

**ELEKTRONİK OLARAK ÜRETİLEN DALGA ŞEKİLLERİ ALTINDA
MANYETİK AYGITLARDA MEYDANA GELEN İLAVE DEMİR
KAYIPLARININ ARAŞTIRILMASI**

Mehmet ŞİMŞİR

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Mühendislik Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

ZONGULDAK

Haziran 2007

KABUL:

Mehmet ŞİMŞİR tarafından hazırlanan “ELEKTRONİK OLARAK ÜRETİLEN DALGA ŞEKİLLERİ ALTINDA MANYETİK AYGITLARDA MEYDANA GELEN İLAVE DEMİR KAYIPLARININ ARAŞTIRILMASI ” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir.22/06/2007

Başkan: Yrd. Doç. Dr. Nedim TUTKUN (Z.K.Ü.)



Üye : Yrd. Doç. Dr. S.Sırrı GÜRLEYÜK (Z.K.Ü.)



Üye : Yrd.Doç. Dr. Halit TAŞKIN (Z.K.Ü.)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. 19/07/2007



Doç. Dr. Mustafa SÖZEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRONİK OLARAK ÜRETİLEN DALGA ŞEKİLLERİ ALTINDA MANYETİK AYGITLARDA MEYDANA GELEN İLAVE DEMİR KAYIPLARININ ARAŞTIRILMASI

Mehmet ŞİMŞİR

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Nedim TUTKUN

Haziran 2007, 85 sayfa

Elektrik makineleri birçok endüstriyel uygulamada yaygın biçimde kullanılan en önemli elektromanyetik aygıtlardır. Özellikle asenkron motorlar, endüstride birçok iş makinesinin tahrik edilmesinde veya harekete geçirilmesinde en çok kullanılan motor türü olarak bilinmektedir. Ancak elektrik makinelerinin enerjilendirilmesinde meydana gelen kayıplar, enerji verimliliğinin giderek önem kazandığı günümüzde üzerinde durulması gereken bir konu olarak kendini göstermiştir.

Elektrik makinelerindeki kayıplar, bakır kayıpları ve demir kayıpları (manyetik kayıplar) olarak ikiye ayrılır. Bu çalışmada, öncelikle manyetik kayıpların tanımı yapılmış, çeşitleri açıklanmış, sebepleri yorumlanmıştır. Manyetik malzemelerin özelliklerine değinilmiştir.

Elektromanyetik teoreminin temellerini oluşturan denklemler ile Faraday ve Maxwell denklemleri açıklanmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Ayrıca deneylerde kullanılan toroidal nüvenin teknik özellikleri anlatılmış, manyetik devre büyüklükleri hakkında bilgi verilmiştir. Manyetik kayıplar, diğer bir deyişle demir kayıpları ve bu kayıpların çeşitleri hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmada dış çapı 60 mm, iç çapı 50 mm. olan 0.3 mm kalınlığında, %3 Si-Fe, manyetik olarak yönlendirilmemiş elektrik çeliğinden yapılmış, 690 primer sarım sayısı, 345 sekonder sarım sayısı olan sargıları 1 mm. çapında bakır telden sarılmış, 1:2 dönüştürme oranına sahip şerit sargılı toroidal nüve kullanılmıştır. Deneysel verilerden elde edilen ölçümlerin güvenilirliğini korumak için tüm deneylerde aynı test cihazları ve yukarıda özelliği verilmiş olan 1.3 kg ağırlığındaki toroidal nüve kullanılmıştır. Toroidal nüvenin primer sargılarına değişik frekanslarda üçgen, sinüzoidal ve kare dalga şeklinde gerilimler uygulanmıştır. Devrede, 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, ve 1.7T manyetik akı yoğunluğu değerlerini elde edebilmek için güç kuvvetlendiricisi yardımıyla gerekli gerilim değerleri ayarlanmıştır. Çalışmada demir kayıplarının değişik frekans ve değişik dalga şekillerine göre davranışları gözlemlenmiştir. Son olarak, elde edilen deneysel sonuçlar ve değerler bu tez çalışmasının ilgili yerlerinde verilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Elektrik Çelikleri, Manyetik Aygıtlar, Demir Kayıpları, Sinüzoidal Olmayan Dalga Şekilleri, Sargılı Toroidal Nüveler.

Bilim Kodu : 608.01.03

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

INVESTIGATION OF ADDITIONAL IRON LOSSES UNDER ELECTRONICALLY GENERATED VOLTAGE WAVEFORMS IN MAGNETIC DEVICES

Mehmet ŞİMŞİR

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Naturel and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Assistant Prof. Dr. Nedim TUTKUN

July 2007, 85 pages

Electrical machines are the most important magnetic devices commonly used in many industrial applications. Among them, asynchronous motors are widely employed to produce mechanical power for several work machines. However, when PWM inverter supplies are used to energize these motors mainly attributed to for controlling their speed, additional losses occur in motors' laminated stators cores. These losses in electrical machines are copper losses and iron losses from electrical aspect. In this study we first focused on an increase on iron losses and characteristics of magnetic losses were investigated. In edition, fundamentals of electromagnetic theory such as Faraday's and Maxwell's equations and properties of the toroidal core used in this measurement system are explained in detail. The toroidal core used in the measurement system, has 50 mm. inner and 60 mm outer diameters and wound from 3% Si-Fe laminated electrical steel with 0.3 mm thick.

ABSTRACT (continued)

It is also wired by 0.3 mm thick laminated copper wire and number of turns for primary and secondary are 690 and 345 respectively. The weight of the core measured is 1.3 kg for calculating specific losses.

During the experiments, the flux density varied from 0.5T to 1.7T, 25, 50, 75 and 100 Hz. The magnetic core was energized by the three voltage excitations such as sinusoidal, square and triangular voltage waveforms at the above frequency range. Under each voltage excitation, the measured magnetic losses were compared with each other at the same conditions. The results indicate that an increase in magnetic losses is mainly attributed to magnetization process in electrical steel and the form factor of voltage waveform.

Key Words : Electrical Steels, Magnetic Devices, Iron Losses, Non-Sinusoidal Waveforms, Wound Toroidal Cores.

Science Code : 608.01.03

TEŞEKKÜR

Yüksek Mühendislik tezimi hazırlamamda benden maddi manevi desteğini esirgemeyen Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Nedim TUTKUN'a teőekkürlerimi bir borę bilirim.

Mehmet ŞİMŞİR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 MANYETİK KAYIPLAR.....	4
2.1 HİSTEREZİS OLAYI	4
2.2 HİSTEREZİS KAYIPLARI	5
2.3 GİRDAP AKIMLARI KAYIPLARI	6
2.4 FAZLADAN GİRDAP AKIMLARI KAYIPLARI.....	9
2.5 YUMUŞAK MANYETİK MALZEMELER	10
2.6 MIKNATISLANMA VE HİSTEREZİS EĞRİSİ.....	11
BÖLÜM 3 TEMEL ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER.....	15
3.1 MAXWELL DENKLEMLERİ.....	15
3.2 POTANSİYEL FONKSİYONLAR	17
3.3 ZAMANLA DEĞİŞEN ALANLAR VE MAXWELL DENKLEMLERİ.....	20
3.4 FARADAY ELEKTROMANYETİK İNDÜKSİYON YASASI	21
3.5 ZAMANLA DEĞİŞMEYEN MANYETİK ALAN PROBLEMLERİ.....	21
3.6 ZAMANLA DEĞİŞEN MANYETİK ALAN PROBLEMLERİ	23

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 MANYETİK DEVRE	24
4.1. TOROİDAL TRANSFORMATÖRLER.....	24
4.2 BESLEME GERİLİMİ VE AKIMIN ELDE EDİLMESİ.....	26
4.3 DEMİR KAYIPLARININ BULUNMASI.....	26
BÖLÜM 5 DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	31
BÖLÜM 6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	80
KAYNAKLAR.....	82
ÖZGEÇMİŞ.....	85

