

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SİNÜSOİDAL OLMAYAN GERİLİMLERDE
YÖNLENDİRİLMEMİŞ SACLARDA OLUŞAN
HARMONİK KAYIPLARIN BELİRLENMESİ**

DOKTORA TEZİ

Elk.Yük.Müh. Mustafa TURAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK

Tez Danışmanı : Prof.Dr.A.Faik MERGEN

EYLÜL 2002

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SİNÜSOİDAL OLMAYAN GERİLİMLERDE
YÖNLENDİRİLMEMİŞ SAÇLARDA OLUŞAN
HARMONİK KAYIPLARIN BELİRLENMESİ**

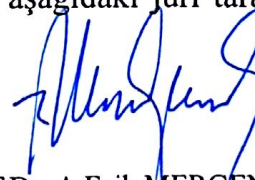
DOKTORA TEZİ

Elk.Yük.Müh. Mustafa TURAN

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK
Tez Danışmanı : Prof.Dr.A.Faik MERGEN

Bu tez 24.09./2002 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oy çokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Feriha ERFAN
Jüri Başkanı


Prof.Dr. A.Faik MERGEN
Jüri Üyesi


Doç.Dr.Ertan YANIKOĞLU
Jüri Üyesi


Doç.Dr. M.Ali YALÇIN
Jüri Üyesi


Doç.Dr. Şerafettin ÖZBEY
Jüri Üyesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın bütün aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof.Dr.A.Faik MERGEN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, sıkıntılı anlarımda yoğun desteklerini esirgemeyen tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2002, Adapazarı

Mustafa TURAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLOLAR LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1 . GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 . DEMİR KAYIPLARI.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Transformatör Saclarının Özellikleri	8
2.2.1. Tanecikleri yönlendirilmiş çelik alaşımlar.....	8
2.2.2. Tanecikleri yönlendirilmemiş çelik alaşımlar	9
2.3. Saclarda Oluşan Kayıpların Azaltılma Yolları	9
2.4. Transformatör Sacında Oluşan Kayıplar.....	10
2.4.1. Foucault kayıpları.....	10
2.4.2. Sinüzoidal uyarmada Foucault kayıplarının bulunması.....	11
2.4.3. Histerezis Kayıpları.....	14
2.4.4. İlave kayıplar.....	18
2.4.5. Demir kayıplarının toplamı	18
BÖLÜM 3 . SİNÜSOİDAL OLMAYAN BESLEME GERİLİMLERİNDE DEMİR KAYIPLARININ HESABI.....	20
3.1. Giriş.....	20
3.2. Kabuller.....	20
3.3. Gerilim – Akı İlişkisi	21
3.4. Sinüzoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Foucault Kayıplarının Hesaplanması	22

3.5. Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Histerezis Kayıplarının Hesaplanması	30
3.6. Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Toplam Demir Kayıpları	41
BÖLÜM 4 . DENEYSEL İNCELEME	43
4.1. Giriş.....	43
4.2. Deney Düzenegi	43
4.3. Başlangıç Deneyleri	46
4.4. Deneyler	49
4.4.1. Üçüncü harmonik deneyleri	50
4.4.3. Beşinci harmonik deneyleri.....	53
4.4.4. Yedinci harmonik deneyleri.....	56
BÖLÜM 5 . TEORİK VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	60
5.1. Giriş.....	60
5.2. Sonuçların değerlendirilmesi	60
BÖLÜM 6 . SONUÇLAR.....	65
BÖLÜM 7 . TARTIŞMA ve ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69
EKLER.....	72
EK 1. Deney Transformatörü ve Ölçü Aletleri.....	72
EK 2. Sac Kayıp Parametrelerinin Bulunuşu.....	74
EK 3. Deneylerde Kaydedilen Grafikler.....	77
EK 4. Minör Çevrim Katsayısının Belirlenmesi.....	104
ÖZGEÇMİŞ.....	105

SİMGELER VE KISALTMALAR

θ	: Faz farkı
ϕ	: Manyetik akı
ρ	: Özgöl direnç
γ	: Özgöl ağırlık
ℓ	: Uzunluk
ω	: Açısal frekans
α	: Harmonikli dalğanın temel bileşeninin, saf sinüs dalgası genliğine oranı
λ	: Akı kavraması
φ	: Faz farkı
σ_f	: Foucault kayıp katsayısı
σ_h	: Histerezis kayıp katsayısı
A	: Alan
B	: Manyetik akı yoğunluğu
d	: Sac genişliği
E	: Elektro motor kuvvet
f	: Frekans
H	: Manyetik alan
k_a	: İlave demir kaybı katsayısı
k_c	: Tepe katsayısı
k_f	: Foucault kayıp katsayısı
k_h	: Histerezis kayıp katsayısı
k_m	: Minör çevrim düzeltme katsayısı
k_s	: Şekil faktörü
N	: Sarım sayısı
n	: Harmonik numarası
P_a	: İlave demir kaybı

P_f	: Foucault kaybı
P_{fe}	: Toplam demir kaybı
P_h	: Histerezis kaybı
r	: Malzemenin iç direnci
t	: Sac kalınlığı
THD	: Toplam harmonik distorsiyon
V	: Gerilim, Hacim
W	: Enerji
x	: Steinmetz üsteli

Kısaltmalar

bkz	: Bakınız
EMK	: Elektro motor kuvvet
THD	: Toplam harmonik distorsiyon

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Trafo sacı ve Foucault akımları	11
Şekil 2.2 Histerezis çevrimi	14
Şekil 2.3 Statik ve dinamik histerezis çevrimleri.....	15
Şekil 3.1 Örüntü 1 (kırmızı eğri gerilimi, mavi eğri akımı ve yeşil eğri akı kavraması).....	32
Şekil 3.2 Örüntü 1'e ilişkin λ -I eğrisi, kısmi genişleme ve büzölmeler (Siyah çevrim örüntü 1'e, kırmızı çevrim eş genlikli sinüsoidal uyarıya aittir. Sarı ve yeşil alanlar; fazla ve eksik kalan kısımları belirtmektedir).....	33
Şekil 3.3 Örüntü 2 (kırmızı eğri gerilimi, mavi eğri akımı ve yeşil eğri akı kavraması).....	34
Şekil 3.4 Örüntü 2'ye ilişkin λ -I eğrisi ve minör çevrimler.....	34
Şekil 4.1 Deney düzeneğine ilişkin bağlantı şeması	44
Şekil 4.2 a) Efektif giriş-çıkış gerilimleri b) Giriş gerilimine göre çevirme oranının tersi ($1/\bar{u}$)	47
Şekil 4.3 50Hz frekansta 1-15V aralığı için dinamik mıknatıslanma eğrileri.....	48
Şekil 4.4 Deney transformatörüne ilişkin statik ve dinamik histerezis çevrimleri .	49
Şekil 4.5 Pozitif 3. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	51
Şekil 4.6 Negatif 3. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	53
Şekil 4.7 Pozitif 5. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	54
Şekil 4.8 Negatif 5. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	56
Şekil 4.9 Pozitif 7. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	57

Şekil 4.10 Negatif 7. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi	59
Şekil 5.1 Pozitif 3. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	61
Şekil 5.2 Negatif 3. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	61
Şekil 5.3 Pozitif 5. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	62
Şekil 5.4 Negatif 5. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	62
Şekil 5.5 Pozitif 7. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	63
Şekil 5.6 Negatif 7. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata	63

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Çevirme oranı deneyine ilişkin sonuçlar	47
Tablo 4.2 Pozitif 3. harmonik (Eşitlik 4.2) için deney sonuçları	50
Tablo 4.3 Pozitif 3. harmonik için demir kayıpları	51
Tablo 4.4 Negatif 3. harmonik (Eşitlik 4.3) için deney sonuçları	52
Tablo 4.5 Negatif 3. harmonik için demir kayıpları	52
Tablo 4.6 Pozitif 5. harmonik (Eşitlik 4.3) için deney sonuçları	53
Tablo 4.7 Pozitif 5. harmonik için demir kayıpları	54
Tablo 4.8 Negatif 5. harmonik (Eşitlik 4.4) için deney sonuçları	55
Tablo 4.9 Negatif 5. harmonik için demir kayıpları	55
Tablo 4.10 Pozitif 7. harmonik (Eşitlik 4.5) için deney sonuçları	56
Tablo 4.11 Pozitif 7. harmonik için demir kayıpları	57
Tablo 4.12 Negatif 7. harmonik (Eşitlik 4.6) için deney sonuçları	58
Tablo 4.13 Negatif 7. harmonik için demir kayıpları	58

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Demir Kayıpları, Foucault Kayıpları, Histerezis Kayıpları, Yönlendirilmemiş Saclar, Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimleri

Bu çalışmada, yönlendirilmemiş makina saclarında sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde oluşan harmonik demir kayıpları ve bunların sinüsoidal olmayan besleme geriliminin toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi incelenmiştir.

İlk olarak makina sacları hakkında genel bir bilgi verildikten sonra, kayıp hesaplarında yaygın olarak kullanılan klasik Foucault ve histerezis kayıp bağıntıları verilmiştir. Yönlendirilmemiş saclar kullanılarak üretilmiş en basit makina olarak bir transformatör ele alınmış ve sacı karakterize eden katsayılar deneyler ve eğri uydurma teknikleri ile bulunmuştur.

Daha sonra, tezin asıl amacı olan sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde Foucault ve histerezis kayıpları, minör histerezis çevrimlerinin oluşturduğu kayıpları da içerecek şekilde, hem besleme geriliminin toplam harmonik distorsiyonu ve hem de manyetik akı yoğunluğunun toplam harmonik distorsiyonu cinsinden elde edilmiştir. Elde edilen kayıp bileşenleri ile toplam demir kayıpları teşkil edilmiştir.

Sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde demir kayıplarının hesaplanması için elde edilen bağıntıların doğruluğu, oluşturulan deney düzeneğinden alınan sonuçlar ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

Yapılan karşılaştırmalı hata analizleri sonucunda, sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde klasik bağıntılar ile yapılan hesaplamalarda hata %34'e kadar çıkarken, bu çalışmada önerilen bağıntılar ile yapılan hesaplamalarda hatanın %3'ten küçük kaldığı görülmüştür.

DETERMINATION OF HARMONIC POWER LOSSES IN NON-ORIENTED STEEL LAMINATIONS FOR NON-SINUSOIDAL VOLTAGE WAVEFORMS

SUMMARY

Keywords: Iron Losses, Eddy Current Losses, Hysteresis Losses, Non-Oriented Steel, Non-Sinusoidal Supply Voltages

In this study, harmonic power losses occurring in non-oriented steel laminations for non-sinusoidal voltage waveforms are investigated.

In the beginning, after a short brief on electrical steel, eddy current and hysteresis loss equations which are commonly used in sinusoidal supply conditions are given.

After that, as main objective, changes in hysteresis and eddy current losses under non-sinusoidal supply voltage waveforms are obtained. Obtained hysteresis loss expressions are also modified to cover additional minor loop losses. Unified iron loss expressions for non-sinusoidal voltage waveforms are given in terms of total harmonic distortion of magnetic field intensity. For easy interpretation, unified iron loss equations in terms of total harmonic distortion of supply voltage are also given.

For experimental proof of above approach, a test circuit equipped with specially designed harmonic power supply and proper measuring and data acquisition devices are set to drive an EI type single-phase test transformer with non-oriented laminations. After having a series of saturation and frequency tests, a proper working point in magnetically linear region and loss parameters characterising non-oriented electrical steel was obtained. The test transformer was subjected to non-sinusoidal supply voltage waveforms having different total harmonic distortion, and iron losses, current and flux changes was acquired.

Comparative analysis of measured and calculated losses for non-sinusoidal voltage waveforms show that the error caused by the expressions obtained in this thesis stay less than 3% error while Steinmetz and Richter type classical loss calculation errors tend to %34, when the total harmonic distortion of the voltage tends to 100%.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Kullanılan elektrik enerjisinin tamamı elektromanyetik çekirdekli makinalar üzerinden tüketilmektedir. Çıkış gücünün; motorlarda yaklaşık %10'u ve transformatörlerde de yaklaşık %3'ü kayıp olmaktadır. Enerji verimliliği açısından bakıldığında, bu kayıpların yaklaşık %30'u çekirdek malzemesi üzerinde demir kaybı olarak sarf edilmektedir. Son yıllarda yüksek verimli makinaların tasarlanması arzusu, bu kayıpların nedenlerinin belirlenmesi ve azaltılması yönündeki çalışmaları arttırmaktadır. Diğer taraftan, enerji kirliliğinin artması ve güç elektroniği donanımlı modern sürücü sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması sebebi ile karşılaşılan sinüsoidal olmayan besleme gerilimleri ve bunların neden olduğu ilave kayıpların artması, bu eklentilerin azaltılması yönündeki çalışmaları hızlandırmaktadır. Zira enerji sektöründe küçük ölçekli bir iyileştirme dahi büyük ekonomik kazanç sağlamaktadır. Bundan dolayı, kayıpların nedenlerinin ve bağımlı olduğu parametrelerin araştırılması hep güncel bir konu olmuştur. Bu çalışmada, uygulanan besleme gerilimi dalga şeklinin demir kayıpları üzerindeki etkileri araştırılmaktadır [1, 2].

Demir kayıpları hakkında yapılan araştırmalar içerisinde, ilk ve en kalıcı ifadeler 1891'de Charles Steinmetz tarafından verilmiştir. Steinmetz, demir kayıpları bileşenlerinden olan histerezis kayıpları için;

$$\overline{P_h} = \sigma_h \cdot f \cdot B_m^x \quad [W/kg] \quad (1.1)$$

ifadesini vermiştir. Bu ifade zaman içinde Histerezis Yasası yada Kayıp Denklemi olarak anılmıştır. Steinmetz farklı demir malzemeler üzerinde yaptığı deneysel çalışmalarda, statik BH çevrim alanının bir malzeme sabiti (σ_h), maksimum akı

yoğunluğu (B_m) ve bir üstelden (x) oluşan bir fonksiyona uyduğunu göstermiştir. Ayrıca, f frekanslı sinüsoidal alternatif akımda, dinamik BH çevrimi saniyede f kez tekrarlandığı için, statik çevrime ilişkin kaybı f ile genişletmiştir. Bu ampirik ifade, kayıp güç ilişkisi için çok iyi seçilmiş bir fonksiyon biçimidir. Bu yüzden Steinmetz'in kayıp yasası, yüz yılı aşkın süredir yapılan çalışmaların hep başlangıç noktası olmaktadır [3, 4].

Diğer taraftan J.B. Foucault'un kuvvetli alternatif manyetik alan içinde bulunan bakır iletkenler içinde girdap akımları oluştuğunu ve bu sebeple Joule kayıpları oluştuğunu göstermiştir. Daha sonra manyetik malzemelerin içerisinde oluşan girdap akımları ve bunların oluşturduğu kayıplar; Foucault (Eddy olarak da bilinmektedir) kayıpları olarak adlandırılmış ve bu konuda en çok kullanılan ifade 1924'te R. Richter tarafından ortaya konmuştur [4]:

$$\overline{P_f} = \sigma_f \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad [W/kg] \quad (1.2)$$

Bu ifade Faraday yasası esas alınarak sinüsoidal manyetik alanlar için türetilmiş olup, σ_f ; sacların Foucault kayıp katsayısını, t ise sac kalınlığını göstermektedir.

1920'lerden sonra çalışmalar iki yönde eğilim göstermektedir. Bunlardan birincisi; sinüsoidal endüksiyon için verilen 1.1 ve 1.2 ifadeleri doğrultusunda, yine ampirik fakat daha iyi yakınsayan fonksiyon arayışları Armagnat ve Richter tarafından sürdürülmüşse de, bu çalışmalar ilklerinin önüne geçememiştir [4].

Diğer yönde yapılan çalışmalar; özellikle fizikçi ve matematikçiler tarafından oluşturulmaya çalışılan histerezis model teorileridir. Manyetik malzemelerdeki Foucault kayıpları, histerezis kayıpları ve doyma etkilerini içinde barındıran lineer olmayan bu doğal manyetik olay, on yıllardır birçok araştırmacının ilgisini çekmeye devam etmektedir. Tanımlanmaya çalışılan etki ayrıca Foucault kayıplarının frekansa bağımlılığını da içermelidir. Bu modelleme çalışmalarının çoğunda ise, kötü doğruluk yakınsaması ve çözüm karmaşıklığı sonuca gitmede bir engel oluşturmaktadır. Bu çalışmaların başlıcalarına aşağıda değinilmiştir.

Manyetik histerezisin modeller ile tanımlanması yönünde; Preisach ve Jiles-Atherton modelleri olmak üzere iki ana teori bulunmaktadır [5].

Klasik Preisach histerezis modeli, 1935'te F. Preisach tarafından ortaya konulmuştur. Teori 1970'te Krasnoselski tarafından matematik ayrıştırma teknikleri ile genelleştirilmiş, fakat fiziksel çıkış noktasından uzaklaştırılmıştır. Teori daha sonra 1991'de I.D. Mayergoyz tarafından sadeleştirilip iyi bir şekilde tanımlanmıştır. Klasik Preisach histerezis modelinde, her biri dikdörtgen şeklinde histerezis karakteristiğine sahip sonsuz sayıda röle operatörü bulunmaktadır. Bu operatörlerin süperpozisyonu yapılmış, yerel hafıza ve hafıza silinmesi gibi özellikler eklenmiştir. Teori günümüze kadar birçok eklenti geçirmiş olup, bu konudaki çalışmalar hala sürmektedir. Teori; çok sayıda (teorik olarak sonsuz) histerezis operatörünün getirdiği bilgisayar hafıza sorunları, çok fazla hesap yükü, yakınsama sorunları ve manyetik malzemelerin tanımlanma güçlükleri sebebiyle çoğu bilim adamı için hala çekici değildir [6, 7].

Üzerinde çok araştırma yapılan diğer bir histerezis modeli de Jiles-Atherton'a aittir [8]. Bu model; daha az işlem yükü gerektirmekte olup, Spice ve CAD programlarına eklenmiştir. Jiles-Atherton modeli manyetik domenlerde oluşan; bükülmeler, gerilmeler ve geçişmeler gibi domen duvarı hareketlerini modelleme esasına dayanmaktadır. Model; histerik olmayan bir mıknatıslanma eğrisi üzerine, malzemenin domen duvarlarında oluşan sıkışma etkilerinin eklenmesi suretiyle oluşturulur. Bu sıkışmalar sonucunda oluşan empedans değişimleri ile, gerçek lineer olmayan malzemelerde görülen; ilk mıknatıslanma eğrisi, doyma, koerzivite, remanans ve histerezis kayıpları modellenir. Model histerezis etkisinin fiziksel doğasını modelleme açısından başarılı bir adım olmakla beraber, tanımında bulunan; termal enerji, domen esneme, domen anizotropi vb parametrelerin belirlenmesinin zorluğu nedeniyle gerçek sonuçlardan uzaklaşmaktadır. Zira bu parametreler üretici kataloglarında da bulunmamaktadır. Ayrıca bu parametreler ürün serisine ve hatta ürünün işlenmesine bile bağımlıdır.

Preisach [6] ve Jiles-Atherton [8] histerezis modelleri hala geliştirilmekte olup, hali hazırda bir çok çeşitlemeleri bulunmaktadır [7].

Farklı bir uygulama da yapay sinir ağı ile gerçekleştirilmiştir. Yapay sinir ağlarının lineer olmayan fonksiyonlardaki kestirim yeteneğinin iyi olduğu bilinmekteyse de; lineer olmayan doyma, histerezis etkisi, permeabilitenin frekans bağımlılığı gibi durumlarda genel çözümler üretip üretemeyeceği yeterince araştırılmamıştır [9].

Birçok diğer araştırmacı da, karmaşık histerezis modelleri yerine, araştırmalarına sinüsoidal endüksiyonlarda oldukça iyi sonuçlar veren 1.1. ve 1.2 ifadelerini başlangıç noktası olarak almışlardır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

[10] 'de Mergen, yarı kare dalga ve PWM (darbe genişlik modülasyonu) dalgalarının oluşturduğu Foucault ve histerezis kayıplarını, saf sinüs dalgasında oluşacak değerler ile teorik olarak karşılaştırmıştır. Yöntem olarak, 1.1 ve 1.2 ifadelerinde verilen Steinmetz ve Richter bağıntıları esas alınarak, PWM dalgasının darbe doluluk oranının değişimi ile kayıplarda oluşan değişimler hesaplanmış ve karşılaştırılmıştır. Çalışma; sabit darbe genişlikli belirli PWM dalgalarını kapsamaktadır. Kayıplar asenkron motor için incelenmiş olsa da, diğer demir çekirdekli makineler içinde benzer yaklaşımlar geçerlilik taşımaktadır.

[11] 'de Kaczmarek, [10]'a benzer olarak demir kayıplarını; üçgen modülasyonlu PWM dalgası uygulanmış asenkron motor ve test transformatörü için, periyod içindeki toplam darbe genişliği cinsinden ifade etmiştir. Kaczmarek, sinüsoidal besleme durumundaki kayıp bileşenlerini 1.1 ve 1.2 ifadelerinde verilen Steinmetz ve Richter bağıntıları ile hesaplamıştır. Makale deneysel çalışma ile desteklenmiş, fakat karşılaşılan ufak minör çevrimler hesap dışı bırakılmıştır.

[12] 'de Lin, harmonikli besleme gerilimlerinde performans ve kayıp analizi için, lineer çalışma bölgesinde Foucault kayıplarının süperpozisyonun yapılabilirliğini gösterip, zaman harmonik eşdeğer devre yaklaşımını kullanmıştır. Fakat Lin, histerezis kayıplarının süperpozisyonunu yaptığı için eleştiri almıştır. Yine hesaplarda Steinmetz ve Richter ifadeleri kullanılmıştır.

[13] 'de Boglietti, klasik Preisach histerezis modelini PWM gerilim dalgası uygulanmış deney transformatörü için toplam demir kayıplarını incelemiştir.

Manyetik alan analizinde Preisach algoritmali sonlu elemanlar yöntemi kullanılmış olup, %10 hatalı sonuçlar elde etmiştir. Bu çalışmada, Boglietti tarafında oluşturulan endüksiyon değişimine bağımlı yeni bir Preisach modeli kullanılmış olup, geliştirilmesi gerekliliği belirtilmiştir.

[14] ‘de Ramin, sinüsoidal ve üçgen endüksiyon dalga şekillerinde demir kayıplarının değişimini, 3.2 Hz – 20 kHz frekans aralığı için deneysel olarak inceleyerek, Foucault kayıplarının, uygulanan gerilimin şekil faktörüne bağımlı olduğunu göstermiştir. Ramin kayıpları bileşenlere ayırmamış sadece toplam demir kayıplarındaki değişimi incelemiştir.

[15] ‘de Goethe, sinüsoidal gerilim ile beslenmiş ve harmonikli yük ile yüklenmiş transformatörlerde, demir kayıplarının değiştiğini ve kayıpların işletim masraflarına getirdiği artışı incelemiştir. Yük akımı sinüsoidallikten uzaklaştıkça çekirdek kayıplarının arttığını belirtmiştir.

[16] ‘de Reinert, Steinmetz’in 1.1’de verilen eşitliği ele alıp, toplam demir kayıplarını ifade edecek şekilde üstelleri değiştirerek;

$$\overline{P_{fe}} = k \cdot f_{eq}^{\alpha-1} \cdot B_m^\beta \quad [W/kg] \quad (1.3)$$

şeklinde değiştirmiştir. Bu ifadede

$$f_{eq} = \frac{2}{\Delta B^2 \cdot \pi^2} \cdot \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (1.4)$$

eşdeğer frekans olarak tanımlanmıştır. Bu yöneme MSE (Değiştirilmiş Steinmetz Eşitliği) adı verilmiştir. Daha sonra 1.3 ve 1.4 ifadelerinin daha da genelleştirilebilmesi için Li [17]; farklı adaptif katsayılar ve eşdeğer frekanslar hesaplanmıştır. Bu yaklaşıma da GSE (Genelleştirilmiş Steinmetz Eşitliği) adı verilmiştir. Li; hem MSE ve hem de GSE yi kullanarak yaptığı hesaplamalar ile deneysel sonuçları karşılaştırmıştır. Çalışmada, uygulanan gerilimin toplam

harmonik distorsiyonu ile toplam demir kayıplarının değişimi incelenmiş; MSE'nin %57'ye ve GSE'nin de %40 varan hatalar yaptığını belirtmiştir. Li'nin çalışması, bu tezde yapılan inceleme en yakın örnek olmakla beraber, kayıp bileşenlerinin ayrıştırılmaması, minör çevrimler konusundaki yetersizliği ve büyük yöntem hataları açısından farklılık göstermektedir.

[18] 'de Masoum, [12] 'de Lin tarafından verilene benzer bir harmonik eşdeğer devre kullanarak toplam kayıpları hesaplayıp, uygulanan tek harmonik bileşenli gerilimin, %5 ve %20 toplam harmonik distorsiyonu olması durumlarında yük akımının farklı faz açıları için ayrı ayrı hesaplamalar yapmış ve demir kayıplarının deneysel verilere göre %2 ile %20 arasında hatalar tespit etmiştir. Masoum'un çalışmasında sınırlı ve süreksiz de olsa, kayıpların THD_v 'ye göre değerlendirilmesi yönü ile bu tezde yapılan incelemelere benzerlik arz etmektedir.

Bu tezde yapılan incelemeler, yukarıda verilen literatür özeti ile aşağıdaki yönlerden farklılık arz etmektedir:

- Bahsedilen çalışmaların hiçbirinde, demir kayıplarının uygulanan gerilimin toplam harmonik distorsiyonu cinsinden incelemesi yapılmamıştır.
- Bu tezde, herhangi bir temel bileşen frekansı için demir kayıp bileşenleri bilinmesi durumunda, histerezis ve Foucault kayıplarının sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerde alacağı değerler; hem gerilimin toplam harmonik distorsiyonu ve hem de manyetik endüksiyonun toplam harmonik distorsiyonu cinsinden hesaplanmıştır.
- Endüksiyonun türevinin bir periyotta ikiden çok kez işaret değiştirdiği durumlarda ortaya çıkan minör histerezis çevrimlerinin neden olduğu ilave kayıplar, tanımlanan yeni bir katsayı ile hesaba katılmış ve kestirimde yapılan hatalar azaltılmıştır

Bu perspektif ile, tezin 2. bölümünde; sinüsoidal endüksiyonlar için Steinmetz ve Richter'in bağıntıları ile gelenekselleşen histerezis ve Foucault kayıp ifadeleri

tanıtılmış, 3. bölümde; Steinmetz ve Richter'in ifadeleri, sinüsoidal olmayan dalga şekilleri için irdelenerek, harmonikli gerilimleri kapsayacak şekilde değiştirilmiştir. Tezin 4. bölümünde; 3. bölümde elde edilen değiştirilmiş ifadelerin deneysel sınamasının yapılması için gerçekleştirilen deneyler verilmiş; önerilen yöntem ve klasik yöntem ile hesaplanan demir kayıplarında deneysel sonuçlarına göre oluşan hatalar 5. bölümde değerlendirilmektedir. Bölüm 6'da tez çalışmasının sonuçları sıralandıktan sonra, gelecekte konu üzerinde çalışacaklar için fikir verecek tartışma ve öneriler Bölüm 7'de verilmiştir.

BÖLÜM 2. DEMİR KAYIPLARI

2.1. Giriş

Bu bölümde transformatör sacları ve saclarda oluşan kayıplar için kullanılan geleneksel ifadeler hakkında bilgi verilecektir.

2.2. Transformatör Saclarının Özellikleri

Sac çeşitlerini genel olarak incelemeden önce, kaliteye etki eden özellikleri irdelenmek gerekir. Bu sayede manyetik malzemeler ve oluşan kayıplar daha iyi modellenebilecektir.

Genel olarak elektrik makinalarında kullanılan nüveler manyetik olarak yumuşak, ince ve 0.15 ila 1 mm kalınlığında çelik alaşımlı saclardır. Yüksek frekanslarda demir oksitlerden paketlenmiş ferrit nüveler de kullanılmaktadır.

Transformatör sacları imalat işlemlerine göre genel olarak tanecikleri yönlendirilmiş ve tanecikleri yönlendirilmemiş olarak iki sınıfa ayrılır [19].

2.2.1. Tanecikleri yönlendirilmiş çelik alaşımlar

Tanecikleri yönlendirilmiş saclar manyetik olarak anizotropik olup, haddelenme yönünde üstün manyetik özellikler gösterirler. Bu üstün özellikler; kimyasal birleşim, haddelenme şekli ve uygulanan ısı işlemler sonucunda elde edilmektedir. Bazı durumlarda istenilen özelliklerin elde edilebilmesi için, manyetik alan altında tavlama ve lazer ile yüzey işlem gibi işlemlerde uygulanmaktadır. Tanecikleri

yönlendirilmiş saclar fiyat olarak pahalı olup genellikle toroid tipteki transformatörlerde kullanılmaktadır.

2.2.2. Tanecikleri yönlendirilmemiş çelik alaşımlar

Bu tip saclar genel olarak izotropik yapıda olup, tüm yönlerde aynı mekanik ve manyetik özellikler gösterirler. Farklı işleme şekillerinde imal edilmiş tipleri vardır. Yarı işlenmiş çelik olarak adlandırılan tipi silikonsuz veya silikonlu alaşımlı olabilmektedir. Yüksek silikon alaşımlı (%6.5'a kadar) çelikler sert ve gevrek yapıda olup, geleneksel imalat teknikleri ile işlenemez özelliktedir. Bu tip saclar silikon yüzdesi arttıkça imalat aşamalarında tel erozyon veya lazer kesme yöntemleri gerektirmektedir.

Yarı işlenmiş çeliğin preste izlenmesi kolay olmakla beraber, tavlama, dekarbürizasyon ve menevişleme gibi metalurjik işlemler gerektirmektedir.

Tavlama işlemi çeliğin yapısı ve bileşimine etki eder. Diğer taraftan diğer bir metalurjik işlem olan menevişleme işlemi sac yüzeyinde demir oksit oluşturarak saclar arasında yalıtkan tabaka oluşturulmasını sağlar.

2.3. Saclarda Oluşan Kayıpların Azaltılma Yolları

Elektrik makinalarının verimine etkiyen temel etken kayıplardır. Kayıpların azaltılması doğal olarak verimin artması anlamına gelmektedir.

Elektrik makinalarında kullanılan saclarda oluşan demir kayıpları genellikle aşağıdaki şekillerde azaltılır:

- Sac kalınlığının azaltılması (Foucault kayıpları)
- Silikon yüzdesinin artırılmasıyla sac özgül direncinin artırılması (Foucault kayıpları)
- Taneciklerin küçültülmesi (Foucault kayıpları)
- Sac malzemesinin saflığının artırılması (Histerezis kayıpları)

- İç gerilmeler ve yüzey gerilmelerinin azaltılması (Histerezis ve Foucault kayıpları)

Bunların yanında demir kayıplarının, uygulanan besleme geriliminin dalga şekline bağlı olduğu bilinmektedir [10].

Sac üretici firmaların kataloglarından görülebileceği üzere, günümüzde birim ağırlık için özgül demir kayıpları 1 ila 10 W/kg arasında değerler almaktadır. Bu, nüve malzemesinin seçiminin elektrik makinalarında verime etkileyen önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

Tabiki bu bir mühendislik seçimidir. Zira düşük kayıplı baz manyetik malzemelerin küçük permeabilite gösterebileceği, dolayısıyla daha büyük mıknatıslama akımı ve bakır kaybı getirecektir.

Sac üreticileri, makine saclarının manyetik davranışlarının modellenenebilmesi için, DC BH eğrisi, 50 ya da 60 Hz frekansta farklı endüksiyonlar için özgül demir kayıpları, özgül direnç, yığılma faktörü gibi bilgileri sağlamaktadırlar [4, 19].

2.4. Transformatör Sacında Oluşan Kayıplar

Genel olarak bu kayıplar demir nüve ve alternatif alanın olduğu tüm makinalarda oluşmakta olup; histerezis, Foucault ve ilave kayıplar olmak üzere üç bileşene sahiptir.

2.4.1. Foucault kayıpları

Foucault Kayıpları, alternatif alanın demir nüve içinde endüklediği EMK'nin neden olduğu girdap akımları tarafından oluşturulur. Girdap (Foucault) akımlarının iki ana etkisi vardır:

Esas Alanı Zayıflatma:

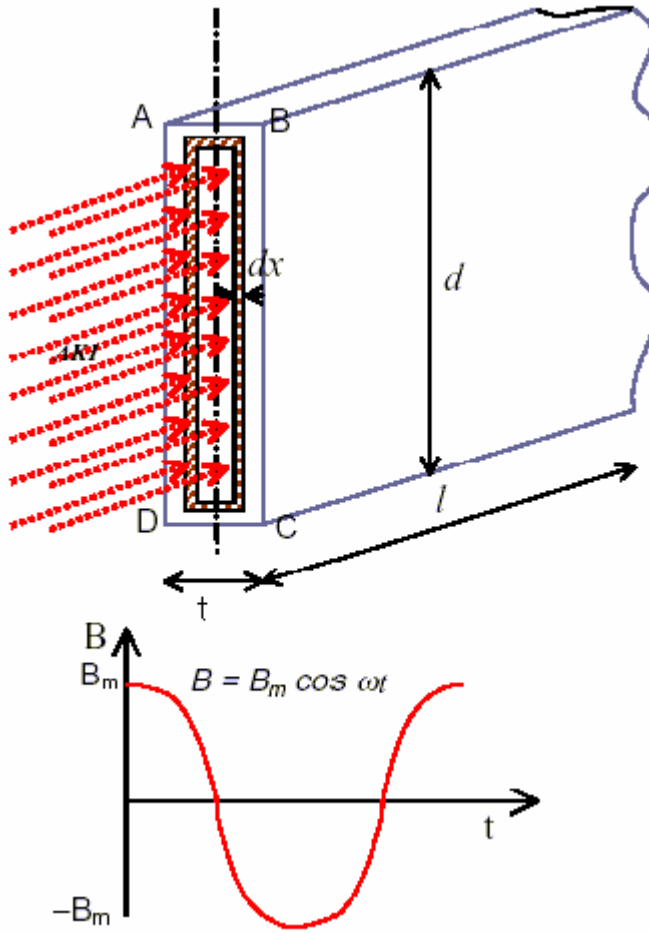
Girdap akımlarının ürettiği MMK, esas alanı zıt yönde akı üretilmesine neden olur. Bu zıt akı malzemenin ortasında maksimum ve yüzeyde sıfır olacak şekilde

dağılır. Bunun sonucunda esas akı malzemenin yüzeyinde yığılır ve etkin endüksiyon azalır.

Foucault kayıpları:

Foucault akımları; manyetik malzemede etkisini ısı olarak gösteren elektriksel kayıplara neden olur.

