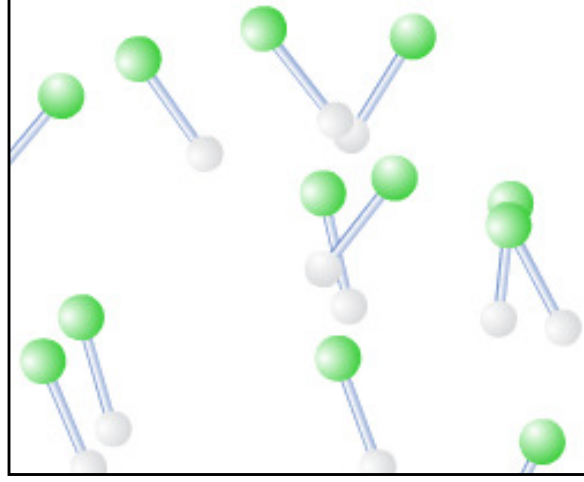
Şekil 4.35 : Kutuplu dielektrik malzemenin molekül yapısı.

Dielektrik malzemenin iki ucuna bir potansiyel fark uygulandığında elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile rastgele kutuplanmış olan moleküller düzgün bir şekilde kutuplanır. Moleküllerin enerjileri kutuplanma yönleri ile birlikte toplandığında dielektrik malzemenin kutuplanarak enerji kazandığı görülür. Şekil 4.36’da kutuplu yapıya sahip dielektrik malzemenin elektrik alan altında kutuplanmış molekül yapısı verilmiştir.



Şekil 4.36 : Kutuplu dielektrik malzemenin kutuplanmış molekül yapısı.

Sıcaklık artırıldığında moleküllerdeki enerji kazanma miktarı artarak moleküllerin hareketlerinde değişim gözlenir. Elektrostatik kuvvetlerin etkisi ile düzgün bir şekilde kutuplanmış olan moleküller sıcaklık etkisi ile hareketlenerek farklı yönlerde kutuplanma eğilimi gösterir. Şekil 4.37’de kutuplu yapıya sahip dielektrik malzemenin elektrik alan altında sıcaklığın artırılması ile molekül yapısındaki değişim verilmiştir.



Şekil 4.37 : Kutuplanmış bir dielektrik malzemenin sıcaklık artışı ile molekül yapısı.

Dielektrik sabiti malzemenin polarize hareket edebilme yeteneği olarak açıklanır. Sıcaklığın artmasıyla enerji kazanan moleküller rastgele hareketlenme eğiliminde bulunarak malzemenin polarize hareket edebilme yeteneğini azaltır, dolayısıyla dielektrik sabitinde azalma meydana gelir [20]. Kayıp faktörü artar.

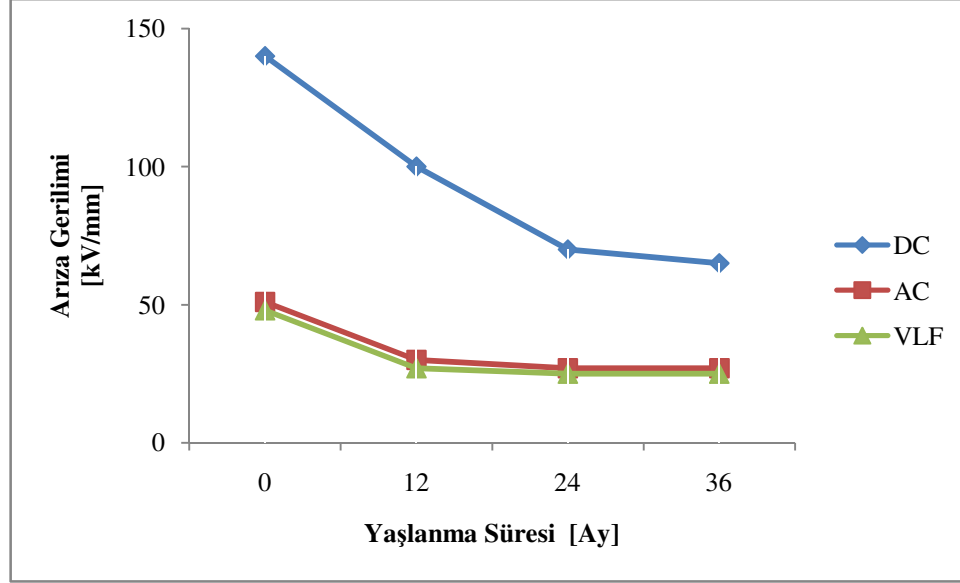
Pankek deney transformatörü ile yapılan ölçümlere göre yalıtım yağı için 21-80°C aralığında sıcaklığın kayıp faktörüne etkisi özetlenecek olursa,

- Sıcaklık artışı kutuplu dielektrik malzemenin kutuplu hareket etme yeteneğini azaltarak iletkenliğini artırır, dolayısıyla kayıp faktörünü artırır.
- Sıcaklık artışı ile dielektrik malzeme içinde bulunan yabancı madde, parçacıklar, nem ve hava boşlukları kısmi boşalmaların daha şiddetli olmasına neden olarak kayıp faktörünü artırır.

4.4.4 Yaşlanma - toplam harmonik bozulma ilişkisi

Harmoniklerin etkisi ile transformatörlerde birtakım sorunlar ortaya çıkar. Bu sorunlar harmonikli akımın etkisi ile artış gösteren bakır kayıpları ve harmonikli gerilim etkisi ile histerezis ve fuko akımlarından dolayı artan demir kayıplarıdır. Ayrıca harmonikli gerilim özellikle yüksek gerilimlerde yalıtım zorlanmalarına yol açar [2]. Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre harmonikli akım ve gerilimin yalıtım dayanımını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [21].

Yaşlanan yalıtkanların dayanım gerilimleri zaman içinde azalır. Şekil 4.38’de arıza gerilimi - yaşlanma süresi eğrisi verilmiştir.



Şekil 4.38 : Arıza gerilimi - yaşlanma süresi eğrisi [18].

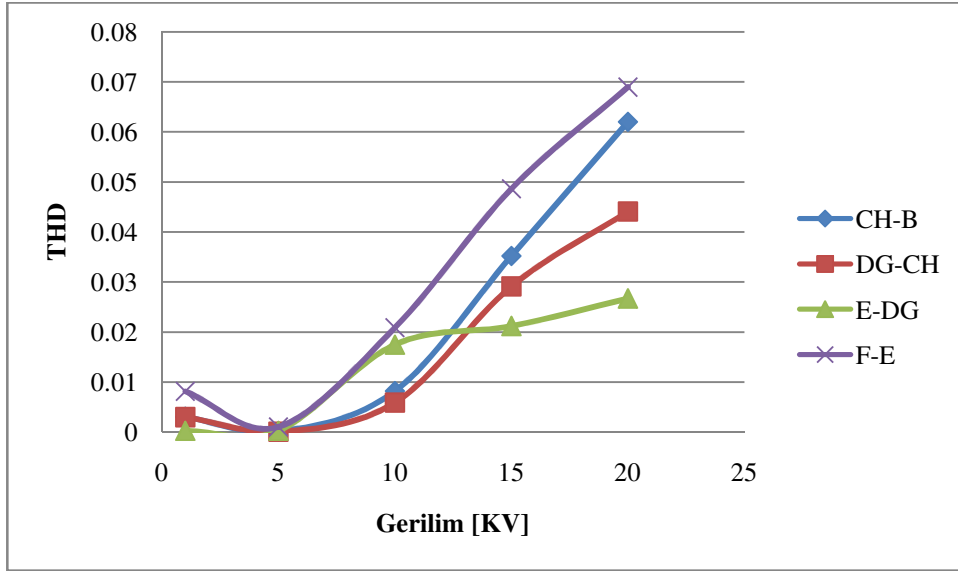
Yaşlanma etkisi ile yalıtkan dayanım geriliminde azalma gözlenmektedir. Yaşlanmanın etkisi ile yalıtıkanda meydana gelen ağaçlanma ve kısmi boşalmaların artması gibi nedenlerle arıza gerilimi düşmektedir yani yalıtkanın dayanım gerilimi düşmektedir.

Yaşlanma etkisi ile yalıtıkanda meydana gelen kısmi boşalmaların artması sistemden ölçülen THD değerinde artışa yol açması beklenir. Yaşlanma etkisi ile sistemden ölçülen harmonik değerinin değişimini gözlemek için 6 ay ara ile aynı deney setinden pankek deney transformatörünün çeşitli bağlantılarında ölçümler alınarak THD değerleri karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.9'da pankek deney transformatörünün ilk ölçüm için çeşitli bağlantılarında toplam harmonik bozulma değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Pankek transformatörün 1-20 kV arası THD değerleri

Bağlantı Şekli	Uygulanan Gerilim				
	1 kV	5 kV	10 kV	15 kV	20 kV
	Toplam Harmonik Bozulma				
CH-B	0,0029041	0,0001267	0,0061972	0,0144703	0,0408431
DG-CH	0,0029245	3,051E-05	0,0057441	0,0235112	0,0395524
E-DG	8,024E-05	0,0002706	0,0173712	0,0139803	0,0237001
F-E	0,0011068	0,0010062	0,020814	0,0322264	0,0634307

Tüm bağlantı şekillerinde 1-20 kV aralığında gerilim artışı ile toplam harmonik bozulma değerleri artış göstermiştir. Bu artışın sebebi olarak gerilim artışı ile yalıtım malzemesinde meydana gelen kısmi boşalmaların şiddetlenmesinin yanında deney setinde ve ölçüm sisteminde ortaya çıkan harmonikler de sayılabilir. Şekil 4.39’da pankek deney transformatörünün ilk ölçüm için çeşitli bağlantılarında gerilim - toplam harmonik bozulma değişimi verilmiştir.



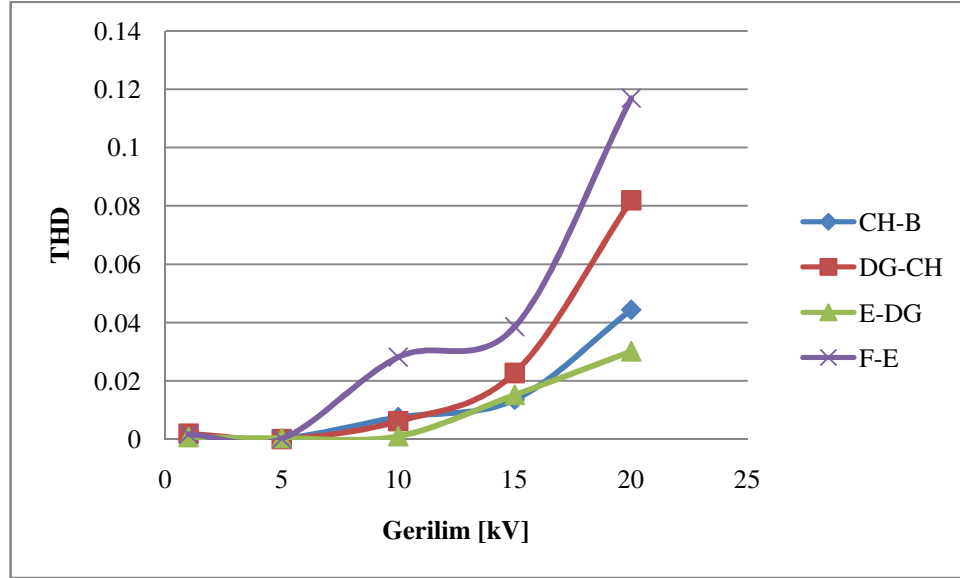
Şekil 4.39 : Pankek transformatör gerilim - THD değişimi.

