

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MAGNETİK MALZEMELERDE KAYIPLARIN
ÖLÇÜLMESİ VE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Fuat KÜÇÜK

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

ARALIK 2002

**MAGNETİK MALZEMELERDE KAYIPLARIN
ÖLÇÜLMESİ VE MODELLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Müh. Fuat KÜÇÜK
(504991211)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Ocak 2003**

Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Oktay AYBAR (Y.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Levent OVACIK (İ.T.Ü.)

ARALIK 2002

ÖNSÖZ

“Magnetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi” adlı tez çalışmam sırasında göstermiş oldukları yakın ilgi ve yardımlardan dolayı değerli hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Deniz YILDIRIM’ a, manevi desteklerini esirgemeyen ve sabır gösteren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Fuat KÜÇÜK

Aralık 2002

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. MAGNETİK MALZEME KAYIPLARI İLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ KAVRAMLAR	4
2.1. Mıknatıslanma ve Histerezis Eğrisi	4
2.2. Histerezis Kaybı	7
2.3. Girdap Akımı Kaybı	9
2.4. Çekirdek Kaybı	12
3. ELEKTRİKSEL VE MAGNETİK BÜYÜKLÜKLERİN ELDE EDİLMESİ	14
3.1. Besleme gerilimi ve akımının Elde Edilmesi	14
3.2. Kapalı B - H Eğrisinin Elde Edilmesi	14
3.3 Çekirdek Kaybının Bulunması	17
4. ÖLÇÜMDE KULLANILAN DEVRE VE CİHAZLAR	18
4.1. İşaret ve Kuvvetlendirici Devreler	19
4.1.1. İşaret üretici devre	19
4.1.2. Kuvvetlendirici devre	22
4.2. Ölçme Devresi ve Sarımlı Magnetik Çekirdekler	25
4.2.1. Deri etkisi	25
4.2.2. Magnetik malzemeler	28
4.2.3. Osiloskop	30
5. ÖLÇÜMLERİN ALINMASI VE MAGNETİK KAYIPLARIN BULUNMASI	31
5.1. Ölçmenin Yapılışı	31
5.1.1. E - tipi SiFe çekirdeğin elektriksel büyüklüklerinin ölçülmesi ve örneklenmesi	31
5.1.2. Toroidal ferrit çekirdeğin elektriksel büyüklüklerinin ölçülmesi ve örneklenmesi	33
5.2. Magnetik Kayıpların Hesaplanması	33

6. MODELİN KURULMASI	41
6.1. Modelleme Hakkında Genel Bilgi	41
6.1.1. Regresyon	41
6.2. E - Tipi SiFe Çekirdeğin Kayıplarının Modellenmesi	44
6.3. Toroidal ferrit Çekirdeğin Kayıplarının Modellenmesi	46
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	49
KAYNAKLAR	52
EKLER	54
ÖZGEÇMİŞ	61

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. İşaret üretici devrenin çıkışından elde edilen gerilim ve frekans değerleri	20
Tablo 4.2. Magnetik kayıpları ölçülen E – tipi SiFe çekirdeğe ait teknik bilgiler	28
Tablo 4.3. Magnetik kayıpları ölçülen toroidal ferrit çekirdeğe ait teknik bilgiler.....	29
Tablo 4.4. RS423 bağlantısında kullanılan pinler ve tanımları	30
Tablo 5.1. E – tipi SiFe çekirdeğin değişik frekanslarda, belirlenen akı yoğunluklarında çalışması için uygulanması gereken sinüzoidal gerilimlerin efektif değerleri (V)	32
Tablo 5.2. Toroidal ferrit çekirdeğin değişik frekanslarda istenen akı yoğunluklarında çalışabilmesi için uygulanması gereken gerilimlerin efektif değerleri (V).....	33
Tablo 5.3. E – tipi SiFe çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarında ölçülen kayıp değerleri (W/kg)	38
Tablo 5.4. Toroidal ferrit çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarında ölçülen kayıp değerleri (W/kg)	39
Tablo 6.1. E – tipi SiFe çekirdek kayıplarının modeli için program tarafından belirlenen denklem kalıpları ve katsayıları	45
Tablo 6.2. E - tipi SiFe çekirdekte test için bırakılıp model ile tahmin edilen kayıp değerleri	46
Tablo 6.3. Toroidal ferrit çekirdek kayıplarının modeli için program tarafından belirlenen denklem kalıpları ve katsayıları	47
Tablo 6.4. Toroidal ferrit çekirdekte test için bırakılan ve model tarafından tahmin edilen kayıp değerleri	48
Tablo 7.1. Kurulan modellerle ilgili önemli görülen bazı bilgiler	49

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Bir ferromagnetik malzemedeki Weiss bölgeleri ve alan yönleri	1
Şekil 2.1 : Mıknatıslanma.....	5
Şekil 2.2 : Histerezis kapalı eğrisi ve mıknatıslanma eğrisi	5
Şekil 2.3 : Magnetik alan şiddetinin genliğinin değiştirilmesiyle elde edilen histerezis eğri ailesi.....	6
Şekil 2.4 : Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda endüklenen gerilimi, akı yoğunluğu ve akımın değişimleri	6
Şekil 2.5 : Magnetik malzemede girdap akımları	9
Şekil 2.6 : Magnetik malzemeyi oluşturan saclardan birinin büyütülmüş görüntüsü	10
Şekil 2.7 : Girdap akımları kaybının kapalı histerezis eğrisine etkisi	13
Şekil 3.1 : Besleme gerilim ve akımının zamanla değişiminin osiloskopt çizdirilmesi için kullanılabilecek devre	14
Şekil 3.2 : B – H eğrisinin elde edilebilmesi için kullanılabilecek devre	15
Şekil 4.1 : Ölçümde kullanılan devre ve cihazların laboratuvar ortamındaki görünüşü	18
Şekil 4.2 : Ölçme düzeneğini oluşturan devre ve cihazların genel bağlantı şeması	19
Şekil 4.3 : Ölçümde kullanılan devrelerin genel resmi	20
Şekil 4.4 : Gerilimi ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre	21
Şekil 4.5 : Kuvvetlendirici devre	22
Şekil 4.6 : Devrede kullanılan OPA541’ in ön – üstten görünüşü	22
Şekil 4.7 : Ayarlı gerilim regülatörlerinin akım kapasitesinin artırılmasını sağlayan devre şeması	24
Şekil 4.8 : İletkende meydana gelen deri etkisi olayı	26
Şekil 4.9 : Deri etkisi nedeniyle akımın iletkenin yüzeyinden akması	26
Şekil 4.10 : Deri kalınlığının frekansa bağlı değişimi	27
Şekil 4.11 : RS423 bağlantısı	30
Şekil 5.1 : Örneklenen bir büyüklük.....	34
Şekil 5.2 : E – tipi SiFe çekirdekte 50 Hz – 1 T’ daki besleme gerilimi ve akımı	36
Şekil 5.3 : E – tipi SiFe çekirdeğin, 50 Hz – 1 T için örneklenmiş akım ve gerilim dalga şekilleri	36
Şekil 5.4 : E – tipi SiFe çekirdeğin 50 Hz – 1 T’ da çektiği ani gücün zamana göre değişimi.....	37
Şekil 5.5 : E –tipi SiFe çekirdekte, magnetik kayıpların akı yoğunluğuna göre değişimi	39

Şekil 5.6	:Toroidal ferrit çekirdekte magnetik kayıpların akı yoğunluğuna göre değişimi.....	40
Şekil 6.1	: Paket programın çalışma ilkesinin blok şeması	41
Şekil 6.2	: E – tipi SiFe çekirdek kayıplarının üç boyutlu değişimi	44
Şekil 6.3	: Toroidal ferrit çekirdek kayıplarının üç boyutlu değişimi	47
Şekil 7.1	: PWM ile hız kontrolünde besleme gerilimi	51

SEMBOL LİSTESİ

μ	: Magnetik geçirgenlik
μ_0	: Boşluğun magnetik geçirgenliği
μ_r	: Bağıl geçirgenlik
B	: Akı yoğunluğu
H	: Magnetik alan şiddeti
B_m	: Maksimum akı yoğunluğu
H_m	: Maksimum magnetik alan şiddeti
i	: Akım
v	: Gerilim
I	: Efektif gerilim
I_{LIM}	: Limit akım
V	: Efektif akım
R	: Elektriksel direnç
R_{CL}	: Akımı sınırlayıcı direnç
N	: Sarım sayısı
e	: Endüklenen gerilim
ϕ	: Akı
A_C	: Akının geçtiği yüzeye dik olan etkin kesit
ω	: Açısal hız
f	: Frekans
λ_C	: Ortalama magnetik yol
P	: Ani güç
P	: Ortalama güç
ϑ_C	: Magnetik malzemenin hacmi
A_h	: Histerezis kapalı eğrisinin alanı
P_h	: Histerezis kaybı
k_h	: Histerezis kayıp katsayısı
P_e	: Girdap akımları kaybı
ρ	: Malzemenin öz direnci
δ	: Kalınlık, deri kalınlığı
k_e	: Girdap akımı kayıp katsayısı
P_C	: Toplam çekirdek kaybı
p_c	: Oranlanmış çekirdek kaybı
V_s	: Besleme gerilimi
R_s	: Ölçme direnci
V_{Rs}	: Ölçme direnci üzerindeki gerilim düşümü
V_i	: Giriş gerilimi
V_o	: Çıkış gerilimi
g	: İşlemsel kuvvetlendiricinin kazancı
r	: Radyal uzaklık
J	: Akım yoğunluğu
σ	: Elektriksel iletkenlik

d	: İletken çapı
X	: Elektriksel bir büyüklük
Δx	: Osiloskop kanalının gerilim katsayısı
T	: Periyot, sıcaklık
m	: Bir peryottaki veri sayısı
Δt	: Zaman aralığı
R_i	: Sargı iletken direnci
e	: Hata
P_C'	: Tahmin edilen çekirdek kayıp değeri
y_i	: Bağımlı değişken
x_i	: Bağımsız değişken
b_0, b_1, b_2	: Regresyon katsayıları
r^2	: Belirlilik katsayısı
w_i	: Ağırlık çarpanı

MAGNETİK MALZEMELERDE KAYIPLARIN ÖLÇÜLMESİ VE MODELLENMESİ

ÖZET

Teknolojideki minimum boyut – maksimum verim hedefi, hayatımızı her alanda kolaylaştıran güç elektroniği devreleri ve elektrik makinelerine de yansımaktadır. Bu hedef, güç elektroniği ve elektrik makinelerinin bir parçası olan magnetik malzemelerin yüksek frekans ve yüksek akı yoğunluklarında çalıştırılmalarına sebep olur. Frekans ve akı yoğunluğunun artışı, beraberinde magnetik kayıpların artışı getirir. İyi bir tasarım gerçekleştirebilmek için, kullanılan magnetik malzemelerin kayıplarının frekans ve akı yoğunluğuna göre değişimi bilinmelidir. Kaybı belirleyen bu büyüklüklerin tek bir matematiksel model ile ifade edilmesi, bilinmek istenen kayıp değerlerine ulaşmayı hızlandırır. Az sayıda ölçümle, geniş bir aralıkta doğru sonuç verecek bir matematiksel kayıp modelinin oluşturulması bu açıdan önemlidir.

Bu çalışmada, ilk olarak gerilimi ve frekansı ayarlanabilir bir güç kaynağı tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Seçilen bazı magnetik malzemeler, güç kaynağından elde edilen değişik frekans ve genlikteki sinüzoidal gerilimlerle beslenmiştir. Her çalışma noktası için magnetik malzemelerin elektriksel büyüklükleri (besleme gerilimi ve akımı) bir analog – dijital dönüştürücü ile örneklenip bilgisayara aktarılmıştır. Sayısal değerleri bilinen elektriksel büyüklüklerden yola çıkılarak, magnetik malzemenin ölçüm yapılan her çalışma noktası için kayıp değerleri bulunmuştur. Kayıp değerlerinin bir kısmı, magnetik malzemelerin kayıp modellerinin oluşturulmasında, geri kalanı ise modellerin testinde kullanılmıştır. Modellerin kurulmasında üç boyutlu yüzey uydurma tekniği uygulanmıştır. Bulunan matematiksel modellerden en uygun olanlarının, logaritmik ifade içeren denklemler olduğu görülmüştür. Test için ayrılan kayıp değerleri ile kurulan modellerin verdiği sonuçlar karşılaştırılmıştır.

MEASURING AND MODELING MAGNETIC CORE LOSSES

SUMMARY

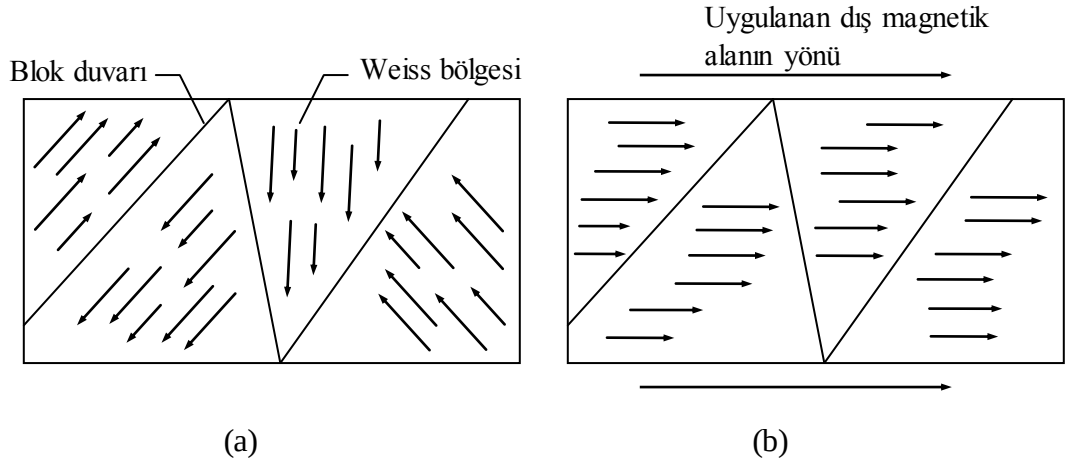
The requirements of minimum-dimension maximum-efficiency devices in industry have led to the new designs in power electronic circuits and electrical machines. This can be achieved by operating the magnetic circuits which are essential - most of the time heaviest and largest section of the device - parts of most electrical machines and power electronic circuits at higher frequencies and at larger flux density values. The increase both in frequency and in flux density value will also result in more losses in these magnetic materials. For a well-designed device, it is necessary to know the variation of magnetic core losses with frequency and flux density values. Obtaining a mathematical model employing these quantities will allow the magnetic losses to be computed at any operating point. Determining an accurate mathematical model using low experimental values valid in wide operating regions is, therefore, important.

In this study, a variable-frequency variable-amplitude power supply has first been designed and constructed. Sinusoidal voltages at different frequencies have been applied to different samples of magnetic cores. The voltage and current values are sampled using an A/D converter for different operating points and recorded to a computer. The power losses at each operating point is then determined from these sampled electrical quantities. Some of these loss values are used for mathematical modelling using three-dimensional surface fitting algorithm while other ones are reserved for testing the developed model. It has been observed that the logarithmic functions produced the best surface fitting results. The results of experimental loss values and those of obtained from the developed model are in good agreement.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Magnetik malzemeler, güç elektroniği ve elektrik makinelerinin önemli elemanlarından biridirler. Kullanıldıkları yerlere, kullanıma amaçlarına ve çalışma koşullarına göre değişiklik arzederler.

Magnetik malzemeler içerisinde en çok kullanımı olanlar ferromagnetik malzemelerdir. Bu tür malzemelerde, Weiss bölgeleri adı verilen, kendi aralarında paralel alanlar oluşturan küçük bölgeler mevcuttur (Şekil 1.1.a). Rastgele yönlendirilmiş olan bu bölgeler, ferromagnetik malzeme magnetik alana maruz bırakıldığında alan yönünde yönlenmeye çalışırlar.(Şekil 1.1.b). Böylece magnetik malzeme içerisinde net ve düzgün bir magnetik alan ve sonuç olarak akı oluşur [1].



Şekil 1.1 Bir ferromagnetik malzemedeki Weiss bölgeleri ve alan yönleri. (a) kendi başına, (b) bir magnetik alan içinde.

Magnetik malzemelerdeki kayıplar genel olarak ikiye ayrılır:

1. Histerezis kaybı,
2. Girdap akımları kaybı,

Kayıplar gerilim akı yoğunluğu ve frekans ile lineer olmayan artış gösterirler. Dolayısıyla magnetik malzemedeki toplam kayıp da lineer olmayan artış gösterir.

Magnetik malzemelerde çeşitli çalışma koşullarında kayıpların bilinmesi için iki yöntemden bahsedilebilir:

1. Her çalışma noktasında ölçüm yapma,
2. Bazı çalışma noktalarında ölçüm yapıp diğerlerini doğru veya doğruya yakın bir şekilde tahmin etme.

Birinci yöntem pek kullanışlı değildir. Magnetik malzeme, ölçüm yapılan çalışma noktasından farklı bir noktada çalışıldığında yeniden ölçüm yapmak zorunda kalınabilir. Ayrıca ölçme düzeneğini sürekli kullanma gereği duyulur.

İkinci yöntem ise kullanışlı olan yöntemdir. Burada mümkün olan en az sayıda ölçümle magnetik malzemelerin kayıplarının karakterize edilmesine çalışılır. Magnetik malzemelerdeki kayıpların değişimi, 2'den fazla büyüklük gözönüne alındığında, ikinci yöntemin önemi daha da artar.

Kayıpların az sayıda ölçümle en az iki değişkene bağlı olarak modellenmesi ve modelin doğru sonuçlar vermesi, modeli oluştururken kullanılan yöntemlerle sıkı sıkıya bağlıdır.

Literatürde kayıpların modellenmesi ve tahmini konusunda farklı yöntemlere rastlanmıştır. Bunlardan en önemlileri şunlardır:

1. Histerezis kaybı ve girdap akımı kaybının matematiksel ifadelerine uygun katsayılar bularak modelleme [2],
2. Ölçülen toplam çekirdek kaybının kayıp bileşenlerini eşdeğer devrelerle ifade ederek modelleme [3],
3. Alanı magnetik malzemenin toplam kaybı ile orantılı olan dinamik histerezis eğrisini matematiksel olarak ifade etme (Preisach modeli) [4, 5, 6]
4. Dinamik histerezis eğrisini malzeme parametrelerine bağlı olarak modelleme (Jiles – Atherton modeli) [7,8],
5. Bulanık mantık, yapay sinir ağlarını gibi yöntemleri kullanarak dinamik histerezis eğrisini modelleme [9,10]

Yukarıda adı geçen yöntemlerin birincisinde, modelleme genel olarak lineer bölgede çalışma için çıkarılmaktadır. 5 numaralı yöntemde dinamik histerezis eğrisinin örneklenip altındaki alanın hesaplanması gerekir. Her dinamik histerezis eğrisi için örnekleme yapılması gerektiğinden onbinlerce veri ile uğraşılması gerektiği açıktır.

Fakat bu yöntemin en önemli özelliği modelin oluşturulmasında kullanılan değişken büyüklüklerin bir sınırlama olmadan arttırılabilmesidir. Örneğin değişken sayısı arttırılmak istendiğinde, analitik işlemleri olan yöntemler (ilk dört yöntem) iyice zorlaşır. Halbuki 5 numaralı yöntem bundan çok fazla etkilenmez. Değişken sayısının arttırılmasıyla model esneklik kazanmış olur.

Bu çalışmada ise, ölçülen kayıpları yüzey uydurma tekniği ile modelleme üzerinde durulmuştur. Basit ve zaman almayan bir yöntemdir. O halde, hassas bir model kurma, kayıp bileşenlerinin değişken büyüklüklerden nasıl etkilendiğini görme, dinamik histerezis eğrisinin nasıl etkilendiğini görme gereksinimi yoksa bu yöntemin seçilmesi sonuca gitmeyi kolaylaştırır. Böylece az veriyle, kısa zamanda ve yeterli düzeyde bir model kurulması gerçekleştirilmiş olur.

Bu çalışmada amaçlananlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Gerilimi ve frekansı ayarlanabilir bir güç kaynağı tasarlamak ve gerçeklemek,
2. Sinüzoidal gerilimle çeşitli çalışma noktalarında (çalışma noktasından kasıt belirli bir frekans ve akı yoğunluğudur) beslenen magnetik malzemelerin elektriksel büyüklüklerini örnekleyip magnetik kayıplarını bulmak,
3. Bulunan magnetik kayıp değerlerinin bir kısmını modelleme için kullanmak ve diğer kısmı ile modellemeyi test etmek ,
4. Modelin bulduğu değerlerle test için ayrılmış değerleri karşılaştırmak.