2.4.2. Sinüzoidal uyarmada Foucault kayıplarının bulunması



Şekil 2.1 Trafo sacı ve Foucault akımları

Şekil 2.1’de görülen t kalınlığındaki ABCD kesidinde

$$B(t) = B_m \cdot \cos \omega t \quad (2.1)$$

şeklinde bir endüksiyon oluştuğu varsayılırsa, sac yüzeyinden geçen esas akıya zıt yönde tepki akıları oluşturacak girdap akımları oluşacaktır.

Şekil 2.1'deki gibi sac boyunca merkezden x uzaklıkta iken bir girdap akımı yörüngesi ele alalım. Bu elementer akım yolunun kalınlığı dx olsun. Sacın merkezinden x uzaklıktaki akım yörüngesi tarafından kaplanan alan;

$$A = 2x \cdot d \quad (2.2)$$

olacaktır.

Faraday yasası gereği akı yolunda endüklenen emk;

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -A \frac{dB}{dt} \quad (2.3)$$

$$e(t) = 2 \cdot x \cdot d \cdot \omega \cdot B_m \cdot \sin \omega t \quad (2.4)$$

bunun efektif değeri;

$$e = 4 \cdot \pi \cdot x \cdot d \cdot f \cdot \frac{B_m}{\sqrt{2}} \text{ yada } e = 4 \cdot \pi \cdot x \cdot d \cdot f \cdot B \quad (2.5)$$

olacaktır.

Sac kalınlığı ihmal edilebilir olduğundan, herbir Foucault akımı yörüngesinin uzunluğu sabit ve $2d$ ' ye eşit kabul edilebilir. Akım akan elementer yolun kesidi ise $\ell \cdot dx$ 'dir. Dolayısıyla Foucault akım yolunun direnci;

$$r = \frac{\rho \cdot 2 \cdot d}{\ell \cdot dx} \quad (2.6)$$

olarak yazılabilir. Burada ρ sacın özgül direncidir. Elementer Foucault akımı şeridindeki güç;

$$p_f = \frac{e^2}{r} = \frac{(4 \cdot \pi \cdot x \cdot d \cdot f \cdot B)^2}{\frac{\rho \cdot 2 \cdot d}{\ell \cdot dx}}$$

$$P_f = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot x^2 \cdot d \cdot \ell \cdot dx}{\rho} \quad (2.7)$$

t kalınlığındaki saca oluşan Foucault kaybı;

$$P_f = \int_0^{t/2} \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot B \cdot f^2 \cdot x^2 \cdot d \cdot \ell}{\rho} dx = \frac{2}{3} \cdot \frac{B^2 \cdot f^2 \cdot t^3 \cdot d \cdot \ell}{\rho} \quad (2.8)$$

olup, burada $d \cdot \ell \cdot t$ sacın hacmidir. Böylece Foucault kayıpları birim hacim için;

$$\overline{P}_f = \frac{2}{3} \cdot \frac{B^2 \cdot f^2 \cdot t^2}{\rho} \quad [\text{W/m}^3] \quad (2.9)$$

olarak elde edilir. Malzemenin γ yoğunluğuna sahip olduğu varsayılırsa, Foucault kayıpları;

$$\overline{P}_f = \frac{2}{3 \cdot \rho \cdot \gamma} \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (2.10)$$

olarak birim kilogram sac için verilebilir. Literatürde çoğu kez

$$\sigma_f = \frac{2}{3 \cdot \rho \cdot \gamma} \quad (2.11)$$

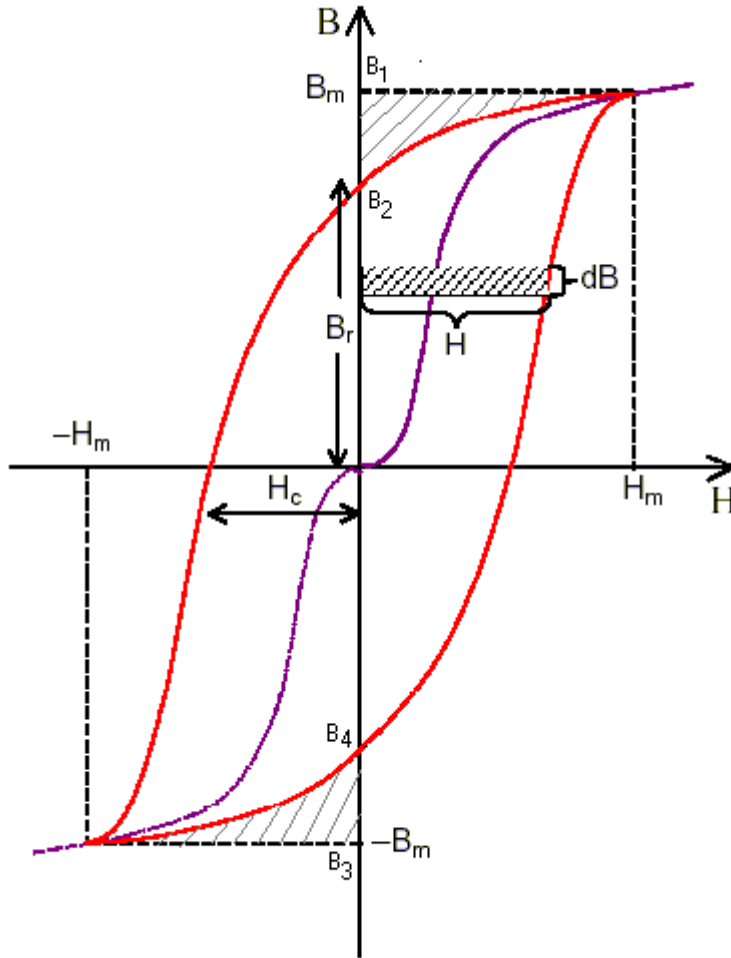
tanımlanarak, Richter'in ifade biçiminde, sinüsoidal uyarma için Foucault kayıpları ifadesi;

$$\overline{P_f} = \sigma_f \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (2.12)$$

olarak verilmektedir. Büyüklükler SI birim sisteminde olup, B; sinüsoidal endüksiyonun efektif değeridir [3, 4, 10, 20].

2.4.3. Histerezis Kayıpları

Manyetik malzemelerdeki lineer olmayan mıknatıslanma karakteristikleri ve mıknatıslama ile oluşturulan mıknatıslamanın silinmesi için gereken mmk'lerin farklı oluşu sebebiyle histerezis etkisi oluşmaktadır. Bu etki Şekil 2.2'de görülmektedir.



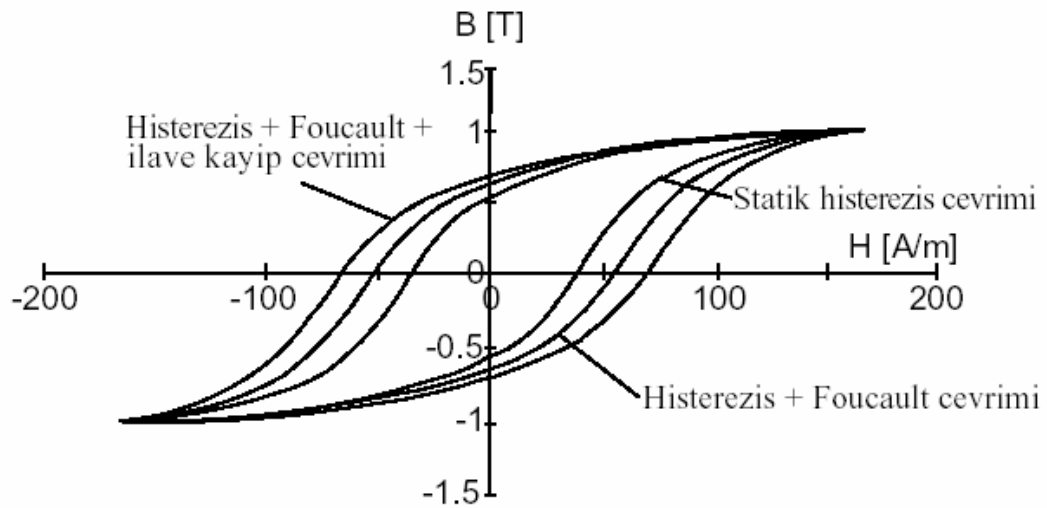
Şekil 2.2 Histerezis çevrimi

Aşağıda gösterileceği üzere, statik mıknatıslamada alan histerezis kaybını vermektedir. Bu kayıp güç; manyetik domenlerin yönlendirilmesi ve döndürülmesi esnasında domen duvarlarındaki sürtünmeden dolayı ısıya dönüşmektedir.

2.4.1 kısmında elde edildiği üzere Foucault kayıpları frekansın karesi ile orantılıdır. Dolayısı ile frekans doğru akıma doğru azaltıldıkça Foucault kayıpları sıfıra gidecektir. Bu özel durumda elde edilen mıknatıslanma eğrisine statik mıknatıslanma ya da statik histerezis eğrisi denir. Bu durumda histerezis çevriminin alanı saf histerezis kaybını vermektedir.

Şayet manyetik nüveye alternatif alan uygulanırsa, ortaya çıkan histerezis çevrimi dinamik mıknatıslanma eğrisi ya da dinamik histerezis eğrisi adını alır. B_m sabit kalsa da, frekans arttıkça artan Foucault ve ilave kayıplar nedeniyle histerezis çevrim alanı büyüyerek sağa doğru yatıklaşır. Belirli bir frekansın üzerinde Foucault kayıplarının baskınlaşması ile B_m ile H_m değerleri arasında faz farkı oluşur ve çevrim eliptikleşir.

Özetle, dinamik histerezis çevrimi alanı bir çevrim için toplam demir kayıpları enerjisini vermektedir.



Şekil 2.3 Statik ve dinamik histerezis çevrimleri

Bu bilgiler ışığında frekansın Foucault kayıplarını ihmal edebilecek kadar küçük olduğunu kabul ederek ($f \approx 0$), bir histerezis çevriminde kaybolan enerji hesaplanır. Manyetik devreye verilen enerji;

$$W = \int_0^T e \cdot i \cdot dt \quad (2.13)$$

Faraday yasası;

$$e = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.14)$$

Amper yasası;

$$H = \frac{N \cdot i}{\ell} \quad (2.15)$$

ve Gauss yasası;

$$\phi = B \cdot A \quad (2.16)$$

ifadeleri yerine yazılırsa,

$$W = \int_0^T N \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \cdot \frac{H \cdot \ell}{N} dt \quad (2.16)$$

$$W = A \cdot \ell \cdot \int_0^B H dB$$

olur. İntegral terimini 1 tam çevrim için aşağıdaki gibi bileşenlere ayırabiliriz:

$$\int_0^B H dB = \int_0^{B_1} H dB - \int_{B_1}^{B_2} H dB + \int_{B_2}^0 H dB + \int_0^{B_3} H dB - \int_{B_3}^{B_4} H dB + \int_{B_4}^0 H dB \quad (2.17)$$

Bu ifadedeki pozitif terimler bobine verilen enerjiyi ve negatif terimlerde bobinden geri alınan enerjiyi verir (Şekil 2.2). Sonuç olarak çevrim içinde kalan alan, yani 1 çevrim için manyetik devreye verilen kayıp enerji hesaplanmış olur. Aşağıda görülen

$$\int_0^B H dB$$

terimi çevrim alanını verir. $A \cdot \ell$ çarpanı manyetik devrenin hacmini verir (V). 1 saniyede yapılan enerji güce eşit olacağından ve histerezis çevrimi 1 saniyede f kez tekrarlanacağından histerezis kaybı ifadesi;

$$P_h = V \cdot f \cdot \int H dB \quad (2.18)$$

olacaktır.

2.18 bağıntısı ile hesap yapmak uzun hesap yükü getirdiğinden, eğri uydurma teknikleri ile Steinmetz'in elde ettiği;

$$P_h = h \cdot V \cdot f \cdot B_m^x \quad [W] \quad (2.19)$$

ifadesinin uygulanması oldukça pratik olup, onyıllardır kullanılmaktadır. Burada h ; ve γ malzemenin histerezis kayıp katsayısı ve özgül ağırlığı ise 2.19 ifadesi;

$$\frac{P_h}{V \cdot \gamma} = \frac{h}{\gamma} \cdot f \cdot B_m^x \quad (2.20)$$

şeklinde birim ağırlık için yazılabilir. Burada;

$$\sigma_h = \frac{h}{\gamma} \quad (2.21)$$

olarak tanımlanırsa birim ağırlık başına özgül histerezis kaybı

$$\overline{P}_h = \sigma_h \cdot f \cdot B_m^x \quad [W/kg] \quad (2.22)$$

olarak elde edilir. Burada σ_h ; malzeme yoğunluğu, saflığı, tanecik büyüklüğü ve gerilmelerine bağlı bir katsayı olup; alaşımlı çelik için 7000, dökme çelik için 750 ila 3000, dökme demir için 2760 ila 4000, yumuşak demir için 500, % 0.2 silikonlu çelik sac için 530 ve % 4.8 silikonlu çelik sac için ise 191 gibi değerler alır.

2.22 ifadesindeki x üsteli Steinmetz üsteli olarak anılıp; 1.5 ila 2.5 arasında değerler alır. Bu üstel malzemeye göre ve mıknatıslanma eğrisindeki çalışma noktasına göre değişir. x üsteli genellikle 1.6 değeri ile 0.2 ila 1.2 Tesla akı

yoğunlukları ve 10 – 500 Hz frekans aralığında % ± 10 doğrulukla sonuçlar vermektedir [19].

2.22 ifadesi; minör çevrimlerin oluşmadığı, sinüsoidal uyarmalı manyetik devrelerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.4. İlave kayıplar

İri tanecikli malzemelerde diğer bir kayıp mekanizması ortaya çıkmaktadır. Dönen duvarları genişledikçe Foucault kayıp yoğunluğu bölgesel düzensizlikler göstermekte ve bunun sonucunda da toplam Foucault kayıplarında ilave bir artış oluşmaktadır. Mekanizma itibariyle iletkenlerdeki deri olayı etkisine benzemektedir. İlave kayıplar,

$$P_a = k_a \cdot V \cdot (f \cdot B_m)^{1.5} \quad [W] \quad (2.23)$$

olarak verilmektedir. Burada k_a ampirik bir katsayıdır. İlave kayıplar özellikle kendini lazer ile yüzey işlem yapılmamış, tanecikleri yönlendirilmiş saclarda güç frekanslarının üstü değerlerde kendini hissettirmektedir. Neticesinde B ile H arasında faz farkı oluşturmakta ve BH çevrimini eliptikleştirmektedir.

2.4.5. Demir kayıplarının toplamı

Yukarıdaki başlıklarda mekanizmaları açıklanan Foucault kayıpları, histerezis kayıpları ve ilave kayıplarının toplamı transformatör saclarındaki toplam kayıpları oluşturur ve demir kaybı olarak anılır. Histerezis, Foucault ve ilave kayıplarının hepsi dinamik histerezis çevriminin genişlemesine neden olmaktadır (Şekil 2.3).

$$P_{fe} = P_f + P_h + P_a \quad (2.24)$$

1 saniyede kaplanan histerezis alanı toplam demir kayıplarını verir. Doğrudan belirlenmesi zordur. Bu amaçla, 2.12 ve 2.22 'te verilen Richter ve Steinmetz

bağıntıları ya da bu bağıntıları esas alan çeşitli türev bağıntılar ile hızlı çözümler aranmaktadır.

Özellikle histerezis ve ilave kayıplarına ilişkin bağıntılar, sinüsoidal uyarma şartlarında yaklaşık $\% \pm 10$ hata aralığında, kolay çözümler sunan ampirik ifadelerdir. Oysa Foucault kayıplarına ilişkin 2.12 ifadesi histerezis ve ilave kayıp ifadelerine göre daha doğru sonuçlar veren analitik bir ifadedir [3, 4, 19, 20].

BÖLÜM 3. SİNÜSOİDAL OLMAYAN BESLEME GERİLİMLERİNDE DEMİR KAYIPLARININ HESABI

3.1. Giriş

Bu bölümde sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde Foucault ve Histerezis kayıplarının hesabı için klasik Steinmetz bağıntılarından yola çıkarak, harmonikli durumlarda oluşan yeni kayıp bileşenlerini içerecek şekilde elde edilen yeni bağıntılar gösterilecektir.

3.2. Kabuller

Geniş ve yer yer lineer olmayan çözüm uzayında, yaygın çalışma noktalarını kapsayacak bağıntıların geliştirilebilmesi için bazı kabullerin yapılması uygun olacaktır. Tezin diğer bölümlerinde de kullanılacak olan kabuller aşağıda verilmiştir:

- Kaçak akılar demir kayıpları üzerine önemli etkiye neden olmadıklarından, demir kayıplarının incelenmesinde ihmal edilebilirler.
- Transformatörler genellikle nominal gerilim civarında çalıştıklarından manyetik olarak doyma bölgesinin altında çalışırlar.
- Doymamış bölgede çalışan bir transformatörde, Faraday yasasını esas alan Foucault kayıplarının harmonik bileşenler için toplamsallığı vardır, süperpozisyon yapılabilir [12].
- Transformatör sürekli rejimde çalışmaktadır.
- Transformatör primer empedansının boşa çalışma şartlarında oluşturacağı gerilim düşümü çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.

- Transformatör sacında doğru alan bileşeni bulunmamaktadır, uygulanan gerilimde doğru bileşen yoktur.
- Transformatör güç frekanslarında çalışma olup, en yüksek harmonik bileşen 450 Hz frekanslıdır.

3.3. Gerilim – Akı İlişkisi

Transformatör nüvesindeki demir kayıplarının, sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerindeki değişiminin belirlenmesi için, devreye

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \cdot \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) \quad (3.1)$$

şeklinde, sonsuz sayıda Fourier bileşeninden oluşan bir gerilim uygulanıp, bobin iç direnci ve kaçak reaktansının küçük olduğu ve doymanın olmadığı kabulü ile bobinde endüklenen emk;

$$e(t) \cong v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_{nm} \cdot \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Bu yaklaşım, demir çekirdek içindeki manyetik akıyı Faraday yasası gereği şebeke gerilimine sıkıca bağlar:

$$v(t) \cong e(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3.3)$$

$$\phi(t) = \frac{1}{N} \cdot \int v(t) dt \quad (3.4)$$

3.4 İfadesi nüvede oluşan akının uygulanan gerilimin dalga şekli ile ilintisini açıkça göstermektedir. 3.1 İfadesi 3.4'te yerine yazılıp integrali alınırsa;

$$\phi(t) = \frac{1}{\omega_1 \cdot N} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{nm}}{n} \cdot \sin(n\omega_1 t - \phi_n) \quad (3.5)$$

elde edilir. N; mıknatıslanmayı oluşturan bobinin sarım sayısıdır.

Toplam akı harmonik bileşenleri ile efektif değer olarak ifade edilirse;

$$\phi' = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \phi_n^2} \quad (3.6)$$

elde edilir. Burada ϕ' ; harmonikli manyetik akının efektif değerini, ϕ_n ; akının n. harmonik bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

olur. Aynı yaklaşım gerilim için uygulanırsa;

$$V' = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (3.7)$$

olur. Burada V; harmonikli besleme geriliminin efektif değerini, V_n ise besleme geriliminin n. harmonik bileşeninin efektif değerini göstermektedir.

Akının n. harmonik bileşeninin, gerilimin n. harmoniği ile ilişkisi;

$$\phi_n = \frac{1}{n \cdot \omega_1 \cdot N} \cdot V_n \quad (3.8)$$

olup, 3.5 bağıntısının kullanımı ile efektif akı gerilimin harmonik bileşenleri cinsinden;

$$\phi = \frac{1}{\omega_1 \cdot N} \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_n^2}{n^2}} \quad (3.9)$$

olarak elde edilir.

3.4. Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Foucault Kayıplarının Hesaplanması

Bölüm 2.4.2’de saf sinüsoidal besleme gerilimi için elde edilen;

$$\overline{P_f} = \sigma_f \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad [W/kg] \quad (3.10)$$

ifadesinde

$$k_f = \sigma_f \cdot t^2 / A^2 \quad (3.11)$$

tanımıyla B yerine ϕ cinsinden yazılarak,

$$\overline{P_f} = k_f \cdot f^2 \cdot \phi^2 \quad (3.12)$$

ifadesi elde edilir. Burada ϕ ; akının efektif değeridir.

Saf sinüsoidal besleme geriliminde doymamış bir demir çekirdek için elde edilen 3.12 ifadesi, Bölüm 2.4.2 ‘de belirtildiği üzere Faraday yasası gereği Foucault akımlarının endüklenmesine dayanmaktadır. Lineer çalışma bölgesinde Faraday’ın türev operatörünün toplamsallığından yola çıkıldığında, 3.12 bağıntısında ϕ yerine, harmonikli gerilim uygulandığında oluşacak harmonikli ϕ ’nin bileşenleri cinsinden yazılabilir. Bunun sonucunda farklı harmonikler için Foucault kayıpları;

$$P_{fn} = f(\phi_n) \quad (3.13)$$

yada gerilim cinsinden;

$$P_{fn} = g(V_n) \quad (3.14)$$

olur. Güçlerin toplamsallığı ilkesi ile;

$$P_f = \sum_{n=1}^{\infty} P_{fn} \quad (3.15)$$

yazılabilir. n . harmoniğin frekansı;

$$f_n = n \cdot f_1 \quad (3.16)$$

yazılabilir. 3.6, 3.12 ve 3.16 bağıntılarından Foucault kayıpları harmonik akı bileşenleri cinsinden

$$\overline{P_f'} = k_f \cdot f_1^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot \phi_n^2 \quad (3.17)$$

elde edilmiş olur.

Uygulanan gerilimin saf sinüs dalgası ve farklı frekanslı sinüslerden oluşan harmonikli bir dalga olması durumunda Foucault kayıplarının değişiminin belirlenmesi için her iki gerilim dalgasının temel bileşen efektif değerlerinin aynı olduğu;

$$V_1' = V_1 \quad (3.18)$$

kabul edilsin. Üs (') işareti harmonikli dalgaya ilişkin olmayı göstermektedir. 3.4 bağıntısı gereği;

$$\phi_1' = \phi_1 \quad (3.19)$$

olacaktır. 3.8 ifadesi 3.17'de yerine konursa;

$$\overline{P_f'} = k_f \cdot f_1^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot \left(\frac{V_n}{n \cdot \omega_1} \right)^2 \quad (3.20)$$

olur. $\overline{P_f'}$ harmonikli besleme gerilimdeki birim ağırlık başına Foucault kaybıdır. 3.20 ifadesi sadeleştirildiğinde harmonikli gerilim dalgası için Foucault kayıpları;

$$\overline{P_f'} = \frac{k_f}{4 \cdot \pi^2} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \quad (3.21a)$$

$$\overline{P_f'} = \frac{k_f}{4 \cdot \pi^2} \cdot V'^2 \quad (3.21b)$$

olur. Saf sinüsoidal gerilimde Foucault kayıpları ise;

$$\overline{P_f} = \frac{k_f}{4 \cdot \pi^2} \cdot V_1^2 \quad (3.22)$$

olur. 3.7 ifadesinden; harmonikli gerilimin efektif değeri;

$$V' = \sqrt{V_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (3.23)$$

yazılabilir. P_f' / P_f oranını bulmak için 3.21b ve 3.22 bağıntıları oranlanırsa;

$$\frac{P_f'}{P_f} = \frac{V_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}$$

ve

$$\frac{P_f'}{P_f} = 1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2} \quad (3.24)$$

elde edilir. 3.24 ifadesindeki 2. terim

$$THD_{V'}^2 = \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2} \quad (3.25)$$

harmonikli gerilimin temel bileşene göre toplam harmonik distorsiyonunun karesini vermektedir [21].

3.24 ve 3.25 ifadelerinden; uygulanan gerilimin temel bileşenin genliği aynı kalmak şartı ile, dalga şeklinin bozulması durumunda oluşacak Foucault kayıplarının saf sinüsoidal gerilime göre değişme oranı;

$$\frac{P_f'}{P_f} = 1 + THD_V^2, \quad (3.26)$$

olarak elde edilir.

Şayet harmonikli gerilimin temel bileşen genliği saf sinüs dalgasının genliğinden farklı ve α katı ise;

$$V_1' = \alpha \cdot V_1 \quad (3.27)$$

3.26 ifadesi;

$$\frac{P_f'}{P_f} = (\alpha^2 + THD_V^2) \quad (3.28)$$

şeklinde genelleşir. 3.28 ifadesi harmonikli gerilimlerde Foucault kayıplarının değişiminin kolayca yorumlanabilmesini sağlamaktadır. Örneğin; temel bileşen genliği aynı kalmak şartı ile gerilim %100 bozulmuş olsa, Foucault kayıpları bozulmamış duruma göre iki kat artar.

Foucault kayıplarının harmonikli besleme gerilimlerinde değişme oranı B cinsinden de bulunabilir. Bu amaçla şekil faktörü tanımı olan;

$$k_s = \text{Fonksiyonun yarı periyod efektif değeri} / \text{Fonksiyonun yarı periyod ortalama değeri} \quad (3.29)$$

ifadesi kullanıldığında, harmonikli dalga için şekil faktörü;

$$k_s' = \frac{V_1'}{V_{yo}} \quad (3.30)$$

olarak verilir. Gerilime ilişkin parametreler, Faraday yasası yardımıyla endüksiyon cinsinden ifade edilirse;

$$k_s' = \frac{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \int_0^{2\pi} \left(\sum_{n=1}^{\infty} n \cdot B_{nm} \cdot \cos(n \cdot x + \theta_n) \right)^2 dx}}{4 \cdot B_m} \quad (3.31)$$

olacaktır [4]. İntegral içindeki seri toplamının kare alma işleminde;

$$y \cdot z \cdot B_{ym} \cdot B_{zm} \cdot \cos(y \cdot x + \theta_y) \cdot \cos(z \cdot x + \theta_z) \quad (3.32)$$

şeklinde terimler oluşur. Burada y ve z sayıları 1 ile ∞ arasında herhangi iki tam sayıdır. Şayet $y=z=n>0$ ise, 3.31 integralinin değeri;

$$\pi \cdot n^2 \cdot B_{nm}^2 \quad (3.33)$$

olur. Zira;

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} \cos(y \cdot x) \cdot \cos(z \cdot x) dx &= \pi \quad ; \quad z=y \text{ için} \\ \int_0^{2\pi} \cos(y \cdot x) \cdot \cos(z \cdot x) dx &= 0 \quad ; \quad z \neq y \text{ için} \end{aligned} \quad (3.34a,b)$$

dır. Ayrıca, $y \neq z$ olan durumlarda da integral sıfır verir. Böylelikle, harmonikli gerilim için şekil faktörü;

$$k_s' = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot B_{nm}^2}}{B_m'} \quad (3.35)$$

olur.

Saf sinüs dalgası için şekil faktörü;

$$k_s = \frac{V}{V_{yo}} = \frac{V_m / \sqrt{2}}{2 \cdot V_m / \pi} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (3.36)$$

değerini alır.

Şekil faktörleri oranının karesi alındığında maksimum endüksiyon cinsinden;

$$\left(\frac{k'_s}{k_s} \right)^2 = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} n^2 \cdot B_{nm}^2}{B_m'^2} \quad (3.37)$$

bulunur.

Bu ifadedeki toplam içindeki terim; 3.17 ifadesindeki toplam terimi ile benzerdir ve aralarında dönüşüm yapılabilir. Dönüşüm için 3.17 ifadesi $\frac{A^2}{2}$ ile çarpılmalıdır.

Böylelikle 3.17 ifadesi harmonikli endüksiyonun maksimum değeri için güncellenmiş olur:

$$\overline{P_f'} = k_f \cdot \frac{A^2}{2} \cdot f_1^2 \cdot \left(\frac{k'_s}{k_s} \right)^2 \cdot B_m'^2 \quad (3.38)$$

B_m' harmonikli endüksiyonun maksimum değeridir.

Benzer yaklaşım saf sinüsoidal besleme için de uygulanırsa;

$$\overline{P_f} = k_f \cdot \frac{A^2}{2} \cdot f_1^2 \cdot B_m^2 \quad (3.39)$$

elde edilir.

Harmonikli durumdaki Foucault kayıplarının, saf sinüsoidal gerilimdeki Foucault kayıplarına göre değişme oranının bulmak için endüksiyonların temel bileşenlerinin eşitliği kabul edilerek 3.38 ifadesini 3.39'a oranlarsak;

$$\frac{P_f'}{P_f} = \left(\frac{k_s'}{k_s} \right)^2 \cdot \frac{B_m'^2}{B_m^2} \quad (3.40)$$

elde edilir.

Enerji kalitesi literatüründe kullanılan tepe faktörü tanımı; harmonikli endüksiyon için:

$$k_c' = \frac{B_m'}{B'} \quad (3.41)$$

maksimum değer in efektif değere oranı olarak verilir [21]. Tepe faktörünün değeri $k_c \geq 1$ 'dir. Bu tepe faktörü tanımları 3.40 ifadesinde değerlendirilirse;

$$\frac{B_m'^2}{B_m^2} = \left(\frac{k_c'}{k_c} \right)^2 \cdot \left(\frac{B'}{B} \right)^2 \quad (3.42)$$

ve $\left(\frac{B'}{B} \right)^2$ terimi; harmonikli endüksiyonun temel bileşen genliğinin, saf sinüsoidal endüksiyonun genliği ile aynı olduğu kabulü ile 3.42 ifadesi, 3.25 eşitliğine benzer olarak değerlendirilirse;

$$\frac{B_m'^2}{B_m^2} = \left(\frac{k_c'}{k_c} \right)^2 \cdot (1 + THD_{B'}^2) \quad (3.43)$$

olur. Böylece 3.40 eşitliği ile verilen Foucault kayıpları oranı;

$$\frac{P_f'}{P_f} = \left(\frac{k_s'}{k_s} \cdot \frac{k_c'}{k_c} \right)^2 \cdot (1 + THD_{B'}^2) \quad (3.44)$$

olur.

Saf sinüsoidal bir dalga için;

$$k_c = \frac{B_m}{B_m / \sqrt{2}} = \sqrt{2} \quad (3.45)$$

ve 3.36 eşitliğinden;

$$k_s = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}}$$

olduğu ve genelleştirmek için harmonikli endüksiyon efektif değerinin saf sinüsoidal endüksiyonun temel bileşen efektif değerine eşit olmayıp α katı olduğu;

$$B_1' = \alpha \cdot B_1 \text{ yada } V_1' = \alpha \cdot V_1 \quad (3.46 \text{ a, b})$$

yaklaşımıyla;

$$\frac{P_f'}{P_f} = \left(\frac{2}{\pi} \cdot k_s' \cdot k_c' \right)^2 \cdot (\alpha^2 + THD_{B'}^2) \quad (3.47)$$

Foucault kayıpları oranı $THD_{B'}$ cinsinden en genel halde elde edilmiş olur.

3.5. Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Histerezis Kayıplarının Hesaplanması

Bölüm 2.4.2 de açıklandığı üzere, uygulanan gerilimin değişimine göre akı yoğunluğu $B(t)$, $H(t)$ ile değişecek ve histerezis çevrimini oluşturacaktır. Artan güç elektroniği elemanları kullanımı ve enerji kalitesinde son yıllarda karşılaşılan sorunlar sebebiyle, transformatörlere uygulanan gerilimin dalga şekline göre;

$$\frac{dB(t)}{dt} \quad (3.48)$$

gerilimin 1 periyodunda 2'den fazla işaret deęiřtirdięinde, ana histerezis çevrimi içerisinde minör çevrimler oluştuğu görölmüřtür (şekil 3.4).

Yapılan deneysel çalışmalar ve simölasyonlar, transformatöre uygulanan gerilimin efektif değeri, harmonik içeriği ve toplam harmonik distorsiyonu aynı olsa bile, harmonik bileşenlerin faz açısına göre histerezis eğrisinde farklılıklar oluştuğunu ve histerezis kayıplarında değişiklik oluştuğunu göstermektedir [10, 14, 15].

Bu kontrast durumların incelenebilmesi için; basit harmonik içerikli, efektif değerleri aynı, aynı harmonik içerikli, aynı toplam harmonik distorsiyonlu, fakat harmonik bileşeni birbirine 180° faz farklı olan 2 farklı gerilim dalgası (Örüntü 1 ve 2) seçilmiştir.

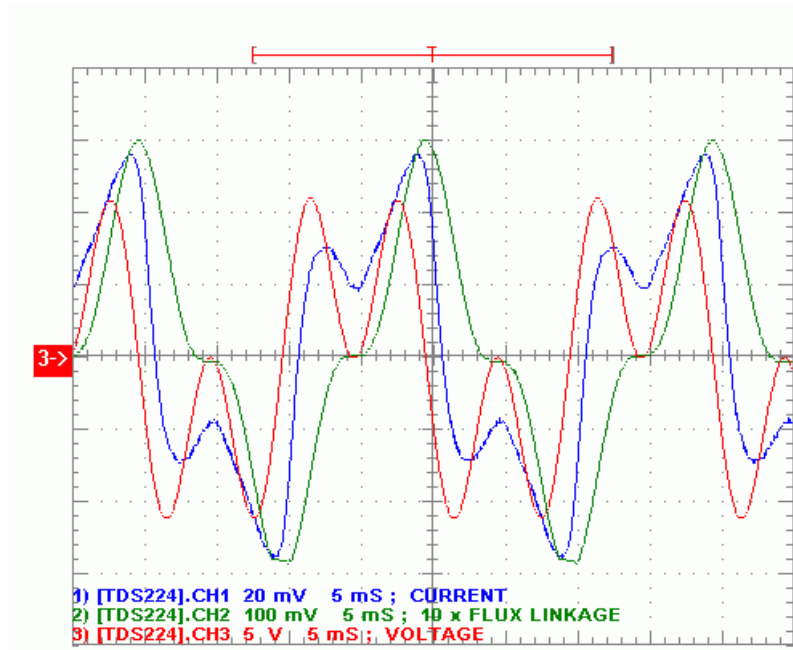
Örüntü 1:

Ele alınan birinci gerilim; temel bileşen ve sıfır faz açılı 3. harmonik içeren $\%THD_V = \%100$ olan bir fonksiyon (şekil 3.1) olsun.

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t) \quad (3.49)$$

Bu fonksiyon için akıma göre akı kavraması değişimi çizilirse, BH çevrimi ile lineer orantılı bir ilişki elde edilmiş olur. Zira akı kavraması (λ) ile endüksiyon arasında;

$$B = \frac{1}{N \cdot A} \cdot \lambda \quad (3.50)$$



Şekil 3.1 Örüntü 1 (kırmızı eğri gerilimi, mavi eğri akımı ve yeşil eğri akı kavraması)

ve manyetik alan (H) ile akım arasında da;

$$H = \frac{N}{\ell} \cdot I \quad (3.51)$$

skaler orantılı bir ilişki vardır. Elde edilen λ -I eğrisi Şekil 3.2' de verilmiştir.