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1	Deneysel çalışmalarda kullanılan muhtelif çaplardaki toroidal nüveler. 2
2.1	%3 Si-Fe elektrik çeliği için histerezis eğrisi. 4
2.2	Manyetik malzemede girdap akımları..... 6
2.3	Manyetik malzemeyi oluşturan saclardan birinin büyütülmüş görüntüsü..... 7
2.4	Manyetik alan şiddetinin genliğinin değiştirilmesiyle elde edilen histerezis eğrisi. 12
2.5	Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda indüklenen gerilim, akı yoğunluğu ve akımın değişimleri..... 13
4.1	Toroidin içinde manyetik akının R yarıçapı ve Φ açısına bağlı değişimi. 25
4.2	Besleme geriliminin ve akımının zamana göre değişiminin osiloskopta çizdirilmesi için kullanılacak bir devre..... 26
4.3	Histerezis kapalı eğrisinin elde edilebilmesi için kullanılacak bir integral alıcı devre. 27
4.4	Deney Sisteminin şematik gösterimi..... 29
5.1	0.5T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 32
5.2	0.7T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 32
5.3	1T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi..... 33
5.4	1.3T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 34
5.5	1.5T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 34
5.6	1.7T , 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 35
5.7	25 Hz sinüzoidal uyarım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması 36
5.8	0.5T , 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 36
5.9	0.7T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 37
5.10	1T , 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi..... 38
5.11	1.3T , 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 38
5.12	1.5T , 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 39
5.13	1.7T , 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.. 39
5.14	50 Hz sinüzoidal uyarım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması 40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.15	0.5T , 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 41
5.16	0.7T , 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 41
5.17	1.0T , 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 42
5.18	1.3T , 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 42
5.19	1.5T , 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 43
5.20	75 Hz sinüzoidal uyartım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması..... 44
5.21	0.5T , 100 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 44
5.22	0.7T , 100 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 45
5.23	1.0T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler. 45
5.24	100 Hz sinüzoidal uyartım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması..... 46
5.25	0.5T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.47
5.26	0.7T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.47
5.27	1.0T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.48
5.28	1.3T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.48
5.29	1.5T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.49
5.30	1.7T ,25 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.49
5.31	25 Hz üçgen dalga uyartımda Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 50
5.32	0.5T ,50 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.50
5.33	0.7T ,50 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.51
5.34	1.0T ,50 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.51
5.35	1.3T ,50 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.52
5.36	1.5T ,50 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.52
5.37	50 Hz üçgen dalga uyartımda Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 53
5.38	0.5T ,75 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.54
5.39	0.7T ,75 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.54
5.40	0.5T ,100 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 55
5.41	0.7T ,100 Hz üçgen dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
5.42	0.5T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 56
5.43	0.7T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 57
5.44	1.0T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 57
5.45	1.3T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 58
5.46	1.5T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 58
5.47	1.7T ,25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 59
5.48	25 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 59
5.49	0.5T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 60
5.50	0.7T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 60
5.51	1.0T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 61
5.52	1.3T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 61
5.53	1.5T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 62
5.54	1.7T ,50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 62
5.55	50 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 63
5.56	0.5T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 64
5.57	0.7T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 64
5.58	1.0T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 65
5.59	1.3T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 65
5.60	1.5T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 66
5.61	1.7T ,75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi... 66
5.62	75 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 67
5.63	0.5T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 67
5.64	0.7T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 68
5.65	1.0T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 68
5.66	1.3T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 69
5.67	1.5T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 69
5.68	1.7T , 100 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi. 70
5.69	100 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması 70
5.70	Sinüzoidal dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması 71

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

No	Sayfa
5.71 Kare dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması	72
5.72 Üçgen dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması	72
5.73 25 Hz mıknatıslanma frekansı altında manyetik akı yoğunluğu ile güç kayıplarının karşılaştırılması	73
5.74 50 Hz mıknatıslanma frekansı altında manyetik akı yoğunluğu güç kayıplarının karşılaştırılması	73
5.75 0.5T manyetik akı yoğunluğunda frekans değişimleri ile dalga şekillerinin karşılaştırılması	74
5.76 0.7T manyetik akı yoğunluğunda frekans değişimleri ile dalga şekillerinin karşılaştırılması	74
5.77 25 Hz frekansta manyetik akı yoğunlukları ile dalga şekillerinin değişimleri karşılaştırması.	75
5.78 0.5T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması	76
5.79 0.7T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması	76
5.80 1.0T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması	77
5.81 25 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması	77
5.82 50 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması	78
5.83 75 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması	78
5.84 100 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması	79

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>		<u>Sayfa</u>
5.1	0.5T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	32
5.2	0.7T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	33
5.3	1.0T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	33
5.4	1.3T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	34
5.5	1.5T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	35
5.6	1.7T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	35
5.7	0.5T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	37
5.8	0.7T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	37
5.9	1.0T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	38
5.10	1.3T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	38
5.11	1.5T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	39
5.12	1.7T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	39
5.13	0.5T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	41
5.14	0.7T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	41
5.15	1.0T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	42
5.16	1.3T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	43
5.17	1.5T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	43
5.18	0.5T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	45
5.19	0.7T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	45
5.20	1.0T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.	46
5.21	0.5T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	47
5.22	0.7T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	47
5.23	1.0T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	48
5.24	1.3T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	49
5.25	1.5T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	49
5.26	1.7T, 25 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	50
5.27	0.5T, 50 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	51
5.28	0.7T, 50 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	51
5.29	1.0T, 50 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	52
5.30	1.3T, 50 Hz üçgen dalga uyartım altında ölçülen değerler.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam ediyor)

No		Sayfa
5.31	1.5T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.....	53
5.32	0.5T, 75 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.....	54
5.33	0.7T, 75 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.....	54
5.34	0.5T, 100 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.....	55
5.35	0.7T, 100 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.....	56
5.36	0.5T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	56
5.37	0.7T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	57
5.38	1.0T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	57
5.39	1.3T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	58
5.40	1.5T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	58
5.41	1.7T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	59
5.42	0.5T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	60
5.43	0.7T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	61
5.44	1.0T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	61
5.45	1.3T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	62
5.46	1.5T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	62
5.47	1.7T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	63
5.48	0.5T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	64
5.49	0.7T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	64
5.50	1.0T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	65
5.51	1.3T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	65
5.52	1.5T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	66
5.53	1.7T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	66
5.54	0.5T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	68
5.55	0.7T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	68
5.56	1.0T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	69
5.57	1.3T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	69
5.58	1.5T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	70
5.59	1.7T, 100 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.	70

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

T	:	Tesla
V	:	Volt
I	:	Akım
v	:	Hacim
B	:	Manyetik akı yoğunluğu
Hz	:	Hertz
Ω	:	Ohm
R	:	Direnç
W	:	Watt
A	:	Amper
VA	:	Volt-Amper
P_h	:	Histerezis kayıpları
P_g	:	Girdap akımları kayıpları
P_e	:	Fazladan (Ekses) Kayıplar
δ	:	Elektrik çeliğinden yapılmış sacın kalınlığı
w	:	Elektrik çeliğinden yapılmış sacın eni
h	:	Elektrik çeliğinden yapılmış sacın yüksekliği
ρ	:	Özdirenç
f	:	Frekans
B_m	:	Maksimum manyetik akı yoğunluğu
k_g	:	Girdap akımları kayıpları için malzeme katsayısı
k_h	:	Histerezis kayıpları için malzeme katsayısı
μ	:	Manyetik geçirgenlik
H	:	Manyetik alan şiddeti
N	:	Sarım sayısı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Φ : Manyetik akı
 A_c : Elektrik Çeliğinin faydalı kesiti

KISALTMALAR

- DC : Doğru Akım
AC : Alternatif Akım
PWM : Pulse Width Modulation

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Elektrik makineleri birçok endüstriyel uygulamada yaygın biçimde kullanılan en önemli elektromanyetik aygıtlardır. Özellikle asenkron motorlar, endüstride birçok iş makinesinin tahrik edilmesinde veya harekete geçirilmesinde en çok kullanılan motor türü olarak bilinmektedir. Bu tür motorların kontrol edilmesi çoğunlukla evirici olarak adlandırılan güç elektroniği aygıtlarıyla yapılmaktadır. Ancak her ne zaman elektrik motoru evirici güç kaynağı ile enerjilendirilirse motorun stator nüvesinde ilave demir kayıpları ve stator sargılarda ise ilave bakır kayıpları meydana gelmektedir. Bu kayıplar temelde frekansa bağlı kayıplardaki artışlardan kaynaklanıyor gibi görünse de farklı mıknatıslanma sürecinin önemli bir etken olduğu göz ardı edilmemelidir. Zira, elektronik olarak üretilen dalga şekilleri altındaki uyarımlarda manyetik malzemede sinüzoidal uyarıma göre çok farklı bir manyetikleşmenin söz konusu olduğu daha önceki araştırmalar neticesinde görülmüştür. Bu kayıpların elektromanyetik aygıt üzerindeki en büyük etkisi nüve ve bakır kayıplarının ciddi boyutta artmasıdır ki; bu sıcaklık artışı olarak kendini gösterir ve elektriksel yalıtımın zayıflamasına yol açabilir. Ayrıca aygıtın uzun süreli çalışmasında performans ve verim azalmasına neden olması da üzerinde durulması gereken önemli konulardan olur ve bu durum, enerji verimliliği bakımından istenilmeyen bir durumdur [1].