BÖLÜM 2. MAGNETİK MALZEME KAYIPLARI İLE İLGİLİ BAZI ÖNEMLİ KAVRAMLAR

2.1. Mıknatıslanma ve Histerezis Eğrisi

Magnetik alana maruz kalan bir magnetik malzemede akı oluşumuna mıknatıslanma denir. Mıknatıslanmanın ölçüsü magnetik geçirgenliktir. Akı yoğunluğundaki değişimin magnetik alandaki değişime oranı olarak tanımlanan magnetik geçirgenliği ifadesi:

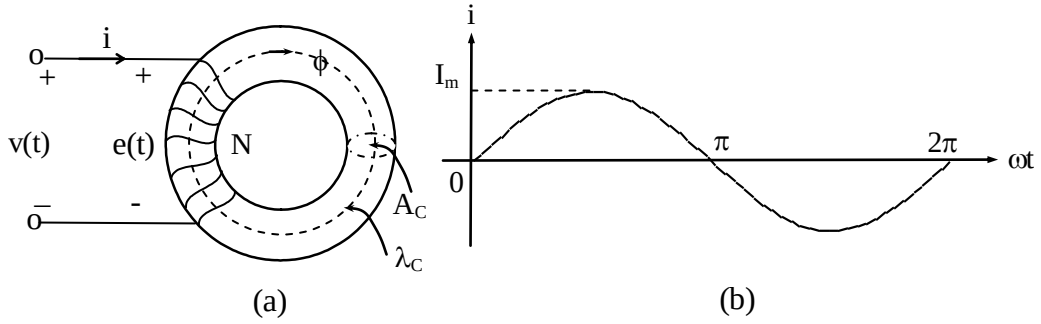
$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (2.1)$$

şeklinde dir. Bu ifadede μ magnetik geçirgenlik (H/m), B akı yoğunluğu (T) ve H da magnetik alan şiddetidir (A/m). Magnetik geçirgenlik, boşluğun (hava olarak da alınır) magnetik geçirgenliği μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) ile malzemenin bağıl magnetik geçirgenliği μ_r ' nin çarpımıdır:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (2.2)$$

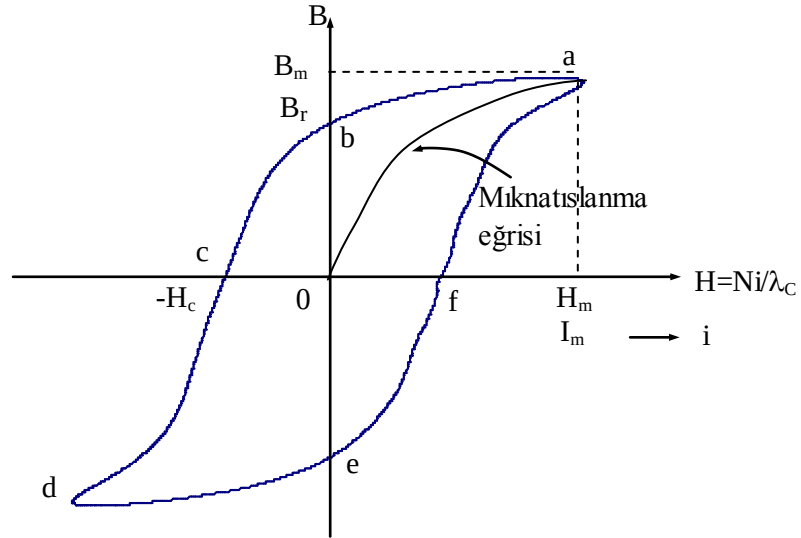
Şekil 2.1.a' da gösterilen N sarımlı çekirdeğin başlangıçta kalıcı mıknatısiyetinin olmadığı varsayalım. Eğer i sinüzoidal akımı (Şekil 2.1.b) sıfırdan itibaren I_m tepe değerine kadar arttırılacak olursa, magnetik alan şiddeti H da akıya uyarak artacak ve H_m değerini alacaktır (Şekil 2.2). Çünkü magnetik alan şiddeti akımla lineer artış gösterir. Fakat akı yoğunluğu B, bu artışa lineer bir şekilde cevap veremez ve Şekil 2.2 de gösterilen 0a yolunu izler. Eğer akım değeri I_m tepe değerinden sıfır değerine düşürülürse magnetik alan şiddeti de sıfır değerine düşer fakat akı yoğunluğu a_b yolunu izleyerek B_r değerinde kalır. B_r ' ye artık akı yoğunluğu denir. Bu sefer akım sıfırdan $-I_m$ değerine arttırıldığında magnetik alan şiddeti de $-H_m$ değerine çıkar ve akı yoğunluğu b_{ce} yolunu izleyerek $-B_m$ değerini alır. Akı yoğunluğunun sıfır olduğu H_C değerine giderme alanı denir. Magnetik alan, akımla birlikte sıfıra azaldığında akı yoğunluğu d_{ef} yolunu izler. Artık akım ikinci periyoda başladığında akı yoğunluğu 0a yolunu değil f_a yolunu izler. Yani ilk periyotta eğri kapanmaz.[11]

Şekil 2.2' de gösterilen kapalı eğri ancak birkaç periyottan sonra oluşur. Meydana gelen bu kapalı eğriye histerezis eğrisi denir.



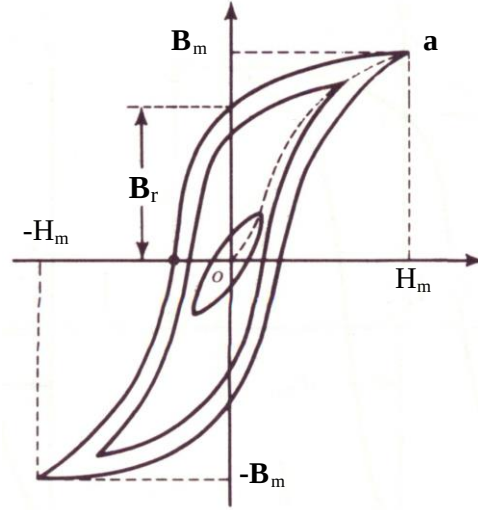
Şekil 2.1 Mıknatıslanma. (a) sarımlı magnetik çekirdek, (b) besleme akımı

Şekilden 2.2' den anlaşılacağı gibi akı yoğunluğu $B(t)$, magnetik alan şiddeti $H(t)$ ' deki değişime ayak uyduramaz gerisinde kalır. Böylece aralarında lineer olmayan bir ilişki doğar. Magnetik malzemelerde görülen bu olaya histerezis denir. Histerezis olayı magnetik malzemelerdeki kaybı belirleyen en önemli faktördür.



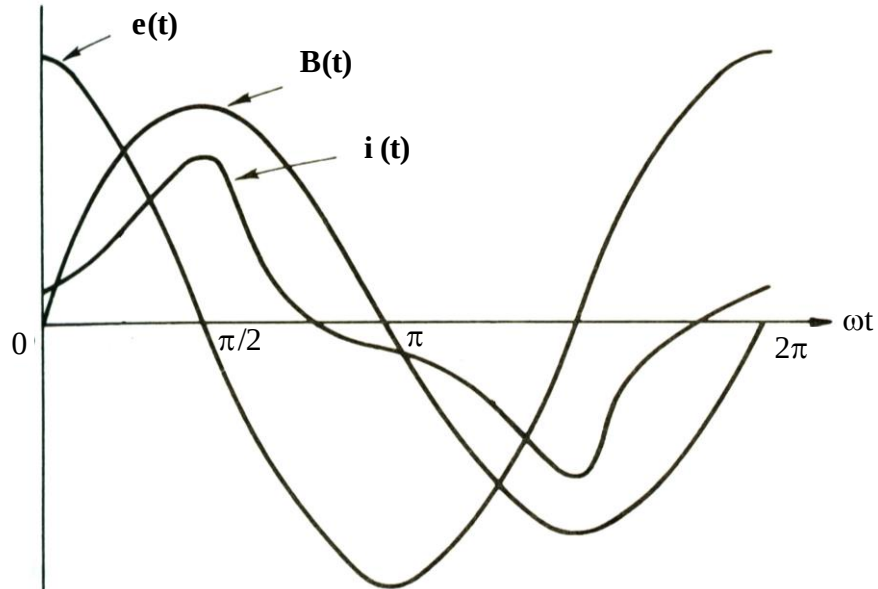
Şekil 2.2 Histerezis kapalı eğrisi ve mıknatıslanma eğrisi

Farklı histerezis eğrileri oluşturmak için akımın (dolayısıyla da magnetik alan şiddetinin) genliğini değiştirmek yeterlidir. Böylece bir histerezis çevrim ailesi oluşturulabilir (Şekil 2.2). Bu kapalı eğrilerin uç noktalarının birleştirilmesiyle Şekilde 2.2' de ve Şekil 2.3' de gösterilen 0a eğrisi, yani mıknatıslanma eğrisi elde edilir. Buradan anlaşılıyor ki, başlangıçta mıknatıslanmamış bir çekirdek mıknatıslanırsa mıknatıslanma eğrisini takip ederek normal çalışma eğrisine ulaşır.



Şekil 2.3 Magnetik alan şiddetinin genliğinin değiştirilmesiyle elde edilen histerezis eğri ailesi

Şekil 2.1’ deki magnetik malzeme sinüzoidal bir akımla beslendiği varsayılmıştır. Bu durumda magnetik alan şiddeti de sinüzoidal olacağı için, akı dolayısıyla da endüklenen gerilim nonsinüzoidal olur. Genelde besleme gerilimi sinüzoidal olur. Endüklenen gerilim ve akı yoğunluğu da sinüzoidal olacağı için histerezis eğrisinden, magnetik alan şiddetinin ve onu oluşturan besleme akımının nonsinüzoidal olacağı anlaşılır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda endüklenen gerilim, akı yoğunluğu ve akımın değişimleri

N sarımlı magnetik malzemede (Şekil 2.1.a) akı yoğunluğu $B(t)$ sinüzoidal değişsin.

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (2.3)$$

Akı $\phi(t) = B(t).A_C$ olduğuna göre,

$$\phi(t) = \Phi_m \sin \omega t = A_C.B_m.\sin \omega t \quad (2.4)$$

olur. Faraday endüklenen gerilim yasasının ifadesi,

$$e(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

dir. Endüklenen gerilim Denklem 2.4, Denklem 2.5'te yerine konulduğunda,

$$e(t) = \omega N A_C B_m \cos \omega t \quad (2.6)$$

bulunur. Burada $\omega = 2\pi f$ dir. Endüklenen gerilim sinüzoidal olduğundan efektif değerleri için,

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} . f . N . B_m . A_C \quad (2.7)$$

yazılır. Denklem 2.7, temel gerilim yasası olarak bilinir. Bu ifadede endüklenen gerilim E (V), frekans f (Hz), maksimum akı yoğunluğu B_m (T) ve çekirdek faydalı kesiti A_C (m^2)' dir.

2.2. Histerezis Kaybı

Histerezis etkisi nedeniyle oluşan güç kaybına histerezis kaybı denir. Bu güç kaybı magnetik malzemenin ısınmasına sebep olur. Gösterilebilir ki histerezis kaybı, histerezis kapalı eğrisinin alanı ile orantılıdır. Şekil 2.1.a' daki N sarımın direncini ihmal edilirse (yeterince küçükse) sargıda endüklenen gerilim, besleme gerilimi olarak alınabilir, $e(t) \cong v(t)$. Çekirdekte ϕ akısı oluştuğunu düşünersek, Faraday yasasından,

$$v(t) = N \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

yazılabilir. Belirli bir zaman aralığında çekirdeğe sağlanan enerji,

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} v \cdot i \cdot dt \quad (2.9)$$

dir. Denklem 2.8 ve 2.9 den,

$$W = \int N \cdot \frac{d\phi}{dt} \cdot i \cdot dt = \int_{\phi_1}^{\phi_2} N \cdot i \cdot d\phi \quad (2.10)$$

$\phi = B \cdot A_C$ ve $i = \frac{H \cdot \lambda_C}{N}$ olduğu bilindiğine göre,

$$W = \lambda_C \cdot A_C \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB = \mathfrak{V}_C \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB \quad (2.11)$$

elde edilir. Burada $\mathfrak{V}_C = \lambda_C \cdot A_C$ magnetik malzemenin hacmidir (m^3). λ_C ortalama magnetik yol (m) ve A_C de akının geçtiği yola dik olan faydalı kesittir (m^2). Bir periyot boyunca transfer edilen enerji Denklem 2.12' daki gibi bulunabilir:

$$W_T = \mathfrak{V}_C \oint H \cdot dB \quad (2.12)$$

Denklem 2.12' dan anlıyoruz ki, bir periyotta magnetik malzemeye transfer edilen enerji, magnetik malzemenin hacmi ile çalışma noktasındaki histerezis eğrisinin alanının çarpımına eşittir. Akımın frekansı f ise o zaman histerezis etkisinden kaynaklanan kayıp,

$$P_h = \mathfrak{V}_C \cdot A_h \cdot f \quad (2.13)$$

olarak bulunur.

Şekil 2.2' den görüleceği üzere $B - H$ eğrisi lineer olmayan (nonlinear) bir eğridir ve çok değerlidir (yani belirli bir H değerine karşılık iki B değeri vardır). Dolayısıyla altındaki alanın hesaplanması zordur. Birçok deney yapıldıktan sonra histerezis eğrisinin alanını kabaca ifade eden bir denklem bulunmuştur [11].

$$A_h = k \cdot (B_m)^n \quad (2.14)$$

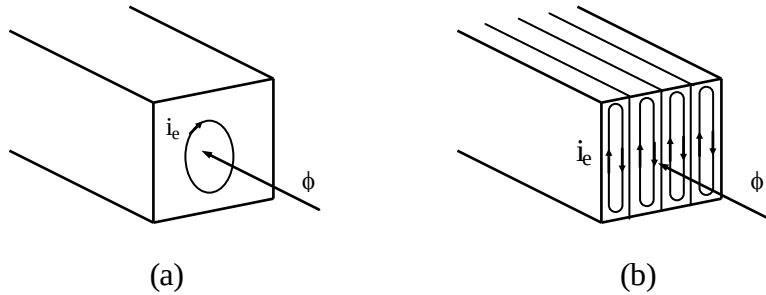
Burada k magnetik malzemenin özelliğine bağlı bir katsayı, n 1,5 ile 2,5 arasında değişen bir katsayıdır. Böylece histerezis kaybı,

$$P_h = k_h \cdot B_m^n \cdot f \quad (2.15)$$

şeklinde yazılabilir. Burada k_h magnetik malzemenin cinsine ve hacmine bağlı bir katsayıdır.

2.3. Girdap akımı kaybı

Magnetik malzemelerde oluşan bir diğer kayıp da girdap akımları kaybıdır. Akı yoğunluğunun zamana göre değişmesinden kaynaklanır. Akının değişimi akının geçtiği yola dik olan kesitte gerilim endükler. Endüklenen gerilimler, iletkenin kesitinin kapalı devre oluşturmasından dolayı girdap akımları adı verilen akımların akmasına sebep olur. Şekil 2.5.a' da kütsel bir magnetik malzemede, Şekil 2.5.b' de ise dilimlenmiş bir magnetik malzemedeki zamanla değişen akının dik kesitte oluşturduğu girdap akımları gösterilmiştir. Girdap akımları, magnetik malzemenin elektriksel direncinden dolayı $i^2 \cdot R$ kadarlık güç kaybına neden olurlar.



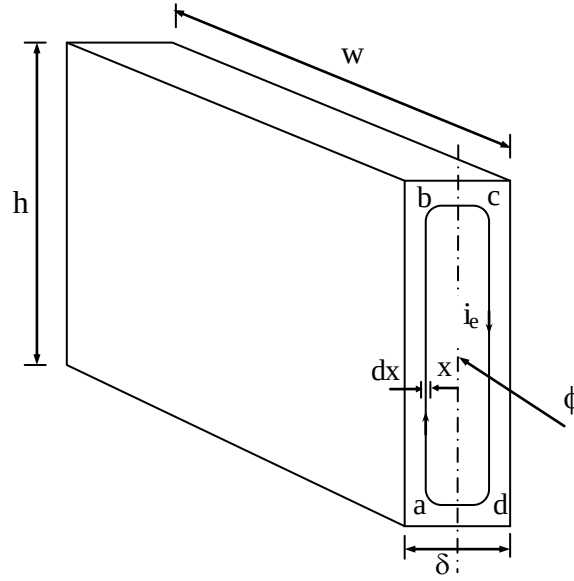
Şekil 2.5 Magnetik malzemede girdap akımları. (a) kütsel bir magnetik malzeme, (b) dilimlenmiş ve birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış saclardan dizilmiş magnetik malzeme.

Şekil 2.5.b' deki magnetik malzemeyi oluşturan saclardan bir tanesinin büyütülmüş görüntüsü Şekil 2.6' da verilmiştir. Sacın kalınlığı δ , eni w yüksekliği de h olsun. $\delta \ll h$ olduğu durumda, abcd kapalı eğrisinin sınırladığı alandaki akı,

$$\phi_m = 2hx B_m \quad (2.16)$$

olur. Kapalı eğride endüklenen gerilim, Denklem 2.7' de verilen temel gerilim yasasından yararlanarak bulunabilir:

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot B_m \cdot 2hx \quad (2.17)$$



Şekil 2.6 Magnetik malzemeyi oluşturan saclardan birinin büyütülmüş görüntüsü

abcd yolunun direnci,

$$R = \rho \frac{\lambda_c}{A_c} = \rho \frac{2h}{w dx} \quad (2.18)$$

dir. Burada ρ malzemenin öz direncidir (Ωm). Kapalı eğride endüklenen gerilim nedeniyle akan diferansiyel akım,

$$dI_e = \frac{E}{R} = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m w x dx}{\rho} \quad (2.19)$$

bulunur. Denklem 2.19 ve 2.17 kullanılarak, abcd kapalı eğrisi üzerinde akan girdap akımının meydana getirdiği güç kaybı bulunabilir:

$$dP_e = E dI_e = \frac{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 2whx^2 dx}{\rho} \quad (2.20)$$

Denklem 2.20' nin, sac kalınlığının tümü için integrali alınırsa,

$$P_e = \int_0^{\delta/2} dP_e = \frac{2 \cdot \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 w h}{\rho} \int_0^{\delta/2} x^2 dx \quad (2.21)$$

$$P_e = \frac{9\pi^2 f^2 \delta^2 B_m^2}{6\rho} \quad (2.22)$$

elde edilir [12]. Burada $\vartheta = w.h.\delta$ olup sacın hacmini (m^3) belirtir. Magnetik malzemedeki girdap akımı kaybı denklem 2.23' deki gibi kısaltılarak ifade edilebilir:

$$P_e = k_e \cdot B_m^2 \cdot f^2 \quad (2.23)$$

Bu ifadede kullanılan k_e magnetik malzemenin kalınlığına ve malzemenin cinsine bağlı bir katsayıdır.

Denklem 2.22' deki ifade yüksek olmayan frekanslarda (50 Hz – 1 kHz), akı yoğunluğu dağılımının girdap akımlarından etkilenmediği durumlarda geçerli olmaktadır. SiFe malzemeler üzerinde yapılan araştırmalar göstermiştir ki, Denklem 2.22 ile hesaplanan kayıp değerleri ölçülen değerlerden % 50 hatalı çıkabilmektedir [12]. Fakat yine de bu ifade, girdap akımı kayıpları ve bağlı olduğu değişkenler hakkında bilgi verdiği için önemlidir.

Denklem 2.22' ye dayanarak, girdap akımı kayıplarını azaltmak için iki yöntemden bahsedilebilir:

1. İletkenliği düşük (yani öz direnci büyük) magnetik malzeme kullanmak. Denklem 2.22' de görüldüğü üzere, girdap akımı kayıpları kullanılan magnetik malzemenin öz direnci ile ters orantılıdır. Demir, ucuz ve bol bulunan iyi bir magnetik malzemedir. Aynı zamanda iletkendir. Bu yüzden girdap akımı kayıpları yüksektir. Demirin içine % 4 - 5 Silisyum katıldığında iletkenliği, dolayısıyla girdap akımı kayıpları azalır. Düşük frekanslarda (50 – 100 Hz) çalışan elektrik makinalarında, magnetik malzeme olarak en çok Silisyum katkılı demir çekirdek (SiFe çekirdek) kullanılır.

2. Dilimlenmiş sac kullanmak. Girdap akımı kayıpları kullanılan magnetik malzemenin kalınlığının karesi ile ters orantılı değiştiği için, kütleli magnetik malzeme yerine dilimlenmiş ve birbirinden yalıtılmış sac malzeme kullanmak kayıpları azaltır (Şekil 2.5.b). Bu yüzden düşük frekanslarda çalışan elektrik

makinalarında, dilimlenmiş (kalınlığı 0,01 - 0,3 mm) ve birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış SiFe saclar kullanılır. SiFe saçlar genel olarak 1,8 T akı yoğunluğu civarı doymaya girerler.