Örüntü 1 tipindeki harmonikli dalgalarda, 3.48'de verilen Steinmetz'in histerezis ifadesi yeterince doğru cevap vermektedir.

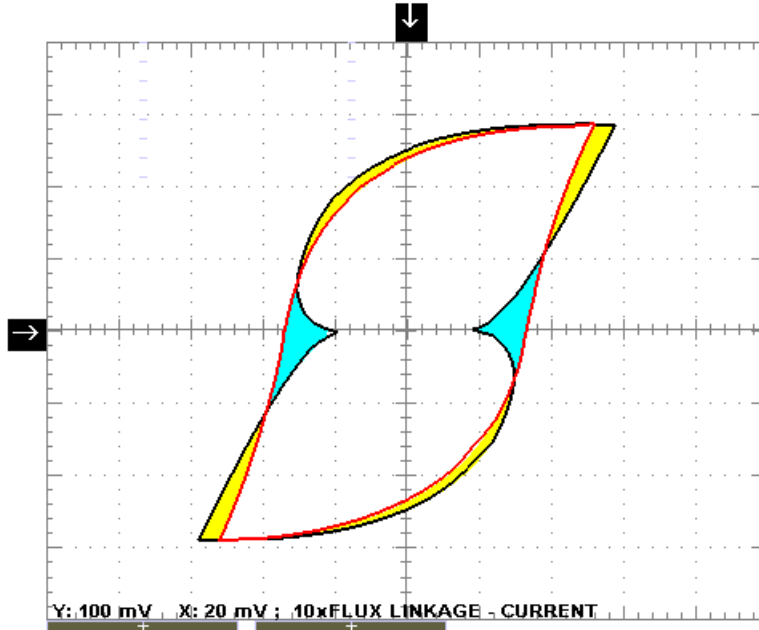
$$\lambda'_m = 29.4 \cdot 10^{-3} \text{ wb} \cdot \text{t}$$

$$\lambda'_{1m} = 15.88 \cdot 10^{-3} \text{ wb} \cdot \text{t}$$

$$\lambda'_{3m} = 5.19 \cdot 10^{-3} \text{ wb} \cdot \text{t}$$

ve Şekil 3.2'den ana çevrim genliğinin;

$$\lambda'_{\text{ana_pp}} = 58.8 \cdot 10^{-3} \text{ wb} \cdot \text{t}$$



Şekil 3.2 Örüntü 1'e ilişkin λ -I eğrisi, kısmi genişleme ve büzölmeler (Siyah çevrim örüntü 1'e, kırmızı çevrim eş genlikli sinüsoidal uyarmaya aittir. Sarı ve yeşil alanlar; fazla ve eksik kalan kısımları belirtmektedir)

olduğu, λ -I çevriminde minör çevrim oluşmadığı; bunun yerine çevrimde kısmi genişleme ve büzölmelerin olduğu gözlenmiştir.

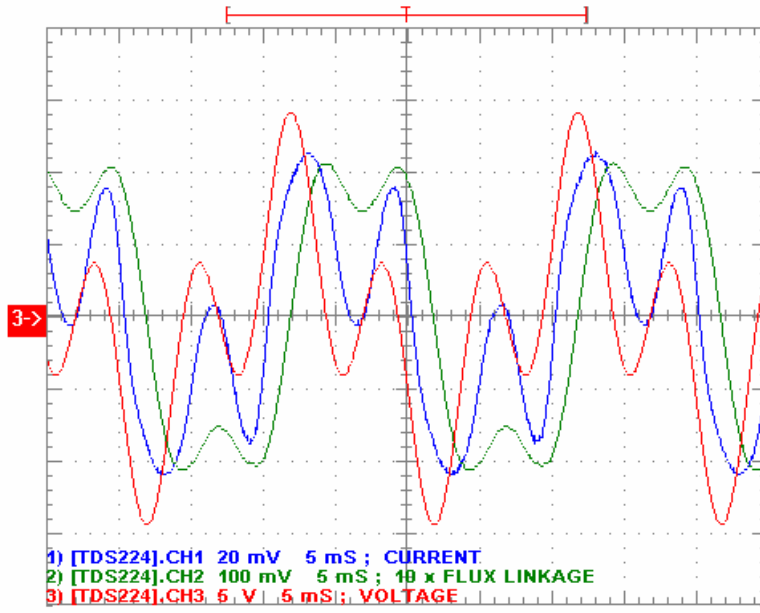
Şekil 3.2'de harmonikli dalgaya ilişkin λ I çevrimi yanında ayrıca aynı B_m 'yi üreten sinüsoidal bir dalgaya ilişkin λ I çevrimi de gösterilmiştir. Bu iki λ I çevrimine ilişkin alanlar, Impression 5.0 yazılımı ile analiz edilmiş ve farklı harmonik distorsiyon değerlerinde de bu alanların yaklaşık eşit kaldığı görülmüştür.

Örüntü 2:

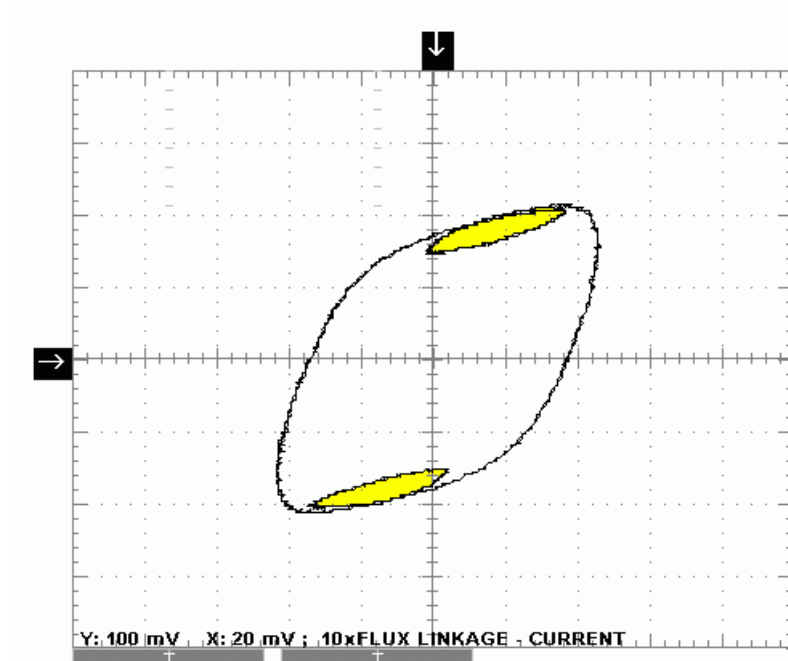
Ele alınan ikinci gerilim; temel bileşen ve ters fazda 3. harmonik içeren $\%THD_V = \%100$ olan bir fonksiyon olsun. Efektif değerler örüntü 1 ile aynı olsun.

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) - \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t) \quad (3.52)$$

Şekil 3.3'de örüntü 2'ye ilişkin gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri verilmiştir.



Şekil 3.3 Örüntü 2 (kırmızı eğri gerilimi, mavi eğri akımı ve yeşil eğri akı kavraması)



Şekil 3.4 Örüntü 2'ye ilişkin λ -I eğrisi ve minör çevrimler

Şekil 3.4 'deki değişimlerin Fourier analizinden;

$$\lambda'_m = 21.4 \cdot 10^{-3} \quad \text{wb} \cdot \text{t}$$

$$\lambda'_{1m} = 22.47 \cdot 10^{-3} \quad \text{wb} \cdot \text{t}$$

$$\lambda'_{3m} = 7.38 \cdot 10^{-3} \quad \text{wb} \cdot \text{t}$$

ve Şekil 3.2'den ana çevrimin genliği;

$$\lambda'_{ana_pp} = 42.8 \cdot 10^{-3} \quad \text{wb} \cdot \text{t}$$

minör çevrimin genliği;

$$\lambda'_{min\ \ddot{r}_pp} \cong 5 \cdot 10^{-3} \quad \text{wb} \cdot \text{t}$$

olarak tespit edilmiştir. Burada;

$$\frac{\lambda'_{lm}}{\lambda'_{3m}} = 3$$

olması 3.8 bağıntısı gereği beklenen bir sonuçtur.

Impression 5.0 yazılımı ile yapılan sayısal integrasyon analizinde Şekil 3.4 'teki minör çevrimin katkısı ile kaplanan toplam çevrim alanı, minör çevrim olmadığı duruma göre %17 artmıştır.

Dikkat edilirse, Şekil 3.4 'teki artış oranı ile;

$$\frac{\lambda'_{3m}}{\lambda'_m} \text{ yada } \frac{B'_{3m}}{B'_m} \quad (3.53)$$

ile bir ilgi görülür. Zira, B'_m 'nin büyümesi B'_{3m} 'nin ilave edeceği minör çevrimin katkısını oransal olarak azaltacaktır, aksi de doğrudur.

O halde, histerezis kaybı minör çevrimler nedeniyle değişiyorsa, bu değişim $(B_{3m} / B_m)^x$ ile adaptif olarak tasarlanmış bir düzeltme faktörü ile kompanze edilebilir. Histerezis kaybındaki değişme miktarının;

$$2 \cdot \eta \cdot \left(\frac{B'_{3m}}{B'_m} \right)^x$$

ile orantılı olduğu öngörülebilir. Burada η ; harmonik bileşen akısının temel bileşene göre yüksek frekanslı olmasından dolayı, minör çevrimin yatıklaşmasından kaynaklanan minör çevrim alanı değişimini kompanze etmek için öngörülmüştür. 2 çarpanı ise iki tane minör çevrim olduğu için konulmuştur.

Detayı 4. ve 5. bölümlerde incelendiği üzere, çeşitli harmonikler için tüm dalga şekillerinde sadece 2 tane baskın minör çevrim oluşmaktadır. Dolayısı ile çarpan sayısı

$$\xi = 2 \cdot \eta \quad (3.54)$$

tanımı ile azaltılabilir. Böylelikle minör çevrim düzeltme faktörü

$$k_m = 1 + \xi \cdot \left(\frac{B'_{3m}}{B'_m} \right)^x \quad (3.55)$$

olarak elde edilir.

Basit 2 örüntü ile öngörülen k_m faktörü, çok sayıda harmonik endüksiyon bileşenin bulunduğu bir durumda;

$$k_m = 1 + \xi \cdot \sum_{n=3}^{\infty} \left(\frac{B'_{nm}}{B'_m} \right)^x \quad (3.56)$$

şeklinde geliştirilebilir ve değeri $k_m \geq 1$ dir.

Bölüm 4'te yapılan deneylerde; 3., 5. veya 7. harmoniğin bulunduğu tek harmonikli besleme gerilimlerinde $0 \leq THD_v \leq 100$ aralığında, harmonik bileşen fazının 180° olduğu (çoğu kez negatif 3., 5., 7. harmonik olarak adlandırılmıştır) gerilimlerde minör çevrimler oluşmuş ve $k_m \geq 1$ olarak hesaplanmıştır (Ek 4). Minör çevrimlerin bulunmadığı; 0° faz farklı (çoğu kez pozitif 3., 5., 7. harmonik olarak adlandırılmıştır) $k_m = 0$ alınmalıdır. Bölüm 4'te yapılan deneyler sonucunda, 3.55

ifadesinin, 1'den fazla harmonik içeren gerilimlerde oluşacak yeni minör çevrimlerin getirdiği ilave kayıpların değerlendirilebilmesi için, ifade 3.66'da verilen toplam şekline getirilmiştir. Bu konu Bölüm 7'de ayrıca tartışılmıştır.

Bu düzeltmelerden sonra Steinmetz'in tek histerezis çevrimi için verdiği 2.22 bağıntısı;

$$\overline{P_h}' = \sigma_h \cdot k_m \cdot f_r \cdot B_m^x \quad [W/kg] \quad (3.57)$$

olarak, minör çevrimleri de değerlendirecek şekilde yapılandırılır. Burada f_r ; çevrimin tekrarlama frekansı olup, pratik olarak karşılaşılabilecek çoğu durumda f_1 'e eşittir. Örneğin; temel bileşen ve 3. harmonikten oluşan bir dalgada gerilimin toplam harmonik distorsiyonu %300 ve yukarı olduğu durumda f_r olarak f_3 alınmalıdır. Diğer bir deyişle %300 distorsiyon değerine kadar $f_r = f_1$ 'dir.

Şimdi 3.57 ifadesini, gerilim yada endüksiyon dalga şekillerinde oluşacak bozulmalar cinsinden ifade edelim:

3.41 Eşitliğinde tanımlanan tepe faktörü harmonikli endüksiyon için;

$$k'_c = \frac{B'_m}{B'} \quad (3.58)$$

idi [21]. Saf sinüsoidal bir dalga için ise;

$$k_c = \frac{B_m}{B_m / \sqrt{2}} = \sqrt{2} \quad (3.59)$$

olur.

3.48 ve 3.57 ifadelerinden yola çıkılarak, temel bileşen genliği aynı kalıp, bozulmaya uğrayan bir gerilim dalgası için histerezis kayıplarının değişim oranı;

$$\frac{P'_h}{P_h} = \frac{\sigma_h \cdot k_m \cdot f_r \cdot B_m^x}{\sigma_h \cdot f_l \cdot B_m^x} \quad (3.60)$$

olarak elde edilir.

Bu ifadede B_m yerine 3.58 'deki eşdeğeri yazıldığında;

$$\frac{P'_h}{P_h} = \frac{k_m \cdot f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{k_c'}{k_c} \right)^x \cdot \left(\frac{B'}{B} \right)^x \quad (3.61)$$

elde edilir.

Burada B efektif endüksiyonu göstermektedir. Üslü (‘) parametreler ise harmonikli şartlardaki değerleri göstermektedir. 3.61 ifadesindeki harmonikli besleme geriliminde oluşan endüksiyonun, saf sinüsoidal durumdaki endüksiyona oranını açıldığında;

$$\frac{B'}{B} = \sqrt{\frac{B'^2}{B^2}} = \sqrt{\frac{B_1^2 + B_3^2 + B_5^2 + \dots + B_n^2}{B_1^2}} = \sqrt{1 + \frac{B_3^2 + B_5^2 + \dots + B_n^2}{B_1^2}} \quad (3.62)$$

olur. Burada 3.25 ifadesinin benzeri olarak;

$$\sqrt{1 + \frac{B_3^2 + B_5^2 + \dots + B_n^2}{B_1^2}} = \sqrt{1 + \text{THD}_{B'}^2} \quad (3.63)$$

yazılabilir. Böylelikle 3.61 ifadesi;

$$\frac{P'_h}{P_h} = \frac{k_m \cdot f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{k_c'}{k_c} \right)^x \cdot (1 + \text{THD}_{B'}^2)^{x/2} \quad (3.64)$$

halini alır. İfade harmonikli gerilime ilişkin temel bileşen efektif değerinin, saf sinüsoidal gerilimin efektif değeri ile aynı olmadığı ve α katı olduğu yaklaşımı ile, lineer bölgede çalışma şartı ile genelleştirildiğinde;

$$B_1' = \alpha \cdot B_1 \quad (3.65)$$

olur ve B yerine $\alpha \cdot B_1$ yazmak gerekir. Ayrıca sinüsoidal endüksiyon için tepe faktörü olan 3.59 ifadesi de yerine yazılarak;

$$\frac{P_h'}{P_h} = k_m \cdot \frac{f_r}{f_1} \cdot \left(\frac{k_c'}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\alpha^2 + THD_{B'}^2} \right)^x \quad (3.66)$$

olarak genelleştirilmiş olur. Bu ifadede temel bileşene en yakın harmoniğin 3. harmonik olduğu bir gerilimde $THD_{V'} < \%300$ değerine kadar olan bozulmalar için, BH çevriminin ana tekrarlama frekansı olan $f_r = f_1$ olacağından ifade daha da sadeleşir.

3.66 ifadesi, lineer sınırlar içinde besleme geriliminin toplam harmonik distorsiyonu cinsinden de elde edilebilir:

Faraday yasası gereği;

$$2 \cdot B_m \cong \frac{1}{N \cdot A} \cdot \frac{1}{T/2} \cdot \int_0^{T/2} v(t) dt \quad (3.67)$$

olur. V_{yo} ; gerilimin yarı periyod ortalaması (doğrultulmuş değeri yada mutlak değer ortalaması) olmak üzere;

$$B_m \cong \frac{1}{2 \cdot N \cdot A} \cdot V_{yo} \quad (3.68)$$

olacaktır. Bu ifade 3.60 ifadesinde yazılırsa;

$$\frac{P_h'}{P_h} = k_m \cdot \frac{f_r}{f_1} \cdot \left(\frac{V_{yo}'}{V_{yo}} \right)^x \quad (3.69)$$

elde edilir.

3.29 ifadesinde verilen şekil faktörü tanımı kullanıldığında, saf sinüs dalgası için şekil faktörü;

$$k_s = \frac{V}{V_{yo}} = \frac{V_m / \sqrt{2}}{2 \cdot V_m / \pi} = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \quad (3.70)$$

değerini alır. Harmonikli dalga için ise;

$$k_s' = \frac{V'}{V_{yo}'} \quad (3.71)$$

olur. Böylece 3.69 eşitliği;

$$\frac{P_h'}{P_h} = k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{k_s}{k_s'} \cdot \frac{V'}{V} \right)^x \quad (3.72)$$

şekline dönüşür. Burada $\frac{V'}{V}$ terimi açılırsa;

$$\frac{V'}{V} = \sqrt{\frac{V'^2}{V^2}} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}{V_1^2}} = \sqrt{1 + THD_{V'}^2} \quad (3.73)$$

gerilimin toplam harmonik distorsiyonu cinsinden yazılmış olur. 3.73 ifadesi 3.72'de yazılırsa;

$$\frac{P_h'}{P_h} = k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{k_s}{k_s'} \cdot \sqrt{1 + THD_{V'}^2} \right)^x \quad (3.74)$$

elde edilir.

İfadeyi harmonikli gerilimin temel bileşeninin efektif değerinin, saf sinüsoidal gerilimin efektif değeri ile aynı olmadığı ve α katı olduğu yaklaşımı ile genelleştirip,

$$V_1' = \alpha \cdot V_1 \quad (3.75)$$

eşitlik 3.70'de verilen saf sinüs dalgasının şekil faktörü de yerine yazılırsa;

$$\frac{P_h'}{P_h} = k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{k_s'} \cdot \sqrt{\alpha^2 + THD_{V'}^2} \right)^x \quad (3.76)$$

elde edilir.

Böylelikle, temel bileşenleri arasında 3.75 ifadesindeki genlik ilişkisi bulunan harmonikli gerilim ve saf sinüsoidal gerilimde oluşan histerezis kayıplarının en genel halde karşılaştırılabilmesi için, $THD_{B'}$ cinsinden 3.66 ve $THD_{V'}$ cinsinden 3.76 ifadeleri elde edilmiş olur. Lineer çalışma bölgesinde her iki ifade de birbirine çok yakın sonuçlar vermektedir. Pratiklik açısından gerilimin fonksiyonu olarak verilen 3.76 ifadesi daha kullanışlıdır.

Histerezis teorisi, 1890'lı yıllardan beri üzerinde uğraşılan, fakat tüm çözüm uzaylarını tatmin edecek birleşik bir ifadenin henüz elde edilemediği bir konudur [22, 23, 24]. Birleşik alan teorisine benzetildiği de olmuştur. Son yıllarda Lorentzian, Bessel fonksiyonları, kuantum teorisi orijinli histeron yaklaşımları gibi fizik ve matematiksel açıdan karmaşık teknikler ile çözümler aranmış, fakat geniş tanım aralığında daha doğru çözümler elde edilememiş, hata çoğu kez %5'ten büyük kalmıştır.

Bu tezde 3.57 ifadesi ile, Steinmetz'in yaygın kullanılan 2.22 ifadesi, minör çevrimlerin etkisini değerlendirecek şekilde düzeltilmiştir. ξ çarpanı deneysel sonuçlara en iyi yaklaşımı verecek şekilde seçilmiştir. Bu konudaki açıklamalar Ek 4'te verilmiştir. Bu ifadeden kaynaklanan hatalar Bölüm 5'te değerlendirilmiştir.

3.6. Sinüsoidal Olmayan Besleme Gerilimlerinde Toplam Demir Kayıpları

Önceki iki alt bölümde detayları ile verilen kayıp güçler toplanırsa, transformatörde sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde oluşan demir kayıpları

$$P'_{fe} = P'_f + P'_h + P'_a \quad (3.77)$$

ile verilir.

Bölüm 4.3'te farklı frekanslar için yapılan deneylerde; Bölüm 2.4.3'te tanımlanan ilave kayıplar araştırılmış, fakat 4 ile 320 Hz frekans aralığında toplam demir kayıpları içerisinde 3/2 üslü herhangi bir ilave kayıp bileşeni tespit edilmemiştir. Bu yüzden, tezin bundan sonraki bölümlerinde toplam demir kayıplarına ilişkin ifadelerde P_a ilave kayıp terimi ihmal edilmiştir.

Sinüsoidal olmayan besleme geriliminde oluşan kayıplar, manyetik endüksiyonun toplam harmonik distorsiyonu cinsinden, 3.47 ve 3.66 ifadelerinin kullanımı ile aşağıdaki şekilde verilir:

$$P'_{fe} = \left[\left(\frac{2}{\pi} \cdot k'_s \cdot k'_c \right)^2 \cdot (\alpha^2 + THD_{B'}^2) \right] \cdot P_f + \left[k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{k'_c}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\alpha^2 + THD_{B'}^2} \right)^x \right] \cdot P_h \quad (3.78)$$

ve besleme geriliminin harmonik distorsiyonu cinsinden, 3.28 ve 3.76 ifadelerinin kullanımı ile;

$$P'_{fe} = (\alpha^2 + THD_{V'}^2) \cdot P_f + \left[k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{k'_s} \cdot \sqrt{\alpha^2 + THD_{V'}^2} \right)^x \right] \cdot P_h \quad (3.79)$$

şeklinde elde edilir.

Bu ifadelerde P_f ve P_h saf sinüsoidal besleme gerilimindeki Foucault ve histerezis kayıplarıdır. Harmonikli gerilimin temel bileşeni (V_1') ile saf sinüsoidal gerilim arasında (V_1) 3.46 a, b eşitliklerinde verilen;

$$V'_1 = \alpha \cdot V_1 \text{ veya } B'_1 = \alpha \cdot B_1 \quad (3.80)$$

ilişkisi mevcuttur.

Günümüzde enerji kalitesi analizörleri ile $THD_{V'}$ ve uygun düzenekler ile (bkz. Bölüm 4) $THD_{B'}$ kolayca ölçülebilmektedir. Böylelikle Foucault ve histerezis kayıplarının harmonikli besleme gerilimlerinde alacağı yeni değerler kolayca kestirilebilmektedir. 3.78 ve 3.79 bağıntılarının doğruluğu Bölüm 5'te deney sonuçları ile karşılaştırılarak tartışılacaktır.

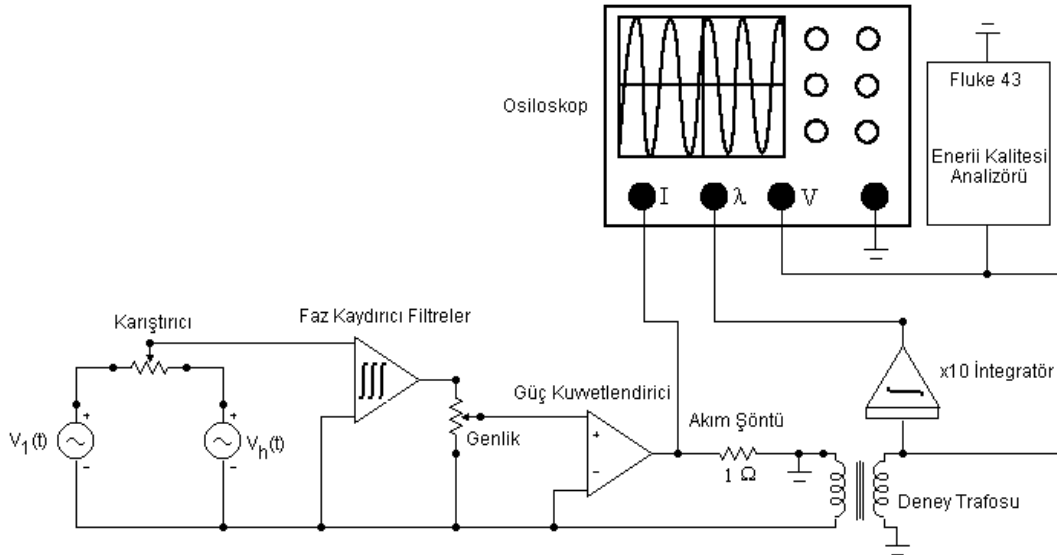
BÖLÜM 4. DENEYSEL İNCELEME

4.1. Giriş

Bu bölümde; Bölüm 3.5'te bahsedilen harmonikli gerilimlerin deney transformatörüne uygulanması ve akım, gerilim, akı kavraması, güç, harmonik bileşen ve BH çevrimlerinin ölçülmesi ve Bölüm 3.6'da elde edilen bağıntıların doğrulanması için yapılan deneyler açıklanmaktadır. Bölüm ile ilgili detaylar Ek 1'de verilmiştir.

4.2. Deney Düzenegi

Deneylerde Foucault ve histerezis kayıplarının uygulanan gerilimin harmonik içeriği ve toplam harmonik distorsiyonu ile değişimini incelemek amacıyla Şekil 4.1'de verilen deney düzenegi kullanılmıştır.



Şekil 4.1 Deney düzenegine ilişkin bağlantı şeması

Düzenekte kullanılan ekipmanların özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

Sinyal jeneratörü: Deneylerde harmonikli gerilimlerin esnek bir şekilde sentezlenmesi amacıyla, sinyal jeneratörü olarak yazılım esaslı çift kanallı 16 bitlik dijital dalga sentezleme yöntemi kullanılmıştır. İncelenecek dalga şekilleri CoolEdit yazılımı ile bilgisayar ortamında sentezlenmiş ve sinyal jeneratörünün bir kanalında genel dalgaya ilişkin temel bileşen, diğer kanala da harmonik bileşenler yazılmıştır. Sinyal jeneratörünün tek saat frekanslı dijital sentezleyici olması sayesinde; temel bileşen ve harmonik bileşenlerin zaman senkronizasyonu kolaylıkla sağlanmıştır.

Karıştırıcı: Sentezlenen çift kanallı sinyal, karıştırma potansiyometresi ile karıştırılarak istenilen toplam harmonik distorsiyonlar elde edilmiştir.

Çok kanallı filtre: Analog güç kuvvetlendiricilerde açığa çıkan faz kayma hataları, güç kuvvetlendiriciden önce konulan çok kanallı analog filtreler ile giderilmiştir. Böylelikle incelenen harmonik bileşenlerin fazlarının 0° yada 180° olması temin edilmiştir.

Genlik ayarı: Deney transformatörüne uygulanan gerilimin genliği, güç kuvvetlendiricisi önüne konulan genlik potansiyometresi ile belirlenmektedir.

Güç kuvvetlendirici: Deney transformatörüne uygulanacak gerilim, kullanılan 200W THD $<1\%$ güç kuvvetlendiricisi ile kuvvetlendirilmiştir. Kuvvetlendirici band aralığı 1Hz – 30kHz'dir.

Akım şöntü:

Transformatör akımının hassas ölçümü için $1\ \Omega$ 'luk manganin şönt direnç üzerinden osiloskoba gerilim ölçümü alınmıştır.

Gerilim ölçümü:

Transformatörde EMK ölçümü; yüksüz durumda E_1 ile E_2 'nin aynı fazda olduğu ilkesiyle, E_2 üzerinden yapılmıştır. Deney transformatörünün çevirme oranı 1

olarak seçildiği için $E_1=E_2$ olup, herhangi bir öteleme katsayısı gerekmeyecektir. Böylelikle, primer sargı seri empedansı üzerindeki gerilim düşümleri ve kayıp güçler ölçüm dışı tutulmuştur.

Akı kavraması ölçümü

Akı Faraday yasayı gereği transformatörde endüklenen EMK'nin integralidir:

$$\lambda(t) = N \cdot \phi(t) = \int v(t) dt \quad (4.1)$$

İntegratör olarak Feedback Control Equipment üretimi bir PID birimi kullanılmıştır. Akı kavramasına ilişkin ölçümlerde gürültü/sinyal oranını küçük tutmak amacıyla x10 kazanç uygulanmıştır.

Ölçüm ve veri toplama

Osiloskop; düzenekteki en önemli ölçüm ve veri toplama cihazıdır. Bu amaçla 4 kanallı 150 MHz band genişlikli dijital hafızalı Tektronix TDS224 model bir cihaz kullanılmıştır. Osiloskop RS232 arabirimi ve Wavestar yazılımı ile tüm ölçümleri bilgisayara örnek dizileri olarak aktarabilmekte ve harmonik analizi, dalga şekli analizi (efektif değer, tepeden tepeye değer, maksimum ve minimum değerler, ortama değer, frekans, tepe faktörü vb bir çok analiz), faz farkı, güç ölçümü gibi birçok ölçüm ve analize imkan tanımaktadır.

Deney başlangıcında istenilen gerilim harmonik distorsiyonunun temini ve harmonik bileşen fazlarının sağlanması için hızlı ölçüm ve veri aktarımına imkan tanıyan Fluke 43 Enerji Kalitesi Analizörü kullanılmıştır.

4.3. Başlangıç Deneyleri

Sinüsoidal olmayan çalışma gerilimlerinde, demir kayıplarının değişimini belirlemek amacıyla yapılacak deneylerde, Bölüm 3.2'de yapılan kabullerin gerçekleşmesi, transformatöre uygulanacak temel bileşen geriliminin lineer

bölgede seçilebilmesi için, önce 12V'luk deney transformatörünün doyma noktası ve çevirme oranı değişimini belirlemek amacıyla, 50Hz saf sinüsoidal gerilim ile 1-21V aralığında deneyler yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir.

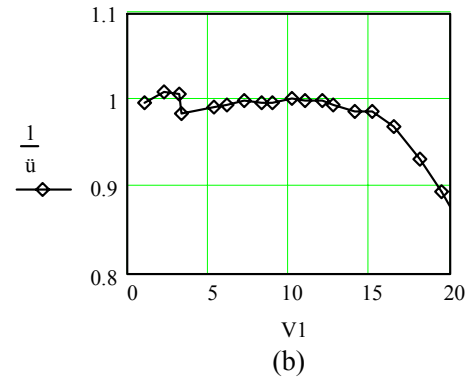
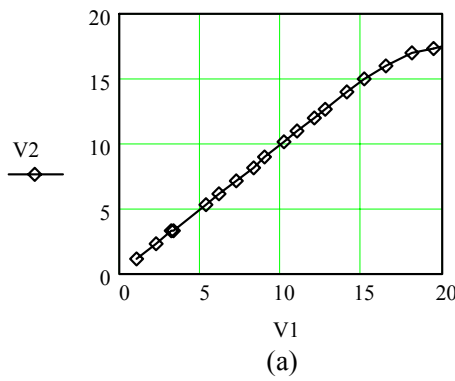
Çevirme oranı;

$$\ddot{u} = V_1 / V_2$$

olarak tanımlanmaktadır.

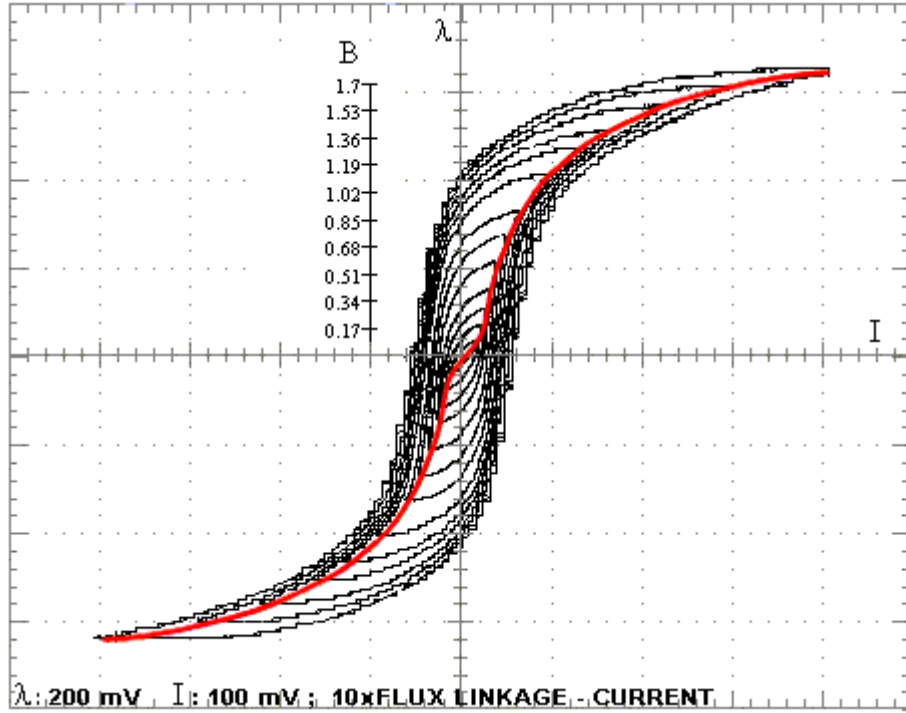
Tablo 4.1 Çevirme oranı deneyine ilişkin sonuçlar

V1	V2	$\ddot{u}$	1/ $\ddot{u}$
1.03	1.03	1.004114	0.995903
2.224	2.25	0.990412	1.009681
3.183	3.20	0.994346	1.005686
3.329	3.27	1.017265	0.983028
5.285	5.24	1.009358	0.990728
6.05	6.01	1.006739	0.993306
7.14	7.14	1	1
8.19	8.15	1.004723	0.995299
8.95	8.93	1.002801	0.997207
10.09	10.12	0.997528	1.002478
10.95	10.95	1.000183	0.999817
11.98	11.96	1.001714	0.998289
12.62	12.55	1.005217	0.99481
14.04	13.86	1.012731	0.987429
15.08	14.88	1.013782	0.986406
16.42	15.89	1.033582	0.967509
18.08	16.84	1.07373	0.931333
19.39	17.31	1.119871	0.89296
21.06	17.73	1.18775	0.841928



Şekil 4.2 a) Efektif giriş-çıkış gerilimleri b) Giriş gerilimine göre çevirme oranının tersi (1/ $\ddot{u}$)

Çevirme oranı test deneylerinde transformatörün 12V giriş geriliminden sonra doymanın arttığı ve çevirme oranı sabitliğinin bozulduğu gözlemlendi. Bu nedenle, dalga şekli testlerinde, doymanın olmadığı 5V ile 7.5V aralığında çalışılmasına karar verildi. Bu aralıkta B_m ; 0.564 ile 0.701 T aralığında kalmaktadır. İlgili dinamik λI çevrimleri (BH çevrimi ile lineer orantılı) Şekil 4.3 te verilmiştir.