Aynı deney setinde aynı gerilim kademeleri ve bağlantı şekillerinde 6 ay sonra alınan ölçümler incelendiğinde ölçümlerde genel olarak toplam harmonik bozulma değerlerinin arttığı görülmektedir. Çizelge 4.10’da pankek deney transformatörünün 6 ay sonra çeşitli bağlantılarında toplam harmonik bozulma değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Pankek transformatörün 6 ay sonra 1-20 kV arası THD değerleri

Bağlantı Şekli	Uygulanan Gerilim				
	1 kV	5 kV	10 kV	15 kV	20 kV
	Toplam Harmonik Bozulma				
CH-B	0,0006644	0,000113	0,0074219	0,0174347	0,0443678
DG-CH	0,0018801	4,26E-05	0,0061401	0,0226765	0,0819324
E-DG	0,0006074	0,0003032	0,0010039	0,0151104	0,0300415
F-E	0,0016503	0,0001426	0,0281429	0,0385305	0,1169227

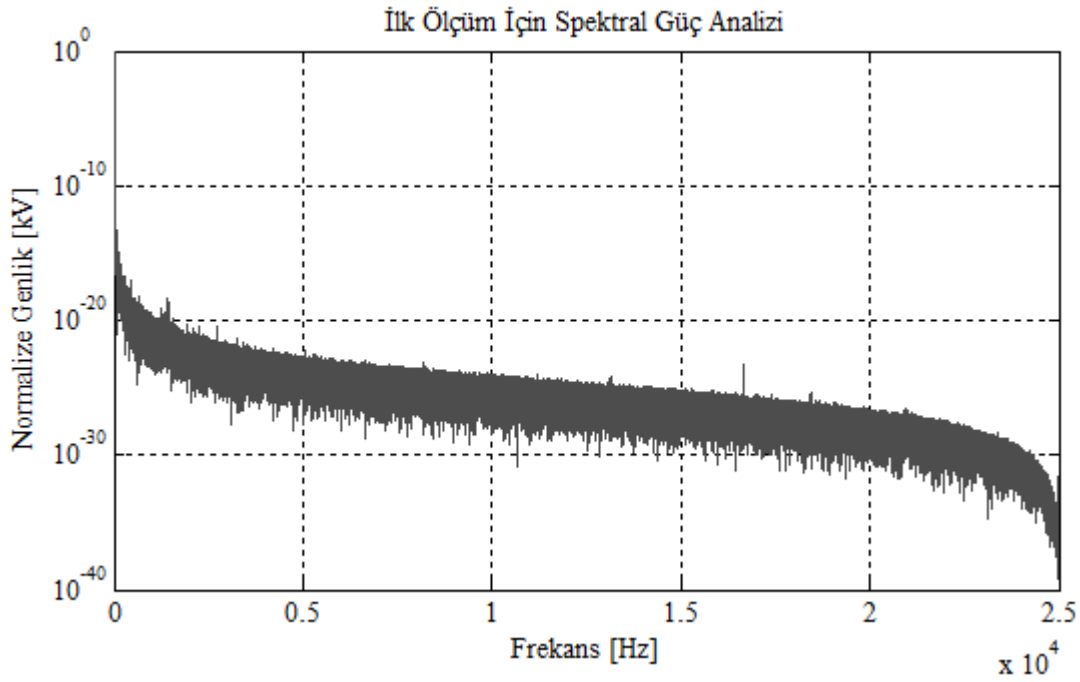
Toplam harmonik bozulma değerleri incelendiğinde 1-5-10 kV gerilim değerlerinde ilk ölçüm ile 6 ay sonra yapılan ölçüm arasında belirgin bir artış gözlenmezken, 15 kV ve 20 kV gerilim değerlerinde toplam harmonik bozulmanın belirgin artış gösterdiği gözlenmiştir. Tüm ölçümlerin THB değişimi incelendiğinde ortalama % 7 artış tespit edilmiştir. Şekil 4.40'da pankek deney transformatörünün 6 ay sonraki ölçüm için çeşitli bağlantılarında gerilim - toplam harmonik bozulma değişimi verilmiştir.



Şekil 4.40 : Pankek transformatörün 6 ay sonra gerilim - THD değişimi.

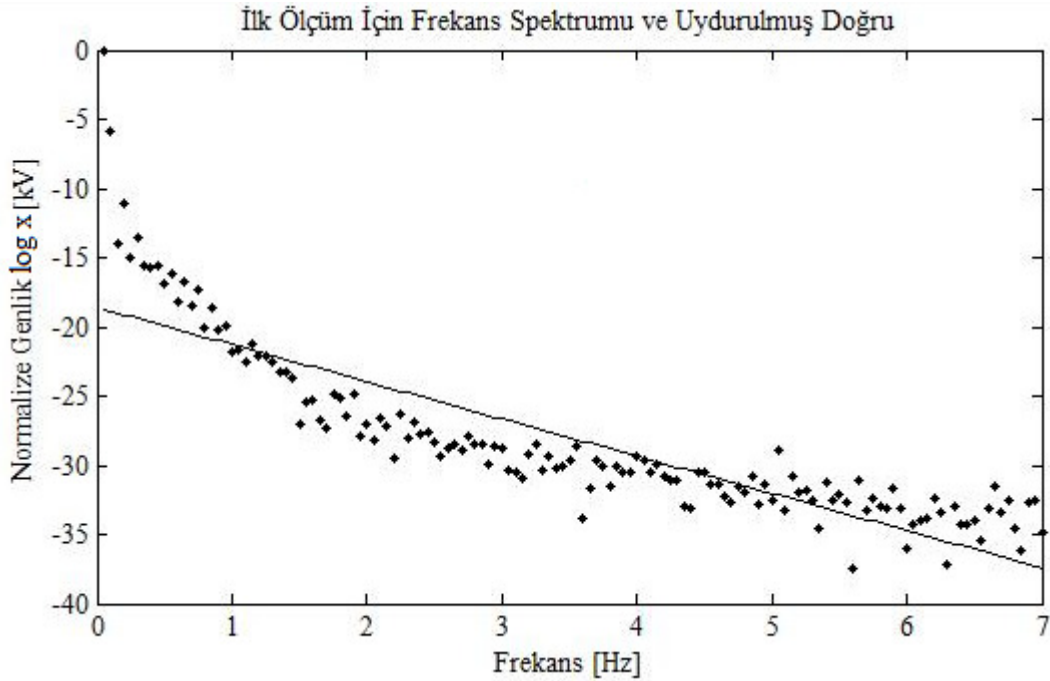
Özellikle 15 kV ve 20 kV gerilim değerlerinde toplam harmonik bozulmanın artış göstermesi yaşlanma etkisi ile yalıtıktaki boşluk, ağaçlanma ve nemden meydana gelen kısmi boşalmaların şiddetlenmesine işaret etmektedir.

İlk ölçüm ile 6 ay sonra alınan ölçüm arasında toplam harmonik bozulmanın daha iyi görülebilmesi için logaritmik eksenindeki spektral güç yoğunluğu grafiklerine $y(x)=m.x + n$ bağıntısıyla birer doğru uydurulmuştur. Burada m doğrunun eğimini vermektedir. Doğru uydurma işleminde 7 Hz frekansına kadar olan veriler ele alınmıştır. Daha yüksek frekanslarda ölçülen genlikler çok küçük değer aldığından göz ardı edilmiştir. Şekil 4.41'de ilk ölçümde CH-B bağlantısı 1 kV gerilimi için elde edilen spektral güç analizi 0 - 2,5 kHz aralığında verilmiştir.



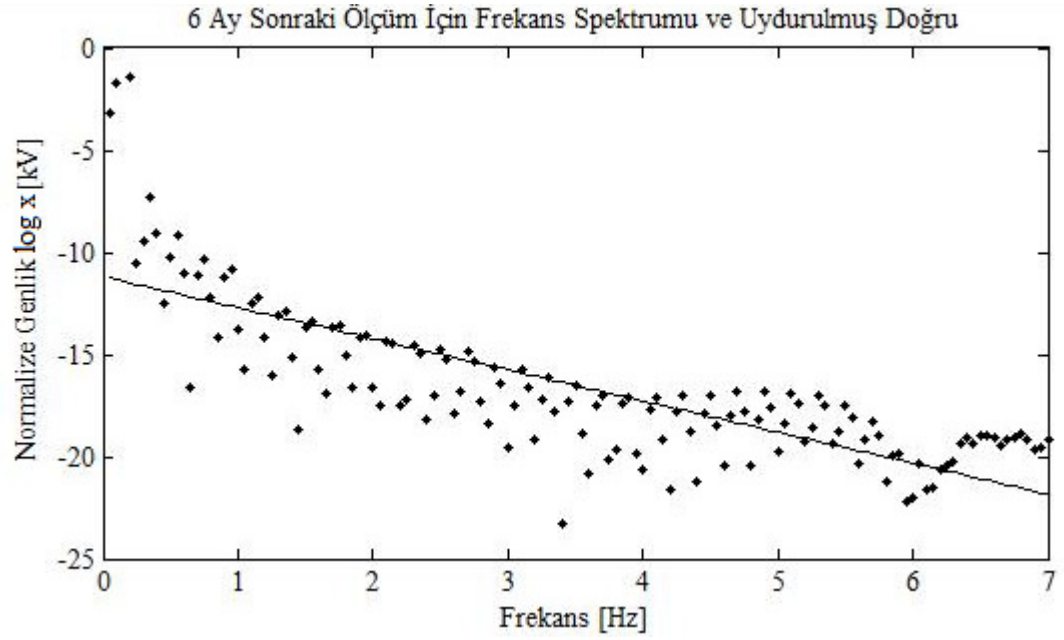
Şekil 4.41 : CH-B 1 kV ilk ölçüm için spektral güç analizi

Şekil 4.42’de aynı ölçümde 0,1-7 Hz aralığındaki spektral güç dağılımından *MATLAB*’de *polyfit* komutu ile doğru geçirilmiştir.



Şekil 4.42 : CH-B 1 kV ilk ölçüm için frekans spektrumu ve uydurulmuş doğru

Şekil 4.43’de ise ilk ölçümden 6 ay sonra alınan ölçümde 0,1 - 7 Hz aralığındaki spektral güç dağılımı ve geçirilen doğru verilmiştir.



Şekil 4.43 : CH-B 1 kV 6 ay sonraki ölçüm için frekans spektrumu ve uydurulmuş doğru

Her iki ölçüm için frekans spektrumundan geçirilen doğruların eğimleri karşılaştırılarak toplam harmonik bozulmalar karşılaştırılmıştır. Asıl işaretin frekansı olan 0,1 Hz frekansında nominal genlik 1 değerini almakta ve logaritmik ölçekte $\log(1)=0$ olarak değer almaktadır. Genlik azaldıkça logaritmik ölçekteki karşılığı negatif yönde artış göstermektedir ($\log(0,001)=-3$). Şekil 4.42 ve 4.43 incelendiğinde doğru eğimlerinin negatif işaretli oluşu açıkça görülmektedir. Mutlak eğimi büyük olan doğrunun harmonik genliklerinin daha küçük değerler aldığı açıktır.