Yüksek frekanslarda (10 kHz – 100 kHz), kaybı azaltmak için magnetik devreyi oluşturan SiFe saçların kalınlığını azaltmak ve direncini artırmak yeterli olmaz. Girdap akımları kaybı frekansın karesi ile artış gösterdiğinden, yüksek frekanslarda kullanılmaları uygun değildir. Bunun yerine çoğunlukla ferritler kullanılır. Öz direncinin yüksek olması (demirin özdirencinden $10^6 - 10^{11}$ oranında yüksek) yüksek frekanslarda kayıplarının düşük olmasını sağlar [1]. Ferrit malzemelerin üretiminde metal oksitler öğütülür, elenir ve elektiksel yalıtkanlığı iyi olan yapışkan malzeme ile karıştırılır. Bu işlem sonucunda metal tanecikleri izole edilmiş ve girdap akımı kayıpları yüksek oranda azaltılmış olur. İstenen forma göre preslenerek yüksek sıcaklıklarda (1100 – 1400 °C) fırınlanır. SiFe malzemeye göre düşük akı yoğunluklarında doymaya girerler (0,4 – 0,5 T).

2.4. Çekirdek kaybı

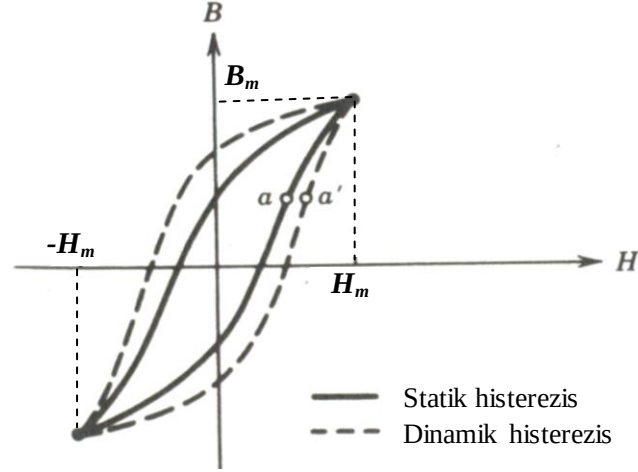
Magnetik malzemelerde toplam çekirdek kaybı, histerezis kaybı ile girdap akımı kaybının toplamına eşittir:

$$P_C = P_h + P_e \quad (2.24)$$

Düşük frekanslarda, magnetik malzeme içinde endüklenen girdap akımları ve sonuç olarak girdap akımı kaybı çok küçük olur. Bundan dolayı B – H kapalı eğrisinin altındaki alan magnetik malzemenin yaklaşık histerezis kaybını verir. Girdap akımı ve girdap akımı kayıplarının olmadığı bu eğriye statik histerezis eğrisi denir. Eğer akı yoğunluğunun frekansı düşük değilse, endüklenen girdap akımlarının oluşturduğu kayıp nedeniyle B – H eğrisi genişler. Oluşan yeni B – H eğrisine dinamik histerezis eğrisi denir (Şekil 2.7). Artık B - H eğrisinin altındaki alan sadece histerezis kaybını vermez, girdap akımı kaybı ile histerezis kaybının toplamını verir. Bu etki şöyle açıklanabilir: Girdap akımı, magnetik malzemede oluşan akıyı değiştirmeye yönelik bir gerilim endükler. Magnetik malzeme, akımın değişmemesi yani girdap akımının etkisini yenebilmesi için daha fazla akıma ihtiyaç duyar. Bu da statik histerezis eğrisinde gösterilen a noktasının, dinamik histerezis eğrisindeki a' noktasına kaymasına neden olur. Böylece kapalı B – H eğrisi büyür [11].

Çekirdek kaybı, Denklem 2.15, 2.23 ve 2.24' den hesaplanabileceği gibi, dinamik histerezis eğrisinin alanının hesaplanmasından da bulunabilir:

$$P_C = \vartheta_C \cdot f \cdot \oint_{\text{Dinamik hyst. eğrisi}} H \cdot dB \quad (2.25)$$

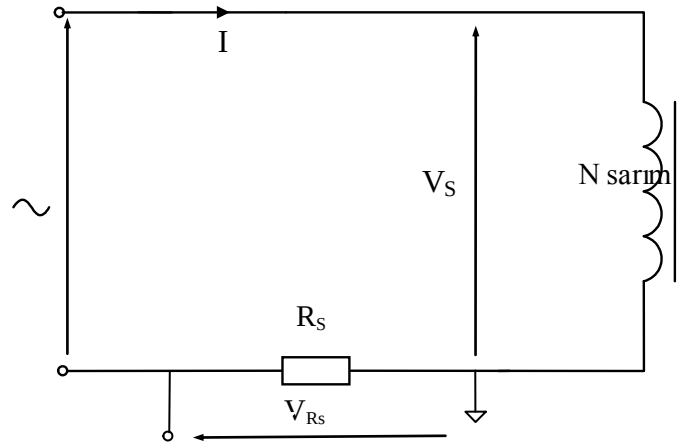


Şekil 2.7. Girdap akımları kaybının kapalı histerezis eğrisine etkisi

BÖLÜM 3. ELEKTRİKSEL VE MAGNETİK BÜYÜKLÜKLERİN ELDE EDİLMESİ

3.1. Besleme gerilimi ve akımının elde edilmesi

Bir magnetik malzemenin beslendiği gerilim ve çektiği akımın zamana göre değişimi, osiloskoptan izlenebilir. Osiloskop gerilim gösteren cihaz olduğundan besleme gerilimi V_S 'nin dalga şekli direkt bağlantı ile görülebilir. Çekilen akımın görülebilmesi için dirençten yararlanılır (Şekil 3.1). Çekilen akım, direnç üzerinde kendisiyle aynı fazda bir gerilim meydana getirir. Böylece çekilen akımın osiloskoptan izlenilebilir. Seçilen direnç 1Ω olursa, magnetik malzemenin çektiği akım, osiloskopta görünen dalga şekline denk düşer. Fakat ölçme yaparken dikkat edilmesi gereken, devreye en az etkinin yapılmasıdır. Bunun için, seçilen direncin daha küçük olması tercih edilmelidir. Böylece yapılan hata da küçülmüş olur.

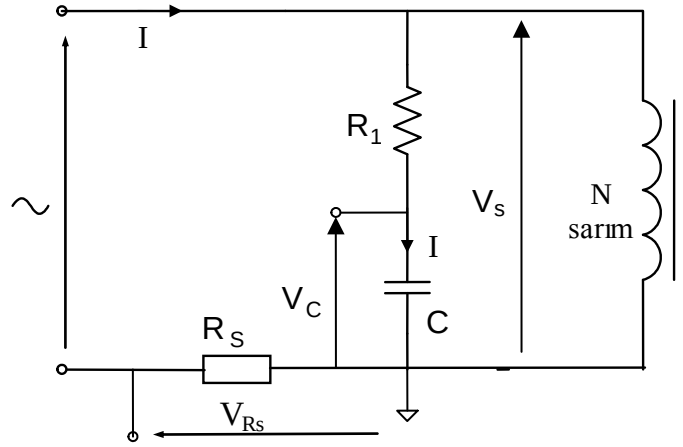


Şekil 3.1 Besleme gerilim ve akımının zamana göre değişiminin osiloskopta çizdirilmesi için kullanılabilecek devre.

3.2. Kapalı B – H Eğrisinin Elde Edilmesi

Bir magnetik malzemeye ait zamanla değişen magnetik akı yoğunluğu $B(t)$ ve magnetik alan şiddeti $H(t)$, orantılı gerilimler sağlandığı takdirde osiloskoptan izlenebilir. B – H eğrisi, magnetik alan şiddetinin magnetik akı yoğunluğuna göre

çizimi olduğuna göre, bu büyüklükler ile orantılı ve aynı fazda gerilimler elde etmek gerekir. Bunun için şekil 3.2’ deki devre kullanılabilir.



Şekil 3.2 B – H eğrisinin elde edilebilmesi için kullanılabilecek devre

Şekil 3.2’ deki N sarımlı magnetik çekirdek sinüzoidal V_s gerilimi ile beslendiğinde sarımda endüklenen gerilim,

$$e(t) = N \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (3.1)$$

ve çekirdekde oluşan akı yoğunluğu,

$$B(t) = \frac{\phi(t)}{A_c} \quad (3.2)$$

dir. Sargı direnci yeterince küçükse ihmal edilebilir ve besleme gerilimi endüklenen gerilime eşit olur. Böylece akı yoğunluğu denklem 3.3’ deki gibi yazılabilir:

$$B(t) = \frac{1}{A_c \cdot N} \int V_s \cdot dt \quad (3.3)$$

Denklem 3.3’ deki V_s geriliminin integrali, Şekil 3.2’ deki RC devresinden elde edilebilir. Eğer $R_1 \gg X_C = 1/\omega C$ ise, kondansatörden geçen akım için,

$$I_C = \frac{V_s}{R_1} \quad (3.4)$$

yazılabilir. Böylece kondansatör gerilimi,

$$V_c = \frac{1}{R_1 \cdot C} \int V_s \cdot dt \quad (3.5)$$

olarak bulunur. Devre, sinüzoidal bir kaynaktan beslendiğinde magnetik akı yoğunluğu için Denklem 3.6' daki ifade elde edilir:

$$B = \frac{R_1 \cdot C}{N \cdot A} \cdot V_c \quad (3.6)$$

Burada A_c akı yoluna dik olan etkin kesit (m^2), C kondansatör (F) ve R_1 direnç (Ω), V_c kondansatör üzerindeki gerilim (V) dir. Denklem 3.6' dan anlaşılacağı üzere, magnetik akı yoğunluğu kondansatör üzerindeki gerilimle doğru orantılıdır. İstenirse devrede RC elemanları kullanılmadan da B değerleri bulunabilir. Denklem 3.5 ve 3.6' dan akı yoğunluğunun besleme geriliminin integrali ile doğru orantılı olduğu görülür. Besleme gerilimi sinüzoidal olduğu taktirde akı yoğunluğu da sinüzoidal olacaktır, fakat akı yoğunluğu 90° faz farkına sahip olacaktır. Besleme geriliminin ani değeri bilinirse, ani değerın integrali alınıp sarım sayısı ile etkin kesite bölündüğünde akı yoğunluğunun ani değeri bulunur.

Magnetik alan şiddeti için de, denklem 3.6' dakine benzer bir ifade bulunabilir. Genel ampersarım yasasından,

$$H = \frac{N \cdot I}{\lambda_c} \quad (3.7)$$

yazılabilir. Burada λ_c , ortalama magnetik yol (m) dur. Karbon direnç üzerindeki gerilim,

$$V_{Rs} = I \cdot R_s \quad (3.8)$$

dir. Denklem 3.7' deki akım yerine Denklem 3.8' deki akım ifadesi yazılıp magnetik alan şiddeti çekilirse,

$$H = \frac{N}{R_s \cdot \lambda_c} \cdot V_{Rs} \quad (3.9)$$

bulunur. Denklem 3.9' dan magnetik alan şiddetinin karbon direnç üzerindeki gerilim düşümü ile doğru orantılı olduğu görülür. Osiloskopta çizdirilmek istenen

histerezis eğrisinin gerçeğe yakın olabilmesi yani hatanın ihmal edilebilir olması için, R_1 direncinin X_C kondansatör reaktansı yanında yeterince büyük; R_S karbon direncindeki gerilim düşümünün ise besleme gerilimi V_S yanında yeterince küçük olmalıdır. Çizdirilen kapalı eğri, V_C' nin V_{R2}' ye göre çizimi olacağından, gerçek B – H eğrisine ulaşmak için Denklem 3.6 ve Denklem 3.9 dikkate alınmalıdır.

3.3. Çekirdek kaybının bulunması

Çekirdek kaybının bulunmasında elektriksel büyüklüklerden yararlanılabilir. Sargıda meydana gelen kayıp, çekilen güce göre çok küçükse ihmal edilir ve çekirdekte meydana gelen toplam güç kaybı çekilen elektriksel güce eşit alınır. Eğer kayıp ihmal edilemeyecek boyutta ise sargı direnci üzerinde harcanan güç, çekilen güçten çıkarılır. Çekirdeğin çektiği elektriksel gücün bulunmasında iki yöntem kullanılabilir:

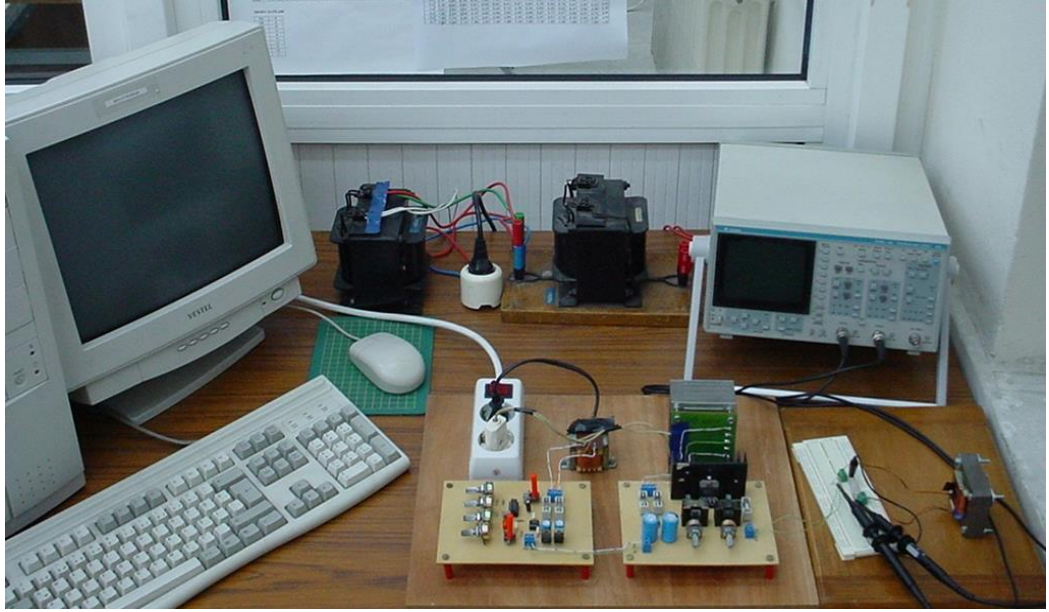
1. Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda, akımın ve gerilimin efektif değeri ve bir $\cos\phi$ metre yardımıyla aralarındaki açı bulunur. Çarpımları çekilen gücü verir.

2. Analog – dijital dönüştürücü yardımıyla besleme gerilimi ve akımının ani değerleri örneklenir. Gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımı ani gücü, bir periyot için ortalaması ise çekilen elektriksel gücü verir.

İlk yöntem daha basit gözükmektedir. Fakat genelde ölçü cihazları (ampermetre, voltmetre ve $\cos\phi$ metre) küçük frekanslar için (örneğin 50 – 60 Hz) dizayn edilirler. Yüksek frekanslarda ölçüm yapan cihazların (50 kHz – 100 kHz) maliyeti yüksektir. Ayrıca örnekleme yapamadığınız için ölçülen büyüklüklerin ani değerleri hakkında bir fikriniz olmaz. Bu yüzden ilk yöntem uygun değildir. İkinci yöntem ise örneklemenin yapılması ve birkaç işlemten sonra sonuca ulaşılması nedeniyle biraz zaman almaktadır. Fakat elinizde bir analog – dijital dönüştürücü mevcutsa, başka bir ölçü cihazına gerek kalmadan sonuca ulaşılabilir. Elektriksel büyüklükleri örnekleyerek daha fazla bilgiye ulaşılmış olur.

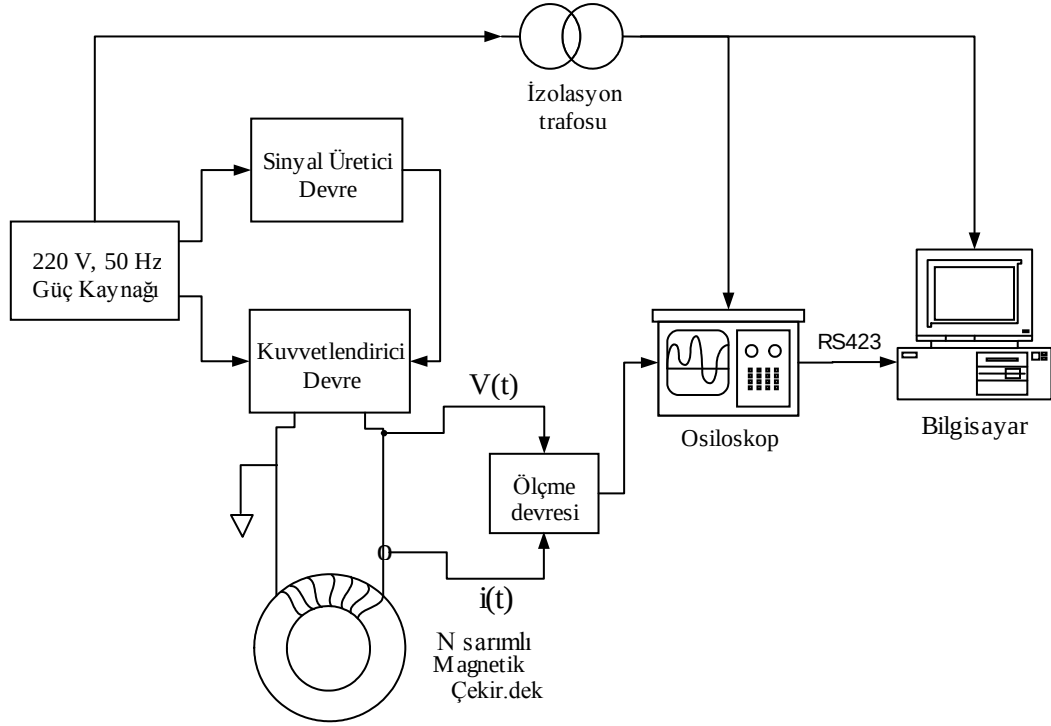
BÖLÜM 4. ÖLÇÜMDE KULLANILAN DEVRE VE CİHAZLAR

Şekil 4.1’ de, deneyin yapılması ve ölçüm sonuçlarının alınmasında kullanılan devre ve cihazların resmi, Şekil 4.2’ de ise bu devre ve cihazların genel bağlantı şeması verilmiştir.



Şekil 4.1. Ölçümde kullanılan devre ve cihazların laboratuvar ortamındaki görünüşü

Değişik frekanslarda işaret üreten devre ile kuvvetlendirici devre, ayrı iki karta baskıdevre olarak hazırlanmıştır. İşaret üretici devreden elde edilen zayıf gerilim kuvvetlendirici devreye verilmektedir. Kuvvetlendiricinin çıkışındaki gerilimle magnetik çekirdek beslenmektedir. Osiloskop, hem elektriksel büyüklüklerin izlenmesinde kullanılmış, hem de elektriksel büyüklüklerin örneklenmesi ve bilgisayara aktarılması işinde kullanılmıştır. Osiloskopun RS423 iletişim portu mevcuttur. Ölçüm yaparken faz – toprak kısadevresini engellemek için, hem osiloskop hem de verilerin aktarıldığı bilgisayar izolasyon trafosuyla şebekeden izole edilmiştir. Ölçme düzeneğini oluşturan devre ve cihazlar sonraki kısımlarda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.



Şekil 4.2 Ölçme düzeneğini oluşturan devre ve cihazların genel görünüşü

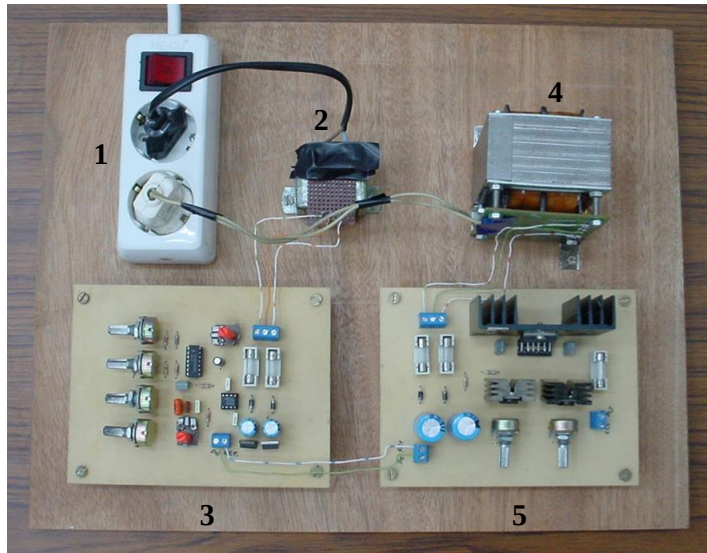
4.1. İşaret ve Kuvvetlendirici Devreler

Şekil 4.3' de, işaret üretici ve kuvvetlendirici devrelerin genel görünüşü verilmiştir. Sarımlı magnetik çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarındaki (çalışma noktasından kasıt frekans ve magnetik akı yoğunluğudur) kayıplarının ve $B - H$ eğrilerinin saptanması için, Şekil 4.4 ve 4.5' de şemaları verilen iki devre kullanılmıştır. Şekil 4.4 işaret üretici devre ve Şekil 4.5 de kuvvetlendirici devredir.