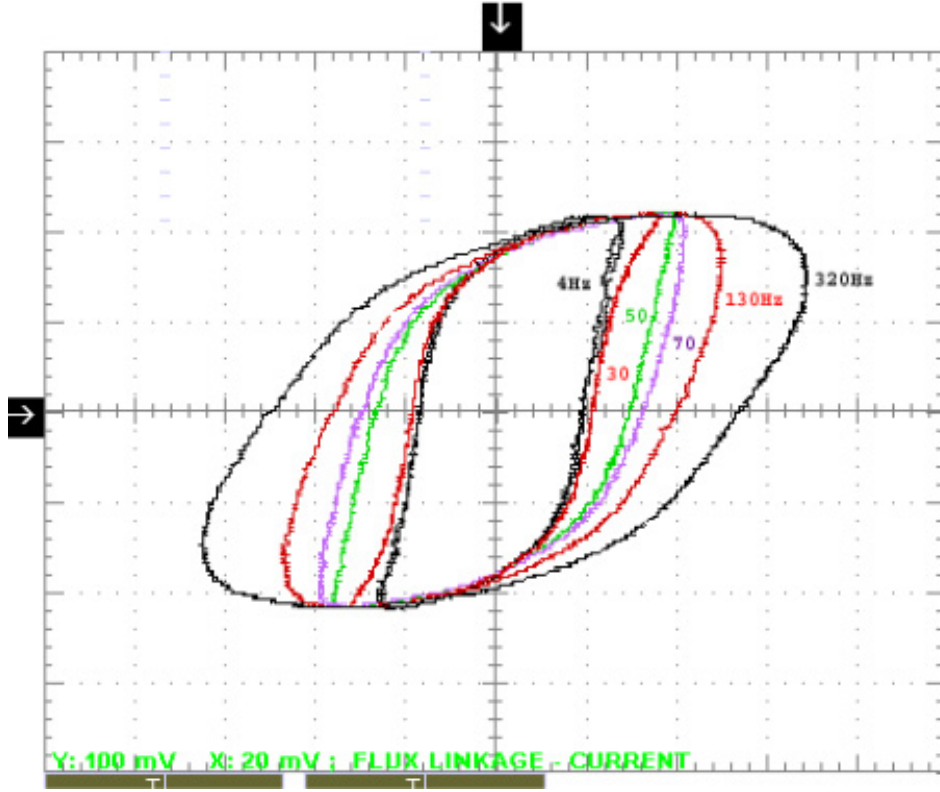
Şekil 4.3 50Hz frekansta 1-15V aralığı için dinamik mıknatıslanma eğrileri

Daha sonra, statik ve dinamik BH çevriminin elde edilebilmesi için maksimum endüksiyon lineer bölge içinde kalacak şekilde; $B_m=0.564$ T 'da sabit tutularak 4-320 Hz frekans aralığında 25 deney yapılmış, statik ve dinamik λI çevrimleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4; artan frekans ile Foucault kayıplarında oluşan artışın neden olduğu dinamik λI çevrim genişlemesi açıkça görülmektedir.

Farklı frekanslar için tekrarlanan bu deneylerde; Bölüm 2.4.3'te tanımlanan ilave kayıplar araştırılmış, fakat 4 ile 320 Hz aralığında toplam demir kayıpları içerisinde $3/2$ üslü bir bileşen tespit edilmemiştir.

Bu deneylerden statik histerezis kayıpları, σ_h ve σ_f katsayıları ve x Steinmetz üsteli

belirlenmiştir. Deney transformatörüne ilişkin kayıp katsayıların bulunuşu Ek 2’de verilmiştir.



Şekil 4.4 Deney transformatörüne ilişkin statik ve dinamik histerezis çevrimleri

4.4. Deneyler

Farklı harmonik içerik ve distorsiyona sahip gerilimlerde ölçümlerin yapılabilmesi için, Bölüm 3.5 ışığında belirlenen dalga fonksiyonları aşağıda verilmiştir:

Temel bileşen frekansı 50Hz seçilmiş olup,

± 3 . harmonik için;

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + \text{THD}_v \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t) \quad (4.2)$$

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) - \text{THD}_v \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot t) \quad (4.3)$$

± 5 . harmonik için;

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + \text{THD}_v \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t) \quad (4.3)$$

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) - \text{THD}_V \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot t) \quad (4.4)$$

± 7 . harmonik için;

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) + \text{THD}_V \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot t) \quad (4.5)$$

$$v'(t) = \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t) - \text{THD}_V \cdot \sqrt{2} \cdot 5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot t) \quad (4.6)$$

şeklindedir. Deneyler THD_V ; 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 ve 1 alınarak, herbir dalga fonksiyonu için farklı harmonik bileşen genliği ile 11 deney yapılmıştır. Deneylerde elde edilen grafiklerin detayları Ek 3'te verilmiştir.

4.4.1. Üçüncü harmonik deneyleri

Bu amaçla 4.2 ve 4.3 ifadeleri ile verilen fonksiyonlar, Şekil 4.1'de bağlantı şeması verilen düzenek kullanılarak deney transformatörüne uygulanmış ve aşağıdaki ölçümler alınmıştır.

Tablo 4.2 Pozitif 3. harmonik (Eşitlik 4.2) için deney sonuçları

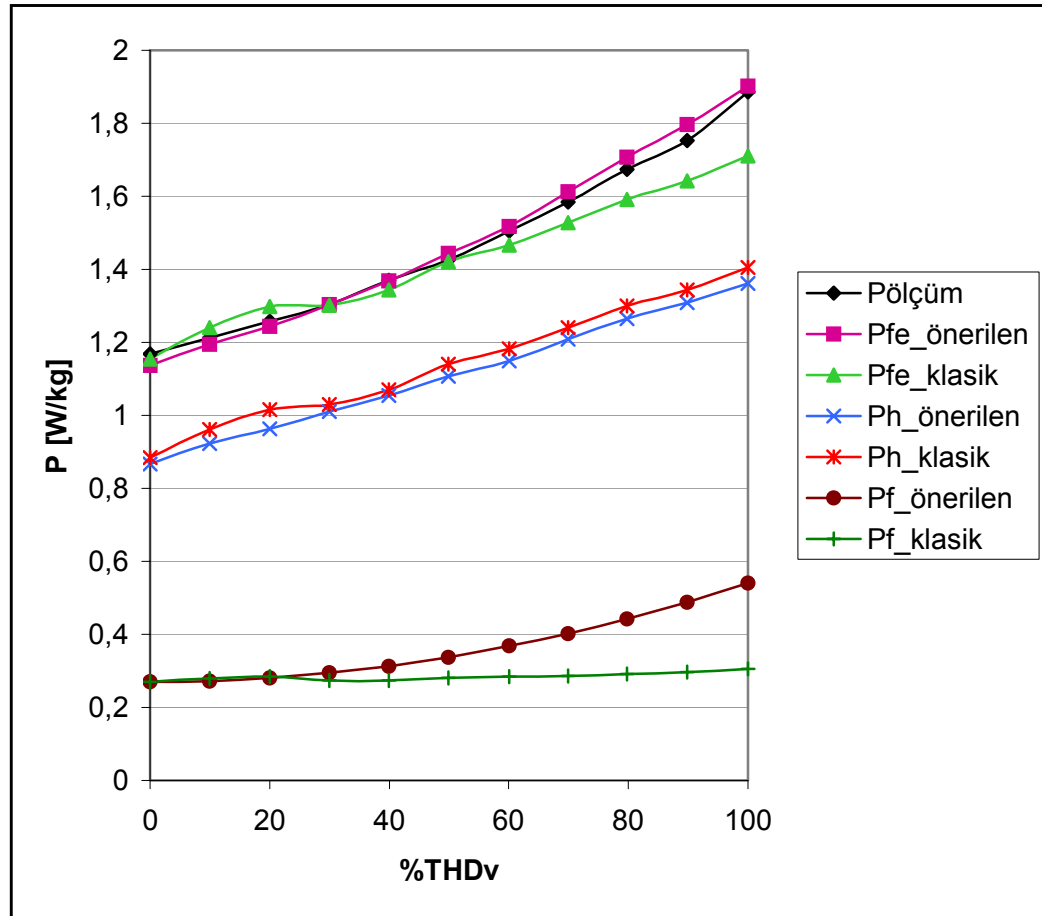
THD_V %	THD_B %	V_1 [V]	V_3 [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B_{3m} [T]	B_m [T]	k_m	k'_s	k'_c
0.000	0.239	5.014	0.000	5.014	104	0.403	0.004	0.564	1.000	1.110	1.398
9.947	2.963	5.023	0.499	5.051	108	0.409	0.015	0.595	1.000	1.084	1.452
19.998	6.108	5.019	1.004	5.120	112	0.413	0.034	0.615	1.000	1.074	1.490
29.955	9.446	5.009	1.500	5.230	116	0.405	0.053	0.620	1.000	1.077	1.530
39.937	12.682	5.022	2.005	5.409	122	0.406	0.072	0.636	1.000	1.079	1.567
49.881	15.967	5.010	2.499	5.601	127	0.411	0.091	0.661	1.000	1.099	1.608
60.080	19.425	5.056	3.038	5.901	134	0.414	0.111	0.677	1.000	1.117	1.636
69.866	22.560	5.044	3.524	6.155	141	0.415	0.129	0.697	1.000	1.140	1.679
79.809	25.914	5.043	4.024	6.459	149	0.419	0.148	0.718	1.000	1.166	1.713
89.864	29.254	5.034	4.523	6.770	156	0.422	0.167	0.733	1.000	1.205	1.735
100.043	32.755	5.076	5.079	7.183	168	0.428	0.188	0.754	1.000	1.219	1.761

Önerilen yöntemin klasik hesap yöntemi ile karşılaştırılmasında; klasik yöntem için Steinmetz'in 2.12 ve 2.22 ifadeleri, bu tezde önerilen yöntem için ise 3.78 bağıntısı

kullanılmıştır (bkz Şekil 4.5 – 4.10).

Tablo 4.3 Pozitif 3. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	
0.000	0.271	0.884	1.154	0.270	0.867	1.137	1.168
9.947	0.279	0.962	1.241	0.273	0.923	1.195	1.213
19.998	0.283	1.016	1.299	0.281	0.964	1.244	1.258
29.955	0.273	1.029	1.302	0.294	1.010	1.304	1.303
39.937	0.274	1.070	1.344	0.313	1.055	1.368	1.370
49.881	0.281	1.140	1.422	0.337	1.107	1.444	1.426
60.080	0.284	1.183	1.467	0.368	1.149	1.517	1.505
69.866	0.287	1.241	1.528	0.402	1.210	1.612	1.583
79.809	0.292	1.300	1.592	0.442	1.265	1.707	1.673
89.864	0.297	1.345	1.641	0.488	1.309	1.797	1.752
100.043	0.305	1.405	1.710	0.540	1.361	1.902	1.887



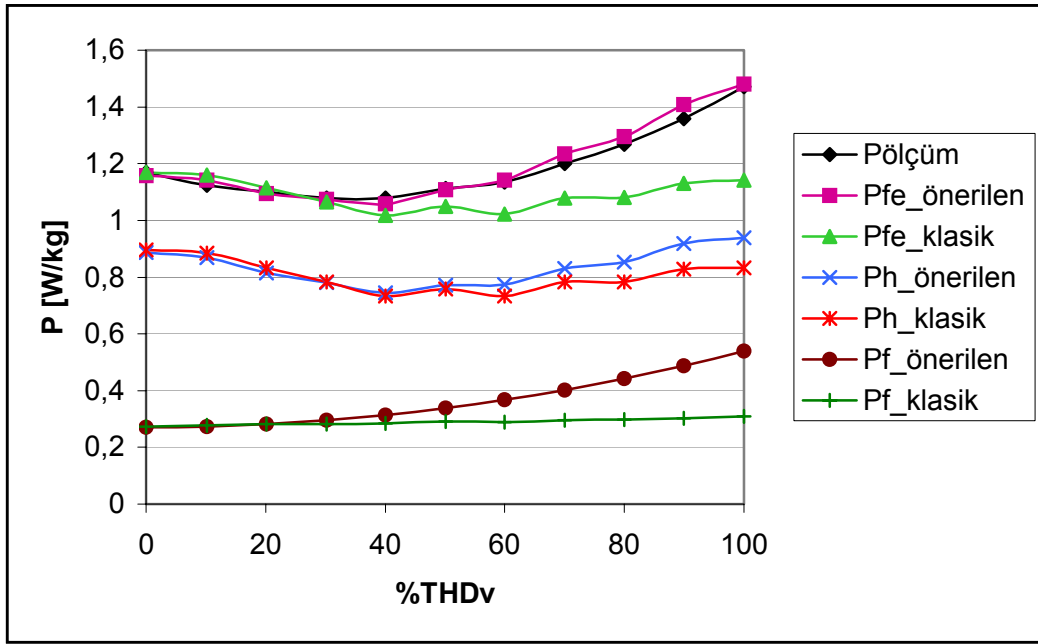
Şekil 4.5 Pozitif 3. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi

Tablo 4.4 Negatif 3. harmonik (Eşitlik 4.3) için deney sonuçları

THD _V %	THD _B %	V ₁ [V]	V ₃ [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B _{3m} [T]	B _m [T]	k _m	k' _s	k' _c
0.000	0.239	5.014	0.013	5.014	104	0.405	0.000	0.569	1.000	1.110	1.405
10.214	4.412	5.045	0.515	5.076	100	0.408	0.019	0.564	1.004	1.166	1.382
20.089	7.271	5.068	1.018	5.172	98	0.412	0.038	0.543	1.012	1.222	1.318
30.236	10.521	5.026	1.519	5.274	96	0.412	0.057	0.523	1.025	1.302	1.269
39.998	13.741	5.039	2.015	5.432	96	0.413	0.076	0.502	1.042	1.378	1.217
50.072	17.217	5.094	2.551	5.702	99	0.419	0.095	0.513	1.058	1.433	1.225
59.971	20.329	5.035	3.020	5.877	101	0.417	0.114	0.502	1.080	1.519	1.206
70.050	23.547	5.050	3.537	6.170	107	0.422	0.133	0.523	1.096	1.561	1.240
79.939	26.726	5.038	4.028	6.458	113	0.423	0.152	0.523	1.118	1.618	1.235
89.941	29.875	5.026	4.521	6.760	121	0.426	0.171	0.542	1.135	1.656	1.272
99.997	33.273	5.042	5.042	7.131	131	0.431	0.190	0.543	1.159	1.683	1.260

Tablo 4.5 Negatif 3. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	
0.000	0.273	0.897	1.169	0.270	0.887	1.157	1.168
10.214	0.277	0.884	1.161	0.273	0.868	1.141	1.123
20.089	0.283	0.833	1.116	0.281	0.814	1.095	1.101
30.236	0.282	0.783	1.065	0.295	0.780	1.075	1.078
39.998	0.283	0.735	1.018	0.313	0.746	1.059	1.078
50.072	0.291	0.759	1.050	0.338	0.771	1.109	1.112
59.971	0.289	0.735	1.023	0.367	0.775	1.142	1.134
70.050	0.296	0.783	1.079	0.403	0.832	1.234	1.202
79.939	0.298	0.783	1.081	0.443	0.853	1.296	1.269
89.941	0.302	0.829	1.131	0.489	0.919	1.408	1.359
99.997	0.310	0.833	1.142	0.540	0.939	1.479	1.471



Şekil 4.6 Negatif 3. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_v ile değişimi

4.4.3. Beşinci harmonik deneyleri

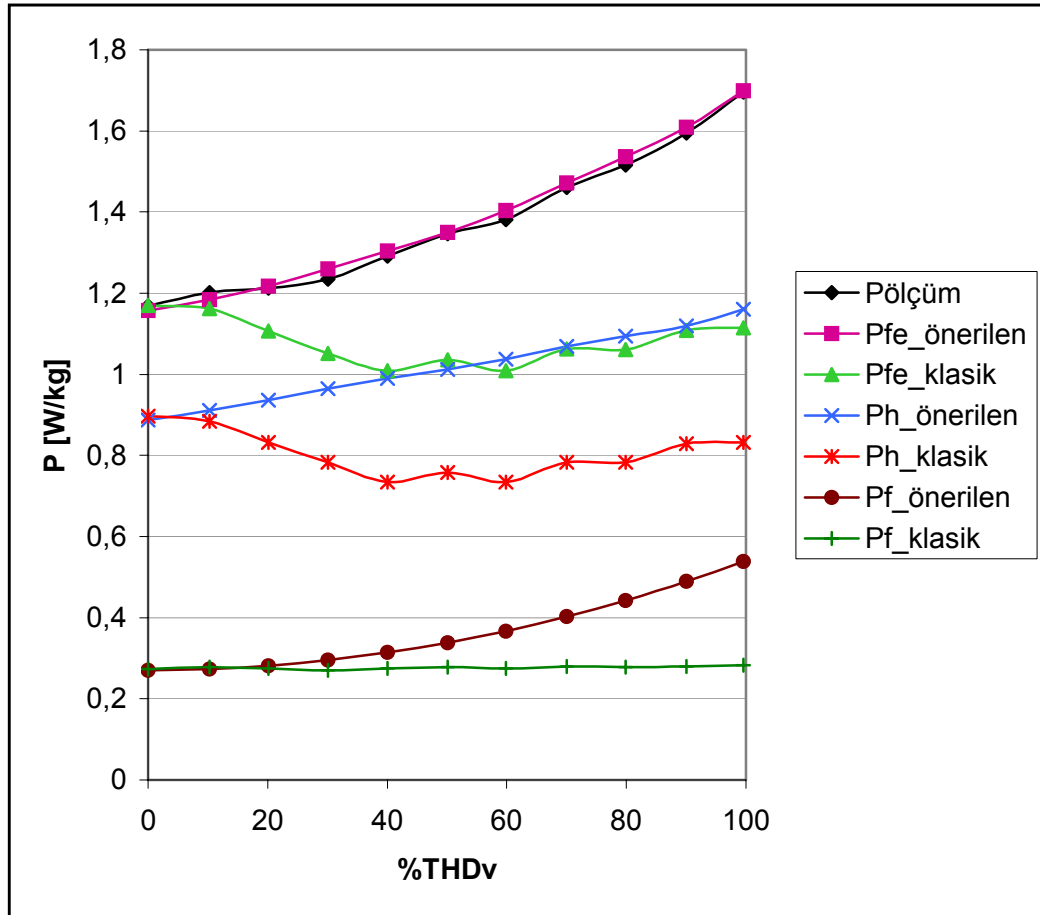
Bu amaçla 4.4 ve 4.5 ifadeleri ile verilen fonksiyonlar, Şekil 4.1’de bağlantı şeması verilen düzenek kullanılarak deney transformatörüne uygulanmış ve aşağıdaki ölçümler alınmıştır.

Tablo 4.6 Pozitif 5. harmonik (Eşitlik 4.3) için deney sonuçları

THD _v %	THD _B %	V ₁ [V]	V ₅ [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B _{5m} [T]	B _m [T]	k _m	k' _s	k' _c
0.000	0.239	5.014	0.000	5.014	104	0.405	0	0.569	1.000	1.110	1.405
10.265	2.053	5.075	0.520	5.101	107	0.409	0.0073	0.584	1.000	1.092	1.429
20.110	4.022	5.076	1.021	5.177	108	0.406	0.0148	0.59	1.000	1.106	1.452
30.127	6.025	5.029	1.515	5.253	110	0.402	0.0228	0.595	1.000	1.126	1.478
40.076	8.015	5.074	2.033	5.466	115	0.407	0.0311	0.61	1.000	1.133	1.500
50.061	10.012	5.091	2.548	5.693	120	0.409	0.039	0.62	1.000	1.153	1.518
59.899	11.980	5.056	3.030	5.894	123	0.407	0.0465	0.625	1.000	1.199	1.538
69.995	13.999	5.087	3.560	6.209	130	0.41	0.0547	0.641	1.000	1.223	1.563
79.837	15.967	5.052	4.033	6.465	135	0.408	0.0621	0.646	1.000	1.270	1.582
90.086	18.017	5.045	4.545	6.790	142	0.41	0.0708	0.656	1.000	1.312	1.600
99.561	19.912	5.059	5.036	7.138	151	0.412	0.0787	0.672	1.000	1.336	1.630

Tablo 4.7 Pozitif 5. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	
0.000	0.273	0.897	1.169	0.270	0.887	1.157	1.168
10.265	0.278	0.884	1.162	0.273	0.912	1.185	1.202
20.110	0.274	0.833	1.107	0.281	0.937	1.218	1.213
30.127	0.269	0.783	1.052	0.295	0.965	1.259	1.235
40.076	0.275	0.735	1.009	0.313	0.990	1.304	1.291
50.061	0.278	0.759	1.036	0.338	1.012	1.350	1.348
59.899	0.275	0.735	1.010	0.367	1.037	1.404	1.381
69.995	0.279	0.783	1.063	0.402	1.069	1.471	1.460
79.837	0.277	0.783	1.060	0.442	1.094	1.536	1.516
90.086	0.280	0.829	1.109	0.489	1.120	1.609	1.595
99.561	0.282	0.833	1.115	0.538	1.161	1.699	1.696

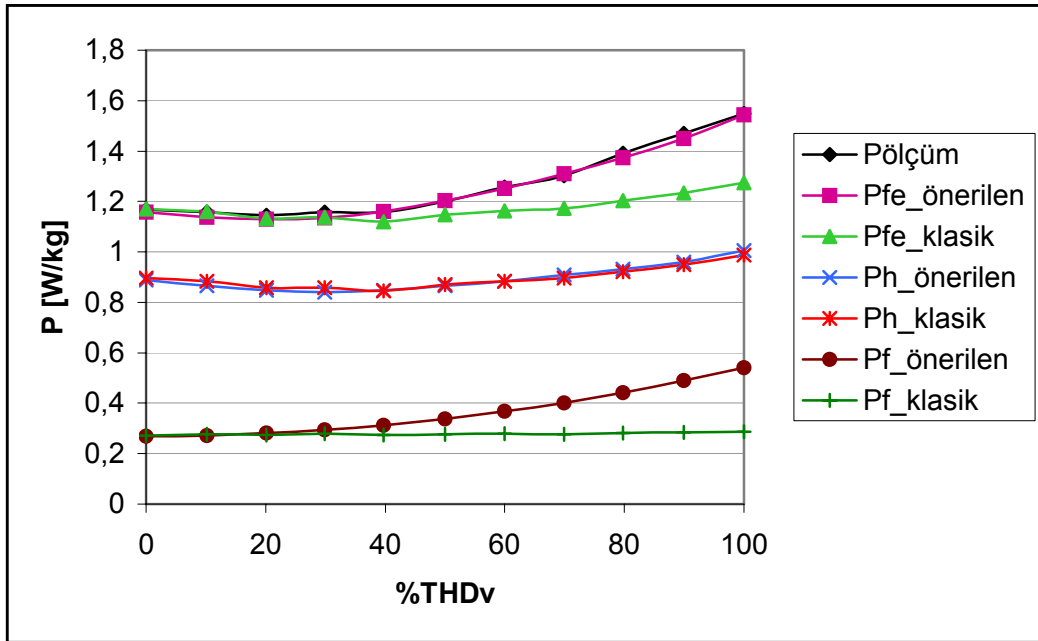
Şekil 4.7 Pozitif 5. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi

Tablo 4.8 Negatif 5. harmonik (Eşitlik 4.4) için deney sonuçları

THD _V %	THD _B %	V ₁ [V]	V ₅ [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B _{5m} [T]	B _m [T]	k _m	k' _s	k' _c
0.000	0.239	5.014	0.000	5.014	104	0.405	0.004	0.569	1.000	1.112	1.405
10.137	2.027	5.135	0.520	5.161	103	0.408	0.009	0.564	1.001	1.131	1.381
20.168	4.034	5.105	1.029	5.207	102	0.407	0.017	0.554	1.003	1.169	1.362
29.879	5.976	5.145	1.537	5.370	103	0.410	0.025	0.554	1.006	1.203	1.352
39.704	7.941	5.088	2.020	5.475	103	0.405	0.032	0.549	1.009	1.262	1.353
49.983	9.997	5.123	2.560	5.727	107	0.409	0.040	0.559	1.013	1.297	1.367
60.010	12.002	5.122	3.074	5.973	112	0.409	0.048	0.564	1.017	1.332	1.377
69.947	13.989	5.093	3.563	6.216	116	0.408	0.056	0.569	1.021	1.389	1.394
79.776	15.955	5.101	4.069	6.525	124	0.411	0.063	0.579	1.025	1.412	1.409
89.987	17.997	5.078	4.569	6.831	131	0.413	0.072	0.590	1.030	1.460	1.426
99.961	19.992	5.076	5.060	7.167	138	0.415	0.080	0.605	1.034	1.513	1.458

Tablo 4.9 Negatif 5. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	
0.000	0.273	0.897	1.169	0.270	0.888	1.158	1.168
10.137	0.277	0.884	1.161	0.273	0.865	1.137	1.157
20.168	0.275	0.858	1.133	0.281	0.848	1.129	1.145
29.879	0.279	0.858	1.137	0.294	0.841	1.135	1.157
39.704	0.273	0.845	1.119	0.313	0.848	1.160	1.157
49.983	0.278	0.871	1.149	0.338	0.867	1.204	1.202
60.010	0.279	0.884	1.162	0.367	0.884	1.251	1.258
69.947	0.277	0.897	1.174	0.402	0.909	1.311	1.303
79.776	0.281	0.923	1.204	0.442	0.932	1.374	1.392
89.987	0.284	0.949	1.233	0.489	0.960	1.448	1.471
99.961	0.286	0.989	1.275	0.540	1.004	1.544	1.550



Şekil 4.8 Negatif 5. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_v ile değişimi

4.4.4. Yedinci harmonik deneyleri

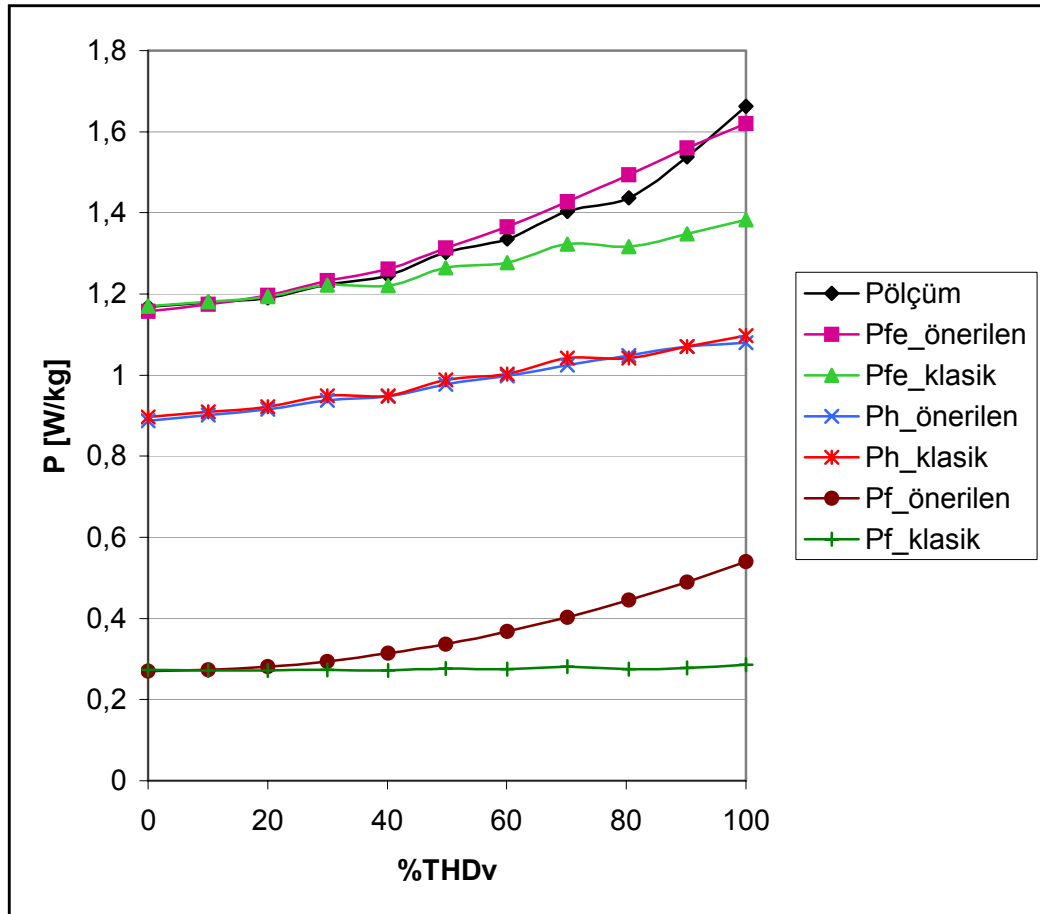
Bu amaçla 4.6 ve 4.7 ifadeleri ile verilen fonksiyonlar, Şekil 4.1'de bağlantı şeması verilen düzenek kullanılarak deney transformatörüne uygulanmış ve aşağıdaki ölçümler alınmıştır.

Tablo 4.10 Pozitif 7. harmonik (Eşitlik 4.5) için deney sonuçları

THD _v %	THD _B %	V ₁ [V]	V ₇ [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B _{7m} [T]	B _m [T]	k _m	k' _s	k' _c
0.000	0.239	5.011	0.000	5.011	104	0.405	0.0026	0.569	1.000	1.110	1.405
10.100	2.020	5.003	0.505	5.028	105	0.405	0.0051	0.574	1.000	1.109	1.420
20.000	4.000	5.102	1.000	5.199	106	0.404	0.0101	0.579	1.000	1.123	1.433
30.000	6.000	5.052	1.500	5.270	109	0.406	0.0163	0.59	1.000	1.134	1.453
40.100	8.020	5.011	2.005	5.397	111	0.404	0.0221	0.59	1.000	1.167	1.459
49.800	9.960	5.122	2.490	5.695	116	0.407	0.028	0.605	1.000	1.185	1.485
60.100	12.020	5.120	3.005	5.937	119	0.406	0.0337	0.61	1.000	1.235	1.501
70.100	14.020	5.102	3.505	6.190	125	0.411	0.0397	0.625	1.000	1.266	1.522
80.400	16.080	5.101	4.020	6.495	128	0.406	0.0444	0.625	1.000	1.337	1.540
90.200	18.040	5.103	4.510	6.810	137	0.409	0.051	0.636	1.000	1.356	1.555
100.000	20.000	5.113	5.000	7.151	148	0.415	0.0586	0.646	1.000	1.365	1.558

Tablo 4.11 Pozitif 7. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	
0.000	0.273	0.897	1.169	0.270	0.887	1.157	1.168
10.100	0.272	0.909	1.182	0.273	0.902	1.175	1.179
20.000	0.272	0.923	1.194	0.281	0.916	1.197	1.190
30.000	0.274	0.949	1.223	0.294	0.939	1.233	1.224
40.100	0.271	0.949	1.220	0.314	0.948	1.261	1.246
49.800	0.276	0.989	1.265	0.337	0.977	1.314	1.303
60.100	0.275	1.002	1.277	0.368	0.998	1.365	1.336
70.100	0.281	1.043	1.324	0.403	1.024	1.427	1.404
80.400	0.274	1.043	1.317	0.445	1.049	1.493	1.437
90.200	0.278	1.070	1.348	0.490	1.070	1.560	1.538
100.000	0.286	1.098	1.384	0.540	1.080	1.620	1.662

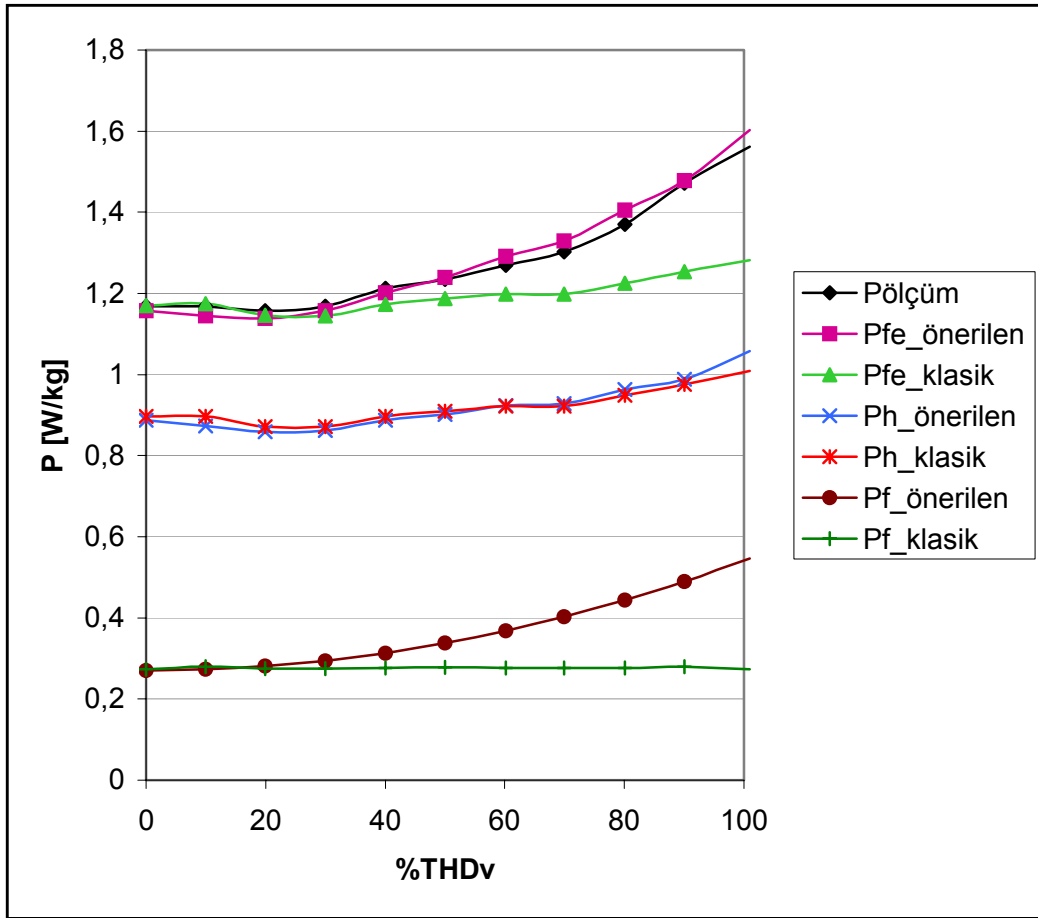
Şekil 4.9 Pozitif 7. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_V ile değişimi

Tablo 4.12 Negatif 7. harmonik (Eşitlik 4.6) için deney sonuçları

THD _V %	THD _B %	V ₁ [V]	V ₇ [V]	V [V]	P [mW]	B [T]	B _{7m} [T]	B _m [T]	k _m	k' _s	k' _c
0.000	0.239	5.014	0.000	5.014	104	0.405	0.003	0.569	1.000	1.111	1.405
10.000	2.000	5.135	0.520	5.161	104	0.410	0.007	0.569	1.001	1.121	1.389
19.900	3.980	5.105	1.029	5.207	103	0.407	0.012	0.559	1.002	1.156	1.374
30.000	6.000	5.145	1.537	5.370	104	0.406	0.018	0.559	1.003	1.189	1.375
40.000	8.000	5.088	2.020	5.475	108	0.407	0.024	0.569	1.005	1.208	1.397
50.000	10.000	5.123	2.560	5.727	110	0.408	0.029	0.574	1.007	1.259	1.406
60.200	12.040	5.122	3.074	5.973	113	0.407	0.035	0.579	1.010	1.315	1.423
69.900	13.980	5.093	3.563	6.216	116	0.407	0.035	0.579	1.010	1.374	1.423
80.100	16.020	5.101	4.069	6.525	122	0.407	0.045	0.590	1.014	1.424	1.448
90.000	18.000	5.078	4.569	6.831	131	0.410	0.052	0.600	1.017	1.446	1.464
101.000	20.200	5.076	5.060	7.167	139	0.406	0.073	0.613	1.028	1.510	1.511

Tablo 4.13 Negatif 7. harmonik için demir kayıpları

THD _V %	Steinmetz Çözümü			Önerilen Yöntem			Deney Sonucu
	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_f$ [W/kg]	$\overline{P}_h$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]	$\overline{P}_{fe}$ [W/kg]
0.000	0.273	0.897	1.169	0.270	0.887	1.158	1.168
10.000	0.279	0.897	1.175	0.273	0.872	1.145	1.168
19.900	0.275	0.871	1.146	0.281	0.858	1.139	1.157
30.000	0.275	0.871	1.145	0.294	0.863	1.157	1.168
40.000	0.276	0.897	1.173	0.313	0.888	1.201	1.213
50.000	0.277	0.909	1.187	0.338	0.902	1.240	1.235
60.200	0.276	0.923	1.198	0.368	0.924	1.292	1.269
69.900	0.276	0.923	1.198	0.402	0.928	1.330	1.303
80.100	0.276	0.949	1.225	0.443	0.963	1.406	1.370
90.000	0.279	0.975	1.254	0.489	0.989	1.478	1.471
101.000	0.274	1.009	1.282	0.546	1.058	1.603	1.561



Şekil 4.10 Negatif 7. harmonik için, klasik Steinmetz ifadeleri ve önerilen yaklaşım ile hesaplanan demir kayıplarının THD_v ile değişimi

Şekil 4.5 - 4.10'dan görüleceği üzere, önerilen yöntem (Eşitlik 3.78, 3.79) ile, besleme geriliminde oluşacak bozulmalar durumunda açığa çıkacak demir kayıpları ve dağılımı, klasik Steinmetz ifadelerine (Eşitlik 2.12 ve 2.22) göre çok daha doğru olarak hesaplanabilmektedir. Yapılan hataların analizi ve detaylı karşılaştırmalar Bölüm 5'te incelenmiştir.