Çizelge 4.11’de ilk ölçüm ve 6 ay sonraki ölçüm için kaydedilen frekans spektrumlarından 0,1-7 Hz aralığında geçirilen doğruların katsayıları verilmiştir. Çizelgede ilk ölçüm için geçirilen doğru $y(x)=m_1.x + n_1$, 6 ay sonraki ölçüm için geçirilen doğru $y(x)=m_2.x + n_2$ ile ifade edildiğinde m_1 ilk ölçüm için geçirilen doğrunun eğimini, m_2 ise 6 ay sonraki ölçüm için geçirilen doğrunun eğimini vermektedir. Pankek deney transformatörü için tüm bağlantı şekillerinde 1 - 20 kV aralığında toplam harmonik bozulma karşılaştırması yapılmasını sağlayan katsayılar Çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 : THD karşılaştırma ölçütleri

Bağlantı Şekli	Gerilim [kV]	İlk Ölçüm		6 Ay Sonraki Ölçüm	
		m ₁	n ₁	m ₂	n ₂
CH-B	1	-2,688	-18,5936	-1,522	-11,1916
	5	-1,8763	-16,2948	-1,1143	-14,8504
	10	-1,8106	-12,0889	-1,5956	-10,7682
	15	-1,8088	-14,6726	-1,661	-10,2601
	20	-1,8288	-15,9516	-1,7607	-9,9795
DG-CH	1	-2,7216	-18,4212	-1,854	-11,1212
	5	-1,8062	-17,2303	-1,4233	-12,1319
	10	-1,7954	-9,9665	-1,7918	-9,7978
	15	-1,7767	-14,6234	-1,5487	-10,3551
	20	-1,7951	-15,6111	-1,9116	-9,219
E-DG	1	-2,1132	-21,8909	-1,8862	-12,2927
	5	-1,7801	-16,9672	-1,5793	-11,6457
	10	-1,8718	-13,3696	-1,57	-9,7408
	15	-1,8494	-14,00	-1,6267	-9,7943
	20	-1,8804	-14,6598	-1,7278	-9,1516
F-E	1	-2,5494	-18,5638	-1,5836	-10,9941
	5	-2,1154	-15,2272	-1,1439	-13,3299
	10	-1,9057	-13,5398	-1,5482	-9,8212
	15	-1,9606	-14,8865	-1,5571	-10,0218
	20	-1,9124	-15,0799	-1,8705	-8,7021

Negatif işaretli doğru eğimleri mutlak olarak karşılaştırıldığında ilk ölçüm için hesaplanan mutlak eğimler aynı bağlantı şekli ve gerilimde 6 ay sonraki ölçüm için hesaplanan mutlak eğimden büyüktür. Mutlak eğimi büyük olan doğrunun harmonik genlikleri daha küçük değerler almaktadır. Dolayısıyla toplam harmonik bozulma daha düşüktür.

İlk ölçüm ile 6 ay sonra yapılan ölçüm arasında tüm ölçümlerdeki eğim değişimi incelendiğinde mutlak eğimin ortalama % 17,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Spektral güç analizine göre ortalama THD değişiminde % 7 artış tespit edilmişti. Bu sonuçlar birleştirildiğinde 21°C yağ sıcaklığında 0 - 7 Hz aralığındaki frekans

spektrumundan geçirilen doğruların eğimindeki % 2,5 oranındaki azalma, ortalama % 1 THD artışına karşılık gelmektedir.

şekil 4.42 ve 4.43'deki doğruların altında kalan bölgenin alanları karşılaştırılarak ya da frekans spektrumlarından üstel birer eğri geçirilip katsayılarının karşılaştırılması yolu ile de benzer sonuçlar elde edilebilir. Çizelge 4.11'de tüm bağlantı şekilleri için 1 kV – 20 kV arasında katsayıları verilen doğrular EK A'da verilmiştir.

Yaşlanmanın toplam harmonik bozulma üzerindeki etkisi ortaya çıkarılarak yüksek gerilimde uygulanan dayanım deneyi, kısmi boşalma deneyi ve kayıp faktörü deneylerinde elde edilen sonuçların daha iyi analiz edilmesi sağlanmıştır. Yaşlanma ile yalıtım malzemesinde oluşan birtakım kimyasal olaylar, ağaçlanmalar, nem ve boşluklar kısmi boşalmaların şiddetlenmesine neden olmakta dolayısıyla harmonik bozulmalara neden olmaktadır. Yüksek gerilimde yalıtım deneylerinin yanında yapılan toplam harmonik bozulma ölçümleri yalıtım durumu hakkında ulaşılan sonuç için destekleyici bir ölçüt olacaktır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

DC ve AC yalıtım deneylerine alternatif olarak ortaya çıkan kablo, elektrik makineleri ve transformatörlerde yalıtım durumu hakkında bilgi veren VLF deneyin birçok üstünlüğü ortaya çıkarılmıştır. Bu üstünlükler şöyle sıralanabilir;

- Dayanım deneyi 50 Hz işletme frekansı yerine 0,1 Hz frekansı ile uygulandığında kapasitif deney gücü 500 kat azalmaktadır. Güç gereksiniminin azalmasıyla AC 50 Hz işletme frekansında devasa boyutta ve ağırlıktaki deney donanımları ile uygulanabilecek yalıtım deneyi çok daha küçük boyutta ve ağırlıktaki VLF deney seti ile uygulanabilmektedir.
- Deney donanımının boyutlarının küçülmesi, aynı oranda maliyetinin azalmasını sağlamaktadır.
- VLF yüksek gerilim deneyinde çok düşük frekans, 0,1 Hz ve daha düşük frekansları ifade eder. VLF yüksek gerilim deneyleri genellikle 0,1 Hz frekansında uygulanmaktadır. Ancak kablonun uzunluğu ve kapasitif yükü arttıkça deney frekansı 0,01 Hz değerine kadar düşürülmektedir. Frekansın azalması deney gücü gereksiniminin azalması anlamına gelir.
- VLF dayanım deneyi, DC dayanım deneyine göre daha düşük gerilim uygulanarak yapılabilmektedir. Ayrıca polaritesinin zamanla değişmesi sayesinde DC yüksek gerilim deneyindeki gibi yalıtıma zarar veren yüksek güçlü şarj akımları meydana gelmemektedir.
- VLF deney alternatif akım ile uygulandığında DC deneyde yapılamayan kayıp faktörü deneyi yani $\tan\delta$ ölçümü yapılabilmektedir.
- Arıza riski göze alınamayan durumlarda VLF yöntemi ile yapılan kayıp faktörü deneyi yalıtıma hasar vermeden yalıtım durumu hakkında bilgi verir. Ayrıca bakım esnasında yapılan kayıp faktörü deneyleri sayesinde iletim ve dağıtım sistemlerinde öncelikli olarak değişmesi gereken hatlar belirlenerek bakım programlarının planlanmasında yardımcı olur.

- VLF yüksek gerilim ile saf ve kısmi boşalmasız bir sinüs gerilimi verilerek kısmi boşalma deneyi uygulanabilir. Denenen cihazda hasara yol açmayacak bir gerilim değeri seçilir. Yapılan kısmi boşalma deneyi sayesinde deney esnasında üretilen tüm kısmi boşalmaların konumu ve büyüklüğü kaydedilir. Kaydedilen boşalmalar ile kısmi boşalma haritası oluşturulur. Bu harita sayesinde yalıtımdaki çeşitli hasarların şiddeti ve konumu belirlenir.

Bu çalışmada çok düşük frekanslı (VLF) yüksek gerilim ile yapılan deneyin üstünlükleri ortaya konulmuştur. Teorik çalışmanın yanında *Stuttgart Üniversitesi, Enerji İletimi ve Yüksek Gerilim Teknolojisi Enstitüsü*'nde 2006-2007 yıllarında pankek deney transformatörü üzerinden kaydedilen çeşitli verilerin bilgisayar üzerinde analizi yapılmıştır.

Pankek deney transformatöründe yapılan kayıp faktörü deneyi sonucunda farklı eşdeğer dielektrik sabitleri için elde edilen kayıp faktörü ölçümlerine göre; yalıtkan malzemenin dielektrik sabiti ile kayıp faktörü arasında ters orantı bulunduğu görülmüştür. Dielektrik sabiti yağa göre yüksek olan presbord yalıtkanlı durumda kayıp faktörünün daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Pankek deney transformatöründe farklı frekanslarda sabit gerilim altında kayıp faktörü değerleri kaydedilmiştir. Uygulanan gerilimin frekansı azaldıkça kayıp faktöründe artış meydana gelmiştir. Yani yalıtım deneyinde frekans azaldıkça yalıtım kayıplarının arttığı görülmüştür. Gerilim frekansı azaldıkça uygulanan gerilim DC gerilime yaklaştığından polarizasyon ile sulu ağaçlarda meydana gelen kısmi boşalmalar daha şiddetli olmaktadır. Sonuç olarak kayıp faktörü değişimi frekans uzayında incelenerek yalıtım malzemesinin içerdiği nem hakkında bilgi edinilebilmektedir. Deneyi yapılan numunenin içeriğindeki nem fazla ise frekans azaldıkça kayıp faktöründeki artış daha fazla olacaktır. Kayıp faktörü deneyinin değişimin en hassas olduğu çok düşük frekanslı bölgede yapılması sulu ağaç tespiti bakımından en sağlıklı sonuçları verecektir.

Frekans – kayıp faktörü deneyi farklı sıcaklıklarda tekrarlanarak sıcaklığın farklı frekanslarda kayıp faktörüne olan etkisi incelenmiştir. Pankek deney transformatörü ile yapılan ölçümlere göre yalıtım yağı için 21-80°C aralığında sıcaklığın kayıp faktörüne etkisi özetlenecek olursa,

- Sıcaklık artışı kutuplu dielektrik malzemenin kutuplu hareket etme yeteneğini azaltarak iletkenliğini artırır, dolayısıyla kayıp faktörünü artırır.
- Sıcaklık artışı ile dielektrik malzeme içinde bulunan yabancı madde, parçacıklar, nem ve hava boşlukları kısmi boşalmaların daha şiddetli olmasına neden olarak kayıp faktörünü artırır.

Yapılan son analizde ise yaşlanmanın toplam harmonik bozulma üzerindeki etkisi ortaya çıkarılarak harmonik bozulma deneyinin yüksek gerilimde uygulanan dayanım deneyi, kısmi boşalma deneyi ve kayıp faktörü deneylerinin yanında destekleyici bir deney olarak kullanılabileceği görülmüştür. Yaşlanma etkisi ile sistemden ölçülen harmonik değerinin değişimini gözlemek amacıyla 6 ay ara ile aynı deney setinden pankek deney transformatörünün çeşitli bağlantılarında ölçümler alınarak THD değerleri karşılaştırılmıştır. 6 ay sonraki ölçümde hesaplanan THD değerleri ilk ölçümde hesaplanan THD değerlerine göre ortalama olarak % 7 oranında yüksek çıkmıştır. Yaşlanmanın etkisiyle yalıtım malzemesinde birtakım fiziksel ve kimyasal olaylar meydana gelmektedir. Zaman içerisinde işletmedeki bir yalıtkan malzeme elektriksel, ısıl ve mekanik etkilere maruz kalmaktadır. Tüm bu etkiler ile yaşanan yalıtkan gevrek hale gelmekte dolayısıyla yalıtkan içinde çatlak ve boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların içine yerleşen nem ve yalıtkan içinde gelişen ağaçlar kısmi boşalmaların şiddetlenmesine yol açarak harmonik bozulmalara neden olmaktadır. Yüksek gerilimde yaygın olarak uygulanan dayanım deneyi, kayıp faktörü deneyi ve kısmi boşalma deneylerinin yanında yapılan toplam harmonik bozulma deneyleri yalıtım durumu hakkında ulaşılan sonuç için destekleyici bir ölçüt olacaktır.