4.1.1. İşaret Üretici Devre

Şekil 4.4' de genel şeması verilen işaret devresi üçgen, kare ve sinüs dalgası üretmektedir. A1 anahtarı yardımıyla, sinyal devresinin çıkışındaki gerilimin şekli (üçgen, kare, sinüs) ayarlanabilmektedir. Devrenin en önemli elemanı ICL8038 entegre devredir [13]. ICL8038 etrafında oluşturulan bu devrenin frekans aralığı A2 anahtarı sayesinde belirlenmektedir. A2 anahtarı ile yapılan dört farklı anahtarlama için frekans 20 Hz – 200 kHz arasında değiştirilebilmektedir.

Devrenin beslemesi için 5VA, 220 / 2 x 6 V' luk orta uçlu transformatör kullanılmıştır. Kontrolsüz yarım dalga doğrultucu devresiyle doğrultulan gerilimin dalgalılığını azaltmak amacıyla 1000 μF 'lık elektrolitik kondansatörler kullanılmıştır. Devrenin ihtiyaç duyduğu gerilim $\pm 5 V$ ' tur. Bunu sağlamak amacıyla



1. 220 V, 50 Hz'lik şebeke
2. İşaret üretici devrenin besleme trafosu
3. İşaret üretici devre
4. Kuvvetlendirici devrenin besleme trafosu
5. Kuvvetlendirici devre

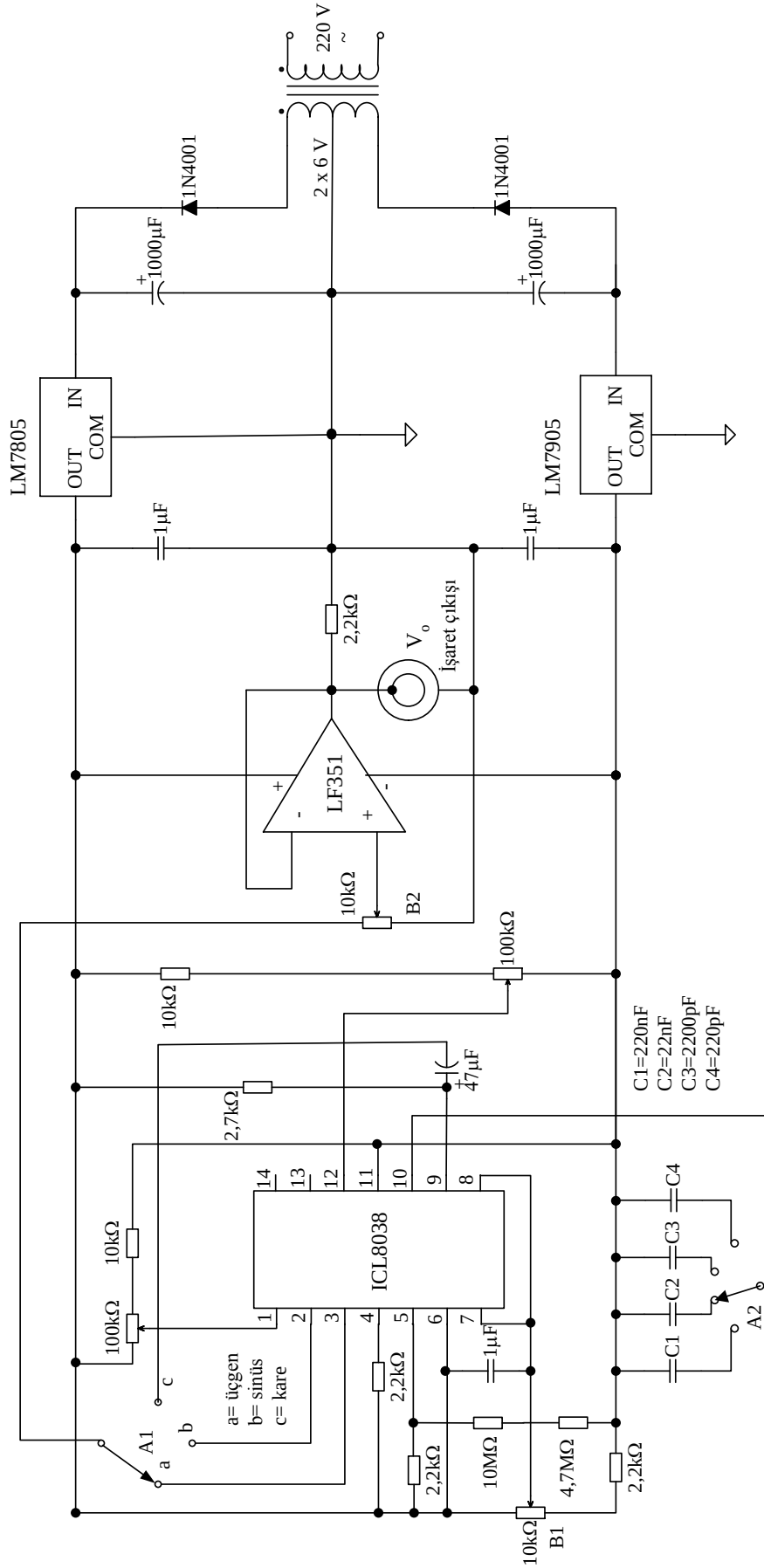
Şekil 4.3 Ölçümde kullanılan devrelerin genel resmi.

LM7805 ve LM7905 gerilim regülatörleri kullanılmıştır. Devrenin ihtiyaç duyduğu güç çok küçük olduğu için bu regülatörlerin soğutulmasına ihtiyaç yoktur. ICL8038 entegresi, içinde kare dalga osilatörü barındırmaktadır. Çıkıştaki işaretin (V_0) frekansı, dört uçlu A2 anahtarına bağlı kondansatörler ve 10 k Ω ' luk ayarlı direnç (B1) üzerinden değiştirilmektedir. Kullanılan kondansatörlerin toleransı %10 veya daha küçük olmalıdır. Çıkıştan elde edilen sinüs işaretin saflığı ise iki adet 100 k Ω ' luk ayarlı dirençlerle sağlanmaktadır. LF351 bir işlemsel kuvvetlendiricidir. Bu devrede kullanılmasının gayesi ise devre ile çıkışı arasında bir tampon oluşturmaktır. LF351'in girişine bağlı 10 k Ω ' luk ayarlı direnç (B2) ise çıkış geriliminin genliğini ayarlamaktadır. Çıkış gerilimi V_0 , 2,2 k Ω ' luk direnç üzerinden alınmaktadır.

Tablo 4.1' de, gerilimi ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre için frekans ve gerilim tablosu verilmiştir.

Tablo 4.1 İşaret üretici devrenin çıkışından elde edilen gerilim ve frekans değerleri

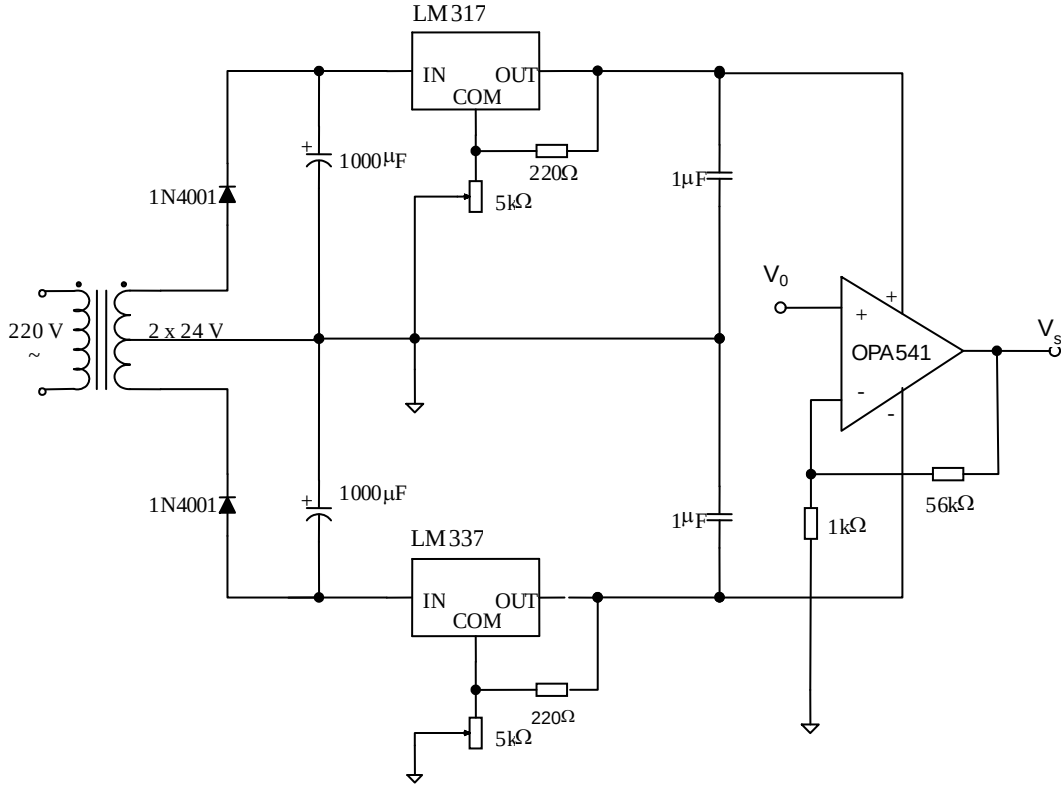
A2 anahtarının konumu	Frekans ayar aralığı (kHz)	Efektif maksimum çıkış gerilimi V_0 (V)		
		Sinüs	Üçgen	Kare
C1	0,02 – 0,85	0,75	0,95	2,25
C2	0,27 – 7,5			
C3	2,5 – 65			
C4	21 – 200			



Şekil 4.4 Gerilimi ve frekansı ayarlanabilir işaret üreten devre

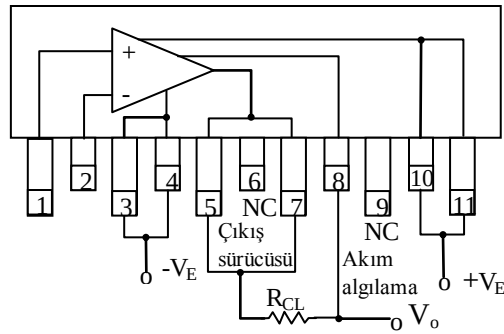
4.1.2. Kuvvetlendirici Devre

Şekil 4.4’ deki devrenin çıkışından elde edilen işaret düşük güçlü olduğu için kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Kuvvetlendirme işlemi için Şekil 4.5’ deki devre kullanılmıştır. Bu devrenin çalışmasını ve güç kapasitesini belirleyici en önemli unsur OPA541 dir [14].



Şekil 4.5 Kuvvetlendirici Devre

OPA541, ± 40 V luk gerilimle beslenebilen ve çıkışından 10 A tepe akımı alınabilen bir güç kuvvetlendiricisidir. Devrede plastik ambalajlı OPA541 kullanılmıştır (Şekil 4.6). Çıkış akımı, R_{CL} üzerinden sınırlanabilmekte ve hatta programlanabilmektedir .



Şekil 4.6. Devrede kullanılan OPA541’ in ön – üstten görünüşü

Akımı sınırlayan direncin çıkış akımına göre değişiminin yaklaşık ifadesi Denklem 4.1' de verilmiştir.

$$R_{CL} = \frac{0,813}{|I_{LIM}|} - 0,02 \quad (4.1)$$

Eğer direncin değeri biliniyorsa kuvvetlendiricinin çıkışından alınabilecek sınır akım bulunabilir:

$$|I_{LIM}| = \frac{0,813}{R_{CL} + 0,02} \quad (4.2)$$

Sınır akım değeri sıcaklık artışıyla düşmeye başlar. Benzer bir şekilde düşük sıcaklıklar da da sınır akımının değeri artar. Akımı sınırlayan direncin farklı sıcaklıklardaki artışının yaklaşık ifadesi,

$$\Delta R_{CL} = \frac{-2mV}{|I_{LIM}|} \cdot (T - 25) \quad (4.3)$$

dir. Burada T gövde sıcaklığıdır (°C) [14].

± 40 V dc besleme geriliminde, çıkışından maksimum ± 40 V ve 5 A'lık tepe akımı alınabilmektedir. Bunun için OPA541' in yeterince soğutulmuş olması gerekir. Güç kuvvetlendiricisinin DC beslemesini sağlamak amacıyla 90VA, 220 / 2 x 24 V' luk transformatör kullanılmıştır. Düşürülen gerilim kontrolsüz yarım dalga doğrultucu kullanılarak doğrultulmuş ve 1000 μF 'lık elektrolitik kondansatörler kullanılarak gerilimin dalgalılığı azaltılmıştır.

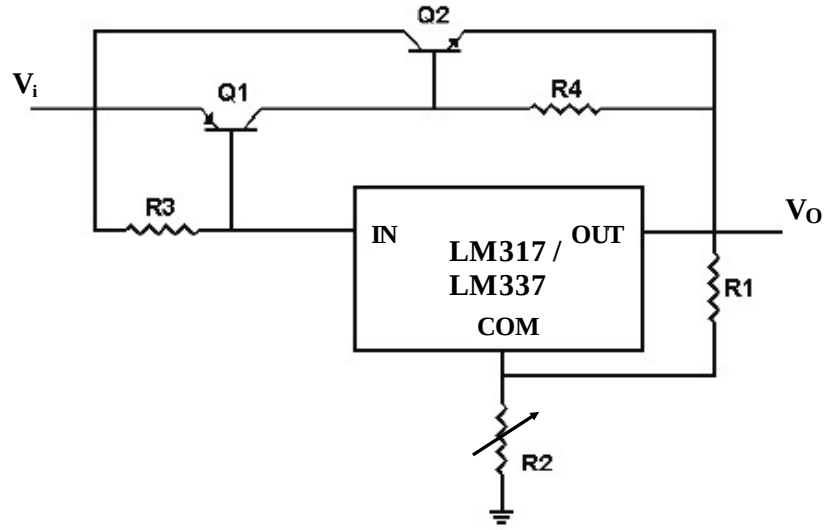
Elde edilen pozitif ve negatif DC gerilimler sırasıyla LM317 ve LM337 ayarlı gerilim regülatörleri üzerinden güç kuvvetlendiricisine uygulanmıştır. Bu iki gerilim regülatörü, 1,2 – 37 V arası gerilim ayarı yapabilmekte, yeterince soğutulmuş olmaları durumunda 1,5 A' e kadar akımı taşıyabilmektedirler. Gerilim ayarı, ayar ucuyla çıkış ucu arasına konan iki dirençle (biri ayarlı) sağlanmaktadır. Giriş gerilimi eşik değerini aştığında, regülatörün çıkış ucuyla ayar ucu arasında yaklaşık 1,25 V' luk gerilim oluşmaktadır. Çıkış geriliminin dirençlere bağlı ifadesi Denklem 4.4' deki gibidir.

$$V_o = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.4)$$

Denklem pozitif gerilim regülatörüne (LM317) göre yazılmıştır. Denklemin negatif işaretli yazımı da negatif gerilim regülatörünün (LM337) gerilim ifadesini verir. Şekil 4.5’ de verilen kuvvetlendirici devrede görüldüğü gibi $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ ve $R_1 = 220 \text{ }\Omega$ seçilmiştir. Dolayısıyla regülatörlerin güç kuvvetlendiricisini besleyebilecekleri maksimum gerilim,

$$V_o = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{5}{0,22}\right) = 29,7 \text{ V} \quad (4.5)$$

olmaktadır. Devrenin vereceği akımı sınırlayan gerilim regülatörleridir. İstenirse gerilim regülatörlerinin akım kapasitesi ufak bir devreyle arttırılabilir. Bununla ilgili devre Şekil (4.7) de verilmiştir.



Şekil 4.7 Ayarlı gerilim regülatörlerinin akım kapasitesinin arttırılmasını sağlayan devre şeması

Şekil 4.4’ deki devre yapısında gerilim regülatörünün akım kapasitesinin artışı şöyle izah edilebilir: R_3 ’ ten akım aktığında üzerine düşen 0,65 V’luk gerilim, Q1 tranzistörünü ilettime sokar. Q1 tranzistöründen akım aktığında R_4 direncinden de akım akar ve üzerine düşen 0,65 V’luk gerilim Q2 tranzistörünü ilettime geçirir. Kısacası, LM317 / LM337’ün regüle ettiği akım Q1 ve Q2 tranzistörleri tarafından kuvvetlendirilir. Burada iki tranzistörün kazancı önemli değildir, çünkü tranzistörlerden geçen akımı ayarlı gerilim regülatörü belirler. Eğer bu devre

kullanılacaksa Q1 ve Q2 tranzistörlerinin iyi soğutulduğundan emin olunmalıdır. Böyle bir devrede ayarlı gerilim regülatörü LM317 / LM337' nin taşıyacağı akım küçük olacağı için soğutulmasına ihtiyaç yoktur. Ayarlı gerilim regülatörünün girişine ve çıkışına 1µF' lık yönsüz kondansatörler konulması, geçici etkileri ve osilasyonu önleyeceğinden devrenin performansı artar.

Gerilimi ve frekansı ayarlanabilir güç kaynağını oluşturan her iki devrenin referans noktalarının birleştirilmiş olmasına dikkat edilmelidir. Aynı zamanda herhangi bir kısadeveye karşı koruma sağlamak için devrelerin girişine ve çıkışına hızlı kesen sigorta konulmuştur. Ölçümde kullanılan kuvvetlendirici devrenin (aynı zamanda OPA541'in) girişine uygulanan gerilimi ile çıkışından alınan gerilim arasındaki ilişki,

$$V_s = V_o \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (4.6)$$

dir. Devrede kullanılan dirençlerden kazanç,

$$g = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \left(1 + \frac{56k\Omega}{1k\Omega}\right) = 57 \quad (4.7)$$

olarak bulunur. OPA541' in beslemesine dikkat edilecek olursa, çıkışından alınabilecek maksimum gerilim (tepe değer olarak) bu devre için yaklaşık 30 V olduğu görülür.

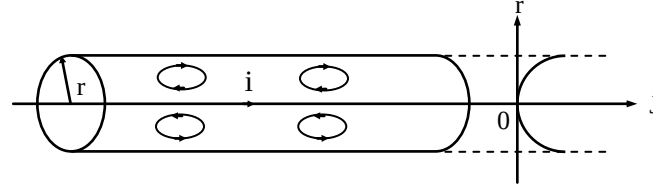
4.2. Ölçme Devresi ve Sarımlı Magnetik Çekirdekler

Ölçme devresi olarak, magnetik malzemenin B – H kapalı eğrisinin çıkarılması için Şekil 3.1, çekirdek kaybının çıkarılması için Şekil 3.2 de gösterilen devre kullanılmıştır. Ölçme esnasında devreye olan etkiyi azaltmak için R₂ direnci 0,68 Ω, R₁ direnci 1 MΩ ve C kondansatörü 1 µF olarak seçilmiştir. Ölçme devresinde ve magnetik malzemenin sarımında kullanılacak iletkenler seçilirken deri etkisine dikkat edilmelidir.

4.2.1. Deri etkisi

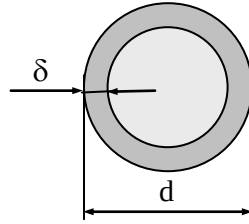
İletkenden geçen alternatif akımın, iletkenin yüzeyinden akma eğilimine deri etkisi denilir. Bunun nedeni, iletkenden geçen akımın iletken boyunca gerilimler

endüklemesidir. Endüklenen gerilimler iletken içinde girdap akımlarının akmasına neden olurlar. Deri etkisinin, akımın kullandığı kesiti nasıl değiştirdiğini daha iyi anlamak için Şekil 4.6’ dan yararlanılabilir.