Bilindiği gibi, son yıllarda gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde enerji verimliliği konusu giderek artan bir önem kazanmaya başlamıştır. Enerji kaynaklarının kısıtlı olduğu düşünüldüğünde, enerji tüketen aygıtların tasarımı çok önemli hale gelmektedir. Zira bunun, yüksek verimle tasarlanmış bir elektromanyetik aygıtın uzun süreli kullanımında enerji tüketimi açısından önemli katkılar sağlayacağı kesinlikle yadsınamaz bir gerçektir. Günümüzde enerji kaynakları endüstriyel ve evsel gereksinimler için hidroelektrik santrallerde, termik santrallerde ve doğalgaz santrallerinde elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Bu tip uygulama alanlarında elektrik enerjisine olan talep o kadar çok artmıştır ki bu talebin karşılanması için ya yeni enerji üretim santralleri kurulması gerekmekte, ya da mevcut enerjinin daha verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir.

Bu nedenle yüksek verimde çalışan elektrikli aygıtların tasarımı elektrik enerjisi üreten bir santralin yapımı kadar önem kazanmaktadır. Günümüzde elektrik enerjisini en fazla tüketen ve endüstriyel uygulamalarda oldukça fazla kullanılan küçük ve büyük güçlü elektrik motorlarının tasarımı, enerji verimliliği açısından üzerinde dikkatle durulması gereken noktadır.

Bu araştırmada elektrik motorları arasında yaygın bir biçimde kullanılan küçük güçlü asenkron motorları denetlemek amacıyla kullanılan Pulse Width Modulation (PWM) evirici güç kaynaklarının neden olduğu ilave demir kayıplarının araştırılması amaçlanmıştır. PWM uyarımı altında stator nüvede meydana gelen ilave demir kayıplarının hangi oranda oluştuğunu, niteliğini ve niceliğini tam olarak anlamak ve kavramak için stator nüve ile aynı çelikten yapılmış, sargılı toroidal bir nüve tüm deneysel ölçümler için kullanılmıştır. Bu nüve, üç farklı uyarım altında ve farklı manyetik akı yoğunluklarında mıknatıslanmış, bu akı yoğunluklarına karşılık gelen güç kayıplarının değeri, manyetik akı yoğunluğu ve manyetik akı yoğunluğunun zamanla değişim oranı ölçülmüştür.



Şekil 1.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan muhtelif çaplardaki toroidal nüveler [15].

Manyetik akı yoğunluğu değerleri 0.5'den 1.7 T'ya kadar 50 Hz'de sinüzoidal uyarım altında mıknatıslanmıştır. Bu uyarım altında aynı toroidal nüve 25, 50, 75 ve 100 Hz'lik mıknatıslanma frekansları için mümkün olduğunca aynı manyetik akı yoğunluğu değerleri referans alınarak mıknatıslanmaya tabi tutulmuş ve gerekli ölçümler yapılmıştır.

Bunun yanı sıra, PWM dalga şeklinin etkisinin görülmesi açısından aynı frekans ve akı yoğunluğu değerlerinde toroidal nüve kare dalga ve üçgen dalga uyarımları altında mıknatıslanmış ve gerekli dalga şekilleri ile değerler çevrim içi işlemler ve analizler için kaydedilmiştir. Yapılan analizler sonucu elektronik olarak üretilen gerilim dalga şekilleri altında manyetik nüve içerisindeki mıknatıslanmanın nasıl oluştuğu ve buna bağlı olarak

ilave manyetik kayıpların nasıl meydana geldiği konusunda bazı bulgulara ulaşılmaya çalışılmıştır.

Bu tez çalışması, PWM uyarımı altındaki elektrik çeliklerinde oluşan ilave kayıplar hakkında bilgi edinmeyi amaçlamaktadır.

İlk olarak farklı manyetik akı yoğunluklarında, üç farklı uyarım altında (sinüzoidal, üçgen dalga ve kare dalga) nasıl bir mıknatıslanma olduğu, ne gibi akı ve alan dalga şekillerinde ne gibi farklılıkların olduğu araştırılması ele alınmıştır. İkinci olarak, mıknatıslanma frekansın değiştirilmesi durumunda nüvedeki mıknatıslanmanın nasıl değiştiği ve manyetik kayıplara nasıl etki ettiğinin araştırılması ele alınmıştır. Yapılan çalışmada, primer sayım sayısı 690, sekonder sarım sayısı 345 olan, manyetik çekirdeği 0,3 mm kalınlığı ve 50 mm eninde iç çapı 50 mm ve dış çapı 60 mm olan laminasyonlu %3 SiFe elektrik çeliğinden yapılmış toroidal nüve kullanılmıştır. Kullanılan bu nüvenin ağırlığı 1,3 kg olup, bu nüveye 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz ve 100 Hz frekanslarda üçgen, sinüzoidal ve kare dalga şeklinde, manyetik akı yoğunluğu 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5 ve 1.7T olarak sağlanacak şekilde gerilim uygulanmıştır.

Sinüzoidal uyarım altında manyetik kayıplar, akı yoğunluğundaki değişim oranının manyetik alan yoğunluğunun çarpımının güç faktörü ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Manyetik alan yoğunluğu primer sargılara seri bağlanmış 1Ω 'luk direnç uçlarındaki gerilimden, manyetik akı yoğunluğunun değişim oranı (dB/dt) doğrudan sekonder sargılarından elde edilmiştir. Ayrıca manyetik akı yoğunluğu entegral alıcı bir devre yardımıyla temin edilmiştir. Basit olarak ölçüm sistemi, sinyal üretici, güç kuvvetlendirici, sayısal multimetre, sayısal osiloskop, 5W gücünde $\pm \%1$ 'lik hata payına sahip direnç ve sargılı toroidal nüveden oluşturulmuştur.

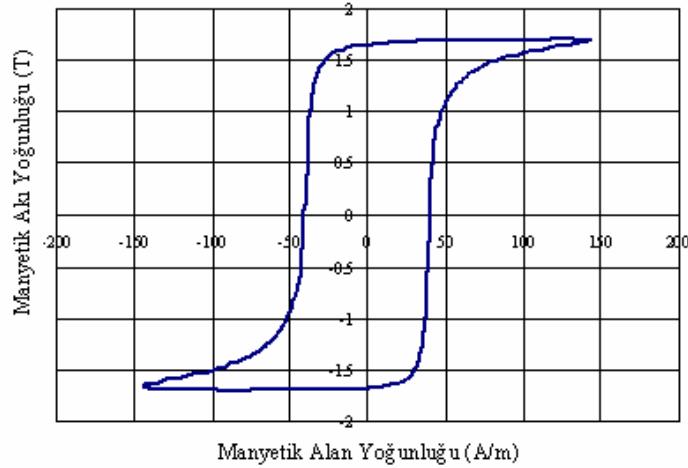
BÖLÜM 2

MANYETİK KAYIPLAR

Manyetik alanın içerisinde çalışan bir manyetik malzemede meydana gelen manyetik kayıplar veya nüve kayıpları genelde üç bileşene ayrılır: histerezis kayıpları, girdap akımı kayıpları ve (fazladan) eksek kayıplar yani başka bir deyişle bilinmeyen kayıplardır [2, 3, 4].

2.1 HİSTEREZİS OLAYI

Histerezis, manyetik malzemelerin doğrusal olmayan mıknatıslanması sonucunda meydana gelen olağandışı olay veya diğer deyişle fenomendir[7, 14, 19, 21, 24, 25, 26, 27, 31].. Yumuşak manyetik malzeme olarak sınıflandırılan %3 Si-Fe alaşımında bu olay, Şekil 2.1'de gösterildiği biçimde oluşur. Elde edilen histerisiz kapalı alanı (loop) o manyetik malzemeye ait olan çoğu koersivite, manyetik doyum seviyesi vb. gibi parametrik özelliklerin bilinmesini sağlar.



Şekil 2.1 %3 Si-Fe elektrik çeliği için histerezis eğrisi [4].

Histerezis kapalı alanı aynı zamanda bir manyetik malzemede birim hacimde harcanan toplam enerji kaybına karşılık gelir. Bu kayıp aşağıdaki denklem ile ifade edilebilir [13].

$$E_k = \oint H dB \quad [V A s / m^3] \quad (2.1)$$

Burada, H ve dB sırasıyla manyetik alan şiddeti veya dayanımı ve manyetik akı yoğunluğunun değişim miktarıdır.