Çalışmamızda kullanılan veriler kendi deney düzeneğimizde elde edilmediğinden kaydedilen tüm verilerin hata oranlarını saptamamız mümkün olmamıştır. Kayıp faktörü tespitinde 100 V geriliminde IDA 200 cihazı ile 5 kV - 20 kV gerilim aralığında MI 540 cihazı ile en fazla % 1 hata payı ile doğrudan ölçüm yapılmıştır. 1 kV – 5 kV gerilim aralığında ise faz farkı yöntemi kullanılmıştır. Faz farkı yöntemi ile hesaplanan kayıp faktörü değerleri doğrudan ölçüm ile karşılaştırıldığında % 8 ile % 15 arasında değişen hata oranları tespit edilmiştir. Bu hata oranı deney düzeneğinde bulunan cihazların hata payı, ölçüm yönteminden kaynaklanan hatalar, referans kapasite olarak kullanılan kablonun dielektrik kayıpları, veri kaydı esnasında oluşabilecek hatalar ve filtrelemeden kaynaklanan birtakım hataların

toplamından oluşmaktadır. Bu yöntemde kayıp faktörü tespitinin dolaylı yoldan yapılması hata oranının fazla olmasına neden olmaktadır. Referans kapasite olarak kablo yerine kondansatör kullanılması daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Konu ile ilgili bundan sonraki yapılacak olan çalışmalarda kayıp faktörü deneyi farklı dielektrik ve fiziksel özelliklere sahip numunelerle (yağ, reçine, kâğıt, XLPE ve EPR gibi) çeşitli frekanslarda (0,01 Hz - 0,1 Hz - 50 Hz gibi) tekrarlanarak yeni ve yaşlı numunelerin kayıp faktörü ölçümleri yapılabilir. Aynı numuneler için VLF dayanım deneyi, AC 50 Hz dayanım deneyi, DC dayanım deneyi ve kısmi boşalma deneyi yapılarak kayıp faktörü deneyi sonuçları ile birlikte değerlendirilip yöntemlerin olumlu ve olumsuz yönleri ortaya çıkarılabilir.

Ayrıca yaşlanma etkisi ile sistemden ölçülen harmonik değerinin değişimini incelemek amacıyla yeni numuneler ile farklı koşullarda farklı sürelerde yaşlandırılmış numunelerin THD değerleri karşılaştırılabilir. Elektriksel, ısı ve mekanik etkilerin yalıtıkta yol açtığı farklı hasarları tespit edebilmek için THD ölçümü kullanılarak yeni yöntemler geliştirilebilir.

VLF tekniğinin diğer yalıtım deneylerine karşı üstünlükleri sayesinde geleceğin en yaygın yüksek gerilim yalıtım deneyi olacağı tahmin edilmektedir. Bu tez çalışmasının Avrupa ve Amerika'da son yıllarda kullanımı artan VLF deney tekniğinin ülkemizde de kullanılması ve geliştirilmesine katkı sağlayacağı ümit edilmektedir.

KAYNAKLAR

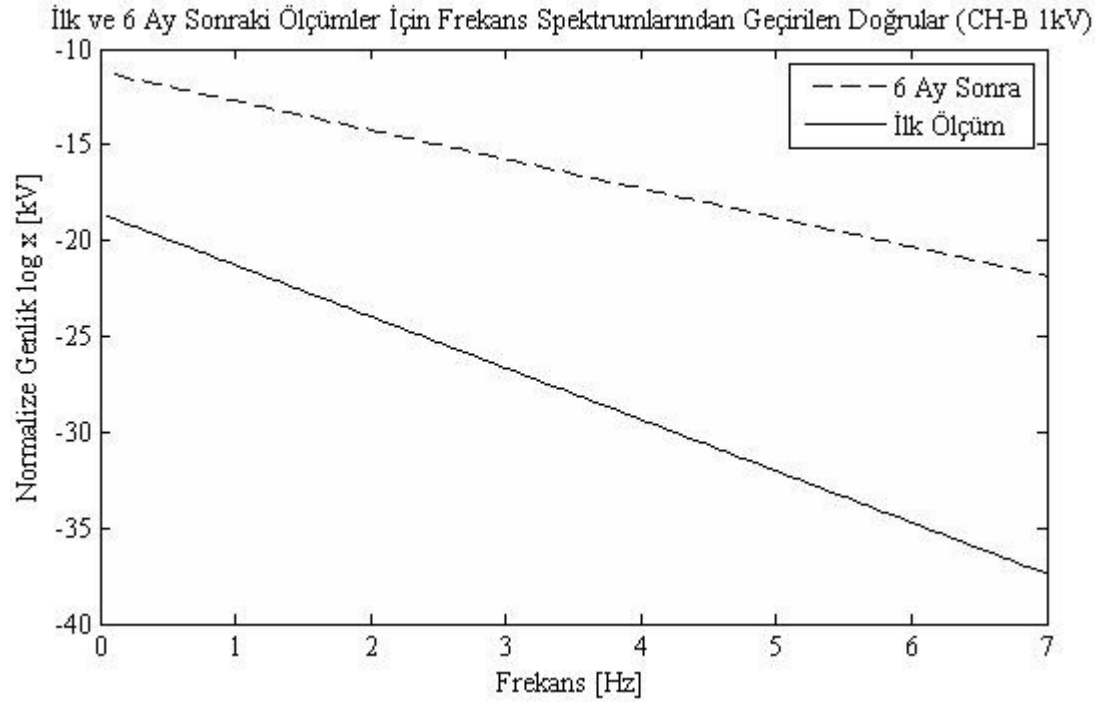
- [1] **Şenyurt, Ö.** 2006: Elektrik Tesislerinde Hızlı Fourier Dönüşümü ile Harmonik Analizinin Yapılması, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [2] **Sucu, M.** 2003: Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [3] **Şahin, Y. G.** 2006: Harmoniklerin Yeraltı Güç Kablolarına Etkilerinin Belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.*
- [4] **Kayran, A. H., Ekşioğlu E.M.** 2010: “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, *Birsen Yayınevi Ltd. Şti., İstanbul.*
- [5] **Kalkan, Y. S.** 2007: Nabız Değişkenliğinin (HRV) Kaydı ve Sayısal Analizi için Bir Holter Sisteminin Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- [6] **İlaslaner, İ.** 2006: Güç Kalitesinde Harmonikler ve Filtrelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.*
- [7] **Tural, N. ve diğ.** 2006: Elektronik ve Haberleşme Lab. Deney Föyü, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, YTÜ, İstanbul.*
- [8] **Url-1:** <<http://www.electrico.drilco.net/pdf>>, alındığı tarih 09.03.2011.
- [9] **Lili, T.** 2003: Investigation of Polarization/ Depolarization Current Measurement of Different Operating Temperature, *Bachelor of Engineering Thesis, Department of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, St Lucia, Australia.*
- [10] **Url-2:** <<http://www.paxdiagnostics.com/uploads/FDS.PDF>>, alındığı tarih 09.03.2011.
- [11] **Situ, C.** 2006: Verlustfaktormessung bei 0,1 Hz, *Lisans Tezi, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart, Deutschland.*
- [12] **Seesanga, S. ve diğ.** 2008: Microcontroller Modulation for VLF High Voltage Generator Rate 3 kV Peak Using DSPIC-30F2010, *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand. 2nd IEEE International Conference on Power and Energy, December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia.*

- [13] **Peschel, M. T.** 2006: VLF Power Testing, *High Voltage Inc. Copake, Newyork, USA*.
- [14] **IEEE 400.2 standart** 2004: “Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)”.
- [15] **IEEE 433 standart** 1974: “Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High Voltage at Very Low Frequency”.
- [16] **IEEE 400 standart** 2001: “Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems”.
- [17] **Eager, G. S.** 1997: High Voltage VLF Testing of Power Cables, *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 2*.
- [18] **Onal, E.** 2010: Determination of dissipation factor of various dielectric materials, *World Academy of Science, Engineering and Technology Conference, Issue:71, pp. 300-302, Venice, Italy*.
- [19] **Karahan, M.** 2007: Sonlu Elemanlar Metodu Kullanılarak Güç Kablolarının Isıl Analizi ve Akım Taşıma Kapasitesinin Değerlendirilmesi, *Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- [20] **Url-3:** <<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/temperature.php>>, alındığı tarih 11.04.2011.
- [21] **Kumm, T. ve diğ.** 2000: Influence of different types of oil and paper to the dielectric response of oil-paper insulation system, *Dielectric Materials, Measurements and Applications Conference, No. 473, pp. 106-111*.