BÖLÜM 5. TEORİK VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

5.1. Giriş

Bu bölümde; Bölüm 3'te 3.78 ve 3.79 ile verilen sinüsoidal olmayan gerilimlerde oluşan demir kayıplarının bulunmasına ilişkin ifadelerin, Bölüm 4'te elde edilen deney sonuçları ile karşılaştırılması yapılacaktır. Başlangıç değerleri olarak, Ek 2'de verilen 50 Hz frekanslı saf sinüsoidal gerilime ait Foucault, histerezis ve toplam demir kayıpları;

$$\overline{P_f} = 0.271 \quad [\text{W/kg}] \quad (5.1)$$

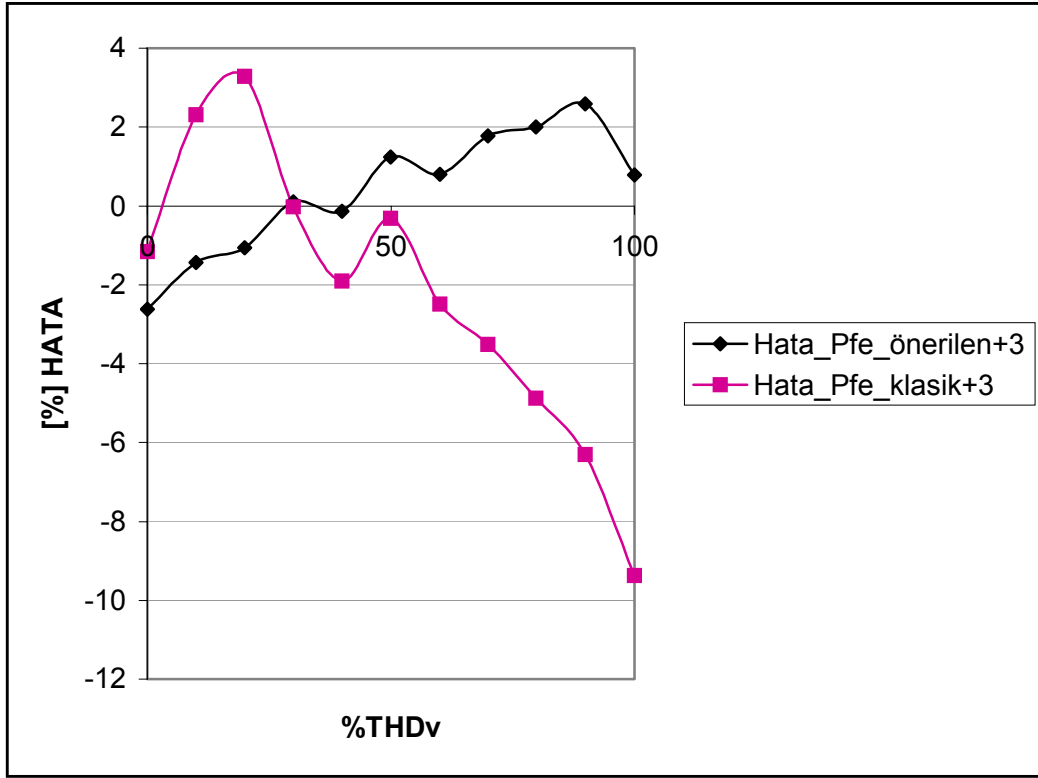
$$\overline{P_h} = 0.884 \quad [\text{W/kg}] \quad (5.2)$$

$$\overline{P_{fe}} = 1.154 \quad [\text{W/kg}] \quad (5.3)$$

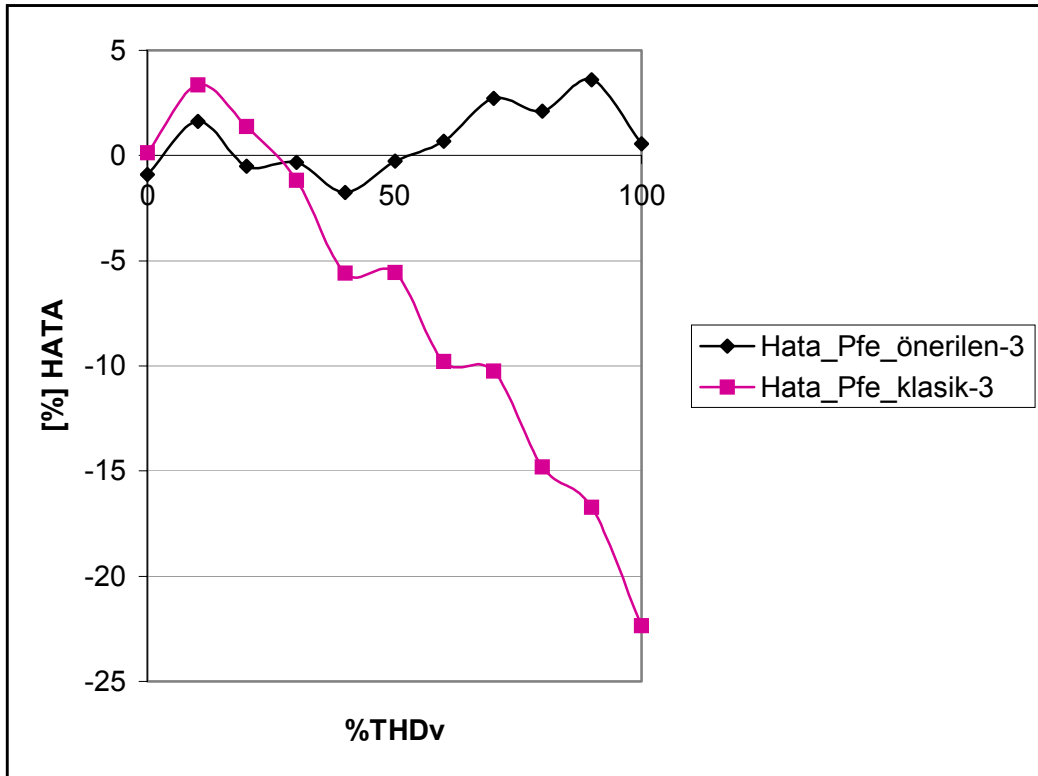
alınacaktır.

5.2. Sonuçların değerlendirilmesi

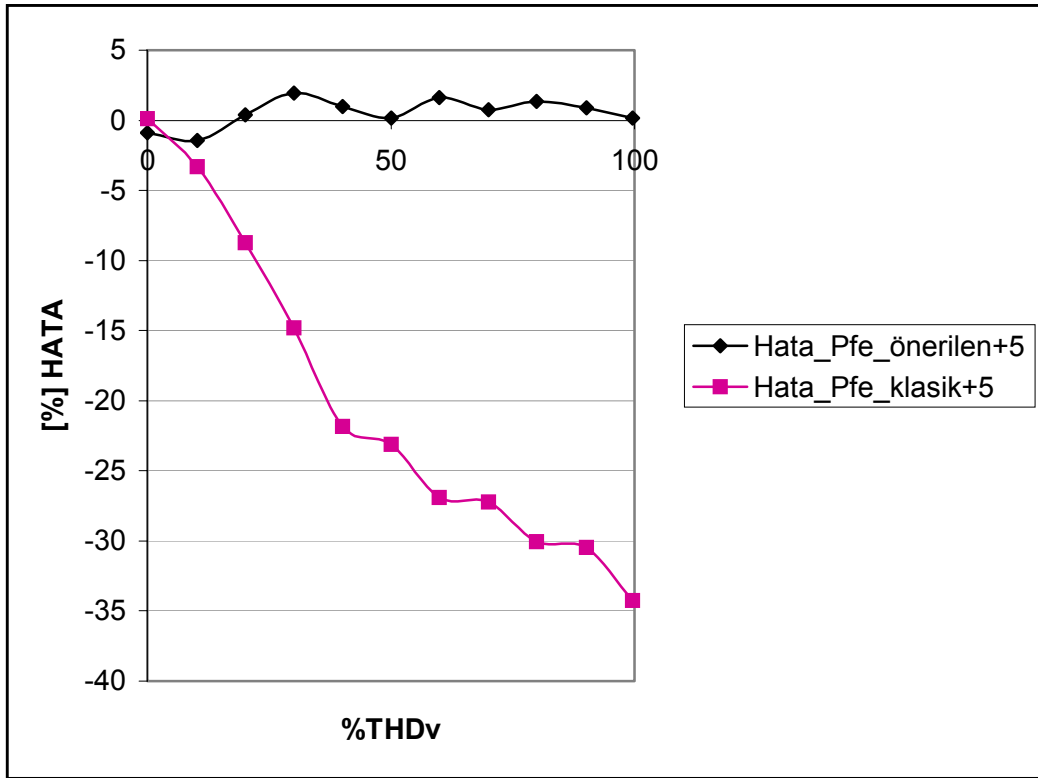
Karşılaştırmada, her bir harmonik içerik için, harmonik bileşen fazının 0° ve 180° değer olması durumlarında, toplam demir kayıplarının belirlenmesinde yapılan yöntem hatası incelenecektir.



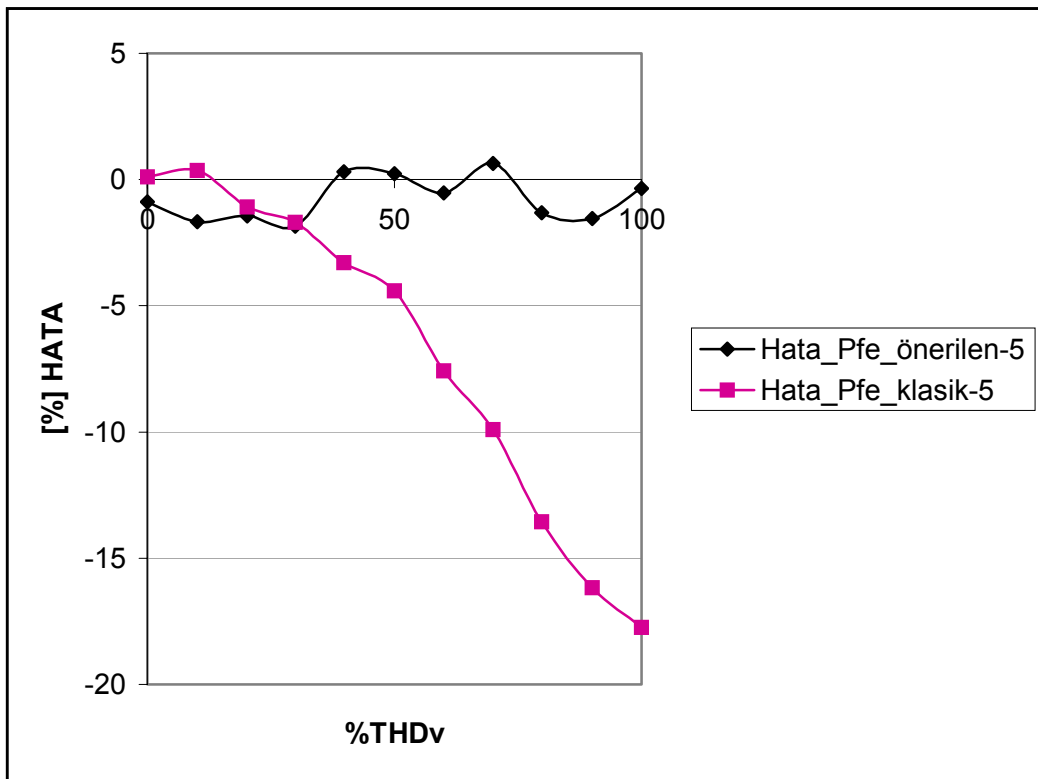
Şekil 5.1 Pozitif 3. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata



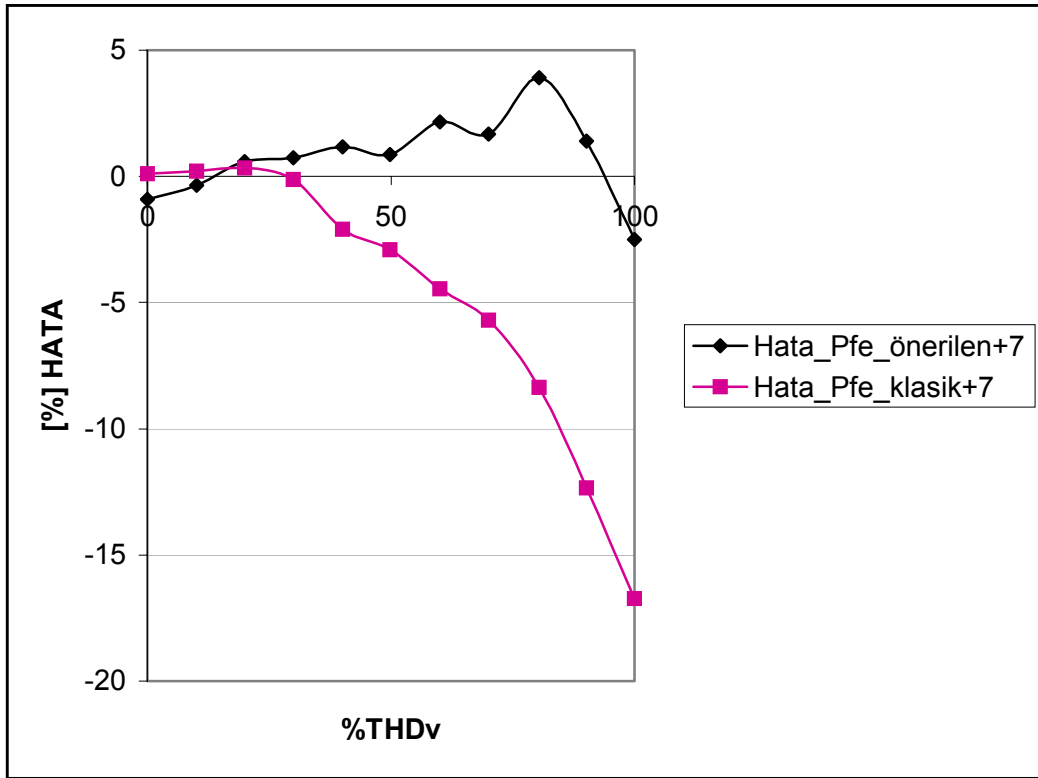
Şekil 5.2 Negatif 3. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata



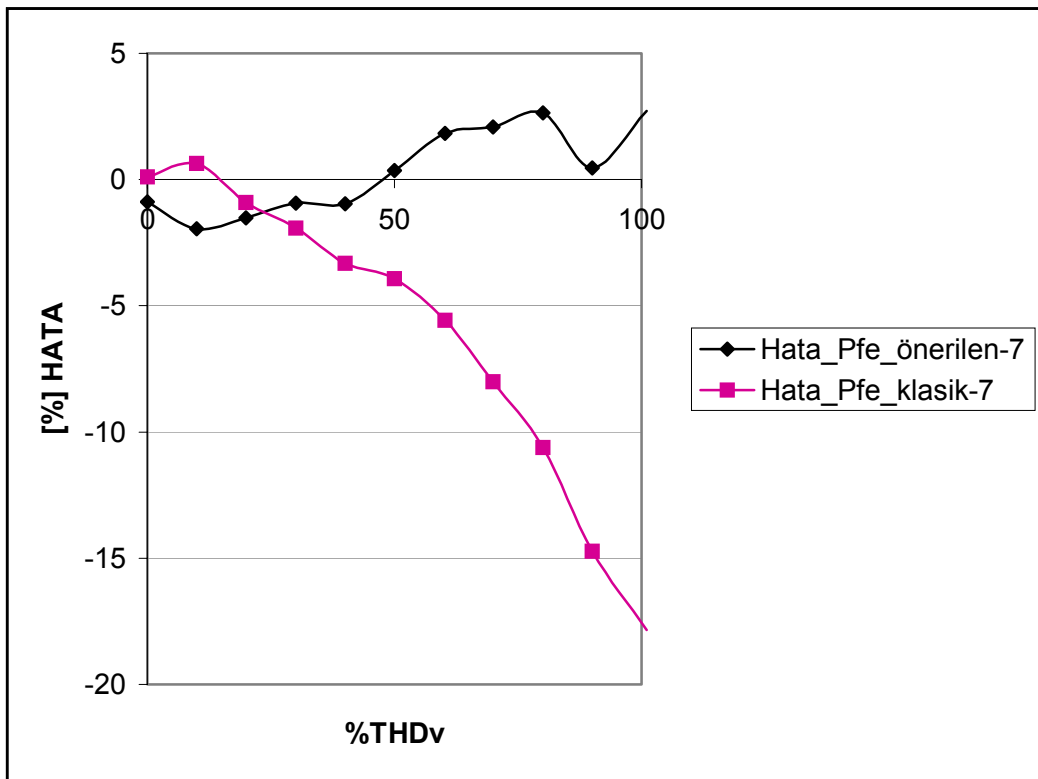
Şekil 5.3 Pozitif 5. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata



Şekil 5.4 Negatif 5. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata



Şekil 5.5 Pozitif 7. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata



Şekil 5.6 Negatif 7. harmonikli gerilimde, toplam demir kaybının belirlenmesinde yapılan hata

Şekil 5.1 - 5.6'dan görüldüğü üzere; önerilen hesap yönteminin ölçülen değerlere kıyasla neden olduğu yöntem hatası, tüm durumlar için %3 'ten küçük kalmaktadır. Oysa klasik yöntem ile yapılan hata %34'lere çıkabilmektedir. Diğer taraftan, klasik yöntemde; pozitif 5. harmoniğin bulunduğu dalgada, $THD_V > \%12$ olduğunda hata %5'i aşmakta; incelenen diğer harmonikli dalgalarda ise %5 hata sınırı genellikle $THD_V > \%50$ 'den sonra aşılmaktadır.

Yukarıdaki hataların içerisinde %3 veri toplama sisteminin hatası da bulunmaktadır. Diğer bir deyişle; watmetrenin %2 hata ile ölçtüğü toplam demir kayıplarına, %3 hatalı veri toplama sistemi ve bu tezde önerilen hesaplama yöntemi kullanılarak %97 yakınsanmıştır.

Şekil 5.1 - 5.6'da önerilen yöntem ve klasik yöntem hesaplamalarındaki eğilim bozukluklarına; veri toplama sistemi (Tektronix TDS224) ile watmetrenin (Fluke 43) örnek almaya eş zamanlı olarak başlamaması neden olmuştur. Her iki cihaz da sayıma el ile başlatılmıştır.

Bölüm 3.5'te bahsedildiği üzere, örüntü 2 biçimindeki besleme gerilimlerinde (-3., -5., -7. harmonikli), histerezis çevrimlerinde ikişer adet minör çevrim oluştuğundan, klasik bağıntı (Eşitlik 2.22) bu ilaveleri değerlendirememiş ve histerezis kayıplarının hesabında yapılan hata artmıştır. Hata özellikle artan THD_V ile artmıştır. Bu yüzden oluşturulan k_m ; minör çevrim düzeltme katsayısı hatanın en büyük olduğu $THD_V \%100$ değerleri için optimize edilmiştir (bkz Ek 4).

3.28 Bağıntısından kolayca görüleceği üzere, harmonik içerik ne olursa olsun $THD_V \%100$ olduğunda, Foucault kayıpları %100 artmaktadır. Oysa klasik Richter bağıntısında (Eşitlik 2.12) bu artış sadece %11'dir. Diğer bir deyişle; $THD_V \%100$ 'e giderken, Foucault kayıplarında yapılan hata %89'a gitmektedir.

Temel bileşen ile 3, 5 veya 7. harmoniğin bulunduğu besleme gerilimlerinde demir kayıpları, Bölüm 3.6'da verilen bağıntılar kullanılarak %3 hata bandı içinde belirlenmiştir. Bu da, tezde elde edilen bağıntıların doğruluğunu ve bağıntıların elde edilmesinde yapılan kabullerin geçerli kaldığını göstermektedir.

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Sinüsoidal olmayan gerilimlerde yönlendirilmemiş saclarda oluşan harmonik kayıpların belirlenmesi, konulu bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Foucault ve histerezis kayıpları uygulanan gerilimin dalga şekli ile değişmektedir.
- Uygulanan gerilimin toplam harmonik distorsiyonu arttığında, Foucault kayıpları harmonik içerik ve bileşenlerin fazlarından bağımsız olarak artmaktadır. Artış;

$$\left(\alpha^2 + \text{THD}_{V'}^2\right) \text{ yada } \left[\left(\frac{2}{\pi} \cdot k'_s \cdot k'_c\right)^2 \cdot \left(\alpha^2 + \text{THD}_{B'}^2\right)\right]$$

ile orantılıdır.

- Histerezis kayıpları uygulanan gerilimin dalga şekli ile değişmektedir.
- Uygulanan sinüsoidal olmayan gerilim şekil faktörü küçüldüğünde veya toplam harmonik distorsiyonu arttığında histerezis kayıpları artmaktadır. Sinüsoidal olmayan gerilimde histerezis kayıplarının değişim katsayısı, uygulanan gerilimin parametreleri cinsinden;

$$\left[k_m \cdot \frac{f_r}{f_l} \cdot \left(\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{k'_s} \cdot \sqrt{\alpha^2 + \text{THD}_{V'}^2}\right)^x\right]$$

dir.

Aynı ilişki manyetik akı yoğunluğu cinsinden ifade edildiğinde; akı yoğunluğunun tepe faktörü veya toplam harmonik distorsiyonu arttığında histerezis kayıpları artmaktadır. Sinüsoidal olmayan gerilimde histerezis kayıplarının değişim katsayısı, akı yoğunluğu parametreleri cinsinden;

$$\left[k_m \cdot \frac{f_r}{f_1} \cdot \left(\frac{k_c'}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\alpha^2 + \text{THD}_{B'}^2} \right)^x \right]$$

dir.

- Histerezis kayıpları Foucault kayıplarından farklı olarak, gerilimin harmonik bileşenlerinin fazlarına da bağlıdır. Harmonik bileşen 180° fazlı olduğunda; endüksiyonun maksimum değeri düşmekte olup, bu durum klasik Steinmetz ifadesi kullanıldığında histerezis kaybı azalmış olarak hesaplanmaktadır. Oysa bu durumda histerezis çevrimi içinde minör çevrimler oluşmakta ve bu çevrimler klasik Steinmetz ifadesi ile değerlendirilememektedir. Bu tezde, oluşturulan minör çevrim düzeltme katsayısı ile bu hata düzeltilmiştir.
- 3., 5. veya 7. harmoniği bulunan, tek harmonik bileşenli sinüsoidal olmayan besleme gerilimlerinde, demir kayıplarının hesaplanmasında klasik Steinmetz ve Richter bağıntıları kullanıldığında yapılan yöntem hatası %34'e kadar çıkarken, bu çalışmada önerilen bağıntılar ile yapılan hesaplamalarda hata %3'ten küçük kalmıştır.
- Sinüsoidal olmayan gerilimlerde, klasik bağıntıların kullanımında oluşan hataların çoğu Foucault kayıplarının yanlış hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. THD_v %100 olduğunda, Foucault kayıplarının klasik Richter bağıntısı ile hesaplanması analitik olarak %-89 yöntem hatasına neden olurken, önerilen bağıntılar ile %3 hata payı içinde kalmaktadır.

BÖLÜM 7. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu çalışmada oluşturulan teorik yaklaşımlar, Bölüm 3.2’de yapılan kabuller içerisinde oluşturulmuş ve kabullere uygun olarak manyetik olarak lineer bölgede yapılan Bölüm 4’teki deneysel çalışmalar ile iyi bir örtüşme görülmüştür. Tezde önerilen bağıntıların doyma durumunda nasıl cevap vereceği araştırılmamıştır. Yaklaşım itibarı ile, elde edilen çok çarpanlı bağıntılar, hesap sonuçlarını dalga şekli ile sıkıca ilişkilendirmiş olup, manyetik doyma durumunda oluşacak yeni dalga şekillerinde, şekil faktörü ve tepe faktörlerinin yeni alacaklar değerlerin doymanın etkilerini ne kadar değerlendireceği araştırılmalıdır.

Tezde sadece seçilen bağıntılar arasındaki yaklaşım farklılığından kaynaklanan yöntem hataları değerlendirilmiştir. Toplam ölçme hatasının belirlenebilmesi için ölçü aletlerinin yapım hatalarının da değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu tezi devam edecek çalışmalarda, doyma durumunda kayıpların değişimi incelenebilir.

Farklı harmonik içerikler ve farklı bileşen fazları olması durumları da ayrı bir inceleme konusudur.

Yapılan deneylerde birden fazla harmonik olması durumunda harmonik bileşenlerin istenilen faz farklarında olmasının sağlanması son derece güçtür. Bu yüzden çoklu harmonik durumu incelenmemiş, k_m nin belirlenmesinde deney sonuçlarından tüme varımlar yapılmıştır. Çok harmonikli dalgada, bileşen fazlarının istenildiği gibi ayarlanabildiği bir harmonik kaynağı yapılabilirse, minör çevrimler üzerine daha detaylı çalışmalar yapılabilir, belki bu tezde elde edilen bağıntılara eklentiler yapılabilir.

Harmonik kayıplar, oluşturulacak yeni histerezis teorileri ile de araştırılmalıdır.

Gerçek şu ki, bileşik teoriler çekicidir. Ama genellikle bileşik alan teorisi gibi, birleştirilmesi hiç de kolay değildir. Bu anlamda, tüm çözüm uzayını kuşatacak bir demir kayıpları teorisi oluşturmak güzel bir hedef olmakla beraber, 1890'dan bu yana yapılan bir çok büyük meblağlı projeler olmasına rağmen, henüz böyle bir teori geliştirilememiştir. Bilim çözümü bulana kadar araştırmayı ön görmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] GOETHE, P.K., GOETHE, D.W., “Loss Evaluation – will non – Utility Transformers be Next?”, EEIC/EMCW Conference, Chicago, September 1995
- [2] CHANDLER, P.L., PATTERSON, D.J., “Counting the Losses in Very High Efficiency Machine Design”, Renewable Energy 22, pp 143-150, 2001
- [3] SAY, M.G., “The Performance and Design of Alternating Current Machines”, Sir Isaac Pitman and Sons Ltd, 3rd Edition, London, 1958
- [4] DUMAN, H, “Elektrik Makinelerinin Kayıpları ve Teorisi“, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1955
- [5] JILES, D.C., “Hysteresis models: non-linear magnetism on length scales from the atomistic to the macroscopic (Invited)”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, In Press, 2002
- [6] BOTTAUSCIO, O, CHIAMPI, M., CHIARABAGLIO D., REPETTO M., “Preisach-Type Hysteresis Models in Magnetic Field Computation”, Physica B 275, pp 34-39, 2000
- [7] MARTEN SJÖSTRÖM, “Hysteresis Modelling of High Temperature Superconductors”, PhD Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, 2001
- [8] JILES, D.C., ATHERTON, D.L., “Theory of Ferromagnetic Hysteresis”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 61, 1986

[9] YUMUŞAK, N., “Güç Sistemi Devre Elemanlarının Elektriksel Özelliklerinin Elde Edilmesinde Yapay Sinir Ağı Tabanlı Algoritmaların Kullanılması, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi F.B.E., Sakarya, 1998

[10] MERGEN, F, “Effects of Supply Voltage Waveforms upon Iron Losses in An Induction Motor”, Bulletin of The Technical University of Istanbul, Vol 43, No 1, İstanbul, 1990

[11] KACZMAREK, R., AMAR, M., PROTAT, F., “Iron Loss Under PWM Voltage Supply on Epstein Frame and in Induction Motor Core”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 32, No 1, January 1996

[12] LIN, D., BATAN, T., FUCHS, E.F., GRADY, W.M., “Harmonic Losses of Single-Phase Induction Motors Under Nonsinusoidal Voltages”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 11, No 2, June 1996

[13] BOGLIETTI, A., BOTTAUSCIO, M., CHIAMPI, M., PASTORELLI, M., REPETTO, M., “Computation and Measurement of Iron Losses Under PWM Supply Conditions”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 32, No 5, September 1996

[14] RAMIN, D., RIEHEMANN, W., “Power Losses of Finemet Using Nonsinusoidal Waveforms”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 203, pp 298-300, 1999

[15] GOETHE, P.K., GOETHE, D.W., “How Core Losses Affect Operating Costs For Transformers Delivering Non-Sinusoidal Loads”, EIC/EMCW Exposition, Cincinnati, Oct. 1999

[16] REINERT, J., BROCKMEYER, A., De DONCKER, R.W., “Calculation of Losses in Ferro and Ferrimagnetic Materials Based on The Modified Steinmetz Equation”, Proceedings of 34th Annual Meeting of the IEEE Industry Applications Society, Vol 3, pp 2087-2092, 1996

- [17] LI, J., TAREK, A., SULLIVAN, C.R., “Improved Calculation of Core Loss with Nonsinusoidal Waveforms”, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pp 2203-2210, Chicago, Oct 2001

- [18] MASOUM, M.A.S., FUCHS, E.F., “Derating of Anisotropic Transformers Under Nonsinusoidal Operating Conditions”, Electrical Power and Energy Systems, Vol 25, pp 1-12, 2002

- [19] RITCHE, E. “Iron Losses and Properties of Soft Magnetic Materials for Electrical Machines”, Notes for Msc Students, Institution Inst. Of Energy Technolgy, Aalborg University, 1998

- [20] FLANAGAN, W.M., “Handbook of Transformer Design and Application”, 2nd Edition, McGraw-Hill Inc., 1993

- [21] ARRILLIGA, J. , BRADLEY, D.A. , BODGER, P., “Power System Harmonics”, John Wiley and Sons, 1985.