Şekil 4.6 İletkenden meydana gelen deri etkisi olayı

İletkenden akan girdap akımları, iletkenin ortasından akan akımı azaltacak şekilde, iletkenin çeperinden akan akımı arttıracak şekilde etkir. Dolayısıyla iletkenden akan toplam akıma bakılacak olursa, iletkenin ortasında akım hemen hemen sıfır olmakta, çepere doğru ise artmaktadır. Frekans arttıkça deri etkisi kendini daha çok hissettirir. Alternatif akımın iletkenden akarken kullandığı iletken kalınlığına, deri kalınlığı denir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Deri etkisi nedeniyle akımın iletkenin yüzeyinden akması

Deri kalınlığını veren ifade,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad [\text{m}] \quad (4.8)$$

Denklemden δ deri kalınlığı (m), f frekans (Hz), μ iletkenin magnetik geçirgenliği (H/m) ve σ iletkenin öziletkenliğidir ($1/\Omega \cdot \text{m}$). σ 'nın bakır iletken için değeri $58 \cdot 10^6$ $1/\Omega \cdot \text{m}$ ' dir. İletkenin yüzeyindeki akım yoğunluğu biliniyorsa, iletkenin herhangi bir noktasındaki akım yoğunluğu da bulunabilir:

$$J = J_0 e^{-r/\delta} \quad (4.9)$$

Bu ifadede J iletkenin herhangi bir noktasındaki akım yoğunluğu (A/m^2), J_0 yüzeydeki akım yoğunluğu (A/m^2), r yarıçapsal doğrultudaki mesafe (m), δ ise deri kalınlığı (m) dir.

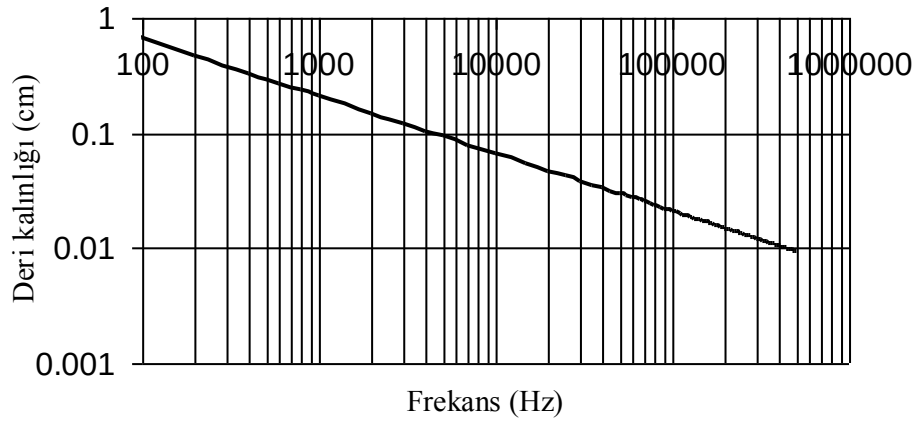
Sarımda genellikle bakır tel kullanıldığından, Denklem 4.9 basitleştirilebilir. Bakırın bağıl magnetik geçirgenliği $\mu_r = 1$ olduğundan, magnetik geçirgenliği havanın magnetik geçirgenliği μ_0 ’ a eşittir. Oda sıcaklığında ($20\text{ }^\circ\text{C}$) kabul edilen bakır iletken için deri kalınlığı,

$$\delta_{Cu} = \frac{6,62}{\sqrt{f}} \text{ [cm]} \quad (4.10)$$

olarak bulunur [15]. Deri etkisini ihmal edebilmek için, sarımda kullanılacak iletkenin çapının deri kalınlığının iki katından küçük olmalıdır:

$$d < 2\delta \quad (4.11)$$

Şekil 4.9’ te, iletkendeki deri kalınlığının çalışma frekansına göre değişimini veren grafik gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Deri kalınlığının frekansa bağlı değişimi

Ölçmenin yapılacağı aralık ferrit çekirdek için $1\text{ kHz} - 50\text{ kHz}$ arası olduğu için, sarımda kullanılacak iletkenin çapı,

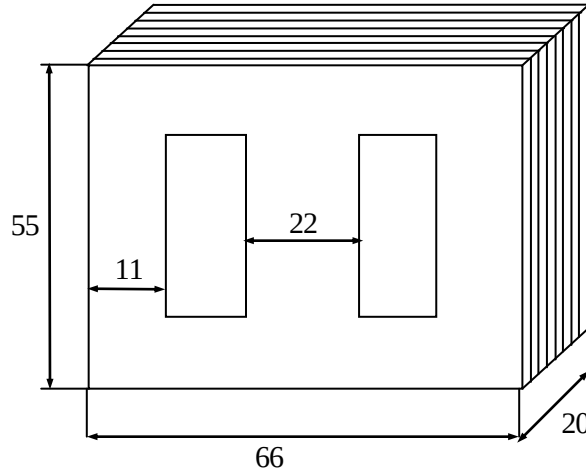
$$2\delta = \frac{2 \cdot 6,62}{\sqrt{50000}} = 0,06 \text{ cm} = 0,6 \text{ mm} \quad (4.12)$$

değerinden küçük olmalıdır.

4.2.2. Magnetik malzemeler

Magnetik kayıplarının ölçülmesi ve modellenmesi için iki tip magnetik malzeme kullanılmıştır:

1. SiFe çekirdek: SiFe çekirdekler, her iki yüzeyi de elektriksel olarak yalıtılmış saçlardan dizilerek veya sarılarak elde edilirler. Saçların kalınlığı genellikle 0,3 mm - 0,2 mm arasındadır. Yüksek akı yoğunluklarında çalışabilirler (1,6 – 1,8 T). Çoğunlukla 50 – 60 Hz frekanslarında çalışan elektrik makinelerinde kullanılırlar. 1 kHz'e kadar olan frekanslarda kullanım alanları vardır. Bu durumda daha ince SiFe saçlar kullanılır (0,1 - 0,08 mm). Ölçmede E – tipi SiFe çekirdek kullanılmıştır. Çekirdek, kalınlığı 0,3 mm olan saçlardan dizilmiştir. Çekirdeğe ait boyutlar Şekil 4.9 ' da, diğer teknik özellikleri ise Tablo 4.2' de verilmiştir.



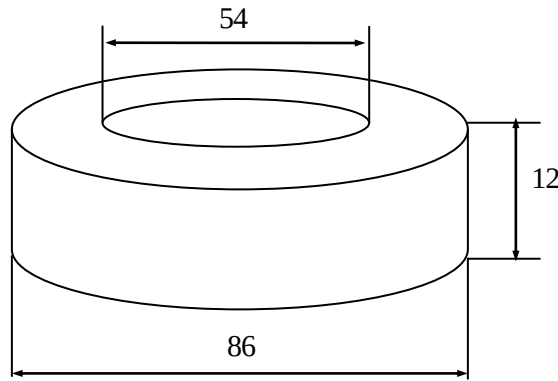
Şekil 4.9. Magnetik kayıpları ölçülen E – tipi magnetik çekirdeğin mm cinsinden boyutları

Tablo 4.2. Magnetik kayıpları ölçülen E – tipi SiFe çekirdeğe ait teknik bilgiler

Saç malzemesi	%3 Si, %97 Fe
Dolgunluk faktörü (k_c)	0,93
Çekirdek faydalı kesiti	4 cm ²
Yoğunluk (d_c)	7,65 g / cm ³
Kütle (m)	350 g
Sarım iletken çapı (d)	0,6 mm
Uygulanan sarım (N)	50 sarım

Çekirdekte 0,6 mm' lik telden, 2 kat paralel 50 sarım sarılmıştır. Bu sayede, hem sargının direnci küçültülmüş, hem de deri etkisi azaltılmıştır. Sargının ölçülen dc direnci 0,3 Ω ' dur.

2. Ferrit çekirdek: Ferrit çekirdekler genel olarak demir oksit (Fe_2O_3) ile diğer oksitlerin karışımından veya manganez, çinko, nikel ve magnezyum gibi metallerin bir veya birkaçının karışımından elde edilir. Yüksek frekanslarda kullanılırlar (1 kHz – 1000 kHz). Fakat SiFe çekirdeklere göre daha küçük akı yoğunluğunda doymaya girerler (0,45 T). Yüksek frekanslarda düşük kayıplarının olması en önemli avantajıdır. Bu yüzden güç elektroniği düzenlerinde geniş kullanım alanına sahiptirler. Ölçmede kullanılan ferrit çekirdek toroidaldir ve geometrik boyutları Şekil 4.10' de, teknik özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Ölçmede kullanılan toroidal ferrit çekirdeğin mm cinsinden geometrik boyutları

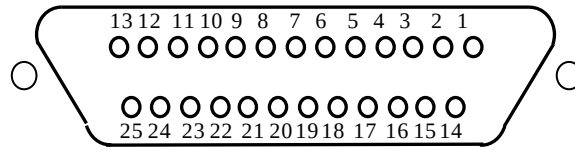
Tablo 4.3. Magnetik kayıpları ölçülen toroidal ferrit çekirdeğe ait teknik bilgiler

Malzeme	Magnezyum, Çinko
Çekirdek faydalı kesiti	1,9 cm ²
Yoğunluk (d_c)	4,85 g / cm ³
Kütle (m)	200 g
Sarım iletken çapı (d)	0,5 mm
Uygulanan sarım (N)	120 sarım

Ferrit çekirdeğe 2 kat paralel 120 sarım atılmıştır. Ölçülen dc sargı direnci 0,5 Ω ' dur.

4.2.3. Osiloskop

Osiloskop, hem dalga şekillerini kontrol etmede hem de dalga şekillerinin sayısal değerlerinin örneklenmesinde kullanılmıştır. İçindeki mevcut olan analog dijital çevirici ve RS423 bağlantısı sayesinde ölçülen dalga işaretlerinin örneklenip bilgisayara aktarılması mümkündür. Osiloskop iki kanalıdır, maksimum örnekleme hızı 100 MHz’ dir. Kanal başına maksimum 501 örnek bilgisayara aktarılabilir. Bağlantı yolu olarak, osilopun RS423 portu (LPT) ile bilgisayarın seri (COM) portu seçilmiştir. Şekil 4.11’ de RS423 bağlantısı gösterilmiştir .



Şekil 4.11. RS423 bağlantısı

RS423 bağlantısında, bilgisayarın paralel portunda (LPT) olduğu gibi 25 pin bulunmaktadır. Bunlardan 8’ i osiloskop tarafından veri transferi için kullanılmaktadır. Kullanılan pinler ve tanımları Tablo 4.4’ de belirtilmiştir.

Tablo 4.4. RS423 bağlantısında kullanılan pinler ve tanımları

Pin	İşaret	Tanımı
1	0 V	Topraklama
2	RXD	Veri kabul
3	TXD	Veri iletimi
4	CTS	Veri temizle
5	RTS	Veri iste
7	0 V	İşaret
9	0 V	Referans
18	0 V / 5	Test gerilimi

Ölçülen elektriksel büyüklükler, örneklemenin ardından 0 – 255 arasındaki değerlere ötelenir. Gerçek değerlere ulaşmak için osiloskopun her bir kanal için belirttiği katsayıları kullanmak gerekmektedir. Bunun için Denklem 4.13 deki ifade kullanılabilir.

$$X = (x - 128) \cdot \Delta x \quad (4.13)$$

X : Ölçülen elektiksel büyüklüğün gerçek sayısal değeri

x : Osiloskoptan elde edilen ve 0 - 255 arasındaki sayısal değer

Δx : Osiloskop kanalının gerilim katsayısı

BÖLÜM 5. ÖLÇÜMLERİN ALINMASI VE MAGNETİK KAYIPLARIN BULUNMASI

5.1. Ölçmenin Yapılışı

Elektriksel büyüklükleri (besleme gerilimi ve akımı) ölçülüp örneklenerek magnetik kayıpları bulunacak olan magnetik malzemeler hakkında gerekli bilgiler 4.4.2’ de verilmişti. Magnetik malzemelerin her ikisin de ölçme ve kayıp hesabında esnasında yapılan kabuller şunlardır:

1. Besleme gerilimi, endüklenen gerilime eşittir (sargıdaki gerilim düşümü, sargı direncinin küçük olması nedeniyle ihmal edilmiştir).
2. Çekirdekteki magnetik alan düzgün dağılmıştır.
3. Tüm akı faydalı akıya dönüşmüştür (kaçak akı $\phi_{\sigma} = 0$)
4. Akımın ölçülmesi için kullanılan direncin değeri sabittir ve frekansla değişmemektedir.
5. Şebeke gerilimine göre yüksek olan frekanslarda deri etkisi yoktur (sarımda kullanılan iletken çapları deri etkisini küçültecek şekilde seçilmiştir).
6. Ölçme oda sıcaklığında (20 °C) yapılmıştır, soğutulması gereken devre elmanları yeterince soğutulup oda sıcaklığına getirilmiştir.

5.1.1 E – tipi SiFe çekirdeğin elektriksel büyüklüklerinin ölçülüp örneklenmesi

Şekil 4.9’ da geometrik boyutları, Tablo 4.2’ de diğer teknik özellikleri verilen E – tipi SiFe çekirdeğin elektriksel büyüklüklerinin çeşitli frekans ve akı yoğunluklarında kayıplarının ölçülmesi amaçlanmıştır. Sarım E – tipi çekirdeğin sadece orta bacağına sarılmıştır. Başlangıçta çekirdeğe 50 sarım uygulanmıştır. Çalışma frekansını arttırdıkça besleme geriliminin de artırılması gerektiğinden (aynı akı yoğunluğu için), 150 Hz’ den sonraki ölçümlerde sarımın azaltılması yoluna gidilmiştir. Aksi taktirde, kuvvetlendirici devrenin verebileceği maksimum gerilim değeri aşılmış

olur. Besleme gerilimlerinin küçük olması da istenmemektedir. Çünkü küçük gerilimlerde hata büyümektedir. E – tipi SiFe çekirdek 0,1 T – 1,3 T arası akı yoğunluklarında ve 40 Hz – 500 Hz frekans aralığında 94 ayrı çalışma noktasında sinüzoidal gerilimlerle beslenmiş, besleme gerilimleri ve çekilen akımlar örneklenip bilgisayara kaydedilmiştir. Bunun için osiloskopun RS423 portu ile bilgisayarın seri portundana bağlantı yapılmıştır. Çekirdeğe uygulanan sinüzoidal besleme gerilimlerinin efektif değerleri Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Tablo 5.1. E – tipi SiFe çekirdeğin değişik frekanslarda, belirlenen akı yoğunluklarında çalışması için uygulanması gereken sinüzoidal gerilimlerin efektif değerleri (V)

Frekans (Hz)	Sarımlar	Akı yoğunluğu (T)							
		0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3
40	50	0,4	1,1	1,8	2,5	3,2	3,6	3,9	4,6
50	50	0,4	1,3	2,2	3,1	4,0	4,4	4,9	5,8
60	50	0,5	1,6	2,7	3,7	4,8	5,3	5,9	6,9
80	50	0,7	2,1	3,6	5,0	6,4	7,1	7,8	9,2
100	50	0,9	2,7	4,4	6,2	8,0	8,9	9,8	11,5
150	50	1,3	4,0	6,7	9,3	12,0	13,3	14,7	17,3
200	40	1,4	4,3	7,1	10,0	12,8	14,2	15,6	18,5
250	35	1,3	4,0	6,7	9,3	12,0	13,3	14,7	17,3
300	25	1,3	4,0	6,7	9,3	12,0	13,3	14,7	17,3
350	20	1,2	3,7	6,2	8,7	11,2	12,4	13,7	16,2
400	20	1,4	4,3	7,1	10,0	12,8	14,2	15,6	18,5
450	15	1,2	3,6	6,0	8,4	10,8	12,0	13,2	15,6
500	15	1,3	4,0	6,7	9,3	12,0	13,3	14,7	17,3

Örneklenmiş besleme gerilimi ve çekilen akımlar 0 – 255 arası değerlere ötelenmiş olacağından, gerçek gerilim ve akım değerlerine Denklem 4.13 sayesinde ulaşılır. Bulunan gerilim ve akımın ani değerleri sırasıyla çarpıldığında ani güç değerleri bulunur. Ani gücün bir periyot için ortalaması, çekirdeğin çektiği aktif güç ile sargıda meydana gelen kaybı verir, yani ölçümün alındığı çalışma noktası için toplam çekirdek kaybı ile toplam bakır kaybı bulunur. Besleme gerilimi ve akımı eşit zaman aralıklarında örneklenmiştir.

5.1.2. Toroidal ferrit çekirdeğin elektriksel büyüklüklerinin ölçülüp örneklenmesi

Şekik 4.10’ da geometrik boyutları ve Tablo 4.3’ de teknik özellikleri verilen ferrit çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarında elektriksel büyüklüklerinin ölçülüp örneklenerek magnetik kayıplarının hesaplanması amaçlanmıştır. Uygulanan sarım sayısı başlangıçta 120’ dir. Ölçümler 1 kHz – 50 kHz frekans aralığında ve 0,02 – 0,2 T akı yoğunluğu aralığında yapılmıştır. Sarım tüm yüzeye dağıtılmıştır. Böylece kaçak akı en aza indirgenmiştir. Magnetik çekirdeğin değişik frekanslarda istenen akı yoğunluklarında çalışması için uygulanması gereken gerilimlerin efektif değerleri Tablo 5.2’ de verilmiştir.

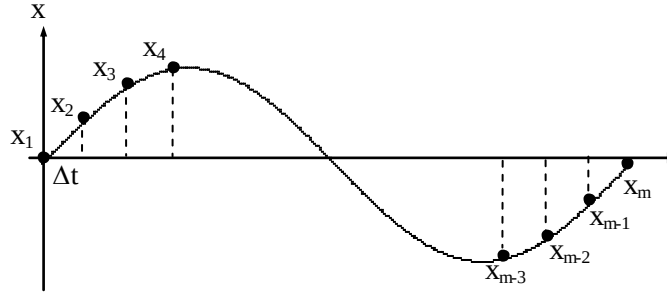
Tablo 5.2. Toroidal ferrit çekirdeğin değişik frekanslarda istenen akı yoğunluklarında çalışabilmesi için uygulanması gereken gerilimlerin efektif değerleri.

Frekans (kHz)	Sarım	Akı yoğunluğu (T)									
		0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
1	120	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
2	60	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
4	30	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
6	20	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
8	15	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
10	12	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
15	8	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
20	6	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
25	4	1,69	3,37	5,06	6,75	8,44	10,12	11,81	13,50	15,18	16,87
30	4	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
35	3	1,77	3,54	5,31	7,09	8,86	10,63	12,40	14,17	15,94	17,72
40	3	2,02	4,05	6,07	8,10	10,12	12,15	14,17	16,20	18,22	20,25
45	2	1,52	3,04	4,56	6,07	7,59	9,11	10,63	12,15	13,67	15,18
50	2	1,69	3,37	5,06	6,75	8,44	10,12	11,81	13,50	15,18	16,87

5.2. Magnetik Kayıpların Hesaplanması

Elektriksel büyüklükleri ölçülüp örneklenen her iki çekirdek için de aynı yöntem uygulanarak magnetik kayıpları hesaplanmıştır. Kullanılan yöntem hakkında bilgi aşağıda verilmiştir.

Periyodik bir x elektriksel büyüklüğü eşit zaman aralıkları ile örneklenmiş olsun (Şekil 5.1).



Sekil 5.1. Örneklenen bir büyüklük

Bu elektriksel büyüklüğün örneklenmiş değerlerin ortalaması, sayısal değerlerin ayırdığı alanların toplamının periyoda bölümü olarak yazılabilir.

$$x_{\text{ort}} = \frac{\sum_{i=1}^m A_i}{T} \quad (5.1)$$

Burada A_i i . veri ile $(i-1)$. veri arasındaki alan, m bir tam periyodu oluşturan veri sayısı, T de periyottur (s). Bir periyot için sayısal değerler yeteri kadar fazla ise, iki sayısal değer arasındaki alan üçgen ve yamuk olarak düşünülebilir. Örnekleme aralığının da eşit olduğu hesaba katılırsa,

$$x_{\text{ort}} = \frac{x_1 \cdot \Delta t / 2 + (x_1 + x_2) \cdot \Delta t / 2 + \dots + (x_{m-1} + x_m) \cdot \Delta t / 2 + x_m \cdot \Delta t / 2}{m \cdot \Delta t} \quad (5.2)$$

yazılabilir. Gerekli sadeleştirmeler yapıldığı takdirde,

$$x_{\text{ort}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} \quad (5.3)$$

bulunur. Denklem 5.3' den görüleceği üzere eşit aralıklı örneklemede x_{ort} değeri, anlık sayısal değerlerin aritmetik ortalamasıdır. Böylece, küçük ve eşit örnekleme aralıkları için ortalama değer hesabı basitleşir.