Yukarıda (2.1) ile ifade edilen enerji kaybı, mıknatıslanma frekansı f ile çarpıldığında birim hacimdeki güç kayıpları hesaplanır ve aşağıdaki denklem ile ifade gösterilir. Alternatif olarak, histerezis kayıpları dinamik histerezis yolunun modellenmesi yardımıyla belirlenebilir. Dinamik histerezis yolunu model alan en önemli modeller, Preisach model ve Jiles-Atherton modelleridir. Yapılan araştırmalarda elde edilen deneysel sonuçlar her iki modelin de geçerli olduklarını göstermiştir. Bu modeller elektrik çeliği üreten firmalar tarafından ilgili kataloglarda genelde kullanılmazlar. Ancak üretici firma kataloglarında çoğunlukla sadece DA mıknatıslanma eğrisi verilir.

$$P_k = f \cdot \oint H dB \quad [VA / m^3] \quad (2.2)$$

2.2 HİSTEREZİS KAYIPLARI

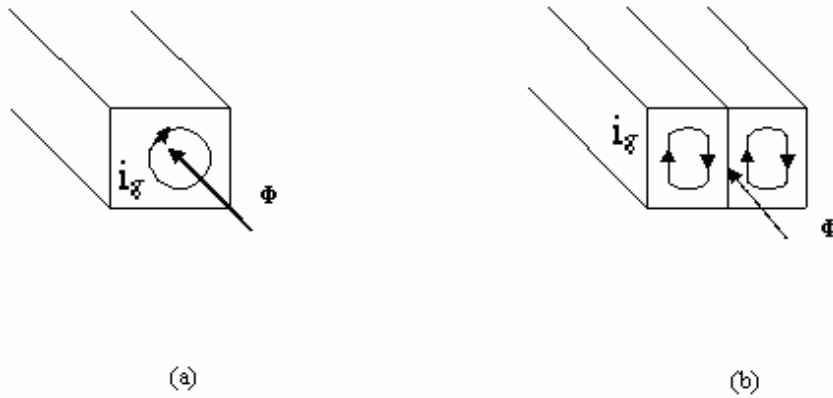
Histerezis kayıpları, Steinmetz tarafından geliştirilen deneysel bir formül ile hesaplanabilir. Bu formül de histerezis katsayısı ve Steinmetz indeks gibi iki bilinmeyen söz konusu olup kaybın doğrudan hesaplanması için bu iki bilinmeyenin belirlenmesi gerekir. Genellikle Steinmetz indeks, Si-Fe alaşımlı tanecik uyumlu ve uyumsuz manyetik malzemeler için 1 ile 3 arasında değişmektedir. Histerezis katsayısı ise manyetik devre parametreleri ile ilişkili olup çeşitli manyetik akı yoğunluklarında ölçülen manyetik kayıpların oranlanması sonucu belirlenir. Bu formül aşağıdaki denklem ile verilebilir.

$$P_h = k_h f B_m^n \quad [W / m^3] \quad (2.3)$$

Burada k_h , n ve B_m sırasıyla histerezis katsayısı, Steinmetz indeks, ve maksimum akı yoğunluğudur.

2.3 GİRDAP AKIMLARI KAYIPLARI

Manyetik malzemelerde oluşan bir diğer kayıp girdap akımları kayıplarıdır. Bu kayıplar, manyetik akı yoğunluğunun zamana göre değişmesi sonucu oluşurlar; zira manyetik akının değişimi bu akının geçtiği yola dik olan kesitte Faraday indüksiyon yasası gereğince iletken manyetik malzeme içersinde birden fazla elektro-motor-kuvvet (emk) veya gerilim indükler. İndüklenen gerilimler, iletkenin kesitinin kapalı devre oluşturmasından dolayı girdap akımları adı verilen akımların iletken malzeme içersinde akmasına neden olur. Şekil 2.2(a)'da kütsel bir manyetik malzemede, Şekil 2.2(b)'de ise bu kayıpları sınırlandırmak için dilimlenmiş bir manyetik malzemede zamanla değişen akının dik kesitte oluşturduğu girdap akımları gösterilmiştir. Girdap akımları, manyetik malzemenin elektriksel direncinden dolayı $i_g^2 \cdot R_m$ değerinde güç kaybına neden olurlar [5, 10, 12, 17, 22, 28, 29, 30].



- a) Kütsel bir manyetik malzeme, (b) Dilimlenmiş ve birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış laminasyonlardan oluşan manyetik malzeme

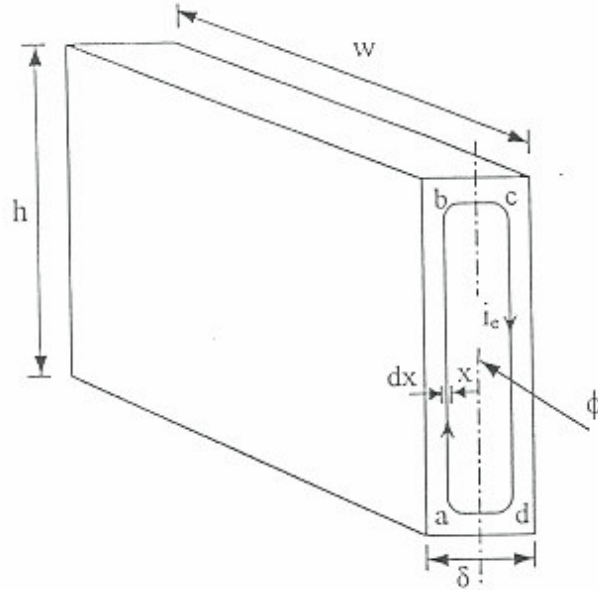
Şekil 2.2 Manyetik malzemede girdap akımları [20].

Manyetik malzemeyi oluşturan dilimlenmiş şekildeki elektrik çeliklerinden bir tanesinin büyütülmüş görüntüsü şekil 2.3'te verilmiştir. Elektrik çeliğinin kalınlığı δ , eni w , yüksekliği de h olsun. $\delta \ll h$ olduğu durumda, abcd kapalı eğrisinin sınırladığı alandaki manyetik akı ifadesi (2.3) denklemi ile bulunabilir.

$$\Phi_m = 2h \times B_m \quad (2.4)$$

Kapalı eğri boyunca sinüzoidal uyartım altında indüklenen gerilim V (2.4) denklemi yardımıyla hesaplanabilir.

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m 2 h x \quad (2.5)$$



Şekil 2.3 Manyetik malzemeyi oluşturan saclardan birinin büyütülmüş görüntüsü [15].

Diğer taraftan, dx kalınlığındaki abcd yolunun omik direnci R verilen parametrelere bağlı olarak (2.5) denklemi yardımıyla elde edilebilir.

$$R = \rho \frac{2h}{w dx} \quad (2.6)$$

Burada, ρ manyetik malzemenin özgül direnci olup (Ωm) olarak boyutlandırılır.

Yukarıda elde edilen ifadelerin ışığında kapalı egride indüklenen gerilim nedeniyle akan diferansiyel akım (2.6) denklemi ile ifade edilebilir [15].

$$dI_s = \frac{\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m w x dx}{\rho} \quad (2.7)$$

Buradan diferansiyel dI_g akımı nedeniyle abcd kapalı eğrisi üzerinde akan girdap akımının meydana getirdiği güç kaybı (2.7) denklemi ile hesaplanabilir.

$$dP_g = \frac{\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 2whx}{\rho} dx \quad (2.8)$$

Yukarıdaki ifade (2.8)'de ifade edildiği gibi laminasyon kalınlığının yarısı boyunca entegre edildiğinde manyetik malzeme ve nüve parametrelerine bağlı olarak sinüzoidal uyartım altındaki girdap akımları kayıpları (2.9) denklemi ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$P_g = \frac{2\left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} f B_m\right)^2 wh \delta^{1/2}}{\rho} \int_0^{\delta^{1/2}} x^2 dx \quad (2.9)$$

$$P_g = \frac{v \pi^2 f^2 \delta^2 B_m^2}{6 \rho} \quad (2.10)$$

Bu ifadede malzemenin ilgili hacmi (2.10) denklemi ile hesaplanmıştır. Böylece, bu kayıp genel olarak (2.11) denklemi ile ifade edilir.

$$v = w.h.\delta \quad (2.11)$$

$$P_g = k_g \cdot B_m^2 \cdot f^2 \quad (2.12)$$

Bu ifadede kullanılan k_g manyetik malzemenin kalınlığına ve malzemenin cinsine bağlı bir katsayıdır.

(2.12) denklemi ile verilen ifade, düşük frekanslardaki akı yoğunluğu dağılımının girdap akımlarından çok fazla etkilenmediği durumlar için geçerli olduğu görülmektedir. Si-Fe alaşımlı malzemeler üzerinde yapılan araştırmalar (2.9) denklemi ile hesaplanan kayıp değerleri deneysel verilerin kullanılması sonucu yapılan parametre kestirimi ile elde edilen sonuçlar ile büyük ölçüde uyduğu görülmüştür. Sinüzoidal uyartım altında elde edilen bu denklemde girdap akımı kayıplarının mıknatıslanma frekansı, manyetik akı yoğunluğu,

laminasyon kalınlığı değerlerinin kareleri ile doğru orantılı, ancak manyetik malzemenin özgül direnci ile ters orantılı olduğu görülmektedir. Genel olarak (2.12) denklemine göre girdap akımı kayıplarını azaltmak için iki yöntemden bahsedilebilir:

1. İletkenliği düşük ya da özgül direnci büyük manyetik malzemeler kullanmak, bu nedenle saf demir içersine belli oranda (% 3 ve % 6,5) silisyum katmak suretiyle elde edilen Si-Fe alaşımlarının kullanılması. Ancak burada büyük miktarlarda katılan silisyum elektrik çeliğinin manyetik satürasyon seviyesini azaltığı göz önüne alınmalıdır.