- [22] ANGELI, M., CARDELLI, E., TORRE, E.D., “Modelling of Magnetic Cores for Power Electronics Applications”, Physica B, Vol 275, pp 154-158, 2000

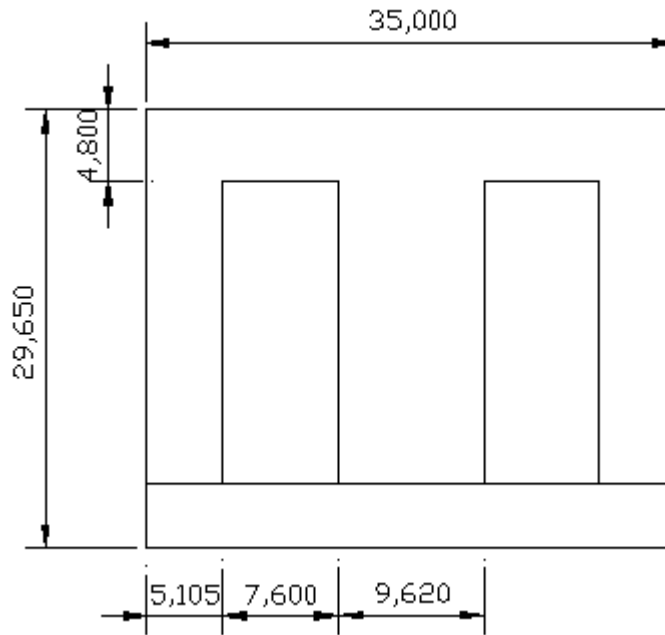
- [23] J. PROUSSALIDIS, N. HATZIARGYRIOU, A. KLADAS, “Iron lamination Efficient representation in power transformers”, Journal of Materials Processing Technology, Vol 108, pp 217-220, 2001

- [24] FIORILLO, F., “DC and AC magnetization Processes in Soft Magnetic Materials”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, In Press, 2002

EKLER

EK 1. Deney Transformatörü ve Ölçü Aletleri

Deney Transformatörü



Şekil Ek 1.1 Deney transformatörünün boyutları (mm cinsinden)

Etiket Değerleri:

Genel Özellikler	Sac özellikleri
12 V / 12 V , 2 VA	Nippon Steel Corp.
$N_1 = N_2 = 296$ Sarım	Yönlendirilmemiş tanecikli
$\phi_1 = \phi_2 = 0.3$ mm	50H700 Grade
$\ell_o = 79.56$ mm	$t = 0.5$ mm
$A = 131.8$ mm ²	$\gamma = 7.8$ kg/dm ³
	$\rho = 27 \cdot 10^{-8}$ $\Omega \cdot m$
	Yığılma faktörü=0.985

Osiloskop

Tektronix TDS 224

150 Mhz, 4 Channel, Digital Real-Time Oscilloscope

Veri toplama = 2500 örnek/kanal

Veri toplama oranı = 180 dalga şekli / s 'ye kadar

Örnekleme oranı = 50 S/s ila 1 GS/s

Düşey doğruluk = %3

RS 232 portlu

Enerji Kalitesi Analizörü

Fluke 43 Power Quality Analyser

Güç ölçmede doğruluk = %2

Gerilim ve akım ölçmede doğruluk = %1

Harmonik ölçmede doğruluk = %3

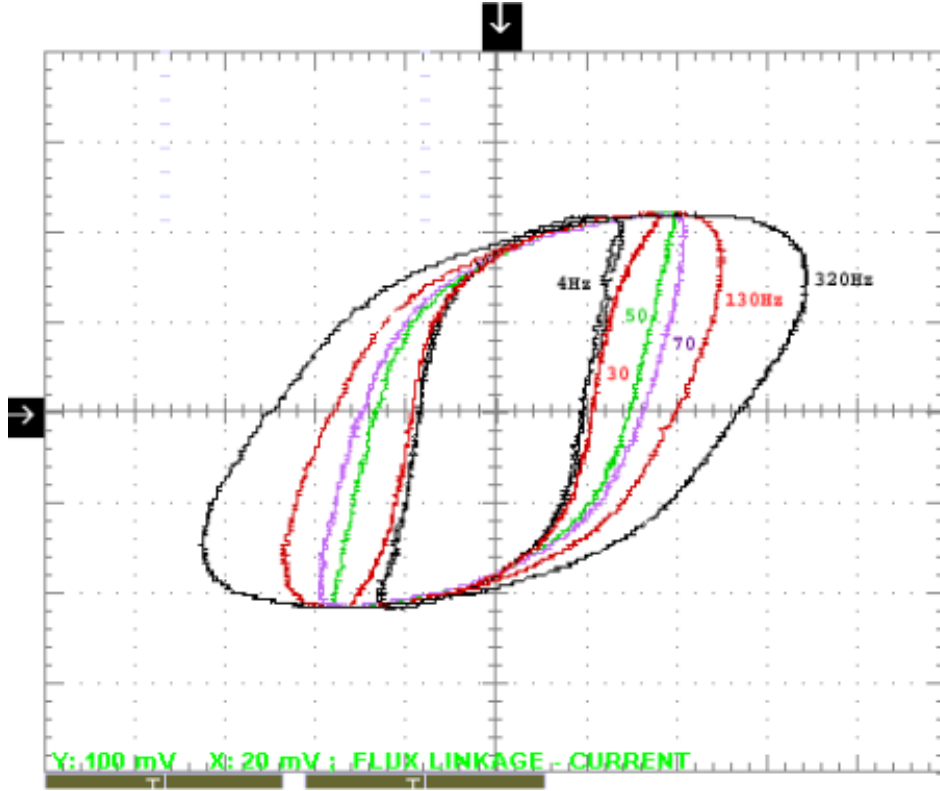
Optik RS 232 portlu



Şekil Ek 1.2 Deney setini görünüşü

EK 2. Sac Kayıp Parametrelerinin Bulunuşu

50 Hz'deki histerezis ve Foucault kayıplarının bulunması



Şekil Ek 2.1 Statik ve dinamik mıknatıslanma eğrileri

Tablo Ek 2.1 1-320 Hz frekans aralığı için BH çevrim alanından hesaplanan demir kayıpları ($B_m=0,564$ Tesla; sabit)

f	P_{fe} [mW]	f	P_{fe} [mW]
1	1.574	70	158,600
4	6.298	90	205,130
6	9,183	110	307,030
8	12,661	130	323,090
10	15,448	145	411,360
20	33,666	150	442,290
30	54,832	155	480,490
40	77,358	170	578,320
45	81,299	190	649,390
50	102,020	240	856,560
55	105,850	250	898,540
60	130,240	310	1219,900
		320	1305,200

Statik histerzis kaybı (1 çevrim için) = 1.432 mW

50 Hz 'de histerezis kaybı;

$$P_{h50} = 50 \cdot 1.432 = 78.72 \text{ mW}$$

Birim ağırlık için;

$$\overline{P}_{h50} = 0.884 \text{ W/kg}$$

Yukarıdaki tablodan 50 Hz 'deki toplam demir kaybı;

$$P_{fe50} = 102.020 \text{ mW}$$

50 Hz'deki Foucault kayıpları;

$$P_{f50} = P_{fe50} - P_{h50}$$

$$P_{f50} = 102 \text{ mW}$$

Birim ağırlık için;

$$\overline{P}_{f50} = 0.271 \text{ W/kg}$$

Bu değerler Bölüm 4 ve 5 te saf sinüsoidal dalgaya ait kayıp bileşenleri olarak alınmıştır.

σ_h ve σ_f katsayıları ve x Steinmetz üstelinin belirlenmesi

Tablo Ek 2.2 1 ile 320 Hz aralığında birim ağırlık başına histerezis ve Foucault kayıpları

f [Hz]	$\bar{P}_h$ [W/kg]	$\bar{P}_f$ [W/kg]	f [Hz]	$\bar{P}_h$ [W/kg]	$\bar{P}_f$ [W/kg]
1	0,016	0,000	70	1,112	0,463
4	0,064	0,002	90	1,429	0,766
6	0,095	0,003	110	1,747	1,144
8	0,127	0,006	130	2,064	1,598
10	0,159	0,009	145	2,302	1,988
20	0,318	0,038	150	2,382	2,127
30	0,476	0,085	155	2,461	2,272
40	0,635	0,151	170	2,699	2,733
45	0,715	0,191	190	3,019	3,417
50	0,794	0,236	240	3,811	5,446
55	0,873	0,286	250	3,970	5,910
60	0,953	0,340	310	4,922	9,087
			320	5,081	9,682

Yukarıdaki tablodan 50 Hz'e ilişkin histerezis ve Foucault kayıpları kullanılarak, aşağıda verilen 2.12 ve 2.22

$$\bar{P}_f = \sigma_f \cdot t^2 \cdot f^2 \cdot B^2 \quad [\text{W/kg}]$$

$$\bar{P}_h = \sigma_h \cdot f \cdot B_m^x \quad [\text{W/kg}]$$

eşitlikleri ile aşağıdaki parametreler hesaplanır:

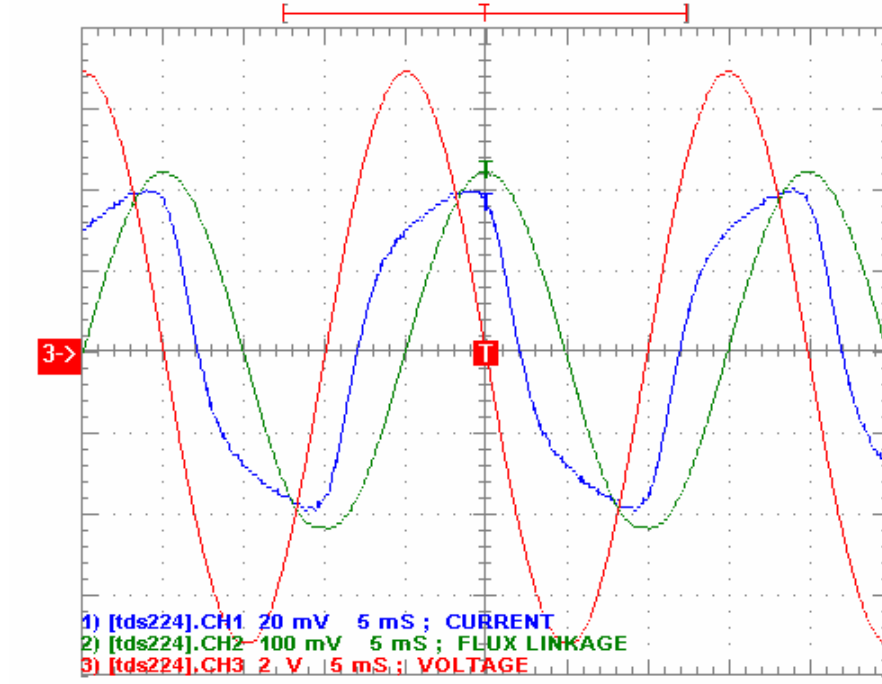
$$\sigma_f = 64.583175$$

$$\sigma_h = 0.008753$$

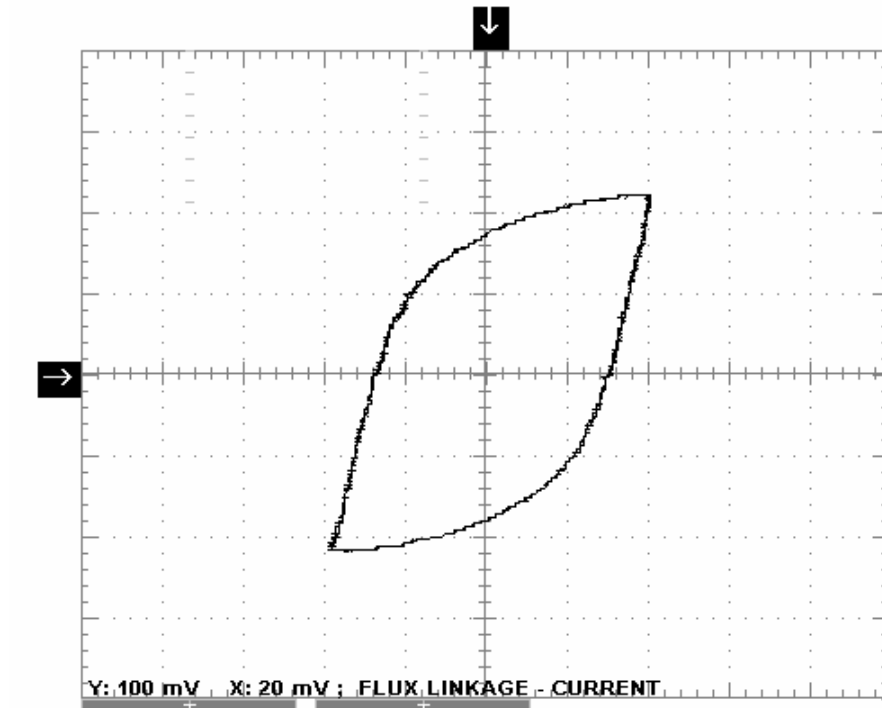
Bu parametreler hesaplanırken Steinmetz üsteli $x = 1.6$ olarak alınmıştır.

EK 3. Deneylerde Kaydedilen Grafikler

Saf sinüsoidal besleme gerilimi İçin alınan grafikler



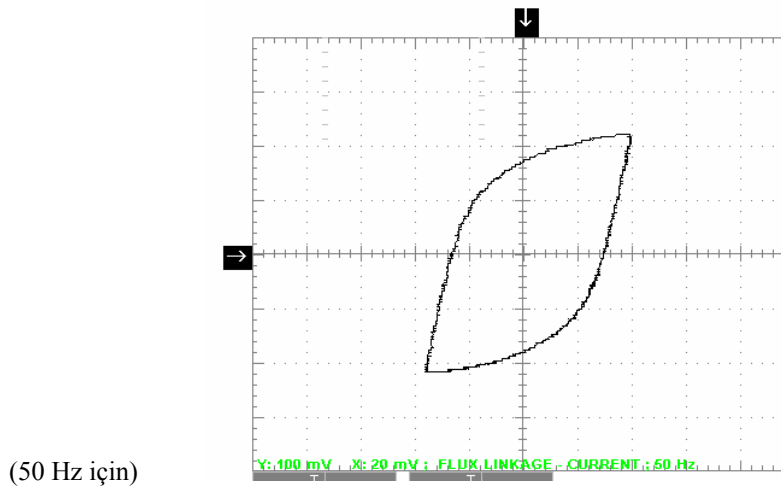
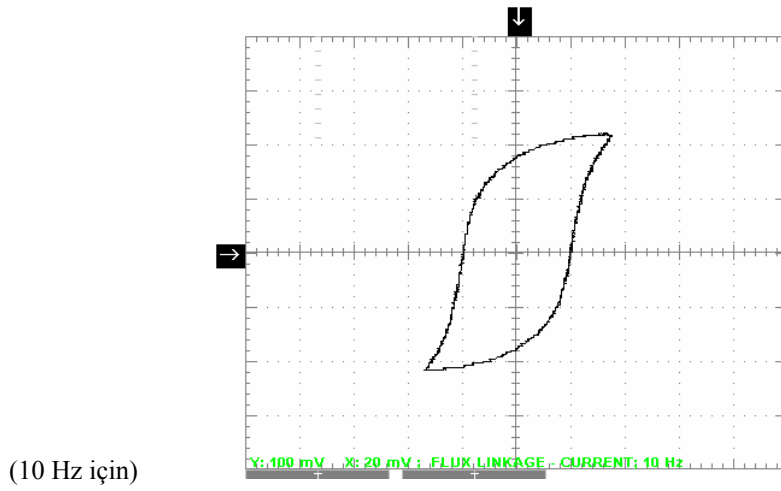
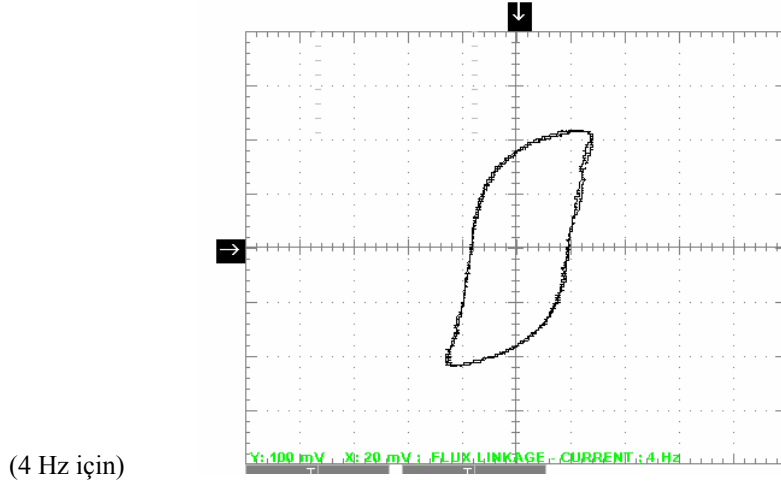
Şekil Ek 3.1 Saf sinüsoidal beslemede akım, gerilim ve akı kavraması değişimleri



Şekil Ek 3.2 Saf sinüsoidal besleme için λ -I çevrimi

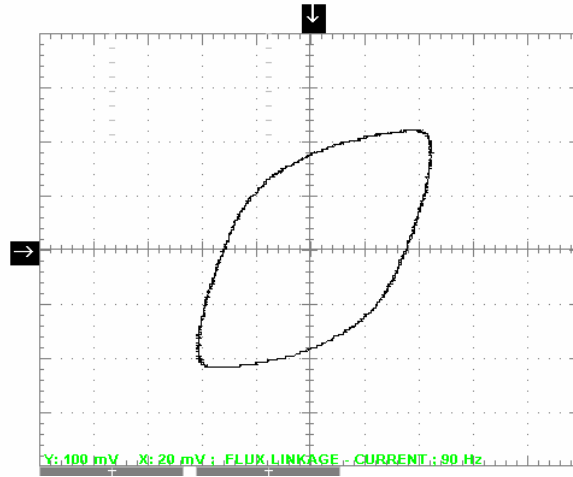
4 – 320 Hz frekans aralığı için ölçülen λ -I çevrimleri

Sabit akı yoğunluğunda, bazı frekanslar için seçilmiş çevrimler aşağıda verilmiştir.

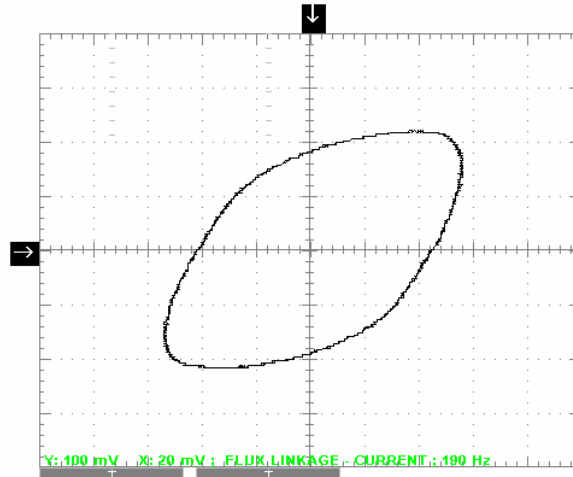


Şekil Ek 3.3 4, 10 ve 50 Hz için λ -I çevrimi

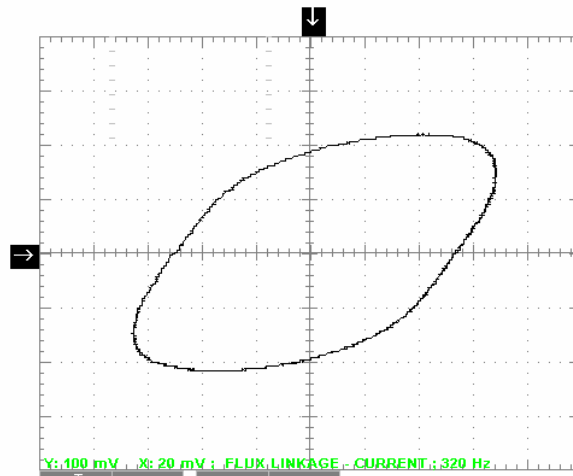
(90 Hz için)



(190 Hz için)

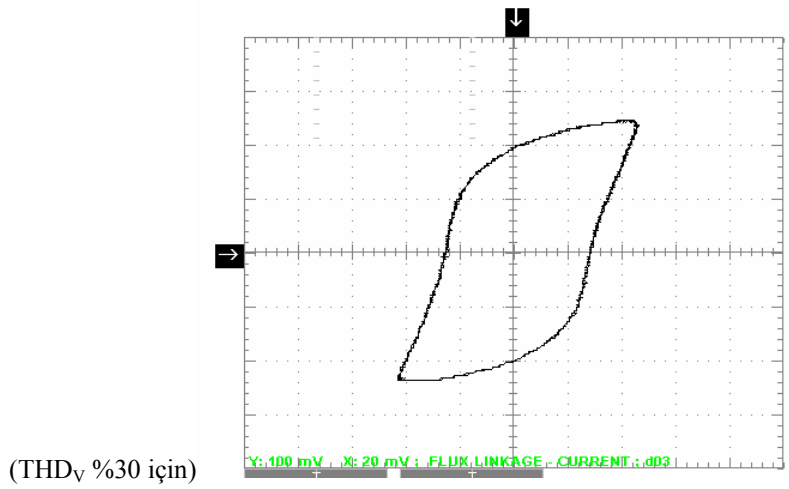
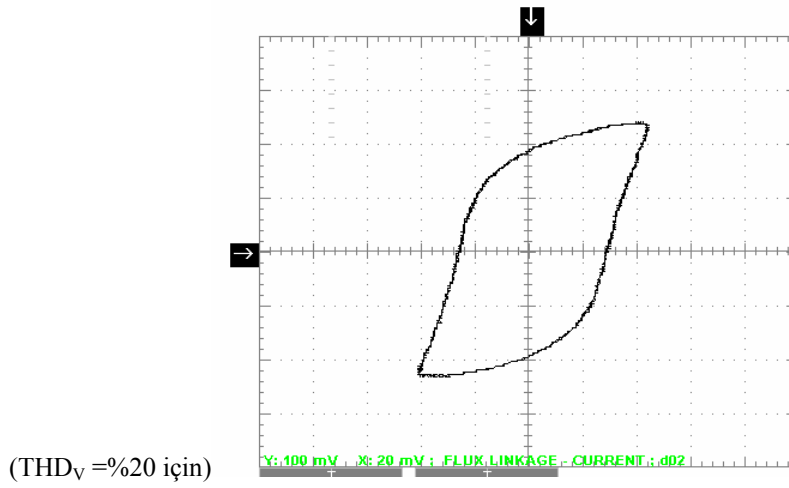
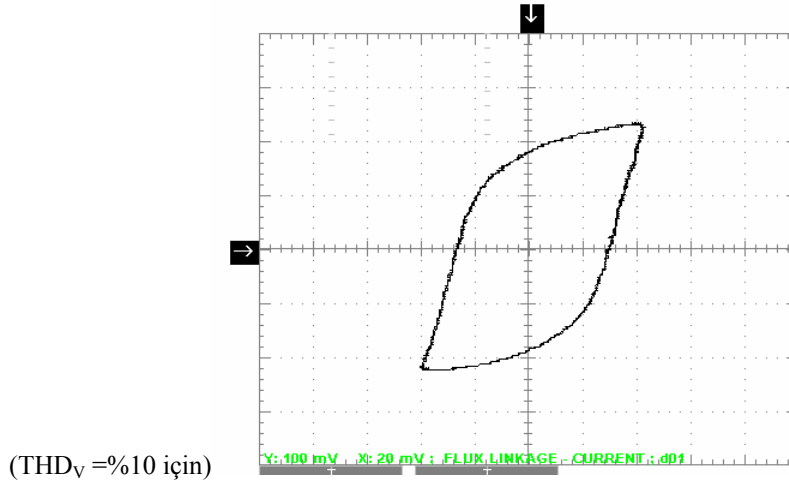


(320 Hz için)



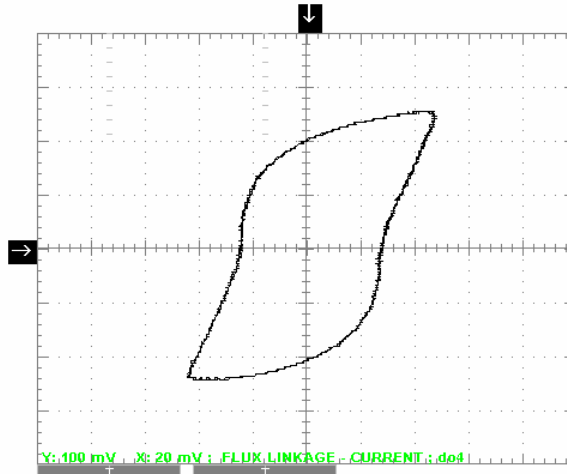
Şekil Ek 3.4 90, 190 ve 320 Hz için λ - I çevrimi

Pozitif 3. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

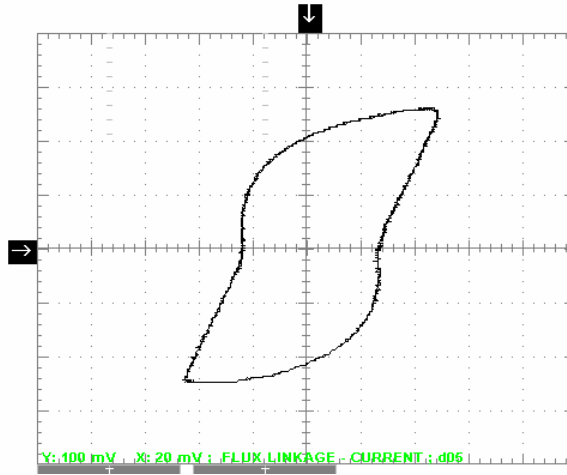


Şekil Ek 3.5 THD_V 'nin %10 ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

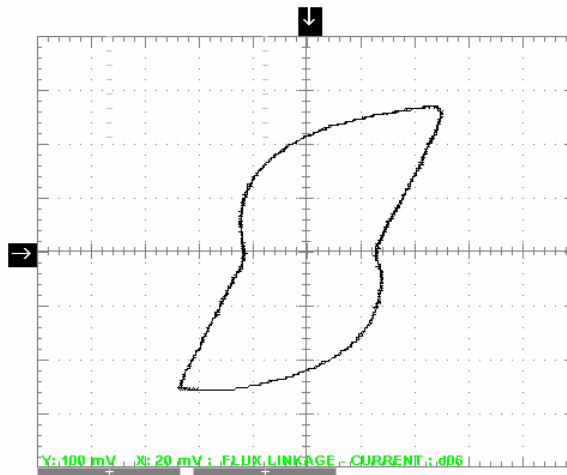
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

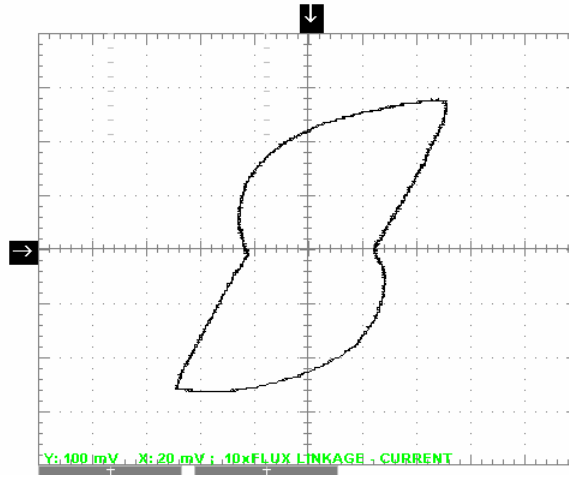


($THD_V = \%60$ için)

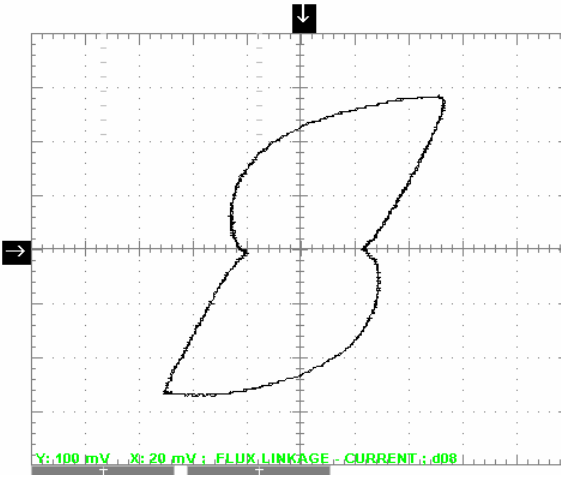


Şekil Ek 3.6 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

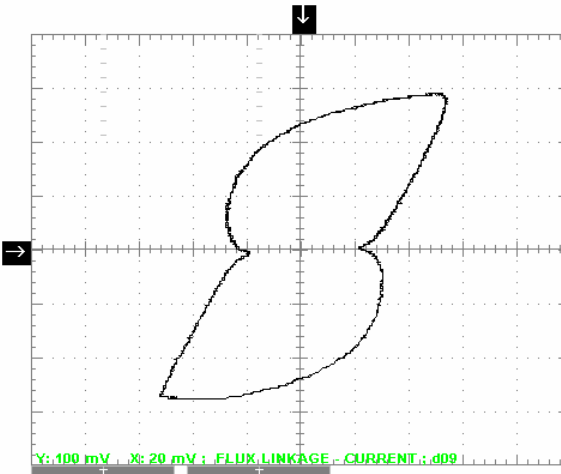
($\text{THD}_V = \%70$ için)



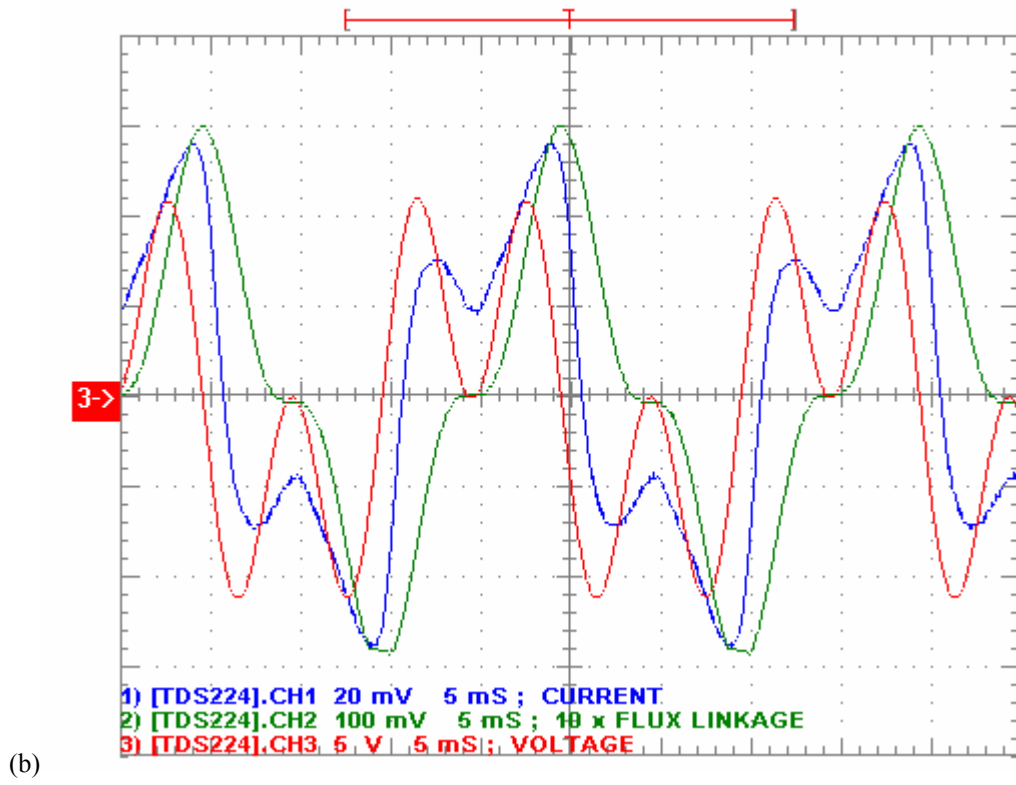
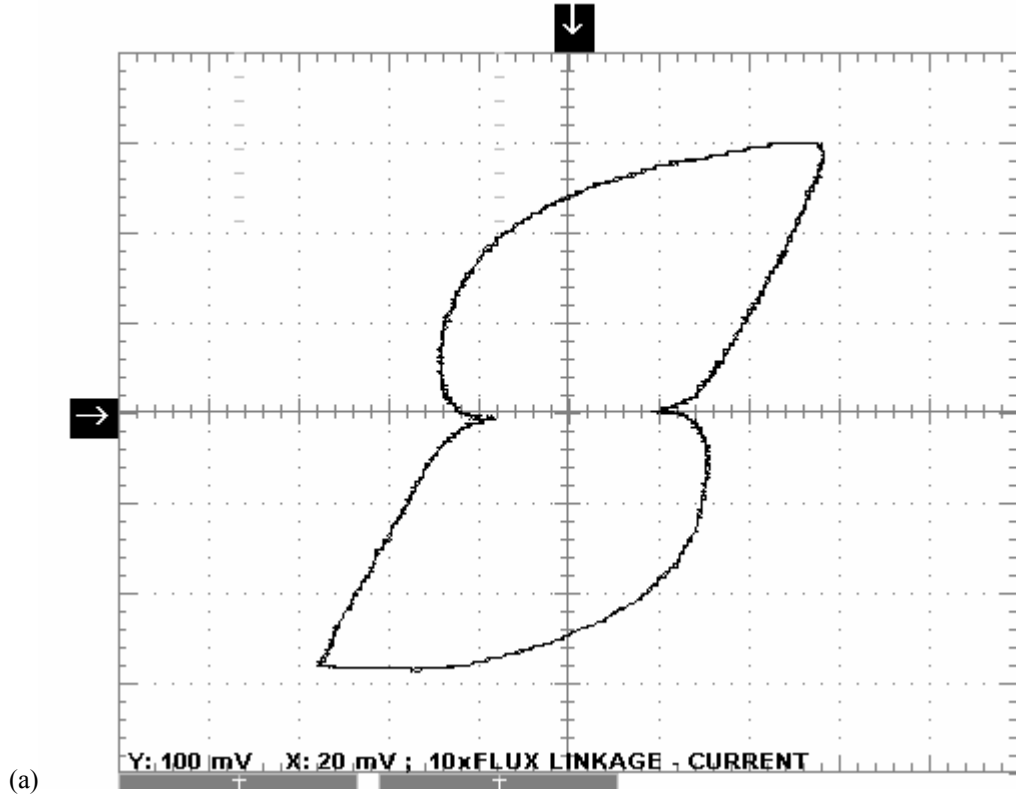
($\text{THD}_V = \%80$ için)



($\text{THD}_V = \%90$ için)

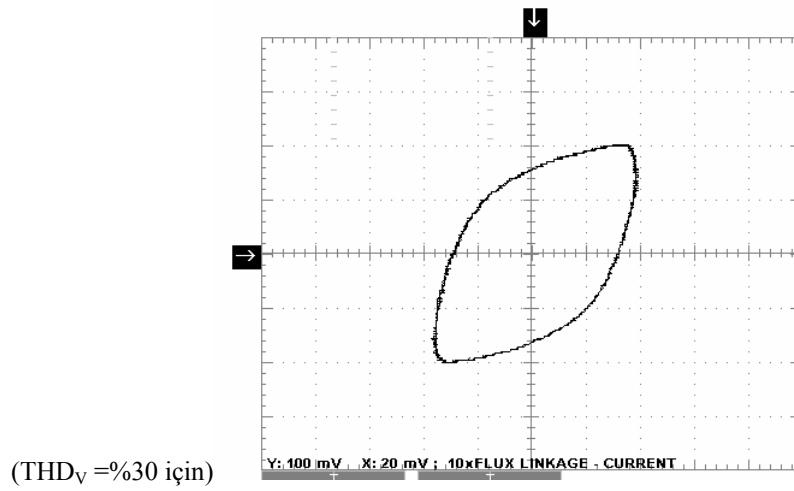
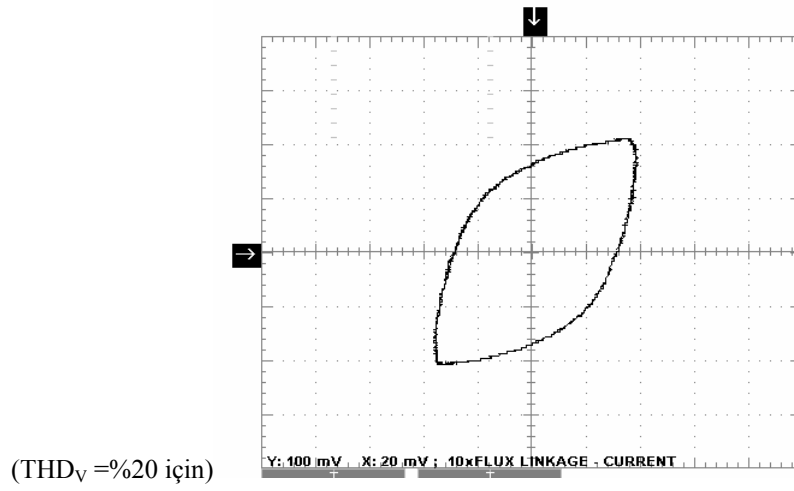
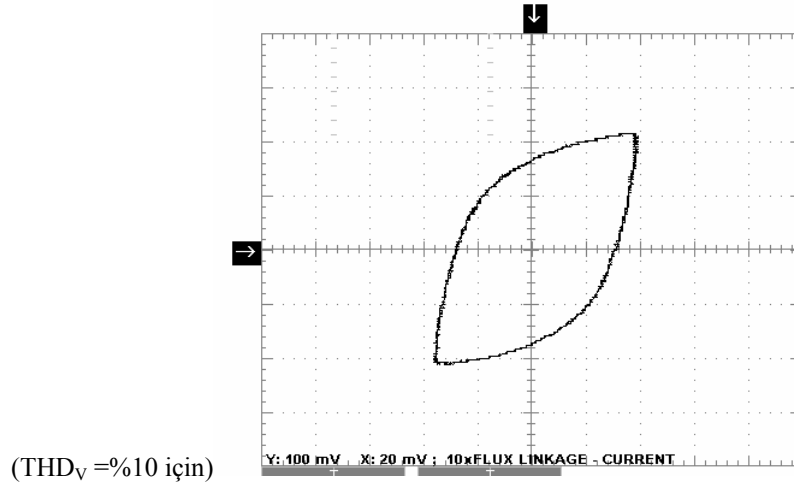