Denklem 5.3' deki ifade, ani gücün ortalama değerinin hesabında da kullanılabilir:

$$p_{\text{ort}} = \frac{p_1 + p_2 + \dots + p_m}{m} \quad (5.4)$$

Sargı ve ölçme devresi üzerinde oluşan kaybı (bakır kaybı) bulabilmek için akımın efektif değerine ihtiyaç vardır. Sinüzoidal gerilimle beslenen çekirdeğin çektiği akım sinüzoidal olamayacaktır. Dolayısıyla akımın efektif değerini bulmak için örneklenmiş değerlerinden yararlanılır. Periyodik i akımını oluşturan sayısal değerlerden yararlanarak, efektif değeri için Denklem 5.2' deki benzer bir ifade yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında,

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{i_1^2 + i_2^2 + \dots i_m^2}{m}} \quad (5.5)$$

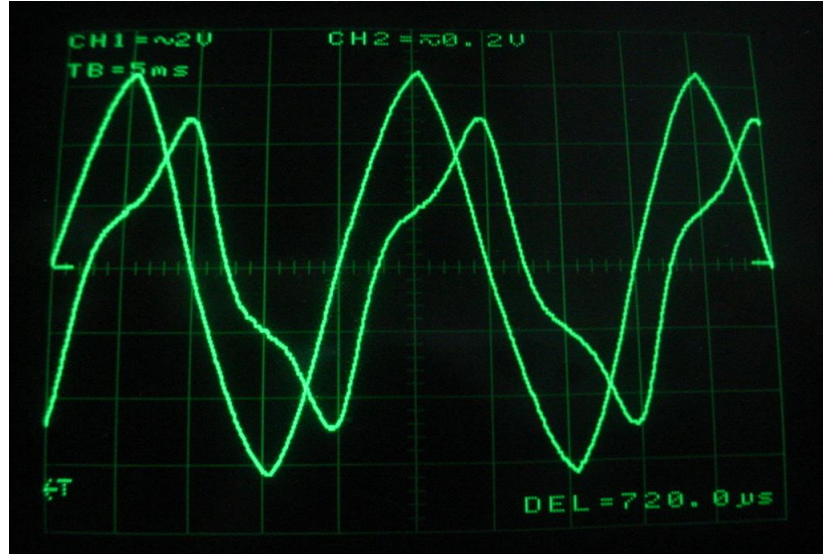
bulunur. Yani akımın karakteristiğini oluşturan eşit aralıklı örneklenmiş sayısal değerler biliniyorsa, akımın efektif değeri bu sayısal değerlerin karelerinin aritmetik ortalamasının kareköküne eşittir.

Akımın efektif değeri bilindiğine göre sargıdaki direnç üzerinde meydana gelen kayıp, bulunan çekilen güçten çıkarılarak çekirdeğin kaybı bulunabilir. Dolayısıyla çekirdeğin kaybını bulmak için Denklem 5.6' daki ifade kullanılacaktır.

$$P_C = P_{\text{ort}} - I_{\text{eff}}^2 \cdot R_i \quad (5.6)$$

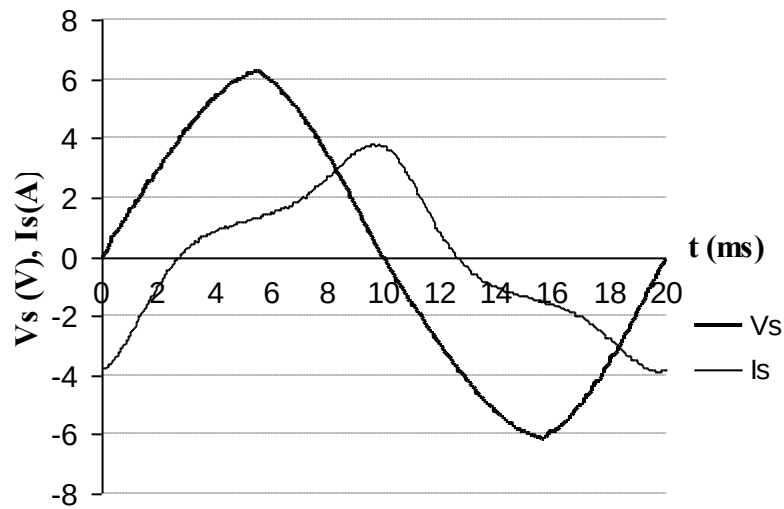
burada R_i sargının direncidir (Ω).

E – tipi SiFe çekirdeğe, çeşitli frekanslarda uygulanan gerilimler Tablo 5.1' de verilmişti. Yukarıda anlatılanlara göre, örneğin 50 Hz, 1 T' da çalışan E –tipi SiFe çekirdeğin kaybını bulalım. 50 Hz' de bu akı yoğunluğunda çalışabilmesi için çekirdeğe endüklenen gerilim 4,4 V efektif olacak şekilde sinüzoidal gerilim uygulanmıştır. Şekil 5.2' de, belirtilen çalışma noktasında çekirdeğin çektiği akım ve besleme geriliminin osiloskop ekranındaki resmi verilmiştir. Akımın zamana bağlı grafiğinden, çekirdeğin doyma bölgesinde olduğu anlaşılmaktadır. Çekilen akım, akı yoğunluğu arttıkça sinüzoidal formdan uzaklaşmakta ve tepe değeri aşırı yükselmektedir. Resimde gerilimin gerçek değeri gözükmemektedir. Akım ise bir direnç üzerinden gerilime dönüştürüldüğünden, gerçek değerini resimde görülen değer ölçüm direncine bölünmesiyle bulunur.



Şekil 5.2. E – tipi SiFe çekirdeğin 50 Hz – 1 T’ daki besleme gerilimi ve akımı. gerilim: 2 V / kare, akım: 0,3 A / kare, zaman: 5 ms / kare

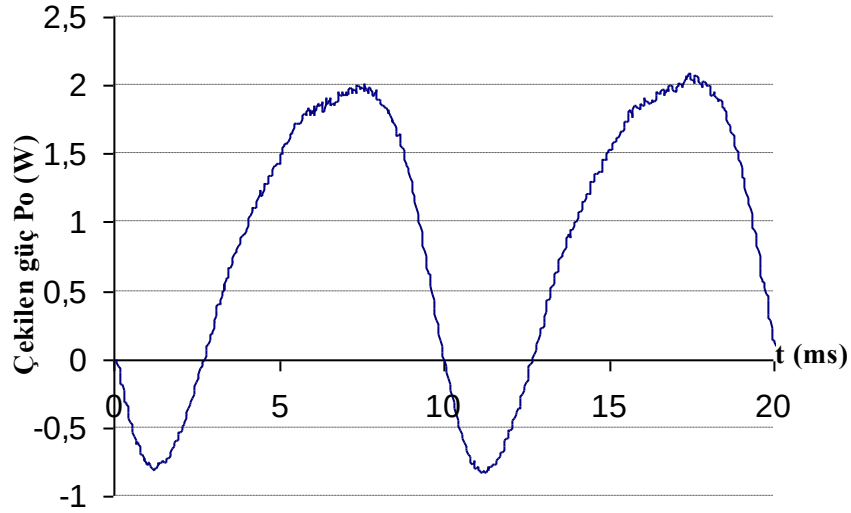
Osiloskopun analog – dijital dönüştürücü ve RS423 bağlantısı ile bilgisayara aktarılan değerler ötelenmiş değerler olduğundan, Denklem 4.12’ deki ifadeyle gerçek değerlere dönüştürülmüştür. Şekil 5.2’ te, osiloskop ekranında birden fazla periyot gözükmesi tercih edilmiştir. Hesaplama için birden fazla periyoda ihtiyaç yoktur. Böyle kaydedilmesinin nedeni, dalga şekillerinin diğer periyotlarda da aynı olduğunun gösterilmesi amacıyla. Hesaplama için bir periyottaki akım ve gerilimin sayısal değerleri yeterlidir. Bir periyodun osiloskop ekranına mümkün olduğunca yayılması önemlidir. Çünkü sayısal değerler buna göre şekillenmektedir.



Şekil 5.3. E – tipi SiFe çekirdeğin, 50 Hz – 1 T için örneklenmiş akım ve gerilim dalga şekilleri. Akım dalga şekli 5 kat büyütülmüştür.

Örneğin 50 Hz' lik bir işaret osiloskop ekranına tam olarak sığdırılabilir. Böylece işaret için elde edilecek sayısal veri sayısı maksimum, yani 501 adet olur. Dolayısıyla seçilen çalışma noktası için (50 Hz, 1 T) gerilim ve akımın örnek sayısı 501' dir. Şekil 5.3' de, örneklenen büyüklüklerden çizilen grafik verilmiştir.

Şekil 5.4' de 50 Hz – 1T için çekilen ani gücün zamana göre değişimi verilmiştir. Gerilim ve akımın bir tam peryodu örneklenip ani değerleri çarpıldığında ani gücün iki tam peryodu bulunmuştur. Bir tam peryodunun ortalamasını bulmak çekilen güç için yeterli olabilir, fakat iki tam peryodun ortalamasını alarak işlem yapılırsa daha sağlıklı bir sonuç elde edilir. Çünkü grafiği oluşturan her iki peryot arasında örneklemeden kaynaklanan çok ufak bir farklılık göze çarpmaktadır.



Şekil 5.4. E – tipi SiFe çekirdeğin 50 Hz – 1 T' da çektiği ani gücün zamana göre değişimi

Çekilen gücün grafiğini oluşturan sayısal değerler eşit aralıklı olduğu için aritmetik ortalaması alınarak ortalama değeri bulunur. Aynı düşünceden yararlanarak çekilen akımın efektif değeri de bulunur. Denklem 5.4 ve 5.5' ten yararlanarak 50 Hz – 1 T için $P_o = 0,87$ W ve $I_{eff} = 0,45$ A bulunmuştur. Sargı direnci $R_i = 0,3 \Omega$ ve akımın ölçüldüğü direnç olduğu hesaba katılırsa çekirdek kaybı,

$$P_c = 0,87 - 0,45^2 \cdot 0,3 = 0,67 \text{ W} \quad (5.7)$$

olarak bulunur. Denklem 5.7' de bulunan çekirdek kaybının standartlaştırılması gerekir. Bu işlem, bulunan çekirdek kaybının hacme bölünmesiyle veya kütleye bölünmesiyle yapılır. Burada standartlaştırma işlemi kütleye bölme ile

gerçekleştirilecektir. Kullanılan E – tipi çekirdeğin kütlesinin 350 g = 0,35 kg olduğu Tablo 4.2’ de belirtilmişti. Buna göre çekirdeğin kg başına kaybı,

$$p_c = \frac{0,67}{0,35} = 1,91 \text{ [W/kg]} \quad (5.8)$$

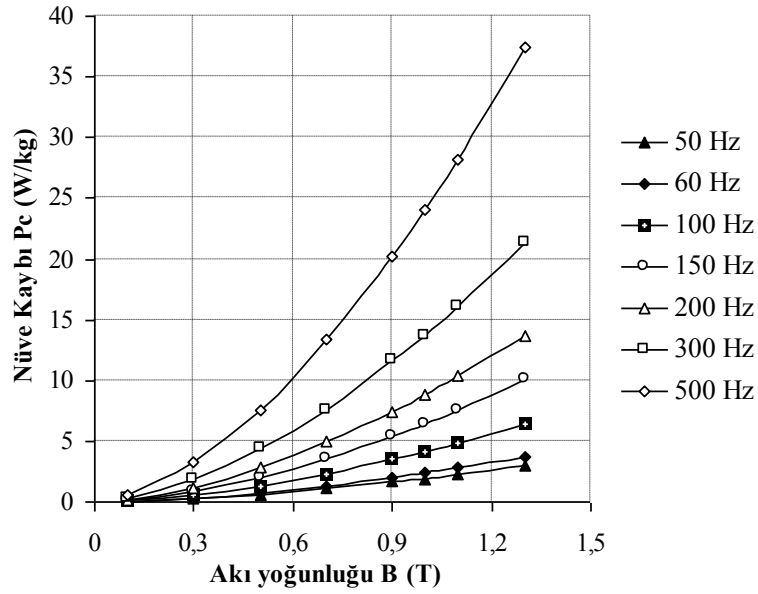
dir. Tablo 5.1’ de belirtilen diğer çalışma noktaları için de aynı şekilde kg başına çekirdek kayıp değerleri bulunmuştur. Elde edilen çekirdek kayıp değerleri Tablo 5.3’ de belirtilmiştir. Bu tablo Bölüm 6’ da anlatılacağı üzere, 0,3 mm’ lik saçlardan dizilmiş E – tipi çekirdeğin kayıp modelinin çıkarılmasında kullanılacaktır.

Tablo 5.3. E – tipi SiFe çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarında ölçülen kayıp değerleri (W/kg)

Frekans (Hz)	Akı yoğunluğu (T)							
	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,1	1,3
40	0.03	0.21	0.49	0.85	1.29	1.54	1.81	2.39
50	0.04	0.26	0.62	1.08	1.65	1.91	2.31	3.03
60	0.05	0.32	0.76	1.32	2.02	2.41	2.80	3.70
80	0.07	0.44	1.04	1.81	2.77	3.27	3.84	5.08
100	0.09	0.56	1.32	2.32	3.50	4.18	4.90	6.43
150	0.14	0.88	2.06	3.59	5.47	6.46	7.59	10.05
200	0.19	1.20	2.82	4.92	7.43	8.87	10.41	13.65
250	0.24	1.53	3.57	6.29	9.50	11.34	13.31	17.45
300	0.30	1.87	4.37	7.61	11.61	13.72	16.10	21.32
350	0.35	2.21	5.17	9.02	13.62	16.26	19.08	25.26
400	0.41	2.57	5.99	10.44	15.77	18.83	22.10	29.26
450	0.47	2.89	6.76	11.89	17.96	21.43	25.16	33.31
500	0.52	3.25	7.59	13.35	20.16	24.07	28.25	37.40

Şekil 5.5’ te verilen grafik, Tablo 5.3’ de verilen değerlere dayanarak çizilmiştir. Grafik, sabit frekans değerlerinde E – tipi SiFe çekirdek kaybının akı yoğunluğuna

göre değişimini vermektedir. Magnetik malzeme kayıplarının akı yoğunluğu ile üstel olarak değiştiği görülmektedir.



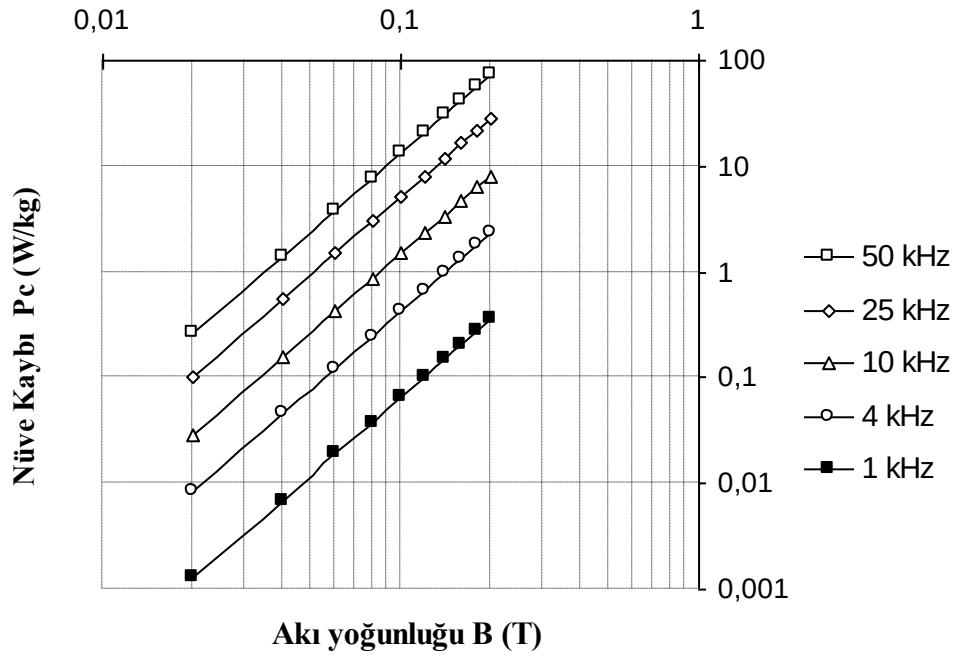
Şekil 5.5. E –tipi SiFe çekirdekte, kaybın akı yoğunluğuna göre değişimi

Tablo 5.4. Ferrit çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarında ölçülen kayıp değerleri (W/kg)

Frekans (kHz)	Akı yoğunluğu (T)									
	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14	0,16	0,18	0,20
1	0.0013	0.0069	0.019	0.038	0.065	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35
2	0.0033	0.018	0.048	0.097	0.17	0.26	0.38	0.52	0.70	0.90
4	0.008	0.046	0.12	0.25	0.43	0.67	0.97	1.35	1.80	2.33
6	0.015	0.079	0.21	0.43	0.74	1.16	1.69	2.35	3.13	4.05
8	0.022	0.12	0.32	0.64	1.10	1.72	2.51	3.48	4.63	5.99
10	0.029	0.16	0.43	0.86	1.49	2.33	3.40	4.71	6.28	8.12
15	0.051	0.28	0.74	1.50	2.60	4.05	5.90	8.17	10.9	14.1
20	0.075	0.41	1.10	2.23	3.84	5.99	8.73	12.1	16.1	20.9
25	0.10	0.55	1.49	3.02	5.20	8.11	11.8	16.4	21.9	28.4
30	0.13	0.71	1.92	3.87	6.66	10.4	15.2	21.1	28.1	36.5
35	0.16	0.87	2.36	4.77	8.22	12.8	18.8	26.0	34.8	45.0
40	0.19	1.05	2.83	5.72	9.86	15.4	22.5	31.3	41.8	54.0
45	0.23	1.23	3.33	6.71	11.5	18.1	26.4	36.8	49.0	63.4
50	0.26	1.42	3.84	7.74	13.4	20.9	30.5	42.4	56.6	73.2

Tablo 5.4' de, toroidal ferrit çekirdeğin çeşitli çalışma noktalarındaki kayıpları verilmiştir.

Şekil 5.6' te verilen grafik Tablo 5.5' te verilen değerlere dayanılarak çizilmiştir. Grafikte, ferrit çekirdek kayıplarının sabit frekanslarda akı yoğunluğuna göre değişimi verilmiştir. Seçilen frekans aralığına göre ferrit çekirdek kayıpları geniş bir aralığa yayılır. Frekans aralığının tümünde kayıp değişimini tek bir grafikte göstermek için logaritmik eksenler kullanılır. Buna dikkat edildiğinde, ferrit çekirdek kayıplarının da akı yoğunluğu ile üstel değiştiği görülür.



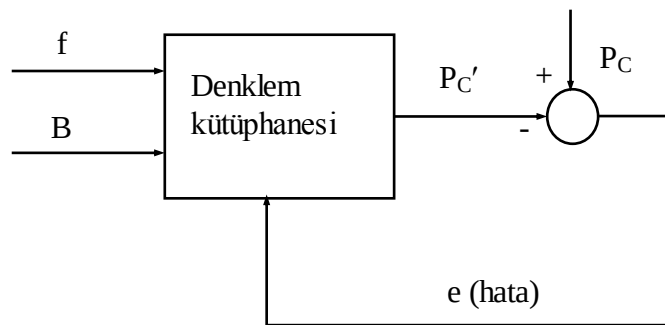
Şekil 5.6. Toroidal ferrit çekirdekte magnetik kayıpların akı yoğunluğuna göre değişimi

BÖLÜM 6. MODELİN KURULMASI

Bu bölümde, magnetik kayıpları hesaplanan E – tipi SiFe çekirdek ile toroidal ferrit çekirdeğin kayıp modeli çıkarılacaktır. Kayıp modelinde, çekirdeklere ait Bölüm 5’ de bulunan kayıp değerlerinden yararlanılacaktır.

6.1. Modelleme Hakkında Genel Bilgi

Modelleme için bir bilgisayar programı kullanılmıştır. Program, hem sayısal değerler kümesine yüzey uydurabilmekte, hem de uydurduğu yüzeyin matematiksel ifadesini verebilmektedir. Kütüphanesinde binlerce denklem kalıbı mevcuttur. Bu denklemleri, istenilen ölçütlerde sayısal değerlere uygulayarak sonuca gitmektedir. Özel olarak oluşturulan veya kütüphanesinde bulunan denklem kalıplarına göre, giriş değerlerinden çıkış sayısal değerleri üretmekte ve bu değerleri asıl çıkış değerleri ile karşılaştırarak denklemin katsayılarını belirlemektedir. Değişik denklem takımları için bu işlem tekrar etmektedir. Modelin kurulmasında, frekans f ve akı yoğunluğu B giriş, kg başına çekirdek kaybı P_C de tahmin edilecek değer olarak seçilmiştir (Şekil 6.1). Farklı bir giriş – çıkış profili de seçilebilmektedir. Modellemeye geçmeden önce bazı tanımları vermek yerinde olacaktır.