2. Manyetik nüveleri uygulama alanına göre mümkün olan en küçük kalınlıktaki yüzeyleri elektriksel olarak yalıtılmış laminasyonlardan imal etmek. Bu tip uygulama birçok elektrik motorları, elektromanyetik aygıtın yapımında yaygın biçimde kullanılmaktadır. Si-Fe elektrik çelikleri genel olarak 1,8T akı yoğunluğu civarında doymaya girerler. Yüksek frekanslarda bu kayıpları azaltmak için laminasyon kalınlığını küçültmek ve direncini arttırmak yeterli olmaz. Girdap akımları kaybı frekansın karesi ile orantılı olarak artış gösterdiği için yüksek frekanslarda kullanılmaları uygun değildir. Bunun yerine ferrit gibi farklı bir manyetik malzeme tercih edilir. Öz direncinin yüksek olması yüksek frekanslarda kayıplarının düşük olmasını sağlar [1]. Ferrit malzemelerin üretim aşamasında metal oksitler öğütülür, elenir ve elektriksel yalıtkanlığı yüksek olan yapışkan malzeme ile karıştırılıp tek parça haline getirilir. Bu işlem sonucunda metal tanecikleri izole edilmiş ve girdap akımı kayıpları yüksek oranda azaltılmış olur. Ancak ferrit malzeme Si-Fe malzemeye göre düşük akı yoğunluklarında satürasyona ulaşır [20].

2.4 FAZLADAN GİRDAP AKIMLARI KAYIPLARI

Bu kayıplar bilinmeyen kayıplar olarak da adlandırılmakla beraber bazı araştırmacılar tarafından fazladan kayıplar veya eksess kayıplar olarak da adlandırılır. Bu kayıpların meydana gelişi bir grup atomun oluşturmuş olduğu çok küçük bölgeciklerin arasındaki duvarların yer değiştirmesi ile olduğu öne sürülmektedir .

Tanecikleri yönlendirilmiş (grain oriented) veya büyük olan malzemelerde bu kayıp türü daha fazla önem kazanmaktadır. Daha büyük bölgecik duvar boşlukları, girdap kaybı yoğunluğundaki yerel artışlara neden olan ve toplam girdap akımları kayıplarında artışa yol açan girdap akımlarının daha fazla homojen olmayan dağılımını verir [12].

Bu mekanizma, bir şekilde akım ileten tellerdeki deri olayının mekanizmasına benzemektedir. Bu kayıp (2.13) ile hesaplanabilir.

$$P_e = k v (f B_m)^{1.5} \quad [W] \quad (2.13)$$

Burada, f mıknatıslanma frekansı, v , manyetik malzemenin hacmi, B_m maksimum akı yoğunluğu ve k_e ise çeliğin şekil ve elektriksel özelliklerine bağlı katsayıdır.

Yukarıdaki denklemlerde k_e katsayısı (2.14) ile ifade edilir.

$$k = \sqrt{\sigma G S V_0} \quad (2.14)$$

Burada σ , G , S ve V_0 sırasıyla elektriksel iletkenlik, manyetik malzemenin elektriksel sönümleme faktörü, laminasyonun kesit alanı ve bölge-duvar hareketlerinin (domain-wall motion) etkilerini tarif eden iç alandır. V_0 , üreticiler tarafından verilmeyen çok özel bir parametre olduğundan yukarıdaki denklem kullanılarak doğrudan bir güç kaybı hesaplaması yapılamaz. Bunun yerine k_e katsayısı keyfi bir sabit olarak düşünülür ve bu şekilde bu kayıplar tahmin edilebilir.

2.5 YUMUŞAK MANYETİK MALZEMELER

Elektrik makinelerinde kullanılan yumuşak manyetik malzemelerin ideal olarak manyetik devrenin relüktansının azaltılması için yüksek manyetik geçirgenliğe ve yüksek doyma manyetik akı yoğunluğuna sahip olması istenir. Pratik olarak bu özelliklerin hepsinin tek bir malzemede olması günümüz teknolojisinde ekonomik olarak mümkün değildir. Elektrik makinelerinde demir kayıpları, elektrik makinelerinin stator nüvelerinde oluşmaktadır. Bu nedenle, manyetik malzemeler güç elektroniği ve elektrik makinelerinin önemli elemanları olarak bilinirler. Kullanıldıkları yerlere, kullanım amaçlarına ve çalışma koşullarına göre değişiklik gösterirler [6, 9, 18, 12].

Manyetik malzemeler içerisinde kullanım açısından en yaygın olanlar ferromanyetik malzemelerdir. Bu tür malzemelerde, Weiss bölgeleri adı verilen bölgeler vardır. Bu bölgelerde kendi aralarında paralel manyetik alanlar oluşur. Manyetik alanları rasgele

yönlenmiş bu bölgelere, sahip manyetik malzeme dışsal manyetik alana maruz bırakıldığında büyük oranda alan yönünde yönlenmeye çalışırlar. Bu sayede manyetik malzeme içersinde daha büyük ve daha düzgün bir manyetik alan meydana gelir; bunun sonucunda malzeme içersinden kapalı bir döngü oluşturacak biçimde manyetik akı akmaya başlar [18].

2.6 MIKNATISLANMA VE HİSTEREZİS EĞRİSİ

Manyetik alana maruz kalan bir manyetik malzemede akı oluşumuna mıknatıslanma denir. Mıknatıslanmanın temel ölçüsü manyetik geçirgenliktir. Manyetik akı yoğunluğundaki değişimin manyetik alandaki değişime oranı olarak tanımlanan manyetik geçirgenliğin ifadesi aşağıdaki ifade ile verilebilir.

$$\mu = \frac{dB}{dH} \quad (2.15)$$

Herhangi bir manyetik malzemenin manyetik geçirgenliği, boşluğun manyetik geçirgenliğinin o malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğinin çarpımına eşittir.

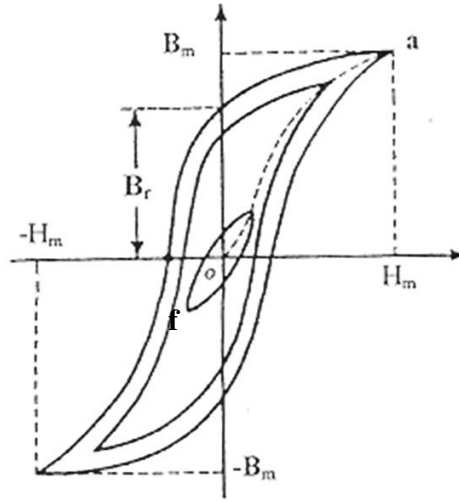
$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2.16)$$

Burada μ_0 ve μ_r havasız ortamın ve kullanılan malzemenin bağıl manyetik geçirgenlikleri olup birincisinin değeri 4×10^{-7} H/m olarak verilir.

N sarımlı bir çekirdeğin başta kalıcı mıknatıslanmasının olmadığı varsayalım. Eğer i sinüzoidal akımı sıfırdan itibaren I_m tepe değerine kadar arttırılacak olursa manyetik alan şiddeti H akıma uyarak artacak H_m değerini alacaktır. Çünkü manyetik alan şiddeti akımla belli bir aralıkta (lineer bölgede) lineer artış gösterir. Fakat akı yoğunluğu B , bu artışa lineer bir şekilde cevap veremez. Eğer akım değeri I_m tepe değerinden sıfır değerine düşürülürse manyetik alan şiddeti de sıfır değerine düşer fakat akı yoğunluğu belli bir değerde kalır. Buna artık akı yoğunluğu denir. Bu sefer akım sıfırdan I_m değerine kadar arttırıldığında manyetik alan şiddeti H_m değerine çıkar ve akı yoğunluğu bu durumda B_m değerini alır. Akı yoğunluğunun 0 olduğu H_c değerine giderme alanı (coercivity) denir.

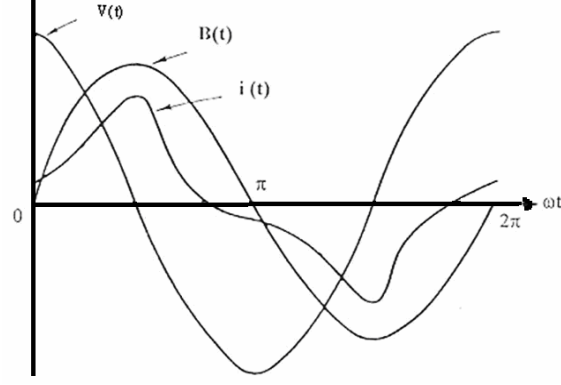
Artık akı ikinci periyoda başladığında manyetik akı yoğunluğu $o-a$ yolu yerine $f-a$ yolunu izler, yani, ilk periyotta eğri kapanmaz. Bu şekilde gösterilen kapalı eğri ancak birkaç periyottan sonra oluşabilir. Meydana gelen bu eğriye histerezis eğrisi denir.