Şekil Ek 3.7 THD_V 'nin %70 ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



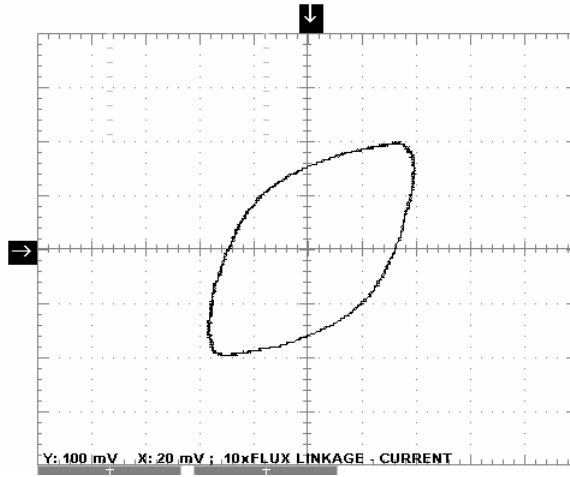
Şekil Ek 3.8 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

Negatif 3. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

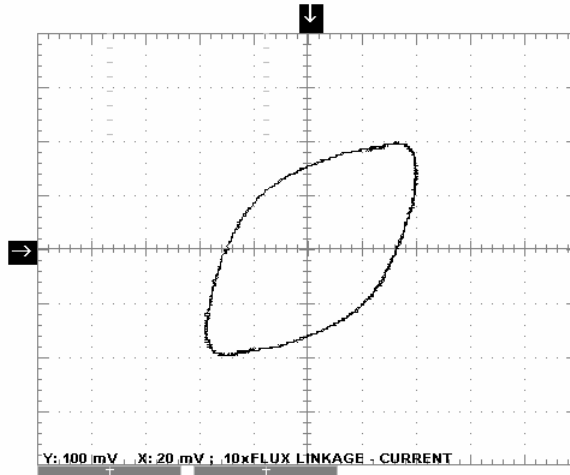


Şekil Ek 3.9 THD_V 'nin %10 ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

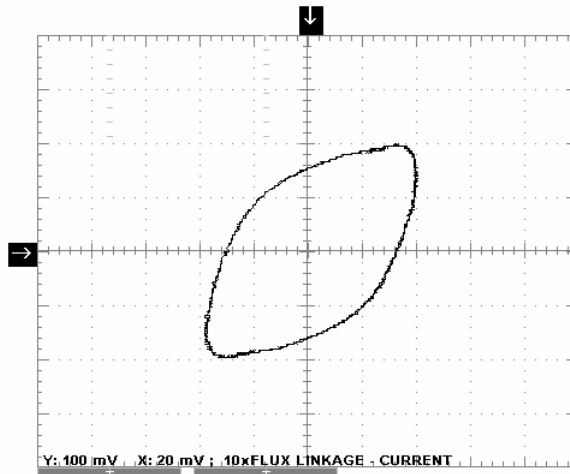
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

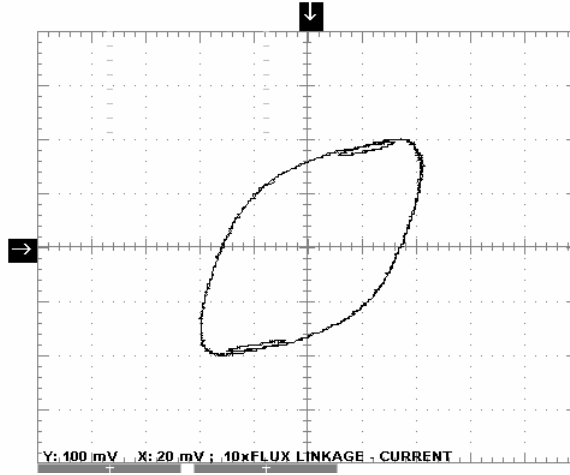


($THD_V = \%60$ için)

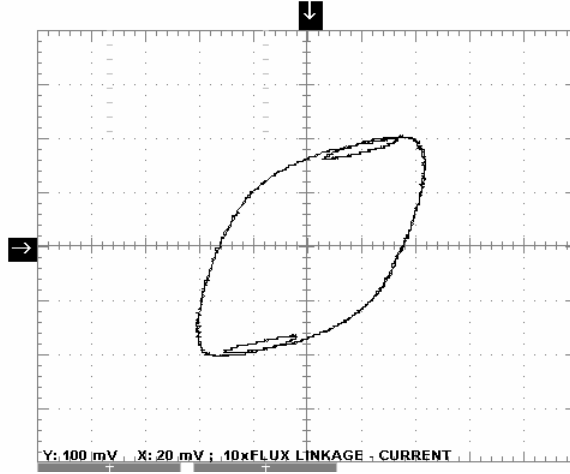


Şekil Ek 3.10 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

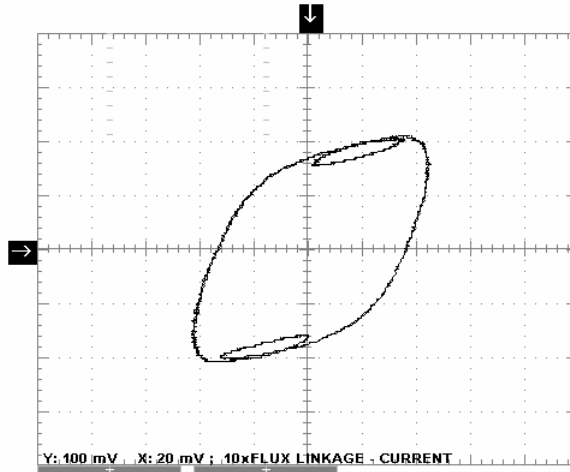
($\text{THD}_V = \%70$ için)



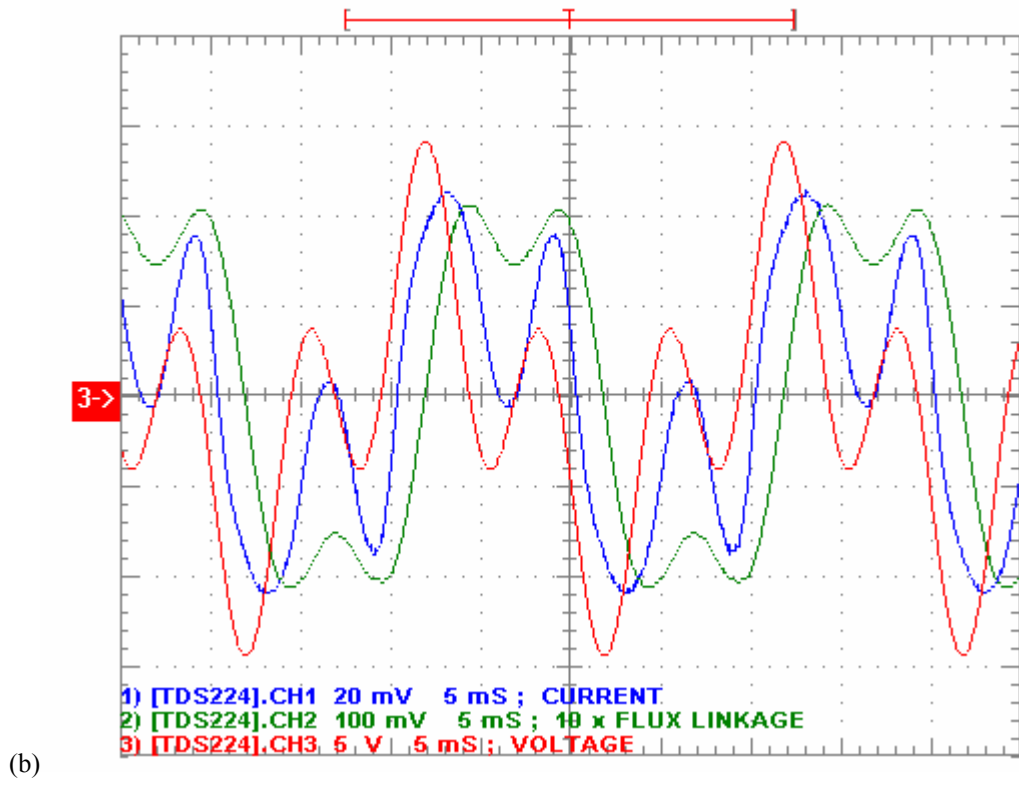
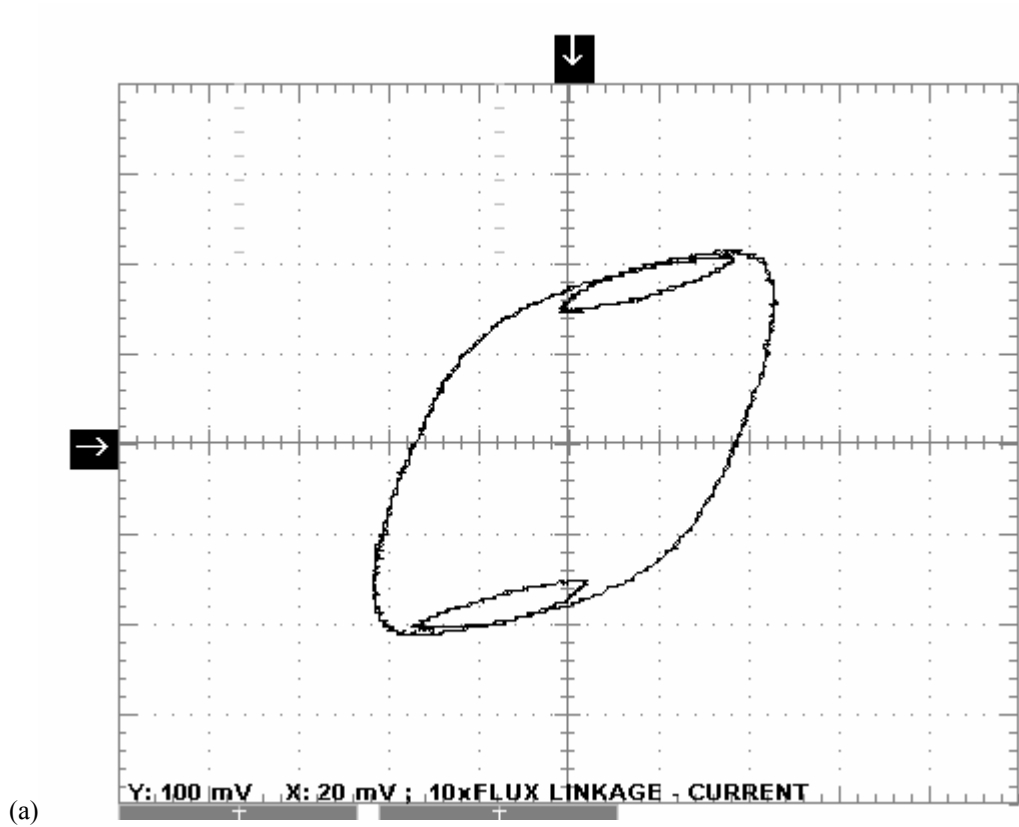
($\text{THD}_V = \%80$ için)



($\text{THD}_V = \%90$ için)



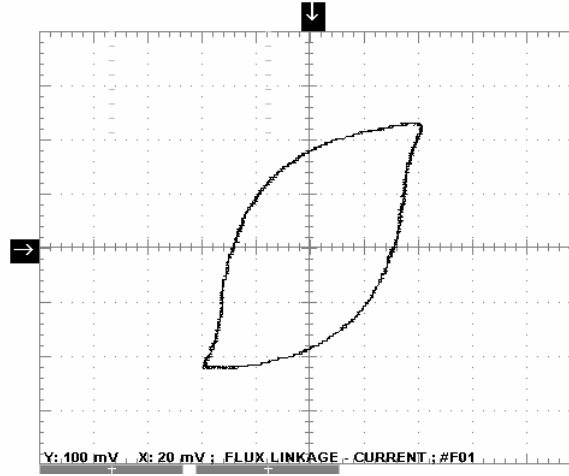
Şekil Ek 3.11 THD_V 'nin %70 ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



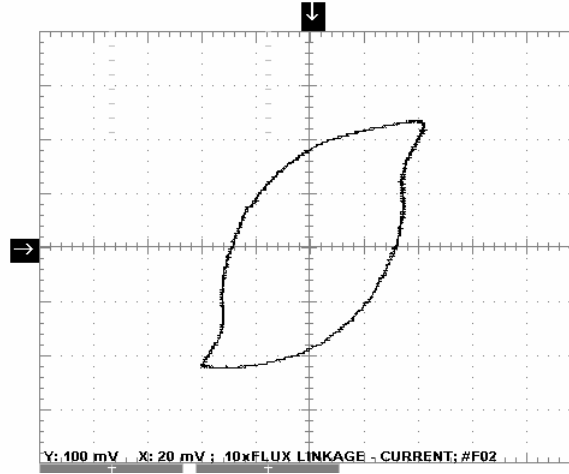
Şekil Ek 3.12 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

Pozitif 5. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

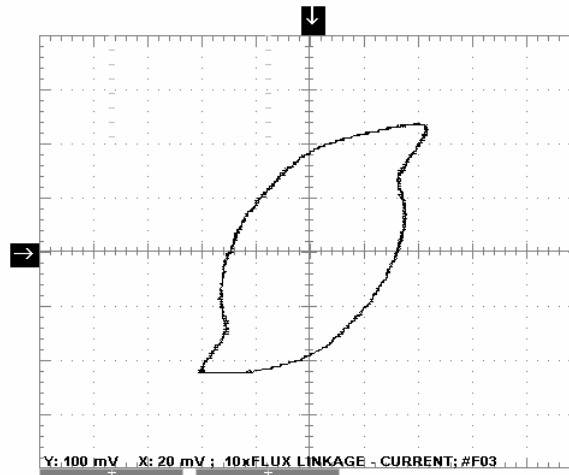
($\text{THD}_V = \%10$ için)



($\text{THD}_V = \%20$ için)

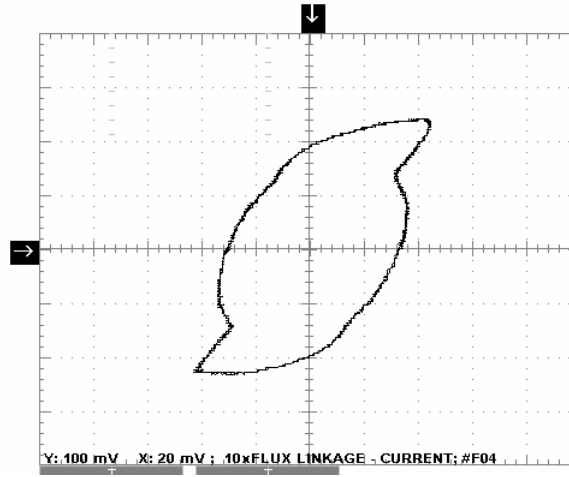


($\text{THD}_V = \%30$ için)

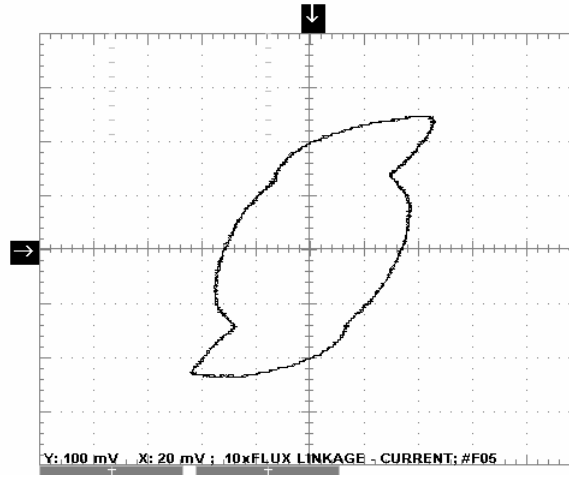


Şekil Ek 3.13 THD_V 'nin %10 ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

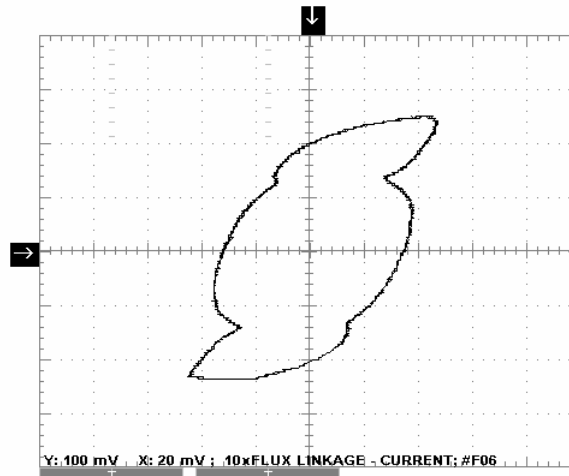
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

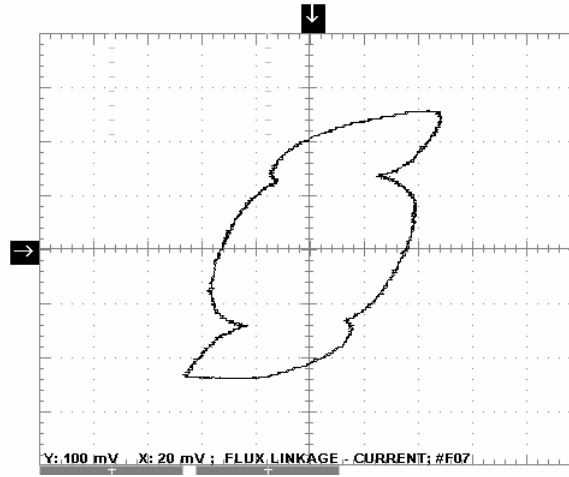


($THD_V = \%60$ için)

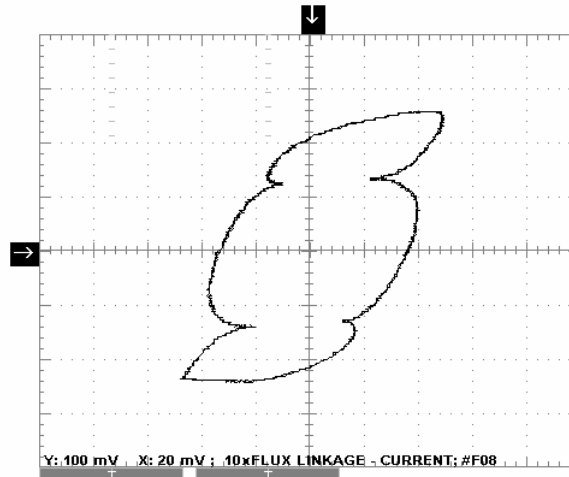


Şekil Ek 3.14 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

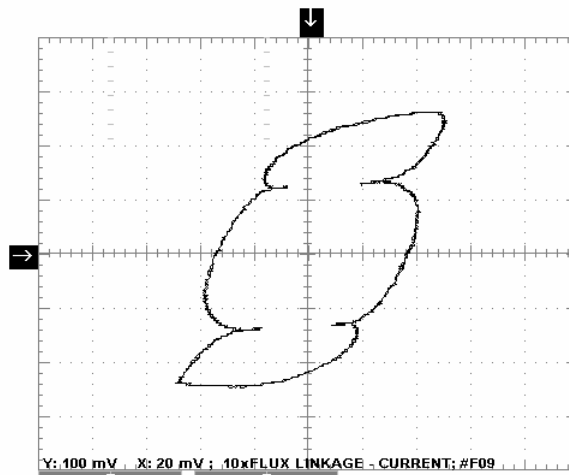
($THD_v = \%70$ için)



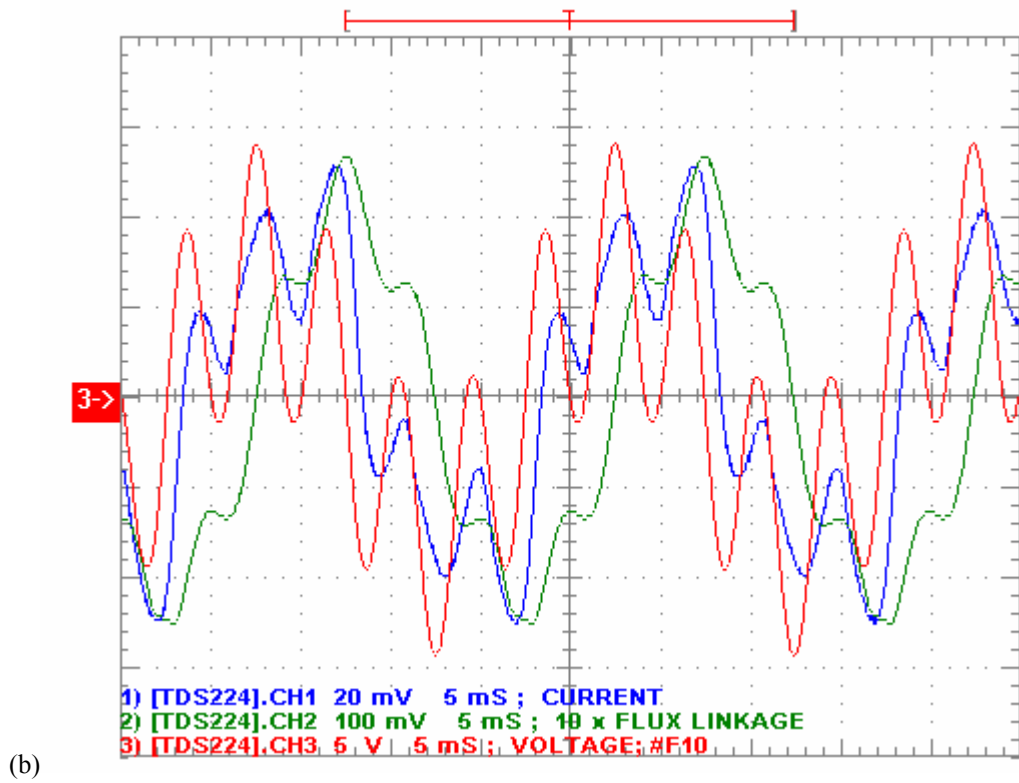
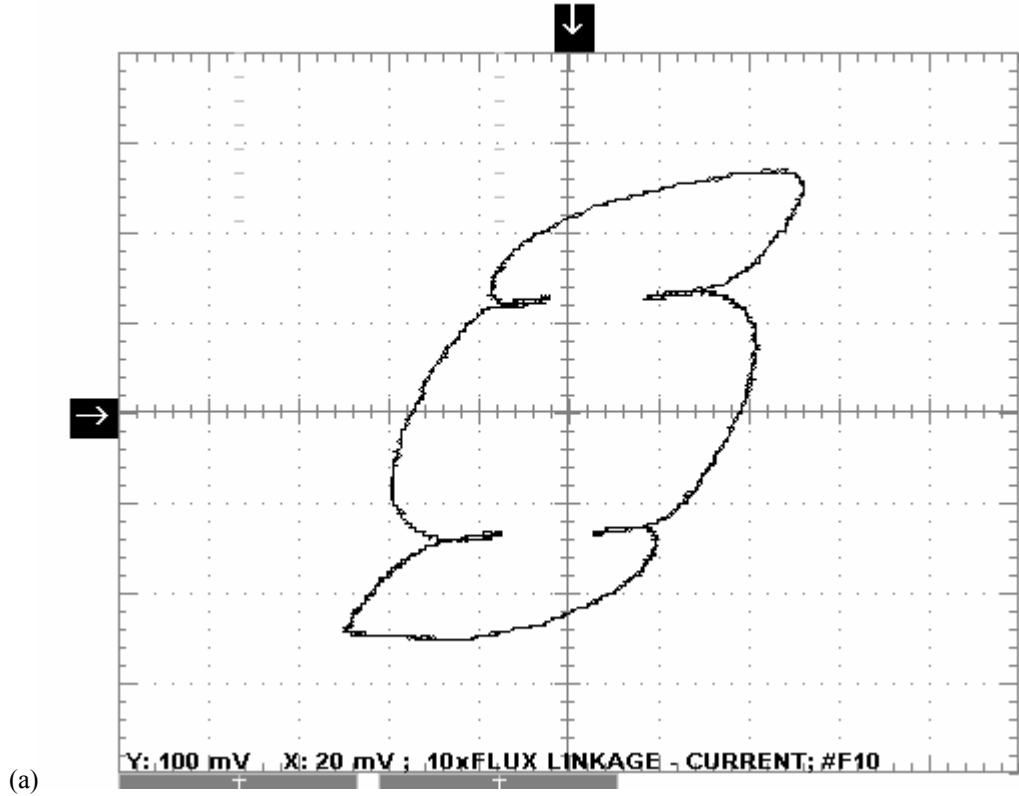
($THD_v = \%80$ için)



($THD_v = \%90$ için)



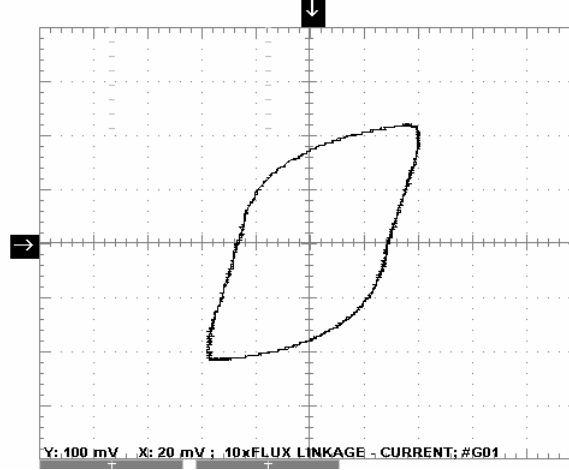
Şekil Ek 3.15 THD_v 'nin $\%70$ ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



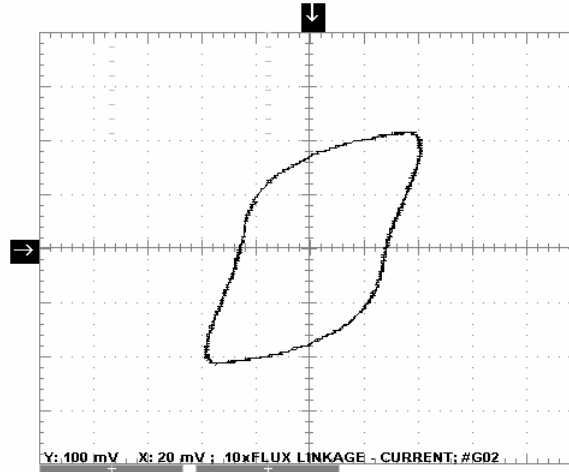
Şekil Ek 3.16 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

Negatif 5. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

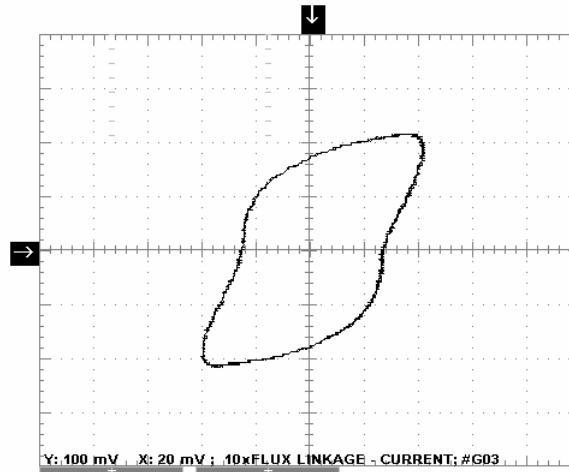
($\text{THD}_V = \%10$ için)



($\text{THD}_V = \%20$ için)

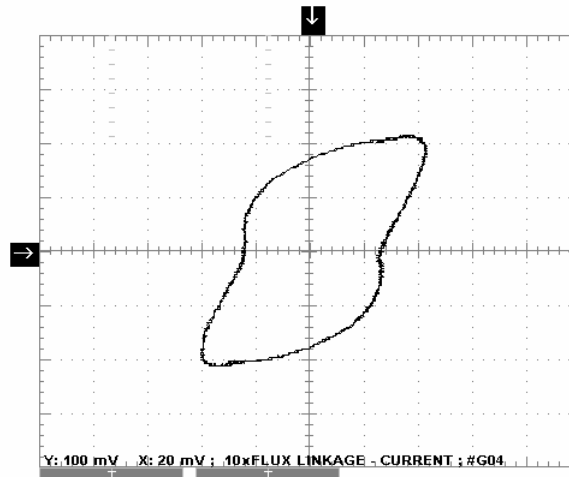


($\text{THD}_V = \%30$ için)

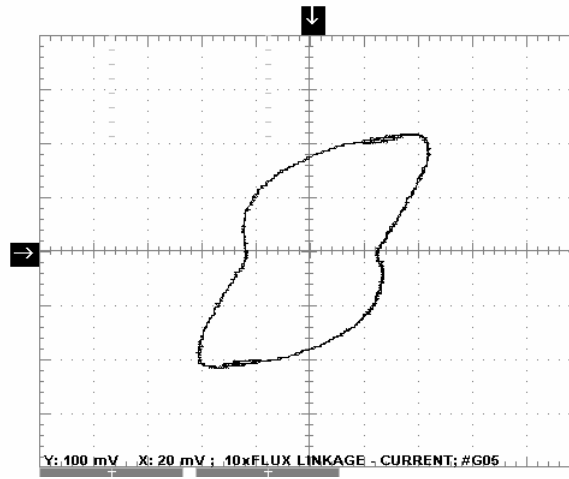


Şekil Ek 3.17 THD_V 'nin $\%10$ ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

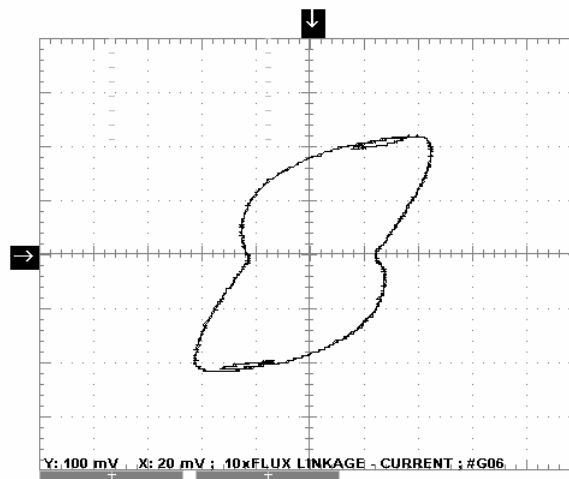
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

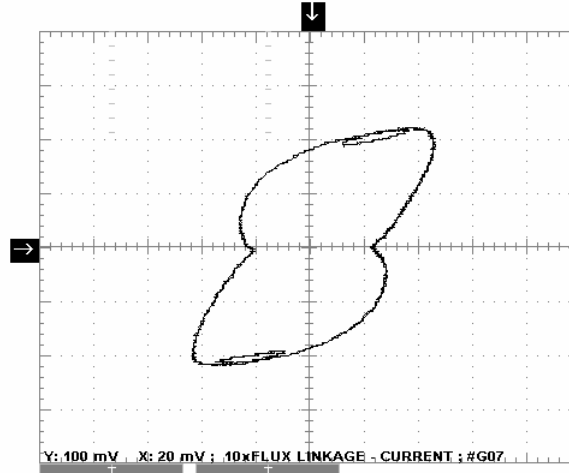


($THD_V = \%60$ için)

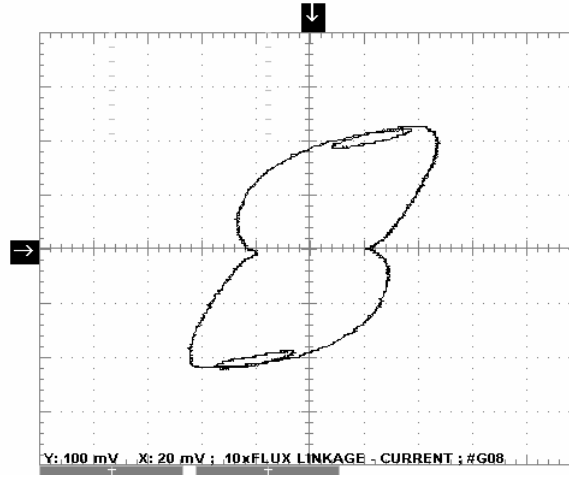


Şekil Ek 3.18 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

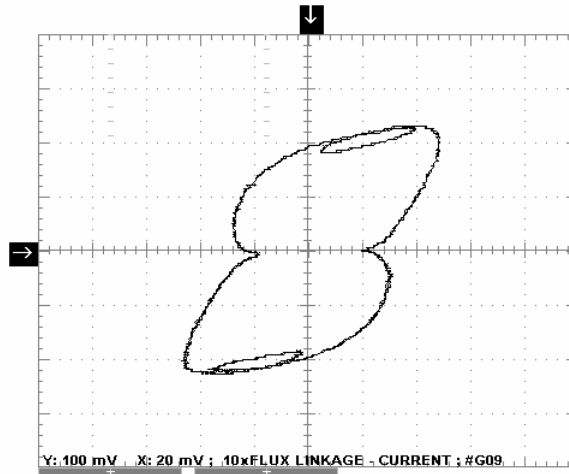
($THD_V = \%70$ için)