Şekil 6.1. Modelin kurulmasına ilişkin blok şeması

6.1.1. Regresyon

Regresyon en genel halde istatistiki ilişki demektir. Regresyon analizinin amacı, iki ya da daha çok rastgele değişken arasındaki istatistiki ilişkinin biçimini (yani matematiksel ifadesini) belirlemek, değişkenlerden birinin (bağımlı değişkenin) diğer

değişken(ler)in (bağımsız değişkenler) değişiminden kaynaklanan yüzdesini hesaplamak ve bağımlı değişkenin değerini bağımsız değişken(ler)in bilinen değerlerine dayanarak tahmin etmektir [16].

y bağımlı değişkeni ile $x_1, x_2, \dots$ bağımsız değişkenleri arasındaki istatistiki ilişki genel olarak,

$$y = \lambda(x_1, x_2, \dots) \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada λ bir fonksiyonu göstermektedir. Denklem 6.1' de verilen regresyon denklemi, fonksiyonel bir ilişkinin denklemi ile aynı şekilde olmakla birlikte farklı bir anlamı vardır. İlişkinin istatistiki karakteri nedeniyle, $x_1, x_2, \dots$ değerlerine karşılık tek bir y değerinin karşılık gelmesi beklenemez. Denklem 6.1, bağımsız değişkenin bilinen değerlerine karşı y' nin alabileceği değerlerin en iyi tahminini (beklenen değerini) göstermektedir.

Basit doğrusal regresyon: Regresyon analizinin en basit biçimi, iki değişken arasındaki basit doğrusal regresyondur. Burada x ile y arasındaki ilişkinin,

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + e_i \quad (6.2)$$

şeklinde olduğu kabul edilir. Burada e_i hata veya kalıntı terimidir ve değerinin 0 olması beklenir. Böylece y' nin x' e göre regresyon denklemi,

$$y = b_0 + b_1 x \quad (6.3)$$

şeklinde yazılabilir. Burada b_0 ve b_1 , β_0 ve β_1 regresyon katsayılarının eldeki örnekten hesaplanan değerleridir. $x = x_i$ için y_i ' nin en iyi tahmini Denklem 6.3' ten hesaplanır:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i \quad (6.4)$$

x ile y arasında doğrusal bir ilişkinin bulunup bulunmadığını görebilmek için örneklenen (x_i, y_i) çiftleri x – y düzleminde noktalanır. Noktaların bir doğru çizgi çevresinde kümelenmeleri doğrusal bir ilişkinin varlığını gösterir. Doğrusal bir ilişki olmadığı durumlarda değişkenlere dönüşüm uygulanıp ilişkinin doğrusal olması sağlanır.

y' nin x' e göre regresyon doğrusunun b_0 ve b_1 regresyon katsayıları, örneklenen y_i değerleri ile tahmin edilen $\hat{y}_i$ değerlerinin farklarının kareleri toplamını en küçük yapacak şekilde hesaplanır. Hata veya fark terimi $e_i = y_i - \hat{y}_i$ olarak alındığında, değerinin en küçük yapılması istenen ifade SSE (hataların kareleri toplamı), Denklem 6.5' deki gibidir.

$$SSE = \sum_{i=1}^m w_i \cdot (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (6.5)$$

y bağımlı değişkeninin değişiminin, x bağımsız değişkeninin değişiminden kaynaklanan yüzdesine belirlilik veya determinasyon katsayısı denir ve r^2 ile gösterilir. r^2 regresyon bağıntısının anlamlılığını gösterir ve değeri 1' e yaklaştıkça regresyonun anlamlılığı artar.

Değişkenlerin normal dağılmamış olmaları halinde normal dağılım elde edebilmek için en çok kullanılan dönüşüm logaritmik dönüşümdür. Değişkenlerin logaritmasının alınmasıyla elde edilen ifade Denklem 6.6' daki gibidir:

$$\ln \hat{y}_i = b_0 + b_1 \ln x_i \quad (6.6)$$

Çok değişkenli doğrusal regresyon: y bağımlı değişkeni $x_1, x_2 \dots x_k$ bağımsız değişkenleri arasındaki doğrusal regresyon,

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e \quad (6.7)$$

denklemleri ile verilir. Basit doğrusal regresyonda olduğu gibi burada da β katsayıları $y_i - \hat{y}_i$ farklarının kareleri toplamı en küçük olacak şekilde tahmin edilir. Çok değişkenli regresyonda belirlilik katsayısı $SSE = \sum w_i \cdot e_i^2$ ve $SSM = \sum w_i \cdot (y_i - \bar{y})^2$ olduğu gözönüne alınırsa,

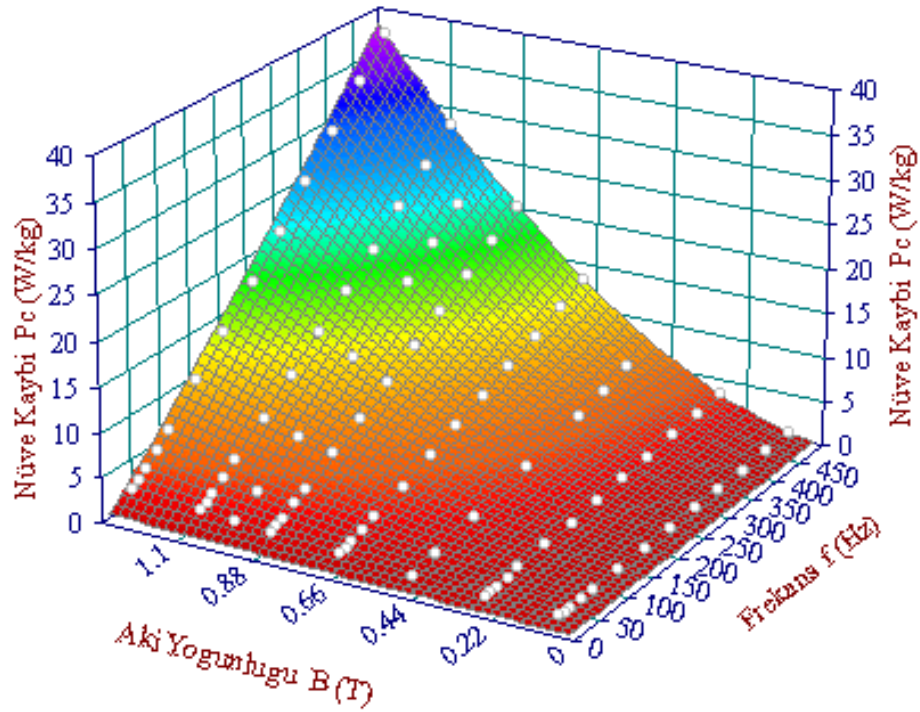
$$r^2 = 1 - \frac{SSE}{SSM} \quad (6.8)$$

şeklinde tanımlanır. Burada $\bar{y}$ bağımlı değişkenin değerlerinin ortalaması, SSM ise ortalama hataların kareleri toplamıdır.

6.2. E – tipi SiFe çekirdeğin kayıplarının modellenmesi

E – tipi SiFe çekirdeğin kayıplarının modellenmesi için 6.1.1’ de anlatılan çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemi ve Tablo 5.3’ de verilen değerler kullanılmıştır. Fakat bu değerlerden Tablo 6.2’ de belirtilen değerler kullanılmamış, bu değerler kurulan modelin testi için bırakılmıştır. Bağımsız değişken olarak akı yoğunluğu ve frekans seçilmiş, çekirdek kaybı ise bağımlı değişken olarak bırakılmıştır.

Buna göre uydurulan yüzey Şekil 6.2’ daki gibidir. Üç boyutlu grafikte, beyaz renkle gösterilen noktalar ölçüm alınan noktalardır.



Şekil 6.2. E – tipi SiFe çekirdeğin kayıplarının üç boyutlu

Programda çeşitli yöntemlerle yüzey uydurulabilmektedir. SSE değerinin küçük yapılmak istendiği yöntemle ile 100 iterasyon sonucunda istenen değerlere ulaşılmıştır. 10’ un üzerinde farklı denklem kalıbıyla belirlilik katsayısı $r^2 = 0,98$ ve üzeri bulunmuştur. Bunlardan 5’ i Tablo 6.1’ de verilmiştir.

Tablo 6.1. E – tipi SiFe çekirdek kayıplarının modeli için program tarafından belirlenen denklem kalıpları ve katsayıları

Denklem Kalıbı	Katsayılar			Belirlilik katsayısı r^2
	b_0	b_1	b_2	
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2$	-3,60	1,09	1,67	0,999
$\ln y = b_0 + b_1 (\ln x_1)^2 + b_2 \ln x_2$	-0,61	0,10	1,67	0,998
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 e^{-x_2}$	-1,87	1,09	-4,72	0,998
$\ln y = b_0 + b_1 (\ln x_1)^2 + b_2 e^{-x_2}$	1,12	0,10	-4,72	0,997
$y^{-1} = b_0 + b_1 / x_1 + b_2 / x_2^2$	-0,034	18,4	0,04	0,983

Tablo 6.1' den görüldüğü üzere, yüzeyi en basit ve en iyi şekilde modelleyen denklem kalıbının,

$$\ln y = b_0 + b_1 \cdot \ln x_1 + b_2 \cdot \ln x_2 \quad (6.2)$$

olduğu anlaşılmaktadır. Bu denklem daha basit bir şekilde de ifade edilebilir. Denklemin sağ tarafı üstel şekilde yazılırsa z bulunabilir:

$$y = e^{(b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2)} \quad (6.3)$$

Her bir üs ayrı tabanlı olarak yazıldığında,

$$y = e^{b_0} \cdot e^{b_1 \ln x_1} \cdot e^{b_2 \ln x_2} \quad (6.4)$$

elde edilir. Bu ifadede $e^{b_1 \ln x_1} = x_1^{b_1}$ ve $e^{b_2 \ln x_2} = x_2^{b_2}$ olduğu bilindiğine göre, Denklem (6.2) ifadesi en basit şekilde,

$$y = e^{b_0} \cdot x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \quad (6.5)$$

ifade edilir. O halde çekirdek kaybını veren ifade için de,

$$P_c = e^{b_0} \cdot f^{b_1} \cdot B^{b_2} \quad (6.6)$$

biçiminde yazılabilir. Yani kayıplar hem frekans, hem de akı yoğunluğu ile üstel olarak artmaktadır. Burada b_0 , b_1 ve b_2 , program tarafından lineer regresyon ile bulunan katsayılarıdır. Tablo 6.1’ de verilen katsayılar Denklem 6.6’ da yerine konulursa E – tipi SiFe çekirdeğin kayıp modeli,

$$P_c = 0,0273.f^{1,09}.B^{1,67} \text{ [W/kg]} \quad (6.7)$$

olarak bulunur. Bu modele göre test için bırakılan çalışma noktalarında, ölçülen ve tahmin edilen değerler ile hata yüzdeleri Tablo 6.2’ de verilmiştir.

Tablo 6.2. E - tipi SiFe çekirdekte test için bırakılıp model ile tahmin edilen çekirdek kayıp değerleri

Akı yoğun. (T)	Frekans (Hz)	Çekirdek kaybı değeri (W/kg)		% hata
		Ölçülen	Tahmin edilen	
0,5	50	0,62	0,62	0,8
	60	0,76	0,75	1,3
	100	1,32	1,31	0,8
	200	2,82	2,79	1,0
	300	4,37	4,35	0,5
	500	7,59	7,59	0,0
1	50	1,91	1,95	-2,2
	60	2,41	2,38	1,2
	100	4,18	4,16	0,5
	200	8,87	8,86	0,1
	300	13,72	13,80	-0,5
	500	24,07	24,09	-0,1

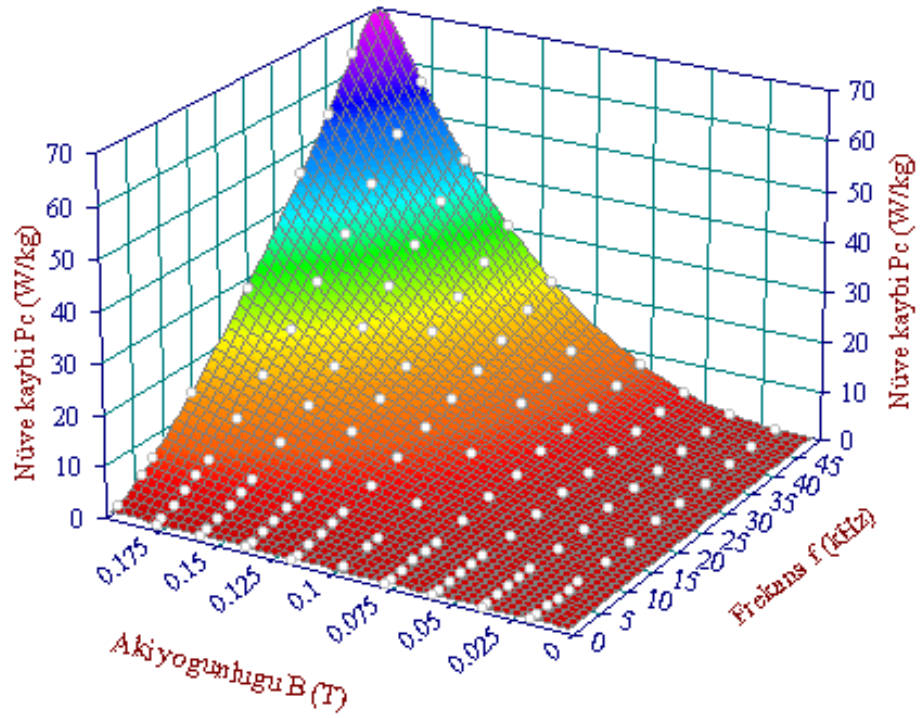
Diğer çalışma noktalarına ait ölçülen ve tahmin edilen kayıp değerleri EK A’ da verilmiştir.

6.3. Toroidal ferrit çekirdeğin kayıplarının modellenmesi

Ferrit çekirdeğin kayıplarının modellenmesi için, E – tipi SiFe çekirdeğin kayıplarının modellenmesinde kullanılan yöntemin aynısı kullanılmıştır. Çok değişkenli doğrusal regresyon yöntemi ve Tablo 5.4’ deki değerler kullanıldığında,, program tarafından uydurulan yüzey Şekil 6.3’ deki gibidir. Tablo 6.4’ de belirtilen

değerler, modelin kurulmasında kullanılmamış, kurulan modelin test edilmesi için sonraya bırakılmıştır.

Her bir denklem kalıbına uyguladığı 100 iterasyon sonucunda, programın ferrit çekirdek kaybı için belirlediği denklem kalıpları ve katsayılarından bazıları Tablo 6.3’ de verilmiştir.



Şekil 6.3. Toroidal ferrit çekirdek kayıplarının üç boyutlu değişimi

Tablo 6.3. Toroidal ferrit çekirdek kayıplarının modeli için program tarafından belirlenen denklem kalıpları ve katsayıları

Denklem Kalıbı	Katsayılar			Belirlilik katsayısı r^2
	b_0	b_1	b_2	
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2$	2,89	1,3	2,45	0,999
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 x_2 \ln x_2$	-7,08	1,3	-18,72	0,999
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 (\ln x_2)^2$	0,58	1,3	-0,63	0,998
$\ln y = b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 / x_2^{0,5}$	3,06	1,3	-1,84	0,998
$y^{-1} = b_0 + b_1 / x_1^{1,5} + b_2 \ln x_2 / x_2^2$	-0,018	5,2	-0,00039	0,983

E – tipi SiFe çekirdeğin kayıp modelinde olduğu gibi bu modelde de en iyi sonucu veren denklem kalıbının Denklem 6.2’ de verilen olduğu görülmektedir. Buna göre ferrit çekirdeğin 0,02 – 0,2 T ve 1 kHz – 50 kHz aralığındaki kayıp modeli ,

$$P_c = 17,993.f^{1,3}.B^{2,45} \text{ [W/kg]} \quad (6.8)$$

olarak verilebilir. Denklem 6.8’ deki ifadede f (kHz) ve B de (T) olduğu unutulmamalıdır.

Test için bırakılan çalışma noktalarında ölçülen ve modelin tahmin ettiği değerler ile aralarındaki % hata Tablo 6.4’ de verilmiştir.

Tablo 6.4. Toroidal ferrit çekirdekte test için bırakılan ve model tarafından tahmin edilen çekirdek kayıp değerleri

Akı yoğunluğu (T)	Frekans (kHz)	Çekirdek kaybı değeri (W/kg)		% hata
		Ölçülen	Tahmin edilen	
0,1	1	0,065	0,064	1,5
	4	0,43	0,424	1,4
	10	1,49	1,48	0,4
	20	3,84	3,83	0,3
	30	6,66	6,66	0,0
	50	13,4	13,39	0,1
0,2	1	0,35	0,348	0,6
	4	2,33	2,32	0,4
	10	8,12	8,12	0,0
	20	20,9	20,93	-0,1
	30	36,5	36,44	0,2
	50	73,2	73,29	-0,1

Diğer çalışma noktalarındaki ölçülen ve tahmin edilen değerler EK B’ de verilmiştir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tasarlanan ve gerçekleştirilen gerilimi ve frekansı ayarlanabilir güç kaynağı, basit ve ucuz bir şekilde magnetik malzemeler üzerinde ölçüm ve test yapmaya olanak sağlamıştır. Ölçümlerde magnetik malzemeler sinüzoidal gerilimle beslenmiştir. İstenildiği takdirde bu çalışma üçgen veya kare dalga gerilimle de tekrarlanabilir.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, magnetik malzemelerin kayıpları sinüzoidal gerilimle beslemede büyük bir yaklaşıklıkla modellenebilir. E – tipi SiFe çekirdek ve toroidal ferrit çekirdek için bulunmuş matematiksel modeller sırasıyla Tablo 6.1’ de ve Tablo 6.3’ de verilmiştir. En basit ve en iyi sonucu veren denklem kalıplarının logaritmik olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 7.1’ de, her iki çekirdeğin kurulan modeliyle ilgili bazı önemli bilgiler sunulmaktadır.

Tablo 7.1. Kurulan modellerle ilgili önemli görülen bazı bilgiler

	E –tipi SiFe Çekirdek	Toroidal Ferrit Çekirdek
Ölçüm sayısı	94	140
Modelde kullanılan ölçüm sayısı	82	128
Teste bırakılan ölçüm sayısı	12	12
Kurulan çekirdek kayıp modeli	$P_c = 0,0273 \cdot f^{1,09} \cdot B^{1,67}$	$P_c = 17,993 \cdot f^{1,3} \cdot B^{2,45}$
Frekans aralığı	50 Hz – 500 Hz	1 kHz – 50 kHz
Akı yoğunluğu aralığı	0,1 – 1,3 T	0,02 T – 0,2 T

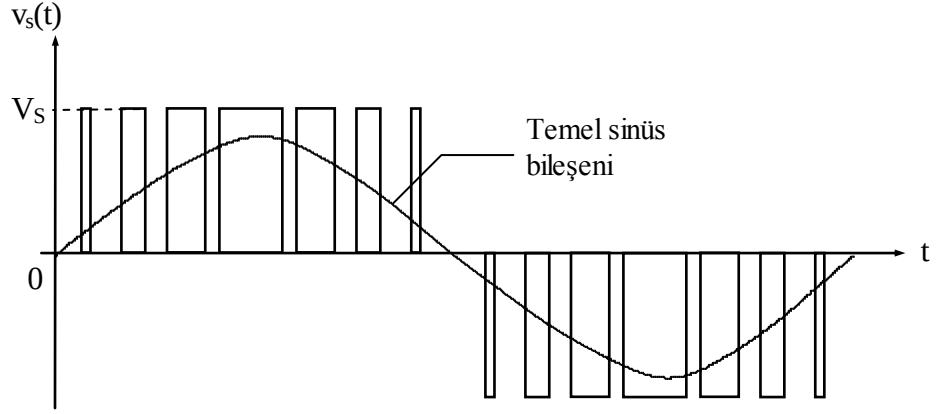
Tablo 6.2 ve Tablo 6.4’ de, sırasıyla E – tipi çekirdek ve toroidal ferrit çekirdeğin bazı çalışma noktalarındaki ölçülen ve tahmin edilen kayıp değerleri verilmişti. Bu noktadaki ölçülen kayıp değerleri modele verilmemiş ve modelden bunları tahmin etmesi istenmiştir. Test için seçilen çalışma noktaları, kayıp değerleri bilinmek istenen noktalar olması bakımından önemlidir. Ölçüm aralığına bakıldığında seçilen test noktalarının bazılarının ölçüm aralığının içinde, bazılarının ise sınırında olduğu görülmektedir. Böylece kurulan modelin her iki durumda da iyi sonuç verdiği gösterilmek istenmiştir. Model, ölçüm aralığının dışında da sonuç verebilir. Fakat bunun için tekrar bir deneysel çalışma yapmak ve bulunan değerleri modelin verdiği değerlerle karşılaştırmak gerekir.

Gerçeklenen güç kaynağının verdiği sinüs geriliminin ideal olmaması, ölçüm sırasında kullanılan osiloskopun hassasiyeti, örnekleme sayısı, deri olayı gibi bazı faktörler ölçülen değerleri etkilemektedir. Deri etkisini küçültmek için ölçme devresinde ve sargıda kullanılan tüm iletkenlerin Litz iletkeni ile değiştirilmesi ve örnekleme sayısı daha fazla olan bir analog – dijital dönüştürücünün kullanılması bu hatayı önemli ölçüde azaltır. Ölçüm yapılacak magnetik malzemelerin özellikle toroidal olması ve sarımın tüm yüzeye uygulanması da önemlidir.