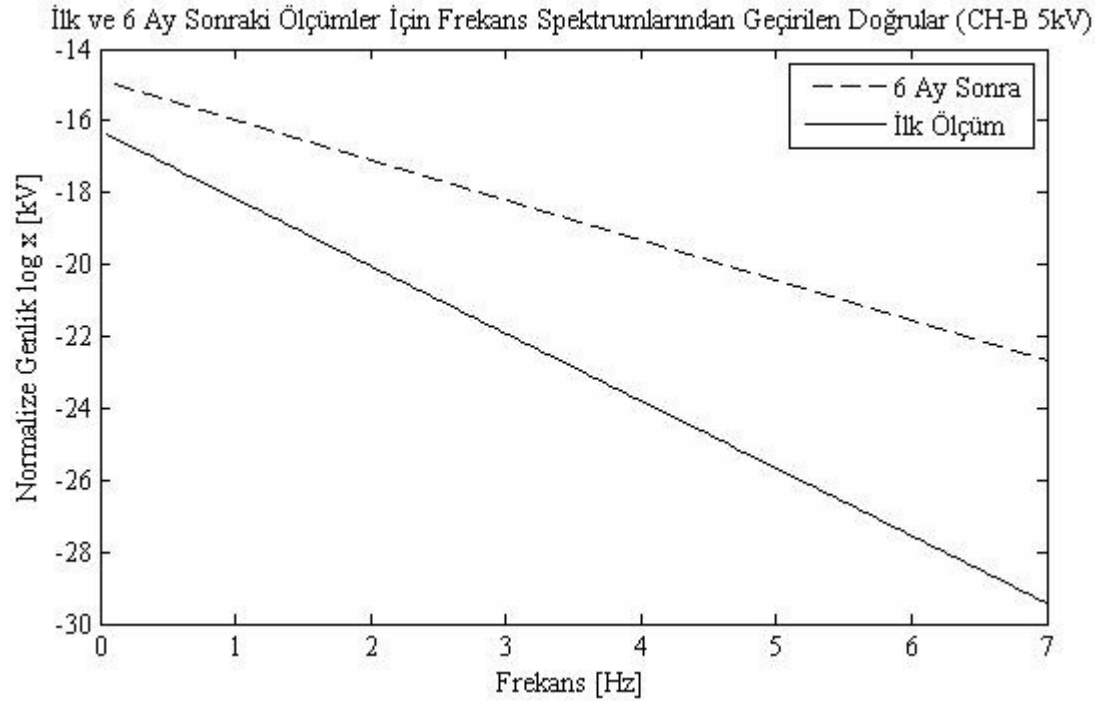
EKLER

EK A : THD Hesaplamasında Frekans Spektrumlarından Geçirilen Doğrular

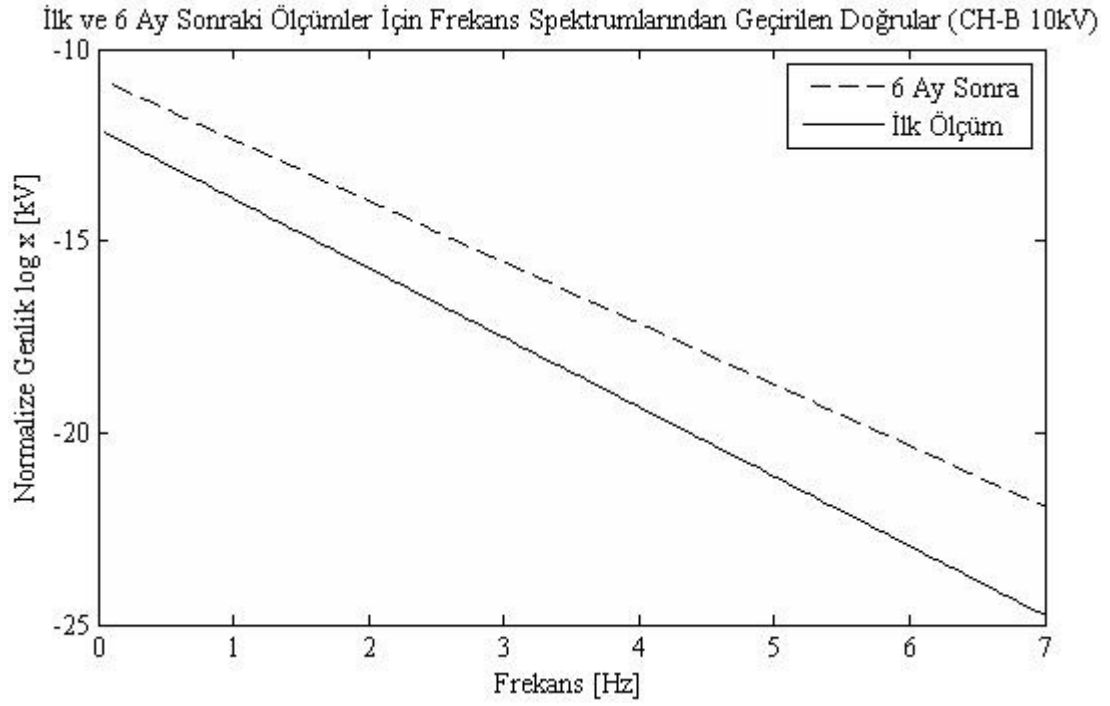
EK A



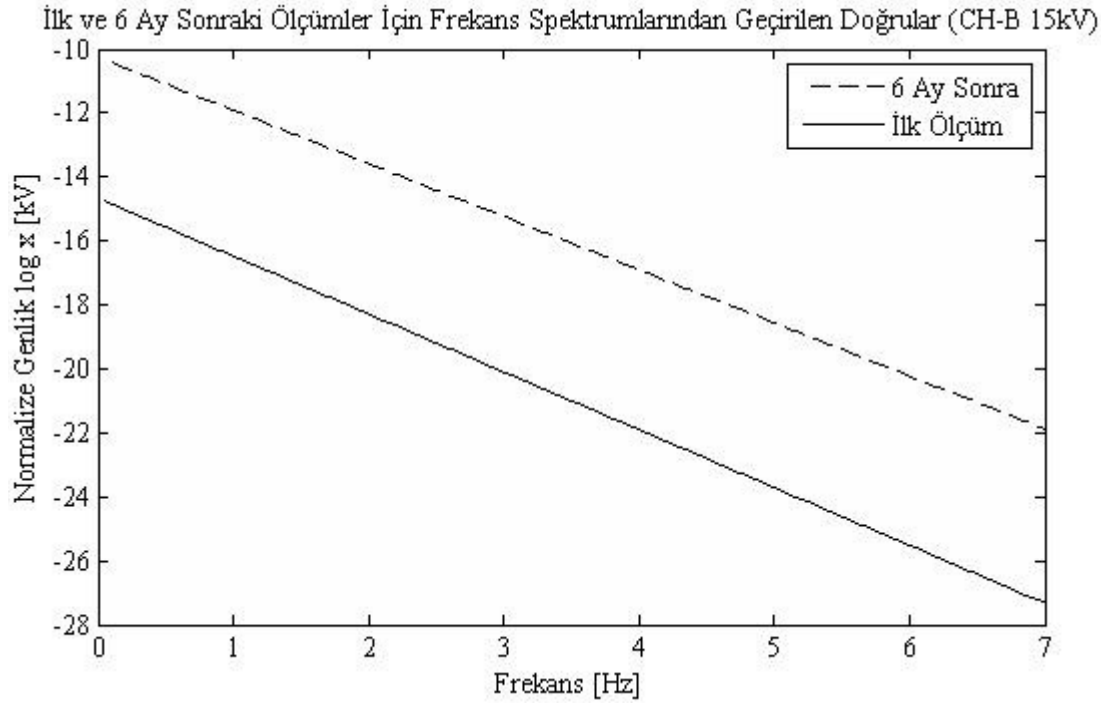
Şekil A.1 : CH-B bağlantısı 1 kV gerilim.



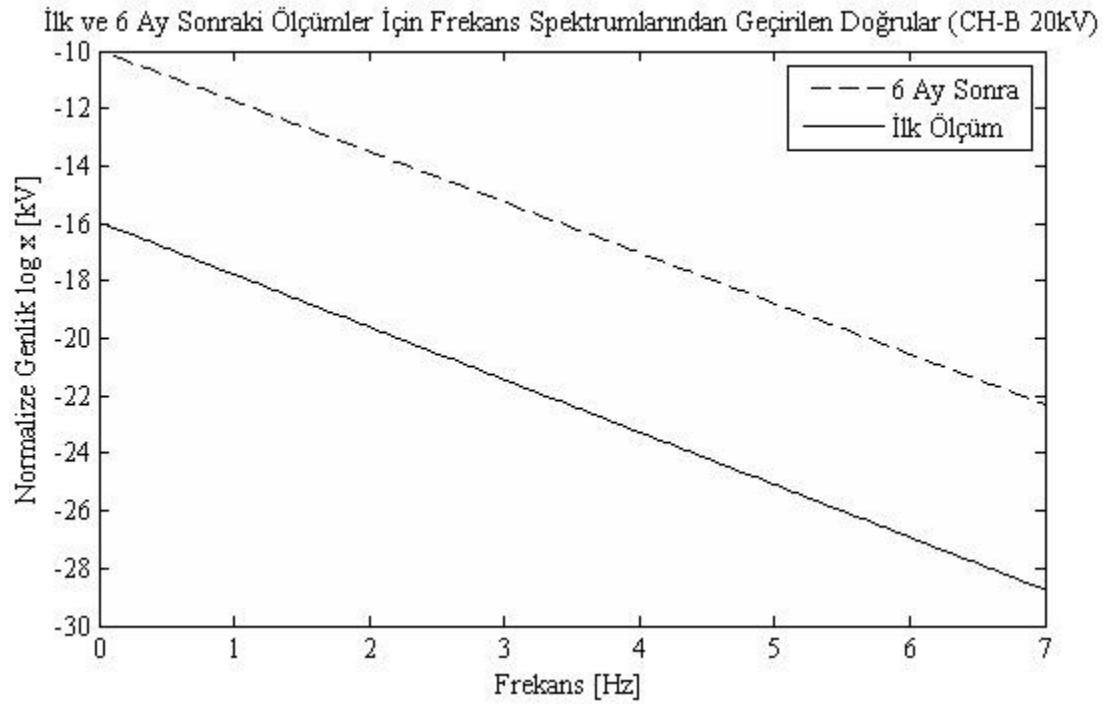
Şekil A.2 : CH-B bağlantısı 5 kV gerilim.



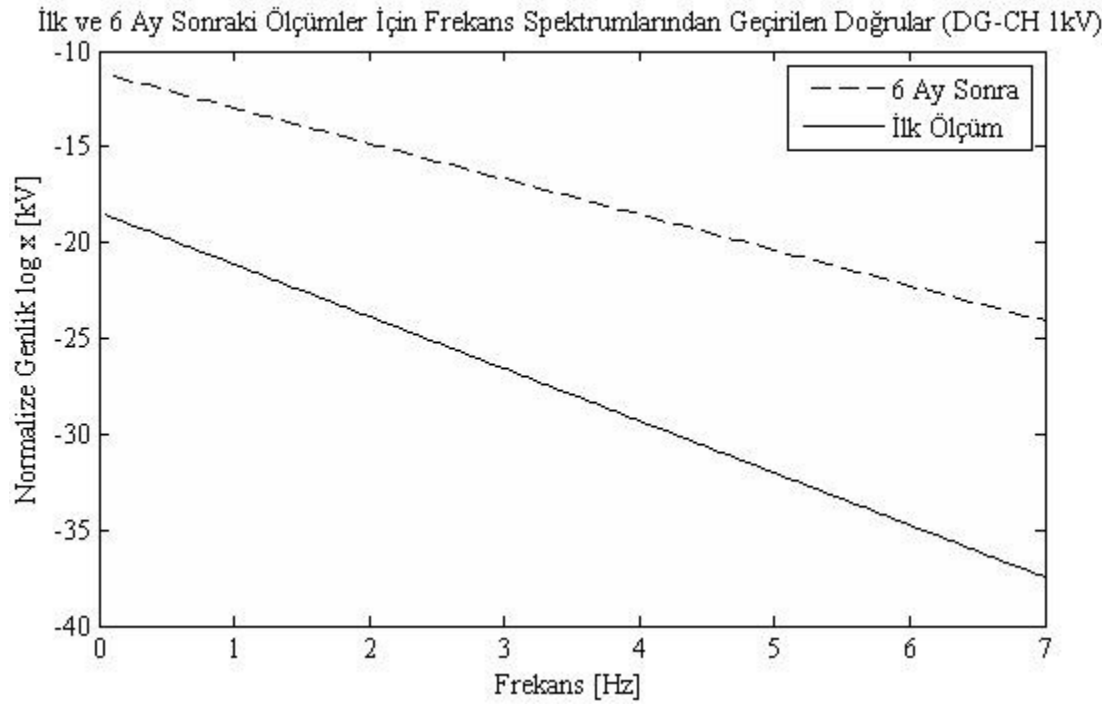
Şekil A.3 : CH-B bağlantısı 10 kV gerilim.



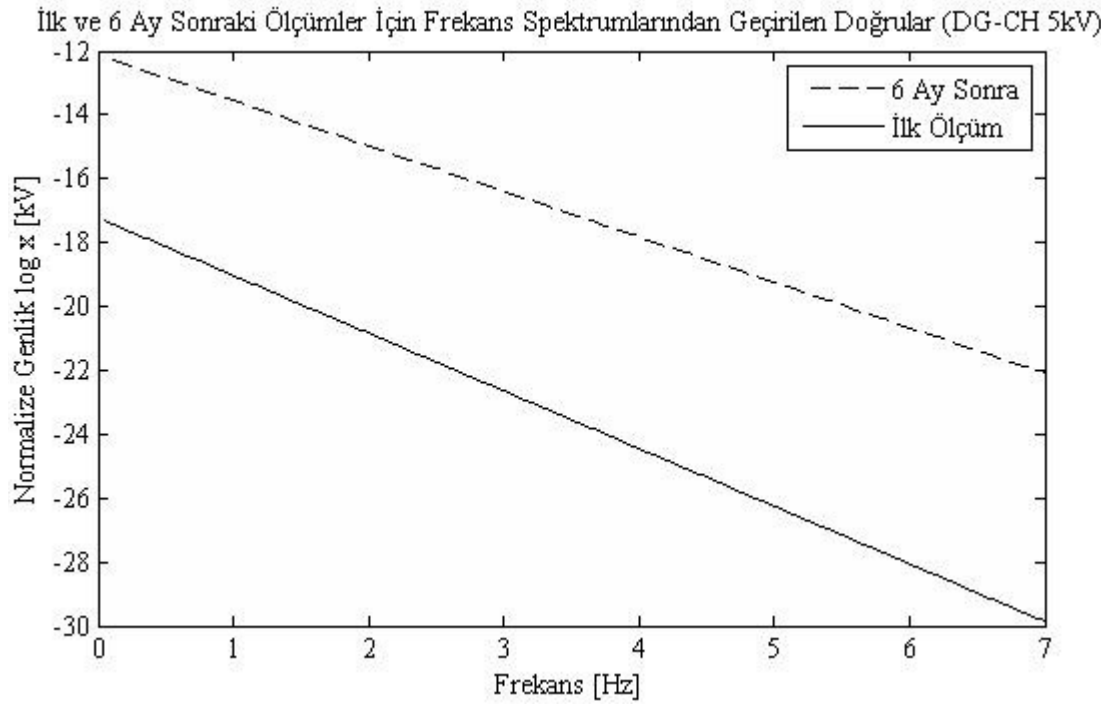
Şekil A.4 : CH-B bağlantısı 15 kV gerilim.