Şekil 2.4'den görülebileceği gibi bu iki büyüklüğün değişimlerinde farklılık meydana gelir ve akı yoğunluğu alan yoğunluğunun gerisinde kalır. Bu şekilde, aralarında lineer olmayan bir ilişki doğar. Manyetik malzemelerde görülen bu olaya histerezis denir. Histerezis olayı manyetik malzemelerde kaybı belirleyen en önemli faktördür. Farklı histerezis eğrileri oluşturmak için akımın (dolayısıyla da manyetik alan şiddetinin) genliğini değiştirmek yeterlidir. Böylece bir histerezis çevrim ailesi oluşturulabilir. Bu kapalı eğrilerin uç noktalarının birleştirilmesiyle mıknatıslanma eğrisi elde edilir. Buradan anlaşılıyor ki, başlangıçta mıknatıslanmamış bir çekirdek mıknatıslanırsa mıknatıslanma eğrisini takip ederek normal çalışma eğrisine ulaşılır [11, 15, 23, 32, 33, 34].



Şekil 2.4 Manyetik alan şiddetinin genliğinin değiştirilmesiyle elde edilen histerezis eğrisi [15].

Manyetik malzemenin sinüzoidal bir akımla beslendiğini varsayalım. Bu durumda manyetik alan şiddeti sinüzoidal, akı dolayısıyla indüklenen gerilim nonsinüzoidal olur. Şekil 2.5'te Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda indüklenen gerilim, akı yoğunluğu ve akımın değişimleri gösterilmiştir. Genelde besleme gerilimi sinüzoidal olur. İndüklenen gerilim ve akı yoğunluğu da sinüzoidal olacağı için histerezis eğrisinden, manyetik alan şiddetinin ve onu oluşturan besleme akımının nonsinüzoidal olacağı anlaşılır.



Şekil 2.5 Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda indüklenen gerilim, akı yoğunluğu ve akımın değişimleri [15].

N sarımlı manyetik malzemede akı yoğunluğu $B(t)$ sinüzoidal değiştiği düşünölsün.

$$B(t) = B_m \sin \omega t \quad (2.17)$$

Buradan manyetik akı ifadesi;

$$F(t) = B(t) A_c \quad (2.18)$$

olduğuna göre, $B(t)$ yerine $B_m \sin \omega t$ ifadesi yazılırsa;

$$\Phi(t) = \Phi_m \sin \omega t = A_c B_m \sin \omega t \quad (2.19)$$

ifadesi elde edilir. Faraday'ın indüksiyon yasasının ifadesi,

$$V(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.20)$$

dir. İndüklenen gerilim (2.19) ve (2.20)'de yerine koyulduğunda ,

$$V(t) = \omega N A_c B_m \cos \omega t \quad (2.21)$$

bulunur. Burada $\omega = 2\pi f$ olarak ifade edilir. İndüklenen gerilim sinüzoidal olduğundan efektif değerler için,

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N B_m A_c \quad (2.22)$$

yazılır. Denklem (2.22), temel gerilim yasası olarak bilinir. Bu ifadede indüklenen gerilim E (V), frekans f (Hz), maksimum akı yoğunluğu B_m (T) ve çekirdek faydalı kesiti A_c (m^2)'dir.

BÖLÜM 3

TEMEL ELEKTROMANYETİK DENKLEMLER

3.1 MAXWELL DENKLEMLERİ

Elektromanyetik indüksiyonun temel önermesine göre zamanla değişen manyetik alan elektrik alan oluşturur. Bu durum çok sayıda deneyle doğrulanmıştır.

Denklemlerde kullanılan $\vec{\nabla} \times$, $\vec{\nabla} \cdot$ ve $\vec{\nabla}$ sembolleri sırasıyla rotasyonel, diverjans ve gradyent operatörleridir.

Maxwell denklemlerinin hem diferansiyel, hem de integral biçimleri aşağıda gösterilmiştir [2].

Diferansiyel gösterimler:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Faraday Yasası} \quad (3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Maxwell-Ampere Yasası} \quad (3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{Gauss Yasası} \quad (3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Manyetik Gauss Yasası} \quad (3.4)$$

(tek başına manyetik yük bulunmaz).

Maxwell denklemlerinin integral biçiminde gösterimleri:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} \quad \text{Faraday Yasası}$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{s} \quad \text{Maxwell-Ampere Yasası}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_S \rho \, d v \quad \text{Gauss Yasası}$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \text{Manyetik Gauss Yasası}$$

Bunlar Maxwell Denklemleri olarak bilinmektedirler. 3.3'deki ρ , serbest yüklerin hacimsel yoğunluğu ve 3.2'deki J , serbest akım yoğunluğudur. Burada J hem konveksiyon akımını (ρu), hem de iletim akımını (σE) içerebilir: bu dört denklem, süreklilik bağıntısı ve Lorentz kuvvet bağıntısıyla birlikte elektromanyetik kuramın temelini oluştururlar. Bu bağıntılar tüm makroskopik elektromanyetik olayları açıklamak ve öngörmek için kullanılabilirler.

Yük korunumu ilkesinin her zaman geçerli olduğu bilinmektedir. Yük korunumunun matematik ifadesi $\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = - \frac{\partial \rho}{\partial t}$ denklemi ile verilmiştir.

Burada önemli soru Maxwell denklemlerinin zamanla değişen bir durumda yük korunumunun matematiksel ifadesine uyup uymadığıdır. Yanıtın olumsuz olduğu, (3.1)'in basitçe diverjansı alınarak açıkça görülür.

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = 0 = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} \quad (3.5)$$

İyi tanımlanmış bir vektör alanının rotasyonelin diverjansının sıfır olduğu bilinmektedir. Yük korunumunun matematiksel ifadesine göre zamana bağlı durumda $\vec{\nabla} \cdot \vec{J}$ sıfır olduğu için yukarıdaki denklem genelde doğru değildir.

Yük korunumunun matematiksel ifadesi ile uyumlu olmaları için (3.1, 3.2, 3.3, 3.4) nasıl değiştirilmelidir? İlk önce (3.5)'in sağına $\partial\rho/\partial t$ terimi eklenmelidir: [2]

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = 0 = \vec{\nabla} \cdot \vec{J} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} \quad (3.6)$$

Yukarıdaki denklemde $\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$ kullanıldığında;

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = \vec{\nabla} \cdot \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \quad (3.7)$$

eşitliği elde edilir. Bu, Maxwell-Ampere yasası akım olmasa bile zamanla değişen bir elektrik alanının manyetik alan oluşturacağını gösterir. $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ ifadesinin yük korunumu ilkesi ile uyumlu olması için $\partial D/\partial t$ ek terimi gereklidir.

$\partial D/\partial t$ 'nin akım yoğunluğu boyutunda olduğu kolayca gösterilebilir. (SI birim sisteminde A/m^2). $\partial D/\partial t$ terimine yer değiştirme akım yoğunluğu denir, bunun $\vec{\nabla} \times \vec{H}$ denkleminde katılması Maxwell'in büyük katkılarından biridir [2].

3.2 POTANSİYEL FONKSİYONLAR

Denklem (3.4) \vec{B} 'nin solenoid olmasını sağlar. Sonuç olarak \vec{B} , \vec{A} gibi başka bir vektör alanının rotasyoneli olarak

$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ şeklinde belirtilebilir. Faraday yasasının diferansiyel biçiminde bu ifade yerine konursa: [2].

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \quad (3.8)$$

veya

$$\vec{\nabla} \times \left(\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.9)$$

(3.9)'da parantezin içindeki iki vektörel niceliğin toplamı rotasyonelden bağımsız olduğundan skalerin gradyenti olarak belirtilebilir.

$$\vec{E} + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = -\vec{\nabla} V \quad (3.10)$$

(3.10)'daki V ifadesi skaler elektrik potansiyeldir. Bu ifade

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (\text{V/m}) \text{ şeklinde gösterilebilir}$$

Durağan halde $\partial \vec{A} / \partial t = 0$ olur ve (3.10)'da , $\vec{E} = -\vec{\nabla} V$ 'ye indirgenir. Burada \vec{E} tek başına V 'den, \vec{B} , $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ ile \vec{A} 'dan elde edilebilir. Zamanla değişen alanlar için \vec{E} , \vec{V} ve \vec{A} 'nın her ikisine de bağlıdır, yani bir elektrik alan şiddeti, $-\vec{\nabla} V$ teriminin belirttiği yük toplanması ve $\partial \vec{A} / \partial t$ teriminin belirttiği zamanla değişen manyetik alandan kaynaklanır. \vec{B} ve \vec{A} 'ya bağlı olduğu için \vec{E} ve \vec{B} çiftlenimlidir.

Denklem (3.10)'daki elektrik alana iki kısımdan oluşmuş gibi bakılabilir: ilk kısım ρ yük dağılımından ileri gelen $-\vec{\nabla} V$, ikinci kısım zamanla değişen \vec{J} akımından kaynaklanan $\partial \vec{A} / \partial t$ 'dir.