Bu çalışma, besleme geriliminin harmonikli sinüzoidal olduğu durumlarda çekirdek kayıplarının değişimi üzerine genişletilebilir. Toplam harmonik distorsiyonu belirli gerilimler ile magnetik malzemeler beslenebilir ve ölçümler alınabilir. Gerilimlerin toplam harmonik distorsiyonu bir değişken olarak modele girilebilir. Çalışmada magnetik malzemelerin sıcaklıkları ortam sıcaklığı (20 °C) olarak alınmış ve değişmediği varsayılmıştı. Magnetik malzemenin sıcaklığı da bir değişken olarak modele girilebilir.

Transformatörler tasarlanırken, çekirdek kaybı (demir kaybı) besleme geriliminin sinüzoidal olduğu duruma göre hesaplanır. Fakat pratikte transformatörler az ya da çok harmonikli gerilimlere maruz kalırlar. Bu duruma, harmonikli akım çeken yüklerin oluşturduğu gerilim düşümleri, açma kapama olayları sebep olabilir. Harmonikler, magnetik kayıpların artmasına, çekirdeğin ısınmasına ve çekirdek kaybının klasik yöntemle (sinüs gerilimi ile hesaplanan) hesaplanandan daha fazla çıkmasına sebep olabilir. Harmoniklerin kaybı ne kadar artırdığı bilinmezse sonuçta transformatör zarar görebilir..

PWM (Darbe Genişlik modülasyonu) ile hız kontrolü yapılan alternatif akım motorlarında, motorun besleme gerilimi aslında sinüs değildir. Ortalama değeri sinüs formunda olan, genlikleri eşit, iletim süreleri farklı pozitif ve negatif dc gerilimlerden oluşmaktadır (Şekil 7.1)



Şekil 7.1. PWM ile hız kontrolünde besleme gerilimi

Şekil 7.1’ de gösterilen dalga şekli ile beslenen alternatif akım motorlarında oluşan akı da harmonikli olacağından magnetik kayıplar artar. Ayrıca gerilimin yüksek frekanslı bileşenler magnetik devrenin beklenenden erken doymasına ve motorun aşırı ısınmasına neden olabilir. Özellikle işletmelerde hayati işlevleri olan, devredışı kalmaması gereken elektrik makinelerinde bu tür incelemelerin yapılması gerekir. Yapılan çalışmadan, bu tür incelemelerde yararlanılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Allahverdiev, Z.**, 1995. Elektriksel Malzemeler, K.T.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Matbaası, Trabzon.
- [2] **Turan, M.**, 2000. Sinüzoidal olmayan gerilimlerde yönlendirilmemiş saçlarda oluşan kayıpların belirlenmesi, İ.T.Ü. seminer notu, İstanbul.
- [3] **Prousalidis, J., Hatzigargyriou, N. and Kladas, A.**, 2001. Iron lamination efficient representation in power transformers, Journal of Material Processing Technology, 108, pp. 217 – 219.
- [4] **Cardelli, E and Torre, E., D.**, 2001. Modeling of hysteresis and dynamic losses in soft ferrites up to radio frequency, Physica B, 306 pp. 240 – 245.
- [5] **Mayergoyz, I. D. and Friedman, G.**, 1988. Generalized Preisach model of hysteresis, IEEE Trans. Mag., 24, pp. 212 – 217.
- [6]. **Mayergoyz, I. D.**, 1986. Mathematical models of hysteresis, IEEE Trans. Mag., 22, pp.603 – 608.
- [7] **Szczyglowski, J.**, 2001. Influence of eddy currents on magnetic hysteresis loops in soft magnetic materials, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 223, pp. 97 – 102.
- [8] **Hernandez, E. M., Muranaka, C. S. and Cardoso, J. R.**, 2000. Identification of the Jiles – Atherton model parameters using random and deterministic searches, Physica B, 275, pp. 212 – 215.
- [9]. **Saliah, H. H. and Lowther, D. A.**, 1997. The use of neural networks in magnetic hysteresis identification, Physica B, 233, pp. 318 – 323.
- [10] **Makaveev, D. and Dupre, L.**, 2001. Modeling of quasistatic magnetic hysteresis with feed – forward neural networks, Journal of Applied Physics, 89, pp. 6737 – 6739.
- [11] **Sen, P. C.**, 1997. Principles of electrical machines and power wlectronics, John Wiley and Sons Press, New York.
- [12] **Intersil**, 2001. ICL8038 Data Sheet, Intersil Corp., USA.

- [13] **Burr Brown**, 2000. OPA541 Data Sheet, Texas Instruments Inc., USA.
- [14] **Matsch, L. W. and Morgan , J. D.**, 1987. Electromagnetic and
electromechanical machines, John Wiley and Sons Press, New York.
- [15] **Mclyman, W. T.**, 1997. Magnetic core selection for transformers and inductors,
Marcel Dekker Press, New York.
- [16] **Bayazıt, M.**, 1996. İnşaat Mühendisliğinde Olasılık Yöntemleri, İ.T.Ü. İnşaat
Fakültesi Matbaası, İstanbul.

EK A

E – Tipi SiFe Çekirdeğe Ait Ölçülen ve Tahmin Edilen Kayıp Değerleri

$$\ln z = a + b \ln x + c \ln y$$

$$a = -3,600$$

$$b = 1,091$$

$$c = 1,666$$

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
1	500	1,3	37,4	37,2958	0,1042	0,28
2	500	1,1	28,25	28,2337	0,0163	0,06
3	500	0,9	20,16	20,2092	-0,0492	-0,24
4	500	0,7	13,35	13,2948	0,0552	0,41
5	500	0,3	3,25	3,2398	0,0102	0,31
6	500	0,1	0,52	0,5194	0,0006	0,12
7	450	1,3	33,31	33,2452	0,0648	0,19
8	450	1,1	25,16	25,1673	-0,0073	-0,03
9	450	1	21,43	21,4716	-0,0416	-0,19
10	450	0,9	17,96	18,0143	-0,0543	-0,30
11	450	0,7	11,89	11,8509	0,0391	0,33
12	450	0,5	6,76	6,7648	-0,0048	-0,07
13	450	0,3	2,89	2,8879	0,0021	0,07
14	450	0,1	0,47	0,4630	0,0070	1,50
15	400	1,3	29,26	29,2355	0,0245	0,08
16	400	1,1	22,1	22,1319	-0,0319	-0,14
17	400	1	18,83	18,8819	-0,0519	-0,28
18	400	0,9	15,77	15,8416	-0,0716	-0,45
19	400	0,7	10,44	10,4215	0,0185	0,18
20	400	0,5	5,99	5,9489	0,0411	0,69
21	400	0,3	2,57	2,5396	0,0304	1,18
22	400	0,1	0,41	0,4071	0,0029	0,70
23	350	1,3	25,26	25,2714	-0,0114	-0,05
24	350	1,1	19,08	19,1310	-0,0510	-0,27
25	350	1	16,26	16,3217	-0,0617	-0,38
26	350	0,9	13,62	13,6936	-0,0736	-0,54
27	350	0,7	9,02	9,0084	0,0116	0,13
28	350	0,5	5,17	5,1423	0,0277	0,54
29	350	0,3	2,21	2,1953	0,0147	0,67
30	350	0,1	0,35	0,3519	-0,0019	-0,55
31	300	1,3	21,32	21,3588	-0,0388	-0,18
32	300	1,1	16,1	16,1690	-0,0690	-0,43

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
33	300	0,9	11,61	11,5735	0,0365	0,31
34	300	0,7	7,61	7,6137	-0,0037	-0,05
35	300	0,3	1,87	1,8554	0,0146	0,78
36	300	0,1	0,3	0,2974	0,0026	0,85
37	250	1,3	17,45	17,5054	-0,0554	-0,32
38	250	1,1	13,31	13,2520	0,0580	0,44
39	250	1	11,34	11,3060	0,0340	0,30
40	250	0,9	9,5	9,4855	0,0145	0,15
41	250	0,7	6,29	6,2401	0,0499	0,79
42	250	0,5	3,57	3,5620	0,0080	0,22
43	250	0,3	1,53	1,5207	0,0093	0,61
44	250	0,1	0,24	0,2438	-0,0038	-1,58
45	200	1,3	13,65	13,7222	-0,0722	-0,53
46	200	1,1	10,41	10,3880	0,0220	0,21
47	200	0,9	7,43	7,4355	-0,0055	-0,07
48	200	0,7	4,92	4,8915	0,0285	0,58
49	200	0,3	1,2	1,1920	0,0080	0,67
50	200	0,1	0,19	0,1911	-0,0011	-0,58
51	150	1,3	10,05	10,0251	0,0249	0,25
52	150	1,1	7,59	7,5892	0,0008	0,01
53	150	1	6,46	6,4748	-0,0148	-0,23
54	150	0,9	5,47	5,4322	0,0378	0,69
55	150	0,7	3,59	3,5736	0,0164	0,46
56	150	0,5	2,06	2,0399	0,0201	0,97
57	150	0,3	0,88	0,8709	0,0091	1,04
58	150	0,1	0,14	0,1396	0,0004	0,28
59	100	1,3	6,43	6,4407	-0,0107	-0,17
60	100	1,1	4,9	4,8758	0,0242	0,49
61	100	0,9	3,5	3,4900	0,0100	0,29
62	100	0,7	2,32	2,2959	0,0241	1,04
63	100	0,3	0,56	0,5595	0,0005	0,09
64	100	0,1	0,09	0,0897	0,0003	0,34
65	80	1,3	5,08	5,0488	0,0312	0,61
66	80	1,1	3,84	3,8220	0,0180	0,47
67	80	1	3,27	3,2608	0,0092	0,28
68	80	0,9	2,77	2,7357	0,0343	1,24
69	80	0,7	1,81	1,7997	0,0103	0,57
70	80	0,5	1,04	1,0273	0,0127	1,22
71	80	0,3	0,44	0,4386	0,0014	0,32
72	80	0,1	0,07	0,0703	-0,0003	-0,44
73	60	1,3	3,7	3,6885	0,0115	0,31
74	60	1,1	2,8	2,7923	0,0077	0,28
75	60	0,9	2,02	1,9987	0,0213	1,06
76	60	0,7	1,32	1,3148	0,0052	0,39
77	60	0,3	0,32	0,3204	-0,0004	-0,13
78	60	0,1	0,05	0,0514	-0,0014	-2,73

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
79	50	1,3	3,03	3,0231	0,0069	0,23
80	50	1,1	2,31	2,2885	0,0215	0,93
81	50	0,9	1,65	1,6381	0,0119	0,72
82	50	0,7	1,08	1,0776	0,0024	0,22
83	50	0,3	0,26	0,2626	-0,0026	-1,00
84	50	0,1	0,04	0,0421	-0,0021	-5,25
85	40	1,3	2,39	2,3697	0,0203	0,85
86	40	1,1	1,81	1,7939	0,0161	0,89
87	40	1	1,54	1,5305	0,0095	0,62
88	40	0,9	1,29	1,2841	0,0059	0,46
89	40	0,7	0,85	0,8447	0,0053	0,62
90	40	0,5	0,49	0,4822	0,0078	1,59
91	40	0,3	0,21	0,2059	0,0041	1,97
92	40	0,1	0,03	0,0330	-0,0030	-10,00

EK B

Toroidal Ferrit Çekirdeğe Ait Ölçülen ve Tahmin Edilen Kayıp Değerleri

$$\ln z = a + b \ln x + c \ln y$$

$$a = 2,891$$

$$b = 1,368$$

$$c = 2,453$$

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
1	50	0,180	56,5720	56,5975	-0,0255	-0,05
2	50	0,160	42,4410	42,3978	0,0432	0,10
3	50	0,140	30,4910	30,5573	-0,0663	-0,22
4	50	0,120	20,9320	20,9375	-0,0055	-0,03
5	50	0,08	7,7450	7,7456	-0,0006	-0,01
6	50	0,06	3,8390	3,8250	0,0140	0,36
7	50	0,04	1,4200	1,4150	0,0050	0,35
8	50	0,02	0,2620	0,2585	0,0035	1,33
9	45	0,2	63,3900	63,4507	-0,0607	-0,10
10	45	0,18	49,0200	49,0021	0,0179	0,04
11	45	0,16	36,7750	36,7080	0,0670	0,18
12	45	0,14	26,4200	26,4565	-0,0365	-0,14
13	45	0,12	18,1380	18,1277	0,0103	0,06
14	45	0,1	11,5680	11,5917	-0,0237	-0,20
15	45	0,08	6,7110	6,7061	0,0049	0,07
16	45	0,06	3,3260	3,3117	0,0143	0,43
17	45	0,04	1,2310	1,2251	0,0059	0,48
18	45	0,02	0,2270	0,2238	0,0032	1,40
19	40	0,2	54,0070	54,0101	-0,0031	-0,01
20	40	0,18	41,7640	41,7112	0,0528	0,13
21	40	0,16	31,3320	31,2463	0,0857	0,27
22	40	0,14	22,5100	22,5201	-0,0101	-0,04
23	40	0,12	15,3770	15,4305	-0,0535	-0,35
24	40	0,1	9,8560	9,8670	-0,0110	-0,11
25	40	0,08	5,7180	5,7083	0,0097	0,17
26	40	0,06	2,8340	2,8190	0,0150	0,53
27	40	0,04	1,0480	1,0428	0,0052	0,49
28	40	0,02	0,1930	0,1905	0,0025	1,29
29	35	0,2	45,0380	44,9944	0,0436	0,10
30	35	0,18	34,8280	34,7485	0,0795	0,23
31	35	0,16	26,0010	26,0305	-0,0295	-0,11

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
32	35	0,14	18,7710	18,7609	0,0101	0,05
33	35	0,12	12,8240	12,8548	-0,0308	-0,24
34	35	0,1	8,2190	8,2199	-0,0009	-0,01
35	35	0,08	4,7680	4,7555	0,0125	0,26
36	35	0,06	2,3630	2,3484	0,0146	0,62
37	35	0,04	0,8740	0,8688	0,0052	0,60
38	35	0,02	0,1610	0,1587	0,0023	1,42
39	30	0,18	28,1040	28,1432	-0,0392	-0,14
40	30	0,16	21,0840	21,0824	0,0016	0,01
41	30	0,14	15,1470	15,1947	-0,0477	-0,31
42	30	0,12	10,3980	10,4112	-0,0132	-0,13
43	30	0,08	3,8660	3,8515	0,0145	0,38
44	30	0,06	1,9160	1,9020	0,0140	0,73
45	30	0,04	0,7090	0,7036	0,0054	0,76
46	30	0,02	0,1310	0,1285	0,0025	1,88
47	25	0,2	28,3610	28,3987	-0,0377	-0,13
48	25	0,18	21,9320	21,9319	0,0001	0,00
49	25	0,16	16,3730	16,4294	-0,0564	-0,34
50	25	0,14	11,8200	11,8412	-0,0212	-0,18
51	25	0,12	8,1150	8,1134	0,0016	0,02
52	25	0,1	5,2010	5,1881	0,0129	0,25
53	25	0,08	3,0170	3,0015	0,0155	0,52
54	25	0,06	1,4880	1,4822	0,0058	0,39
55	25	0,04	0,5530	0,5483	0,0047	0,84
56	25	0,02	0,1020	0,1002	0,0018	1,79
57	20	0,18	16,1120	16,1634	-0,0514	-0,32
58	20	0,16	12,0870	12,1081	-0,0211	-0,17
59	20	0,14	8,7260	8,7267	-0,0007	-0,01
60	20	0,12	5,9910	5,9794	0,0116	0,19
61	20	0,08	2,2280	2,2120	0,0160	0,72
62	20	0,06	1,0990	1,0924	0,0066	0,60
63	20	0,04	0,4080	0,4041	0,0039	0,95
64	20	0,02	0,0750	0,0738	0,0012	1,57
65	15	0,2	14,0890	14,1213	-0,0323	-0,23
66	15	0,18	10,8950	10,9057	-0,0107	-0,10
67	15	0,16	8,1740	8,1695	0,0045	0,05
68	15	0,14	5,9010	5,8880	0,0130	0,22
69	15	0,12	4,0510	4,0344	0,0166	0,41
70	15	0,1	2,5960	2,5798	0,0162	0,62
71	15	0,08	1,4990	1,4925	0,0065	0,44
72	15	0,06	0,7430	0,7370	0,0060	0,80
73	15	0,04	0,2760	0,2727	0,0033	1,21
74	15	0,02	0,0510	0,0498	0,0012	2,33
75	10	0,18	6,2770	6,2634	0,0136	0,22
76	10	0,16	4,7090	4,6920	0,0170	0,36

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
77	10	0,14	3,4000	3,3817	0,0183	0,54
78	10	0,12	2,3340	2,3171	0,0169	0,73
79	10	0,08	0,8640	0,8572	0,0068	0,79
80	10	0,06	0,4280	0,4233	0,0047	1,10
81	10	0,04	0,1590	0,1566	0,0024	1,51
82	10	0,02	0,0290	0,0286	0,0004	1,35
83	8	0,2	5,9920	5,9771	0,0149	0,25
84	8	0,18	4,6340	4,6160	0,0180	0,39
85	8	0,16	3,4760	3,4579	0,0181	0,52
86	8	0,14	2,5100	2,4922	0,0178	0,71
87	8	0,12	1,7150	1,7076	0,0074	0,43
88	8	0,1	1,0990	1,0919	0,0071	0,64
89	8	0,08	0,6370	0,6317	0,0053	0,83
90	8	0,06	0,3160	0,3120	0,0040	1,28
91	8	0,04	0,1170	0,1154	0,0016	1,36
92	8	0,02	0,0220	0,0211	0,0009	4,17
93	6	0,2	4,0520	4,0328	0,0192	0,47
94	6	0,18	3,1330	3,1145	0,0185	0,59
95	6	0,16	2,3510	2,3331	0,0179	0,76
96	6	0,14	1,6890	1,6815	0,0075	0,44
97	6	0,12	1,1590	1,1522	0,0068	0,59
98	6	0,1	0,7430	0,7367	0,0063	0,84
99	6	0,08	0,4310	0,4262	0,0048	1,11
100	6	0,06	0,2140	0,2105	0,0035	1,64
101	6	0,04	0,0790	0,0779	0,0011	1,43
102	6	0,02	0,0150	0,0142	0,0008	5,16
103	4	0,18	1,8050	1,7887	0,0163	0,90
104	4	0,16	1,3480	1,3400	0,0080	0,60
105	4	0,14	0,9730	0,9657	0,0073	0,75
106	4	0,12	0,6680	0,6617	0,0063	0,94
107	4	0,08	0,2480	0,2448	0,0032	1,29
108	4	0,06	0,1230	0,1209	0,0021	1,72
109	4	0,04	0,0460	0,0447	0,0013	2,78
110	4	0,02	0,0084	0,0082	0,0002	2,74
111	2	0,2	0,9050	0,8975	0,0075	0,83
112	2	0,18	0,7000	0,6931	0,0069	0,98
113	2	0,16	0,5250	0,5192	0,0058	1,10
114	2	0,14	0,3790	0,3742	0,0048	1,26
115	2	0,12	0,2600	0,2564	0,0036	1,38
116	2	0,1	0,1670	0,1640	0,0030	1,82
117	2	0,08	0,0970	0,0949	0,0021	2,21
118	2	0,06	0,0480	0,0468	0,0012	2,41
119	2	0,04	0,0180	0,0173	0,0007	3,72
120	2	0,02	0,0033	0,0032	0,0001	4,06
121	1	0,18	0,2730	0,2686	0,0044	1,61

XYZ	X Value	Y Value	Z Value	Z Predict	Residual	Residual %
122	1	0,16	0,2050	0,2012	0,0038	1,85
123	1	0,14	0,1480	0,1450	0,0030	2,01
124	1	0,12	0,1010	0,0994	0,0016	1,62
125	1	0,08	0,0380	0,0368	0,0012	3,27
126	1	0,06	0,0190	0,0182	0,0008	4,46
127	1	0,04	0,0069	0,0067	0,0002	2,68
128	1	0,02	0,0013	0,0012	0,0001	5,63

ÖZGEÇMİŞ

Fuat KÜÇÜK 1 Ocak 1978 yılında Trabzon’ da doğdu. Orta öğrenimini Gebze – Darıca Lisesi’ nde, yüksek öğrenimini ise 1995 – 1999 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü’ nde tamamladı. Aynı yıl içerisinde İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği programına kaydoldu. 2001 yılında İ.T.Ü. Elektrik Mühendisliği Bölümü’ ne araştırma görevlisi olarak atandı. Halen bu görevine devam etmektedir.