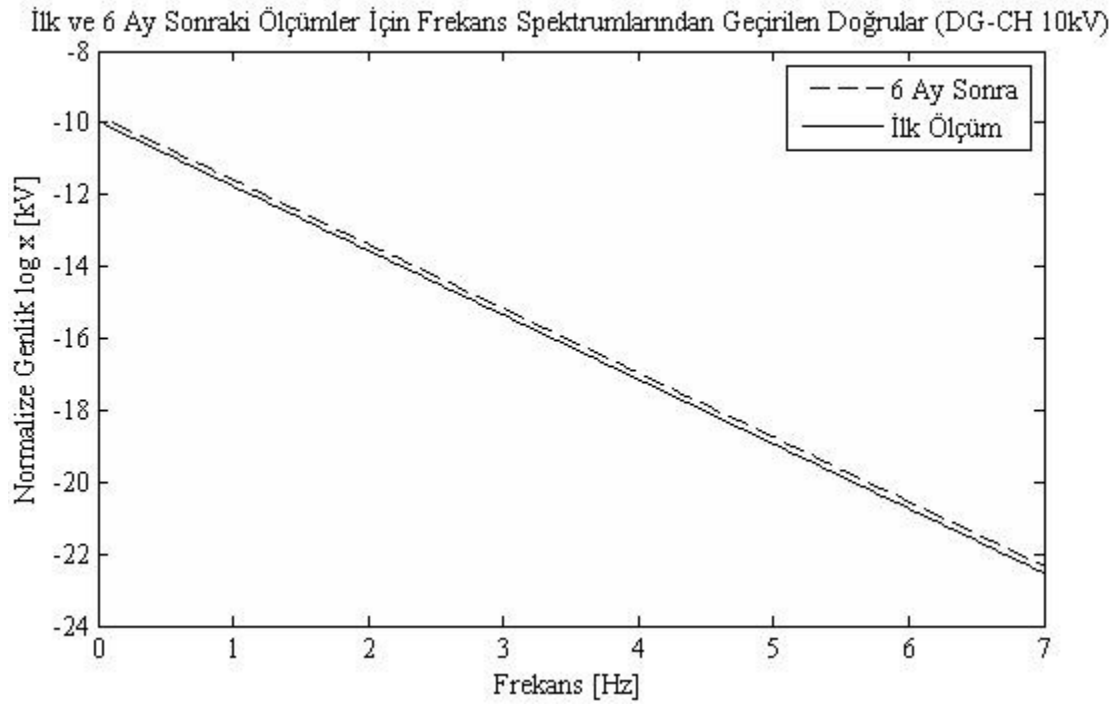
Şekil A.5 : CH-B bağlantısı 20 kV gerilim.



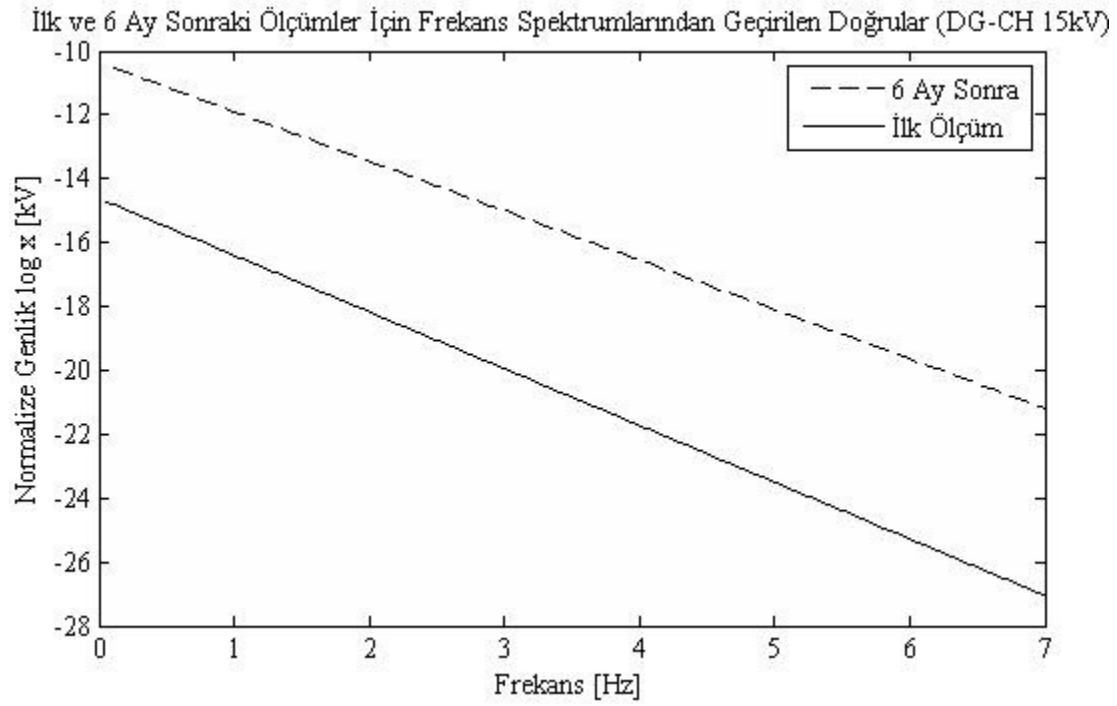
Şekil A.6 : DG-CH bağlantısı 1 kV gerilim.



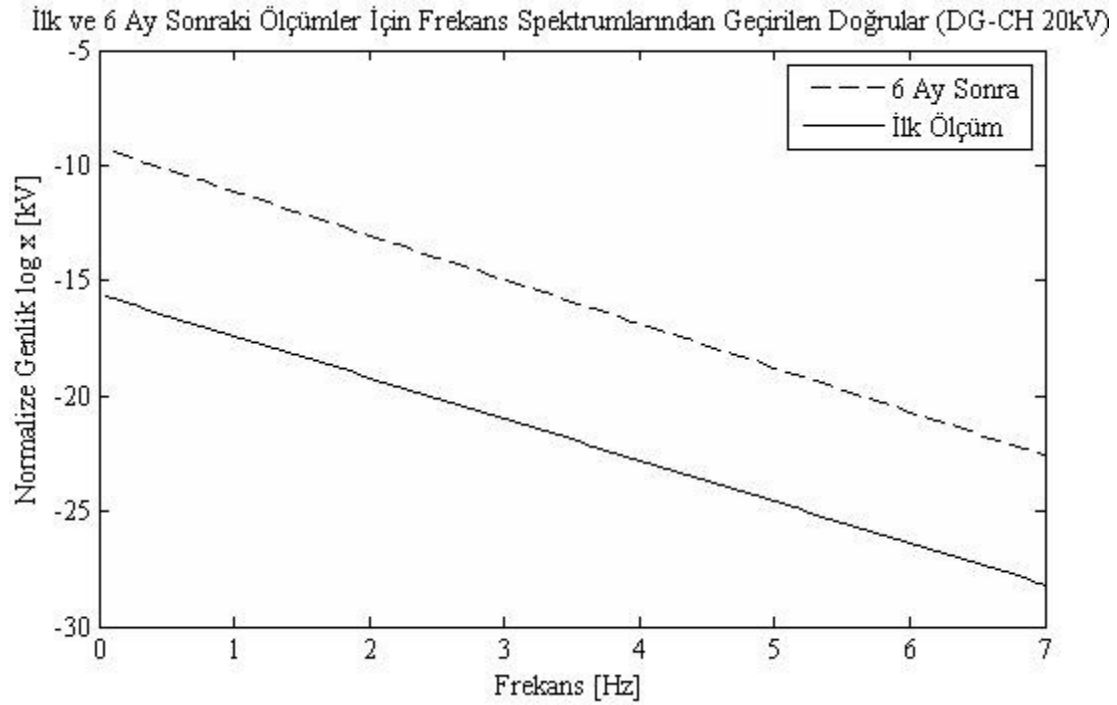
Şekil A.7 : DG-CH bağlantısı 5 kV gerilim.



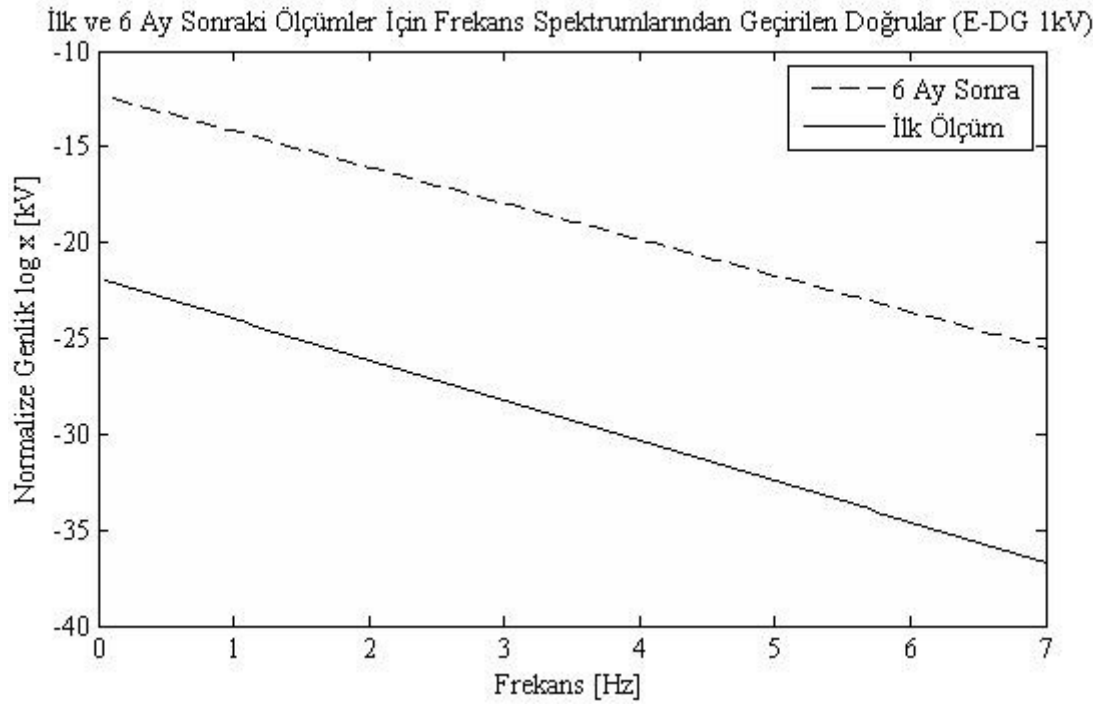
Şekil A.8 : DG-CH bağlantısı 10 kV gerilim.