Belli bir bölgede bulunan sürekli yük dağılımının elektrik potansiyeli, yük eleman katkısının yüklü bölge üzerinden integrali ile elde edilir [2]. Hacimsel bir yük dağılımı için

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{V'} \frac{\rho}{R} d v' \quad (3.11)$$

ifadesi kullanılır ve (3.11) ile A bulunur.

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{v'} \frac{J}{R} d v' \quad (3.12)$$

Bununla birlikte önceki iki denklem durağan koşullarda elde edilmişlerdir ve V ve A için sırasıyla Poisson denklemleri (3.13) ve (3.14)

$$\nabla^2 \vec{V} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{V} = \left(\vec{a}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{a}_y \frac{\partial}{\partial y} + \vec{a}_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \cdot \left(\vec{a}_x \frac{\partial V}{\partial x} + \vec{a}_y \frac{\partial V}{\partial y} + \vec{a}_z \frac{\partial V}{\partial z} \right) \quad (3.13)$$

ve

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \quad (3.14)$$

nin çözümleri olarak verilmişlerdir. Bu çözümler ρ ve J zamanın fonksiyonu olabildiklerinden zamana bağlı olabilirler, fakat zamanla değişen elektromanyetik alanların sonlu yayılma hızı ile ilgili gecikme etiketleri önemsenmez.

$\vec{B} = \vec{\nabla} \Delta \vec{A}$ ve, (3.9), (3.2)'de yerine konulsun ve $\vec{H} = \vec{B} / \mu$ ve $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ yapısal bağıntıları kullanılsın. Böylece,

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \mu \vec{J} + \mu \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{-\nabla V - \partial \vec{A}}{\partial t} \right) \quad (3.15)$$

$\nabla \times \nabla \times A$ vektör özdeşliği kullanıldığında (3.15), (3.16) şeklinde ifade edilebilir.

$$\vec{\nabla}^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} + \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t}) \quad (3.16)$$

Burada ϵ değeri elektriksel geçirgenliği ifade etmektedir. Bir vektörün tanımı vektörün hem rotasyonelinin hem de diverjansının belirtilmesini gerektirir. \vec{A} 'nın rotasyoneli $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 'deki \vec{B} 'yi göstermekle birlikte \vec{A} 'nın diverjansı yine de serbestçe seçilebilir;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \mu \epsilon \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.17)$$

ve buradan

$$\nabla^2 \vec{A} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -\mu \vec{J} \quad (3.18)$$

V skaler potansiyeli için uygun dalga denklemi, (3.10), (3.3)'te yerine konularak elde edilebilir:

$$-\vec{\nabla} \cdot \epsilon (\nabla V + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = \rho \quad (3.19)$$

Sabit eleman için:

$$\vec{\nabla}^2 V + \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.20)$$

(3.17) denklemini kullanarak (3.21) elde edilir.

$$\nabla^2 \vec{V} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.21)$$

3.3 ZAMANLA DEĞİŞEN ALANLAR VE MAXWELL DENKLEMLERİ

H ve B arasındaki ilişki (3.22)'deki gibi ifade edilebilir [2].

$$H = \frac{1}{\mu} B \quad (3.22)$$

Statik durumda (zamanla değişmeyen) elektrik alan vektörleri \vec{E} ve \vec{D} ve manyetik alan vektörleri \vec{B} ve \vec{H} 'nin bağımsız ayrı çiftler oluşturdukları görünür. Başka bir deyişle

elektrostatik modeldeki \vec{E} ve \vec{D} , manyetik durağan alan manyetostatik modeldeki \vec{B} ve \vec{H} ile bağlantılı değildir. İletken bir ortamda durağan elektrik ve manyetik alanların her ikisi de var olabilirler ve bir elektriksel durağan alan oluştururlar. İletken bir ortamda durağan bir elektrik alan kararlı bir akımın doğmasına neden olur ve bu da durağan bir manyetik alana yol açar. Ancak, elektrik alan durağan elektrik yüklerden veya potansiyel dağılımından tamamıyla belirlenebilir. Manyetik alan bir sonuçtur; elektrik alanın hesabına girmez.

Elektromanyetik olayları zamanla değişme koşullarında açıklamak için elektrik alan vektörleri \vec{E} ve \vec{D} 'nin manyetik alan vektörleri \vec{B} ve \vec{H} 'ye tam olarak bağlandığı bir elektromanyetik model oluşturmak gerekir.

3.4 FARADAY ELEKTROMANYETİK İNDÜKSİYON YASASI

Elektromanyetik kuramda büyük ilerleme 1831'de Michael Faraday'ın deneysel olarak iletken bir halkadan geçen bir manyetik akının değişmesiyle, halkada etkiyle bir akımın oluşmasını keşfetmesiyle yapıldı. Etkiyle oluşan emk ile akı değişim hızı arasındaki deneysel gözleme dayanan nicel bağıntı Faraday yasası olarak bilinir. Bu bir deneysel yasadır ve önerme olarak göz önüne alınır ancak elektromanyetik indüksiyon kuramının geliştirilmesi için sonlu bir halka ile ilgili deneysel bağıntı başlangıç noktası olarak alınmayacaktır. Elektromanyetik indüksiyon için temel önerme (3.1)'de Faraday Yasası ifade edilmiştir.

Bir nokta fonksiyon bağıntısını belirtir; yani boş uzayın veya bir maddesel ortamın her noktasına uygulanabilir. Zamanla değişen manyetik akı yoğunluğu bölgesinde elektrik alan şideti korunumsuzdur ve bir skaler potansiyelin gradyenti olarak ifade edilemez [2].

3.5 ZAMANLA DEĞİŞMEYEN MANYETİK ALAN PROBLEMLERİ

Yükleri gözlem noktasına göre sabit hızla hareket eden, yani kaynağı doğru akım olan alanlara zamanla değişmeyen manyetik alan denir. Zamanla değişmeyen manyetik alan problemlerinde, girdap akımlarının ihmal edildiği, zamana bağımlılığın göz önüne alınmadığı basit düzeydeki manyetik alan problemleri incelenir [2].

$B_r=0$ durumunu göz önüne alarak temel denklemler:

$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$, $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 'dir. Bu eşitlikleri kullanarak;

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (3.23)$$

veya

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} - \mu \vec{J} = 0 \quad (3.24)$$

Elde edilebilir. Coulomb yasasına uygun olarak (3.24) aşağıdaki (3.25) şeklinde ifade edilebilir.

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} - \mu \vec{J} = 0 \quad (3.25)$$

$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$ olduğu daha önce de ifade edilmişti. Buna göre;

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu \vec{J} \quad (3.26)$$

biçimini alır. Ancak ferromanyetik malzemelerin çoğu doğrusal karakteristiğe sahip değildir. Yine de doymaya ulaşılan kadar geçirgenlik μ sabit olarak kabul edilebilir.

İki farklı manyetik ortamın ara kesitinde

$$\vec{H}_{t1} = \vec{H}_{t2} \quad (3.27)$$

$$\mu_1 \vec{H}_{n1} = \mu_2 \vec{H}_{n2} \quad (3.28)$$

bağıntıları geçerlidir.

3.6 ZAMANLA DEĞİŞEN MANYETİK ALAN PROBLEMLERİ

Elektriksel yükleri zamanla değişen alanlara dinamik manyetik alan denir. Bu alandaki durum magnetostatik duruma benzemektedir. Ancak tek fark girdap akımlar gibi veya indüklenen akımlar gibi zamana bağlı olayların göz önüne alınmasıdır. Bu durum birçok elektromekanik problem için geçerlidir. Transformatörler, elektrik motorları ve jeneratörler gibi manyetik aygıtlar ve manyetik alanı zamanla değişen problemler bu duruma örnek olarak gösterilebilir.

Statik manyetik alanlar için geçerli olan $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ denklemleri zamanla değişen manyetik alanlar için de geçerlidir. $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ olduğundan elektrik alanı (3.10)'daki gibi ifade edilebilir. Buradan;

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \epsilon \frac{\partial}{\partial t} \left(-\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) + \vec{J} \quad (3.29)$$

veya

$$-\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} - \vec{\nabla} \left(\frac{\partial}{\partial t} \epsilon \mu V \right) - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + \mu \vec{J} = 0$$

olur. A vektörünün diverjansı aşağıdaki gibi

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{A} + \epsilon \mu \frac{\partial}{\partial t} V = 0 \quad (3.30)$$

kabul edilebilir. Bu durumda ; (3.18) ifadesi görülür. Zamanla değişmeyen manyetik alanlarda olduğu gibi ortamın lineer malzeme olduğu kabul edilir. Ara kesitlerde ise koşullar zamanla değişmeyen manyetik alanlardaki gibidir [2].

BÖLÜM 4

MANYETİK DEVRE

4.1 TOROİDAL TRANSFORMATÖRLER

Çeşitli formlarda üretilebilen toroidal nüve, iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan yüksek güçlü transformatörlerden güç elektroniğine ve hatta tıbbi sistemlere kadar geniş kullanım alanları vardır.