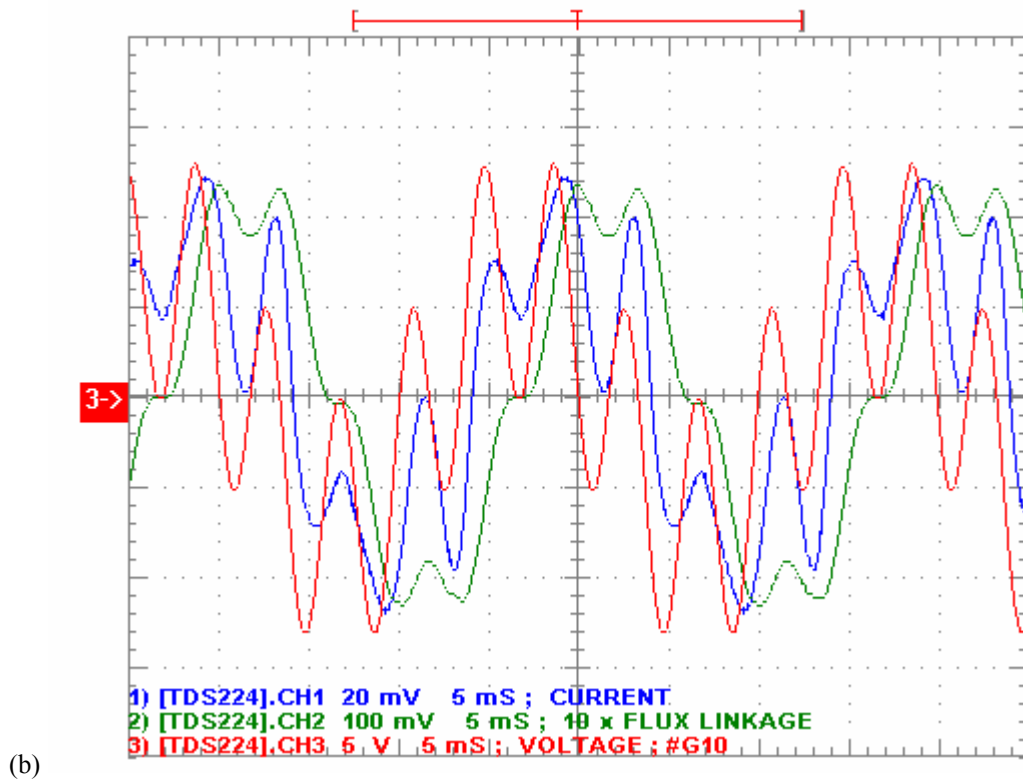
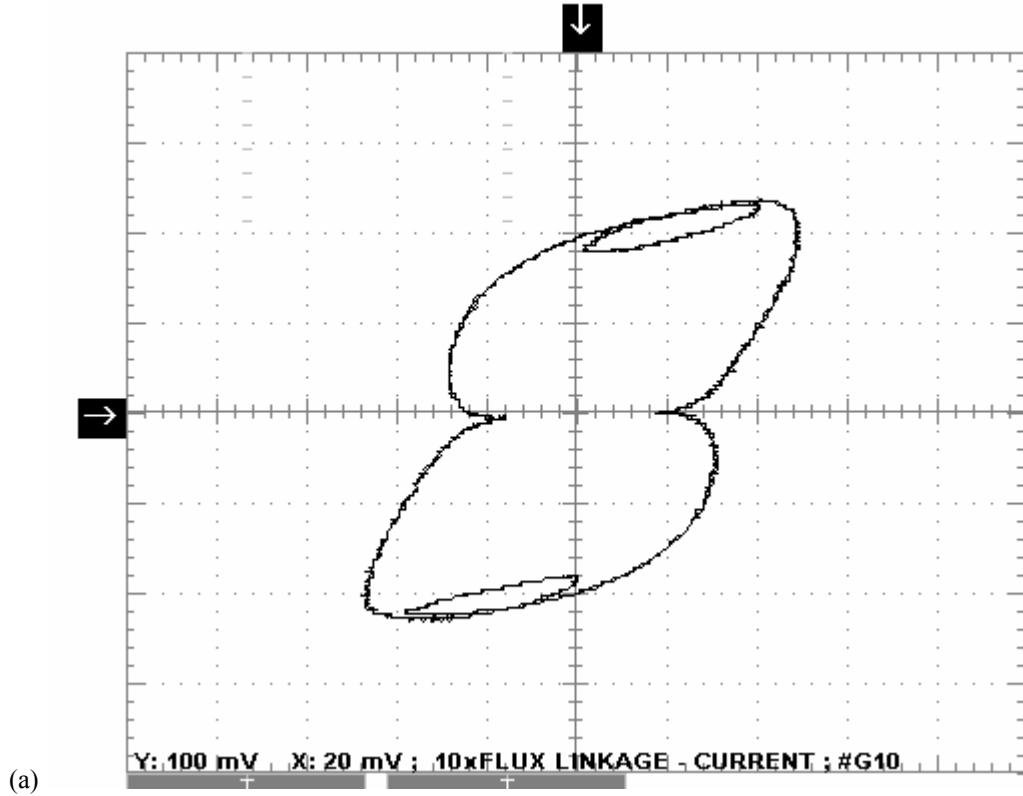
($THD_V = \%80$ için)



($THD_V = \%90$ için)



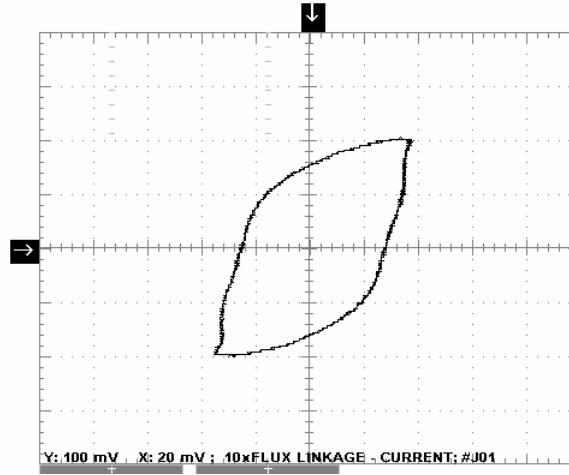
Şekil Ek 3.19 THD_V 'nin $\%70$ ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



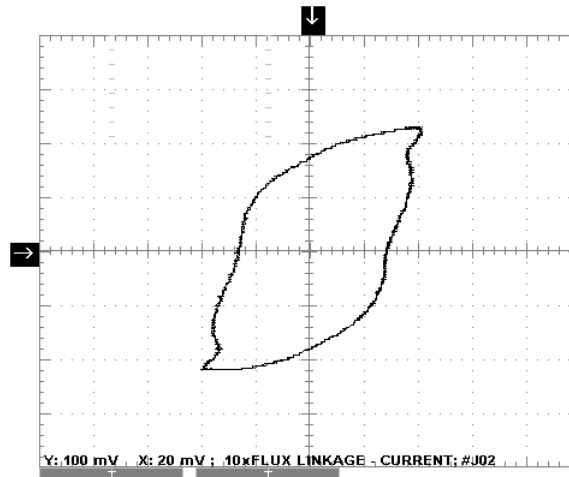
Şekil Ek 3.20 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

Pozitif 7. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

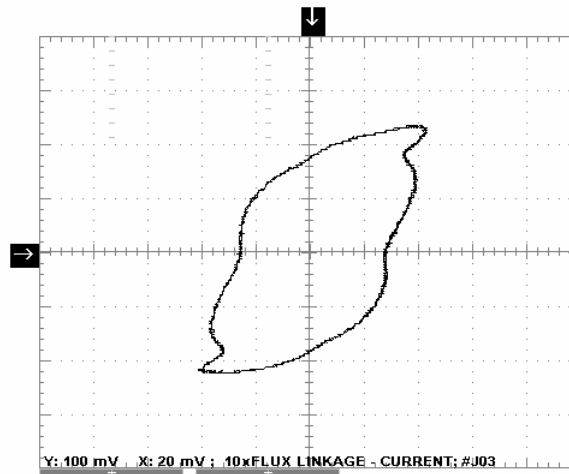
($\text{THD}_V = \%10$ için)



($\text{THD}_V = \%20$ için)

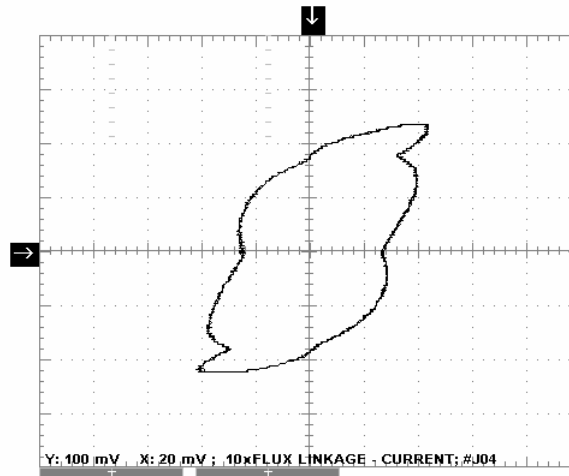


($\text{THD}_V = \%30$ için)

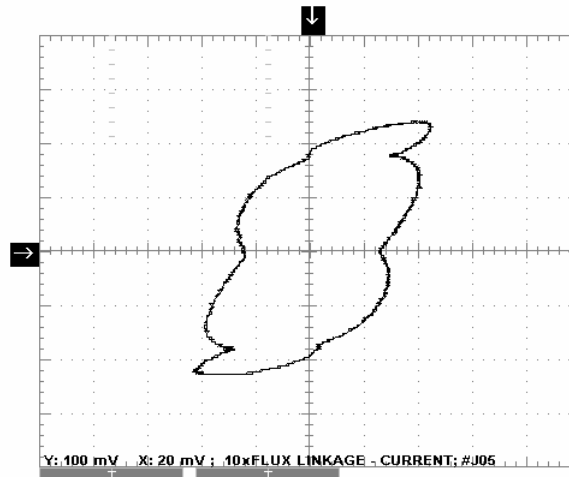


Şekil Ek 3.21 THD_V 'nin $\%10$ ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

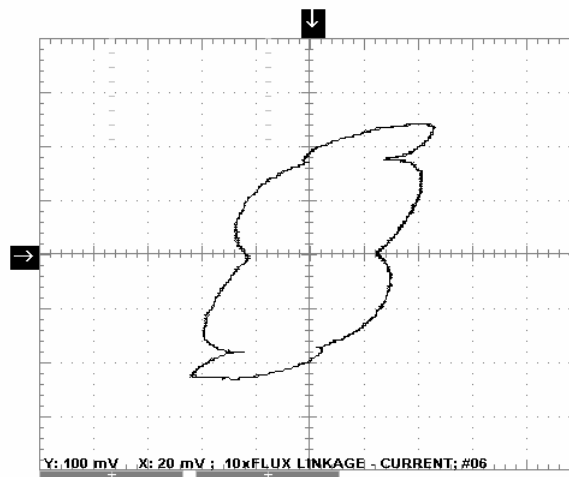
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

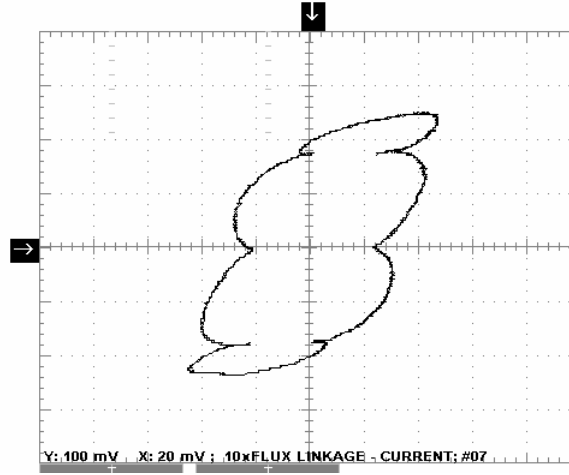


($THD_V = \%60$ için)

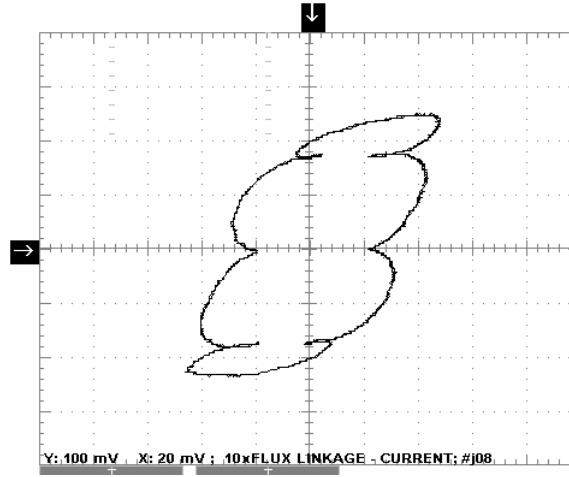


Şekil Ek 3.22 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

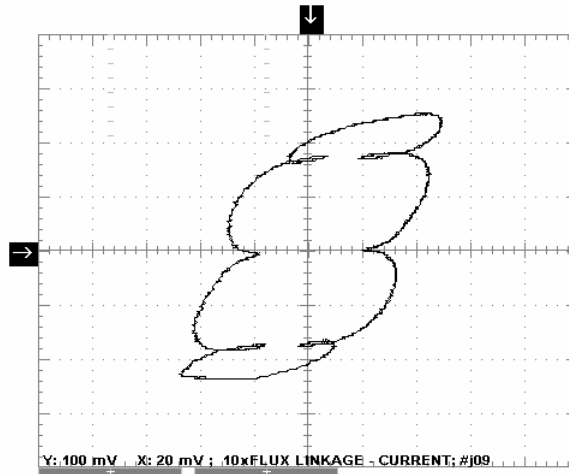
($THD_v = \%70$ için)



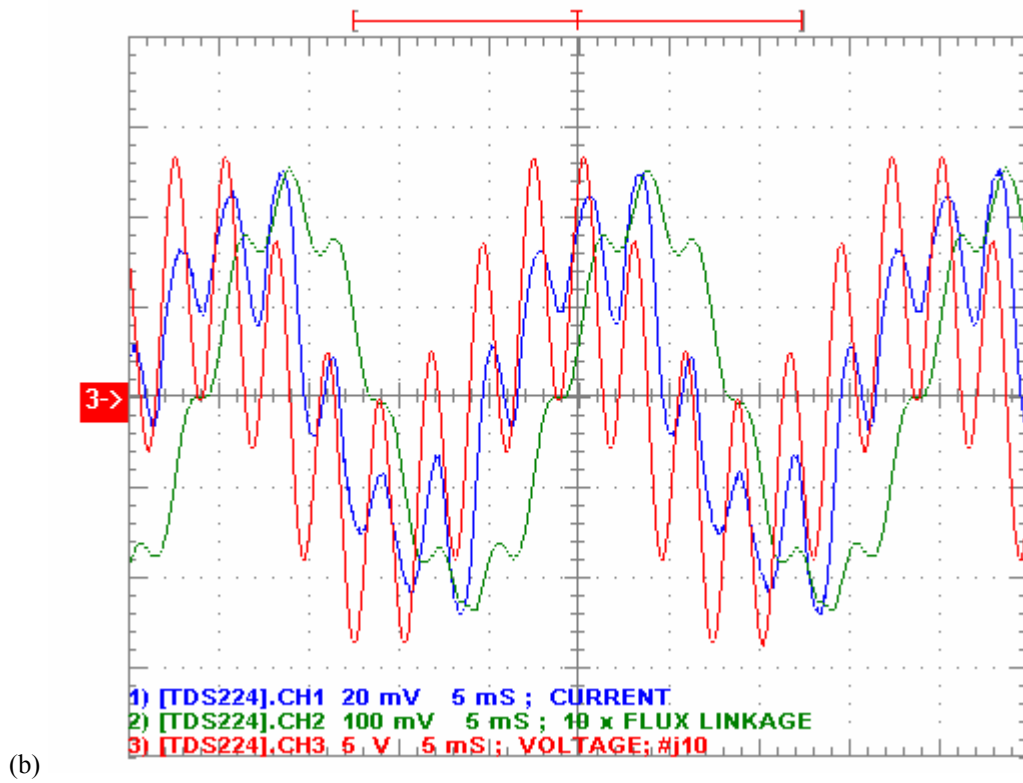
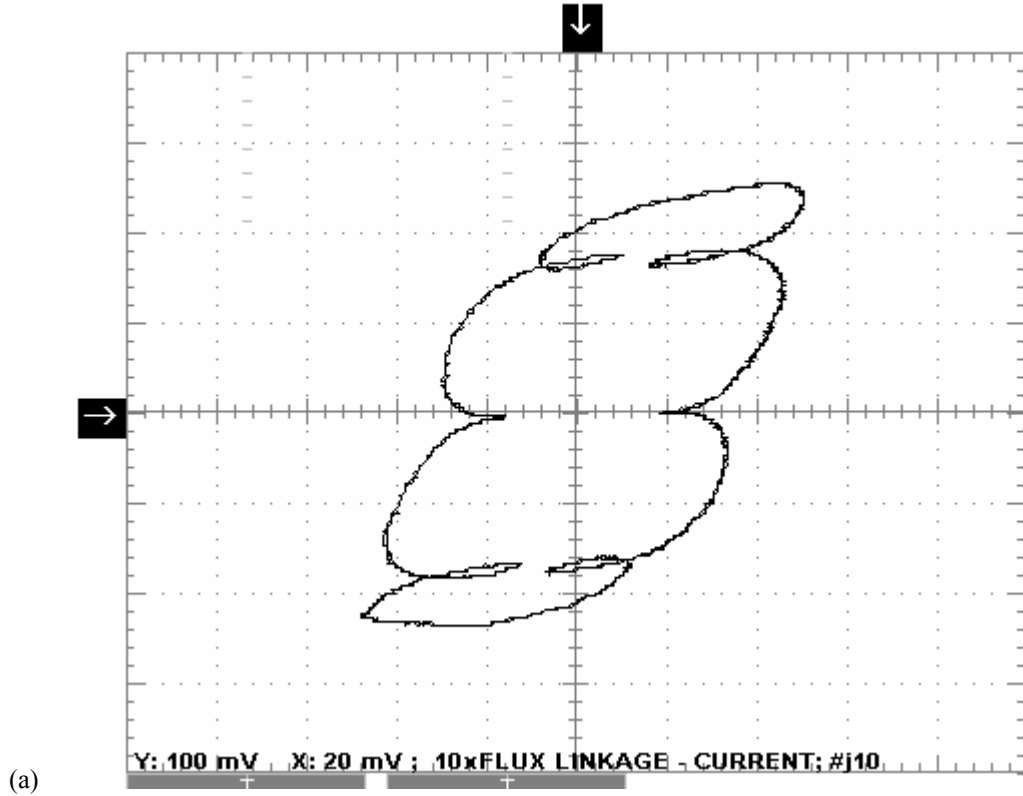
($THD_v = \%80$ için)



($THD_v = \%90$ için)



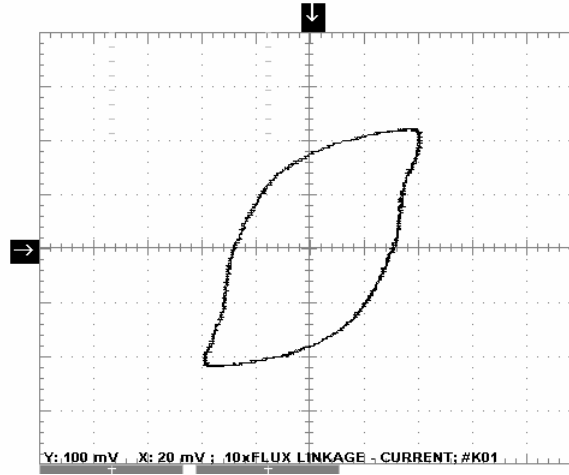
Şekil Ek 3.23 THD_v 'nin $\%70$ ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



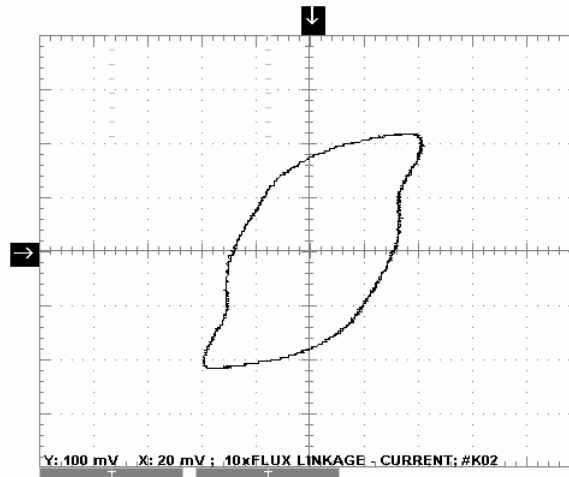
Şekil Ek 3.24 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

Negatif 7. harmonikli deneylerde ölçülen λ -I çevrimleri

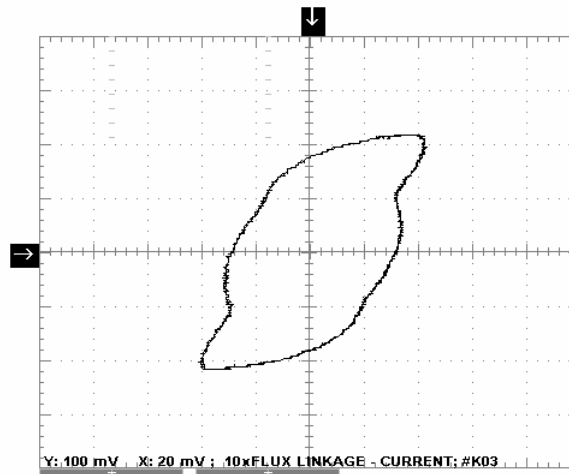
($\text{THD}_V = \%10$ için)



($\text{THD}_V = \%20$ için)

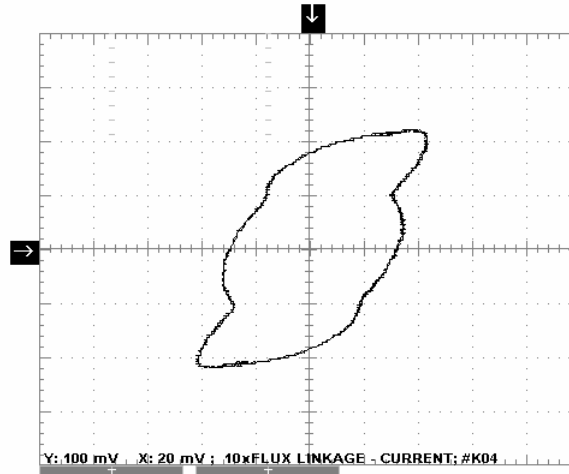


($\text{THD}_V = \%30$ için)

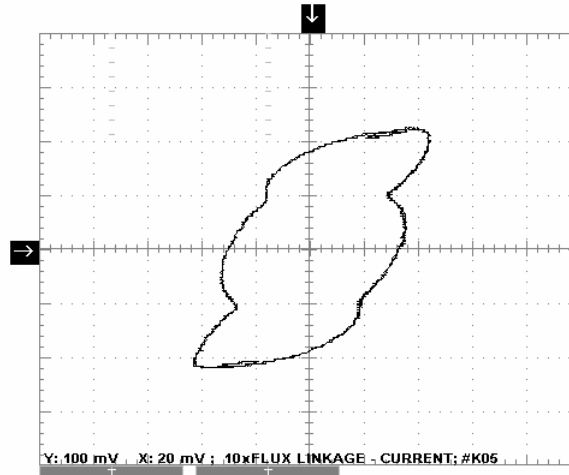


Şekil Ek 3.25 THD_V 'nin $\%10$ ila 30 olması durumlarında λ -I çevrimleri

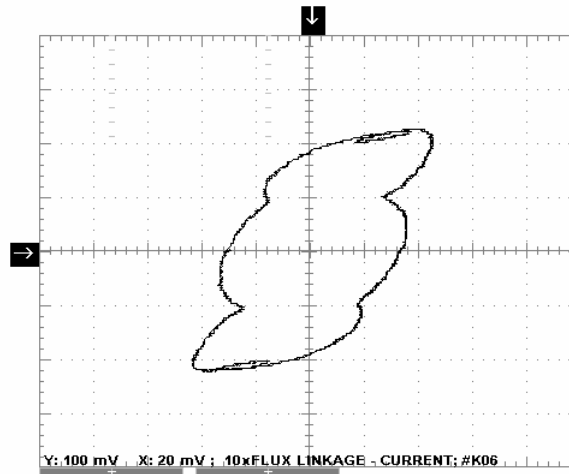
($THD_V = \%40$ için)



($THD_V = \%50$ için)

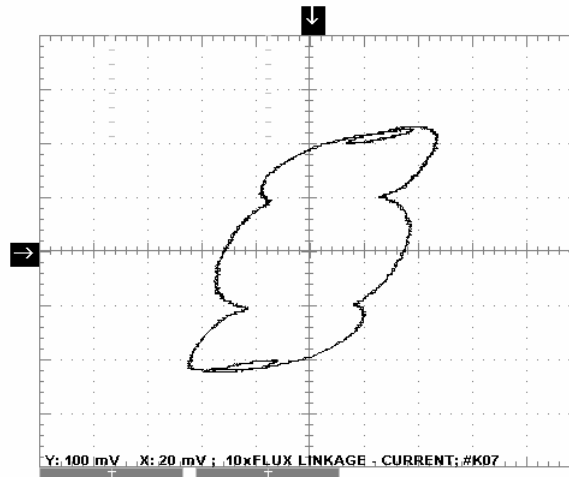


($THD_V = \%60$ için)

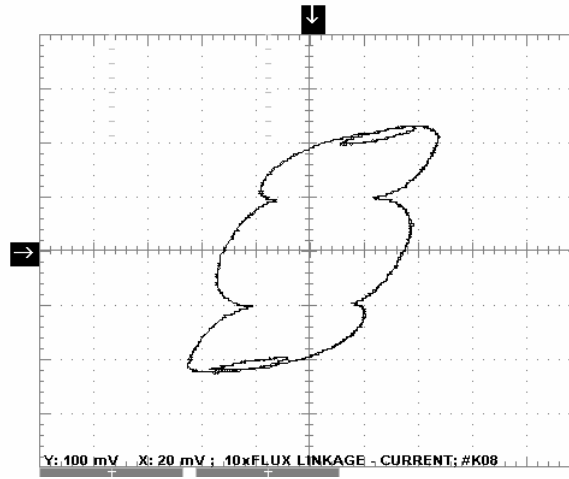


Şekil Ek 3.26 THD_V 'nin $\%40$ ila 60 olması durumlarında λ -I çevrimleri

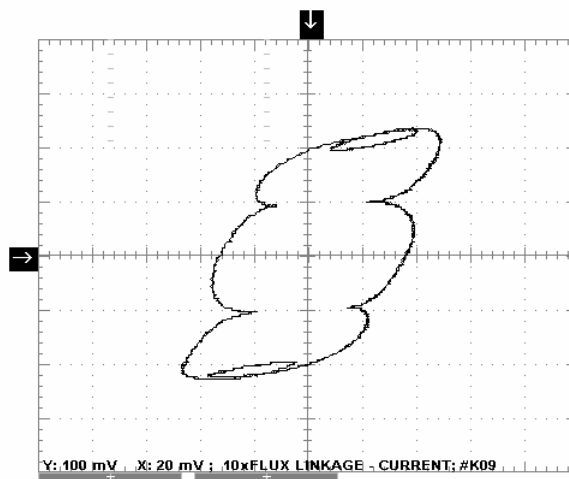
($THD_v = \%70$ için)



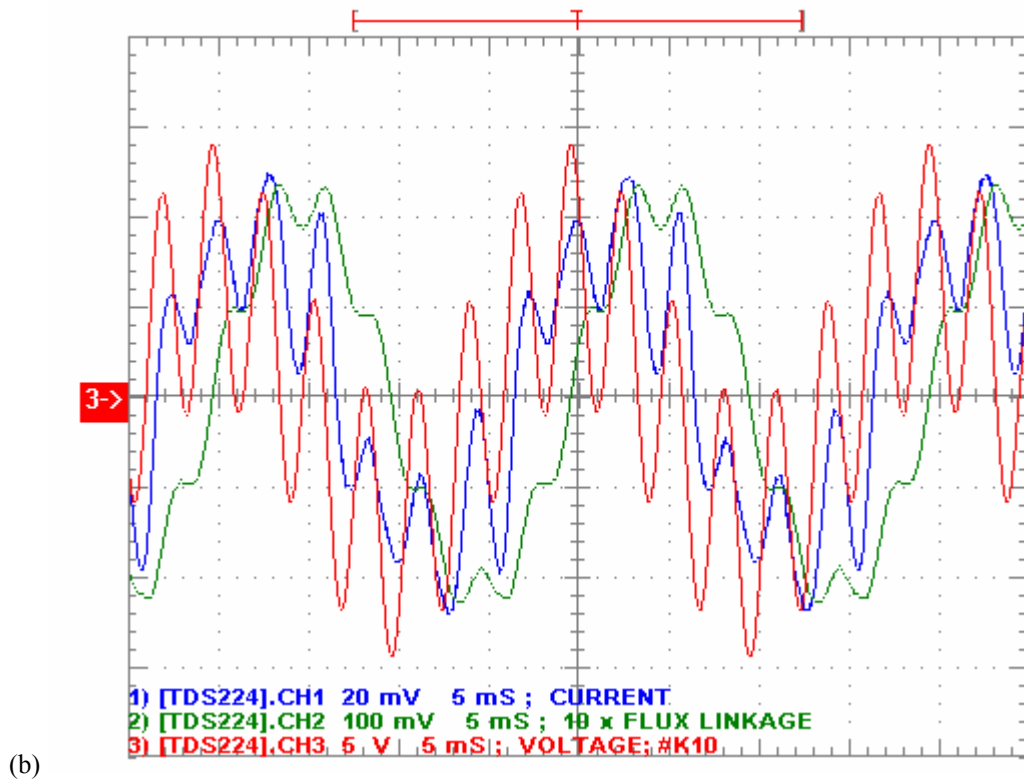
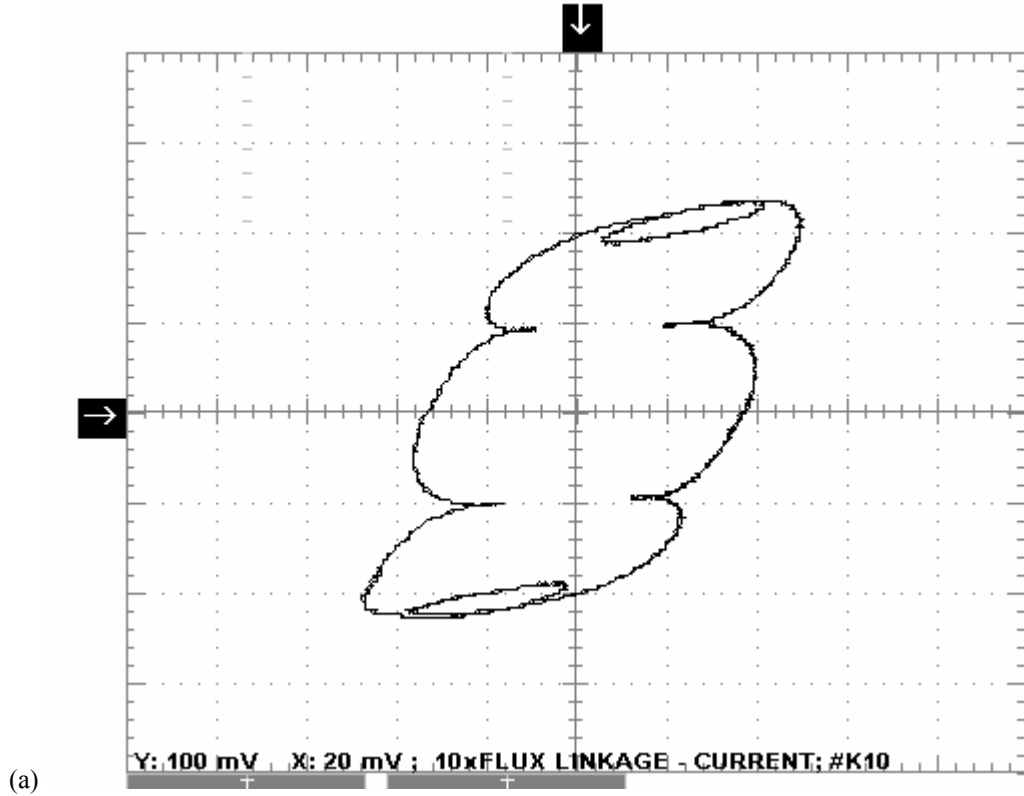
($THD_v = \%80$ için)



($THD_v = \%90$ için)



Şekil Ek 3.27 THD_v 'nin $\%70$ ila 90 olması durumlarında λ -I çevrimleri



Şekil Ek 3.28 THD_v %100 için a) λ -I çevrimi, b) Gerilim, akım ve akı kavraması değişimleri

EK 4. Minör Çevrim Katsayısının Belirlenmesi

Bölüm 3.5 ve Bölüm 5'te değerlendirildiği üzere minör çevrimlerin neden olduğu en büyük hata, deneylerde uygulanan en bozulmuş dalga olan THD_V nin %100 olduğu negatif harmonik bileşenli dalgalardır. Yapılan incelemelerde, belirlenecek k_m minör çevrim düzeltme katsayısının en uygun hesap noktası için, en büyük ilave minör çevrimin olduğu negatif 3. harmonik bileşenli THD_V değeri %100 olan dalga olduğu görülmüştür. Bu nokta için belirlenen k_m değeri, diğer tüm minör çevrimli dalgalarda yapılan yöntem hatasının %3'ten küçük kalmasını sağlamıştır.

Deneylerde kullanılan tek harmonikli gerilim dalgaları için 3.55 ifadesi;

$$k_m = 1 + \xi \cdot \left(\frac{B'_{3m}}{B'_m} \right)^x$$

ele alınarak, önerilen yöntem ile hesaplanan $P'_{f_önerilen}$; ölçülen toplam demir kaybı olan $P'_{fe_ölçülen}$ 'den çıkartılarak, minör çevrimli durumda hesaplanması istenen histerezis kaybı bulunur (P'_h). Bulunan histerezis kaybı, klasik Steinmetz ifadesi ile hesaplanan histerezis kaybına (P'_{h_klasik}) bölünürse; k_m elde edilir:

$$\frac{P'_{fe_ölçülen} - P'_{f_önerilen}}{P'_{h_klasik}} = \frac{P'_h}{P_h} = 1 + \xi \cdot \left(\frac{B'_{3m}}{B'_m} \right)^x$$

Bu ifade ve Bölüm 4'teki tablolarda verilen parametreler kullanılarak ξ çarpanı bulunur:

Minör çevrimli dalga	ξ
Negatif 3. harmonik	0.853
Negatif 5. harmonik	0.865
Negatif 7. harmonik	0.842

Tezdeki hesaplamalarda $\xi=0.853$ olarak alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Kasım 1964'te Babaeski'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini, hayatının geliştiği Adapazarı'nda okudu. 1987'de, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1996 yılında SA.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği ana bilim dalı Elektrik bilim dalında yüksek lisansını tamamlayarak, aynı enstitüde doktora çalışmasına başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalışmakta olan Mustafa Turan, evli ve bir çocuk babasıdır.