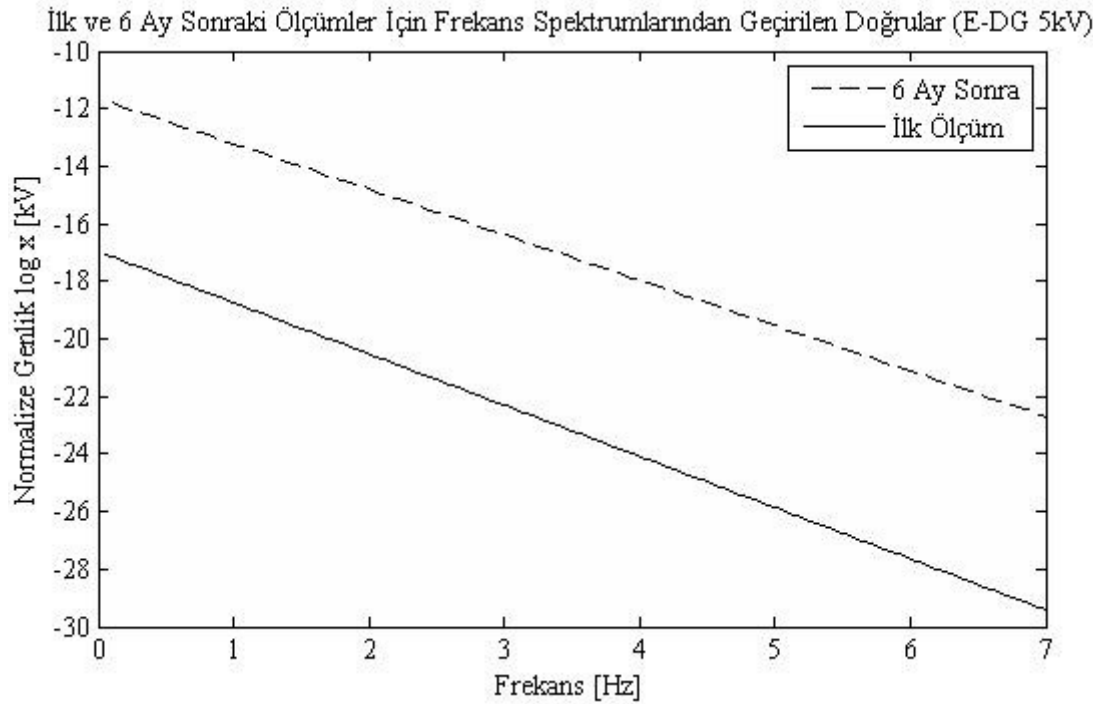
Şekil A.9 : DG-CH bağlantısı 15 kV gerilim.



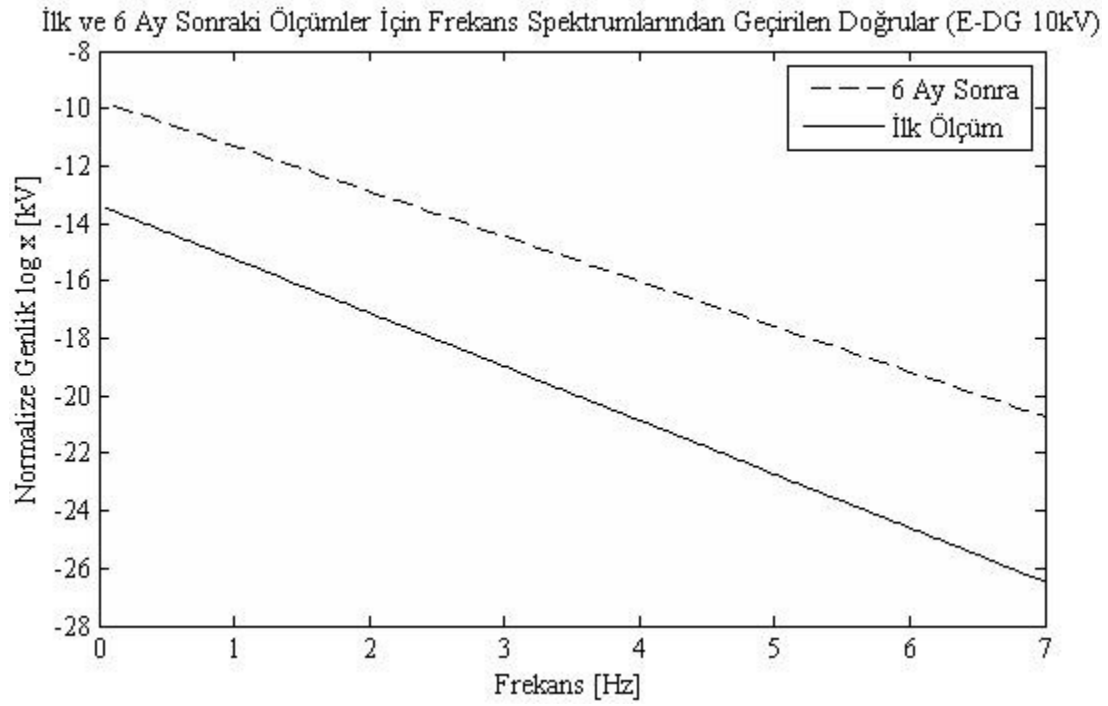
Şekil A.10 : DG-CH bağlantısı 20 kV gerilim.



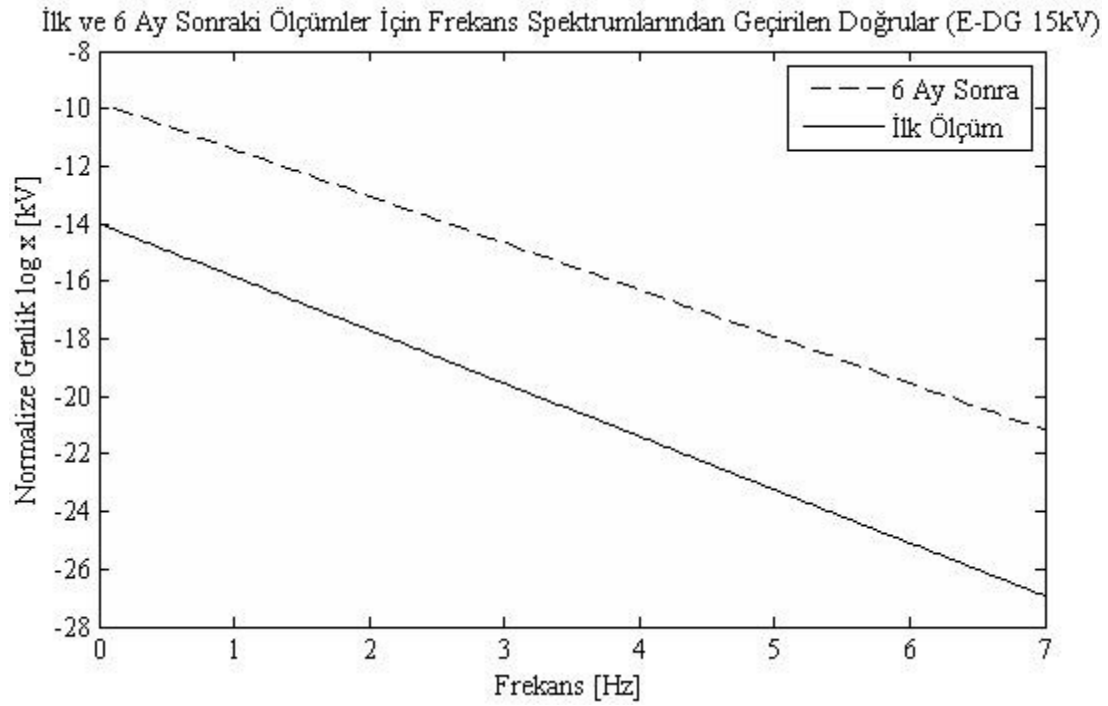
Şekil A.11 : E-DG bağlantısı 1 kV gerilim.



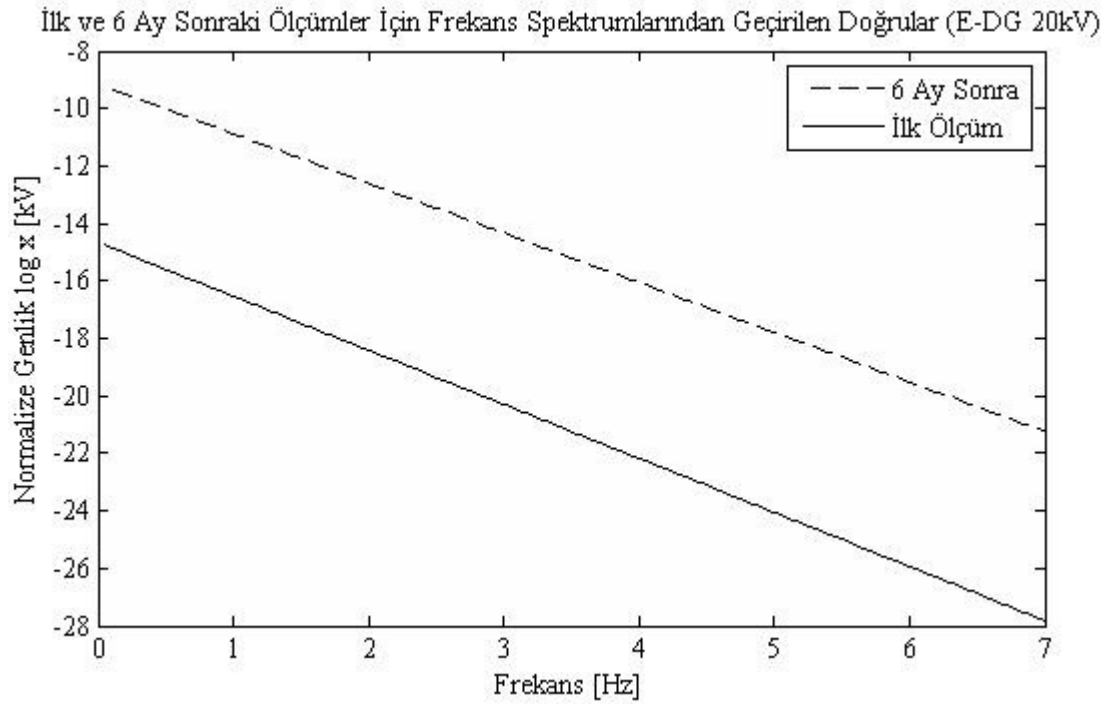
Şekil A.12 : E-DG bağlantısı 5 kV gerilim.



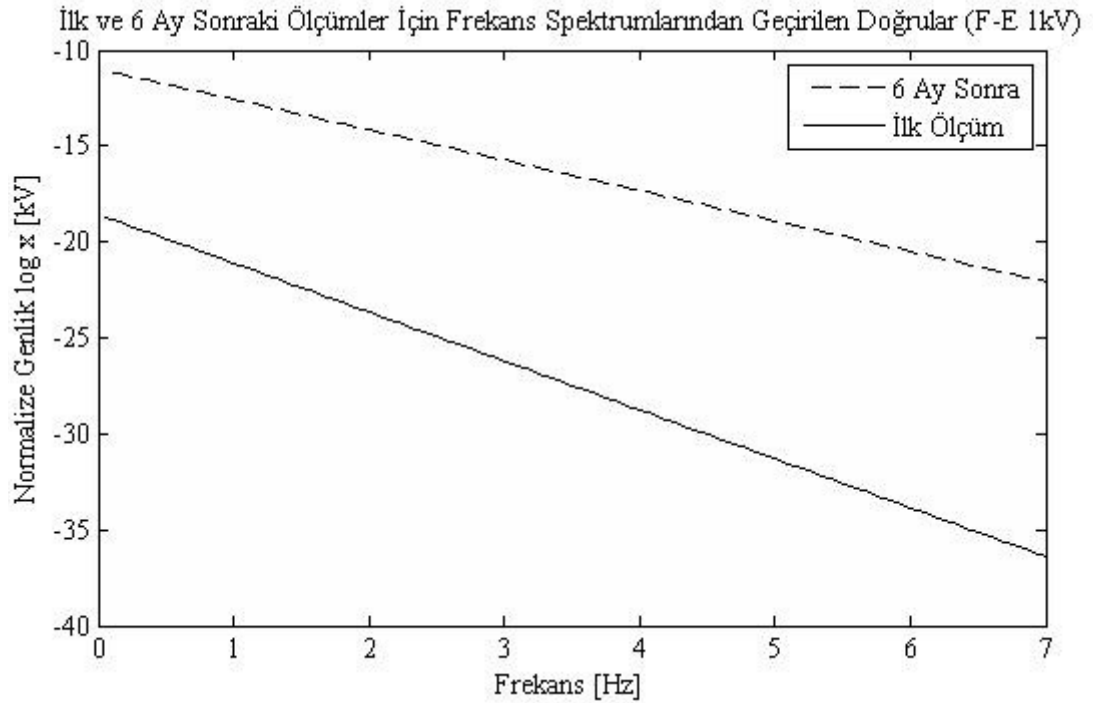
Şekil A.13 : E-DG bağlantısı 10 kV gerilim.



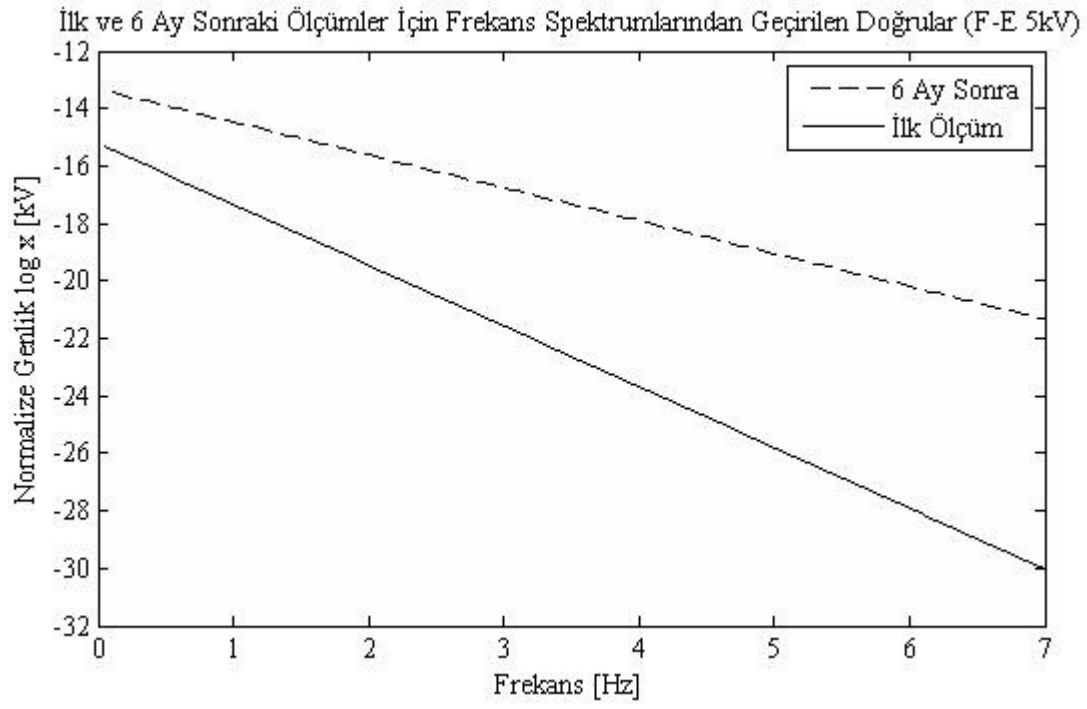
Şekil A.14 : E-DG bağlantısı 15 kV gerilim.



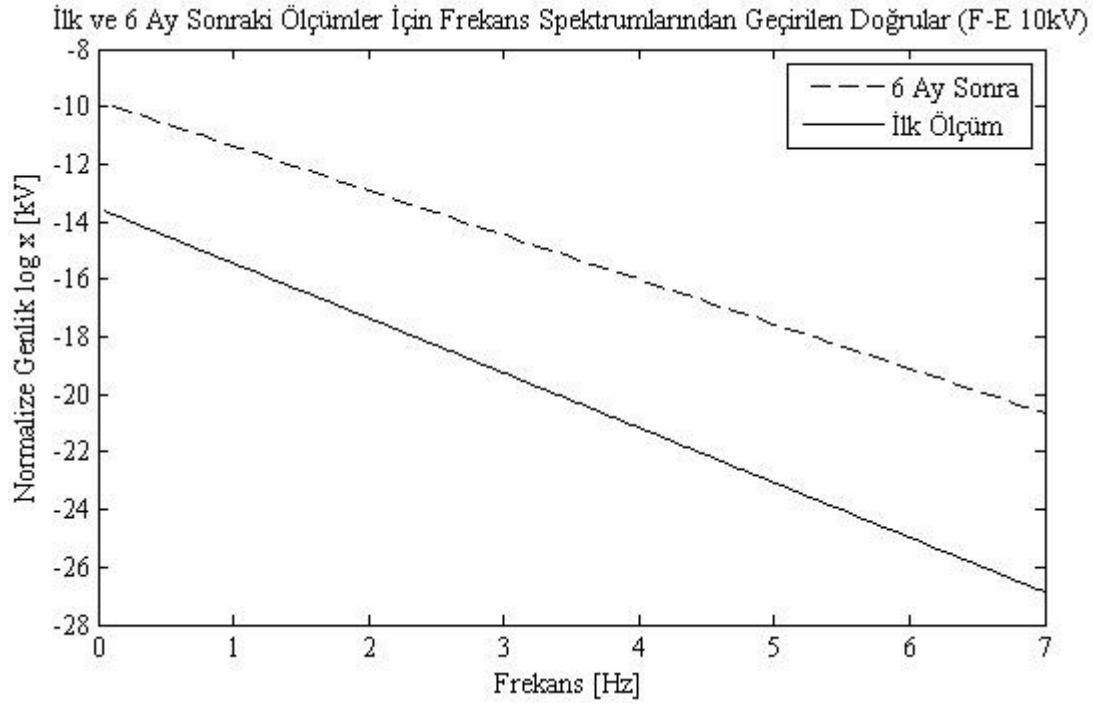
Şekil A.15 : E-DG bağlantısı 20 kV gerilim.



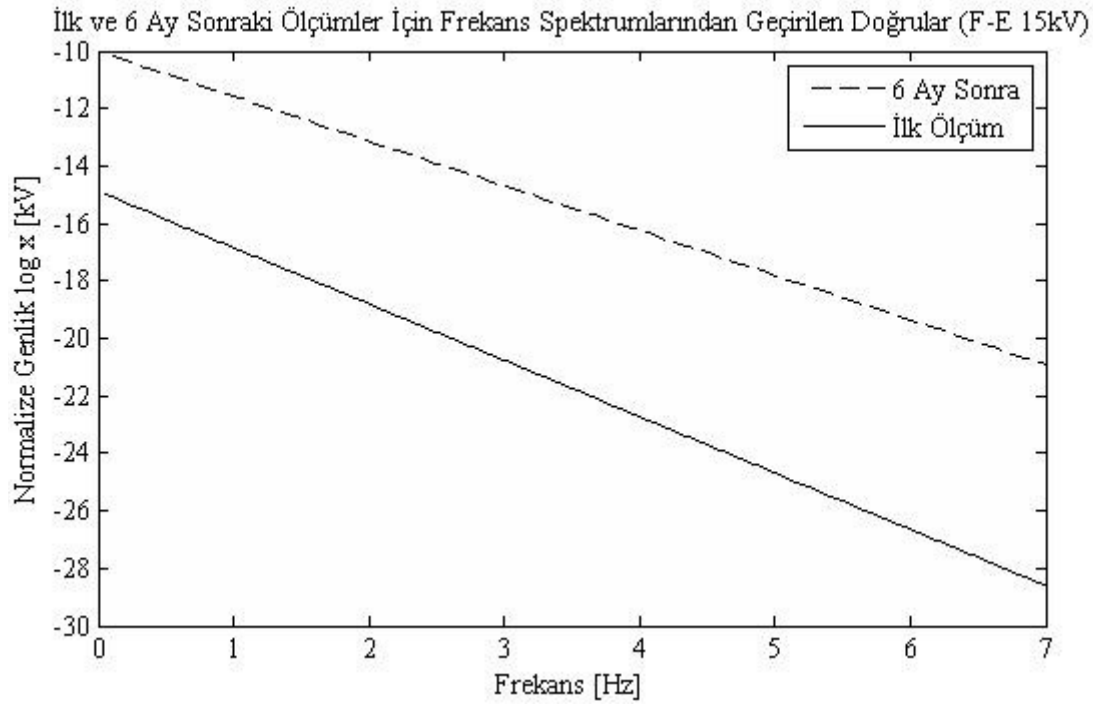
Şekil A.16 : F-E bağlantısı 1 kV gerilim.



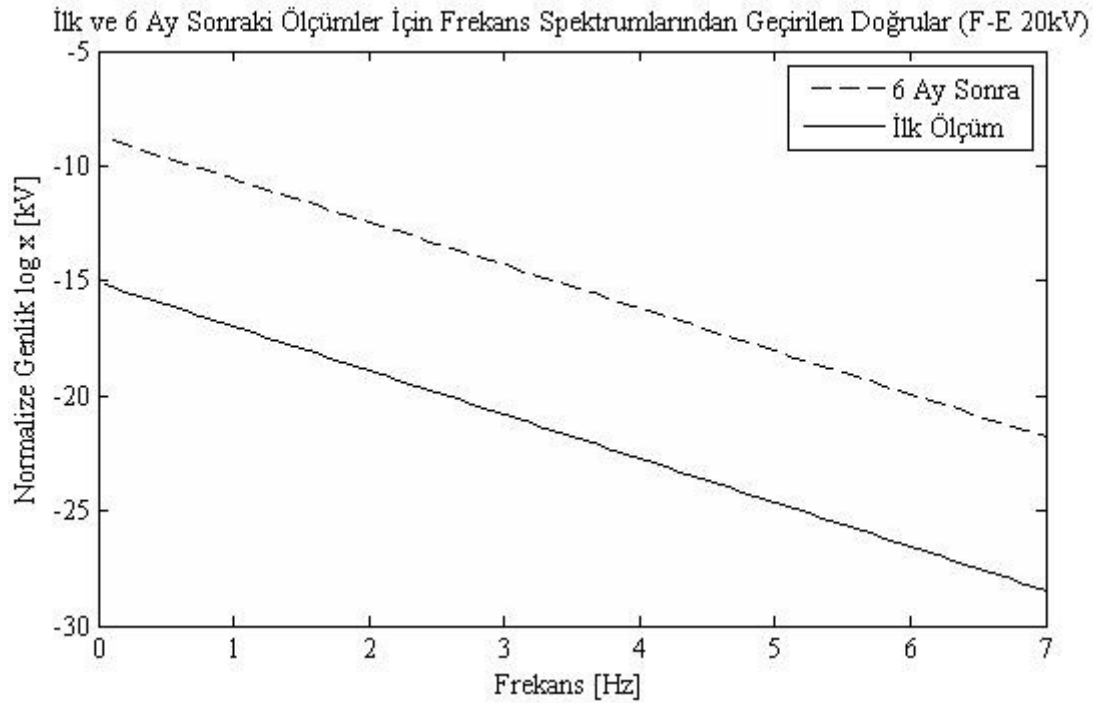
Şekil A.17 : F-E bağlantısı 5 kV gerilim.



Şekil A.18 : F-E bağlantısı 10 kV gerilim.



Şekil A.19 : F-E bağlantısı 15 kV gerilim.



Şekil A.20 : F-E bağlantısı 20 kV gerilim.

ÖZGEÇMİŞ

Oğuz SUAK, 1985 yılında İstanbul’da doğmuştur. İlk ve orta öğrenimini Mustafa Necati İlkokulu, Halil Bedii Yönetken İlköğretim Okulu ve Adile Mermerci Anadolu Lisesi’nde tamamladıktan sonra, 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’ne girmiştir. 2007 yılında lisans eğitimini tamamlamıştır. 2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği yüksek lisans programına başlamıştır.