Toroidin içindeki manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan büyüklüğü ile ilgili denklemler Maxwell denklemleri ve Stoke teoremi uygulanarak elde edilir. [15]

$$\oint_S (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (4.1)$$

Bu teorem, ortamda toroidin üzerinde manyetik akı oluşturacak bir değişken elektrik alanı olmayan durumlar için uygulanırsa;

$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} = \oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = I \quad (4.2)$$

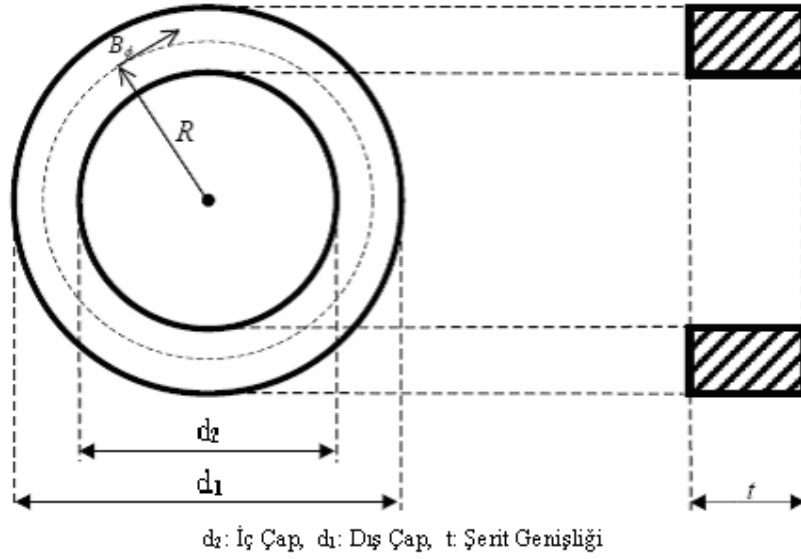
elde edilir. Yukarıdaki denklem N sarımlı bir bobine uygulanırsa;

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = N.I_0 \quad (4.3)$$

ve

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu.N.I_0 \quad (4.4)$$

ifadeleri elde edilir. Yukarıdaki denklem toroid için açık bir şekilde ifade edilirse aşağıdaki şekil 4.1’de görülen kesit için toroidin içinde R yarıçapı boyunca geçecek, manyetik akının büyüklüğü silindiriksel koordinat sisteminde ifade edilmiş olur [12, 15, 16,].



Şekil 4.1 Toroidin içinde manyetik akının R yarıçapı ve Φ açısına bağlı değişimi [15].

Burada $\vec{a}_\Phi : \Phi$ yönündeki birim vektör olmak üzere verilen denklemler tekrar düzenlenirse ve

$$\vec{B} = \vec{a}_\Phi B_\Phi \quad (4.5)$$

$$d\vec{l} = \vec{a}_\Phi r d\Phi \quad (4.6)$$

denklemleri yardımıyla

$$\oint_C \vec{a}_\Phi B_\Phi \cdot \vec{a}_\Phi r d\Phi = \mu NI \quad (4.7)$$

denklemini elde edilir. Buna göre r ve B_Φ 'nin Φ 'e göre değiştiği kabul edilirse; $B = \frac{\mu NI}{2\pi r}$

ifadesi elde edilir. Buna göre manyetik akı yoğunluğu ve manyetik alan büyüklüğü tekrar vektörel olarak ifade edilirse:

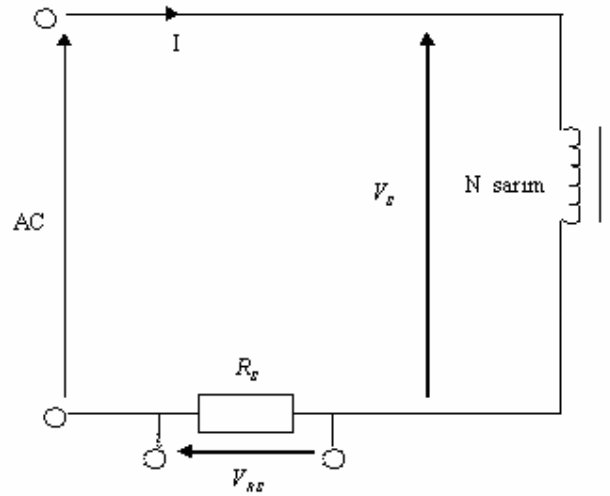
$$\vec{H} = \vec{\alpha}_\phi \frac{NI}{2\pi\rho} \quad (4.8)$$

$$\vec{B} = \vec{\alpha}_\phi \frac{\mu NI}{2\pi\rho} \quad (4.9)$$

denklemleri elde edilir.

4.2 BESLEME GERİLİMİ VE AKIMIN ELDE EDİLMESİ

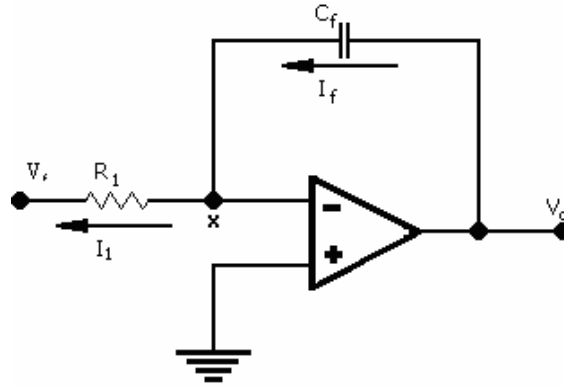
Bir manyetik malzemenin beslediği gerilim ve çektiği akımın zamana göre değişimi, osiloskoptan izlenebilir. Osiloskop gerilim gösteren cihaz olduğundan besleme gerilimi V_s 'nin dalga şekli direkt bağlantı ile görülebilir. Çekilen akımın görülebilmesi için dirençten faydalanılır. Çekilen akım, direnç üzerinde kendisi ile aynı fazda bir gerilim meydana getirir. Böylece çekilen akım osiloskoptan izlenebilir. Seçilen direnç 1Ω olursa, manyetik malzemenin çektiği akım osiloskopta görülen 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 4.2'de besleme geriliminin ve akımının zamana göre değişiminin osiloskopta çizdirilmesi için kullanılabilecek bir devreye yer verilmiştir.



Şekil 4.2 Besleme geriliminin ve akımının zamana göre değişiminin osiloskopta çizdirilmesi için kullanılabilecek bir devre [20].

4.3 DEMİR KAYIPLARININ BULUNMASI

Bir manyetik malzemeye ait zamanla değişen manyetik akı yoğunluğu $B(t)$ ve manyetik alan şiddeti $H(t)$, orantılı gerilimler sağlandığı takdirde osiloskoptan izlenebilir. B-H eğrisi manyetik alan şiddetinin manyetik akı yoğunluğuna göre çizimi, belli bir manyetik akı yoğunluğu değerinde sekonder sargılarda indüklenen gerilimin bir integratör devre yardımıyla integre edilmesiyle gerçekleştirilebilir [20].



Şekil 4.3 Histerezis kapalı eğrisinin elde edilebilmesi için kullanılacak bir integral alıcı devre.

Şekil 4.3'teki integral alıcı devrenin giriş gerilimi sekonder sargılarda indüklenen gerilimdir.

N sarımlı manyetik çekirdek sinüzoidal V_s gerilimi ile beslendiğinde sarımda indüklenen gerilim, $V(t) = N \frac{d\Phi(t)}{dt}$ ve çekirdekte oluşan akı yoğunluğu, $B(t) = \frac{\Phi(t)}{dt}$ 'dir. Sargı direnci yeterince küçükse ihmal denebilir ve besleme gerilimi indüklenen gerilime eşit olur. Böylece akı yoğunluğu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$B(t) = \frac{1}{A_c \cdot N} \int V_s \cdot dt \quad (4.10)$$

Burada $B(t)$, A_c , N ve V_s , sırasıyla manyetik akı yoğunluğu, manyetik nüvenin kesit alanı, primer sarım sayısı ve devrenin giriş gerilimidir.

Yukarıdaki denklemdeki V_s geriliminin integrali yukarıdaki şekildeki RC devresinden elde edilebilir. Eğer $\gg X_c = 1/\omega C$ ise kondansatörden geçen akım için, $I_c = \frac{V_s}{R_1}$ yazılabilir. Böylece kondansatör gerilimi,

$$V_c = \frac{1}{R_1 \cdot C} \int V_s \cdot dt \quad (4.10)$$

olarak bulunur. Devre, sinüzoidal bir kaynaktan beslendiğinde manyetik akı yoğunluğu için aşağıdaki ifade elde edilir.

$$B = \frac{R_1 \cdot C}{N \cdot A} \cdot V_c \quad (4.11)$$

Burada A_c akı yoluna dik olan etkin kesit, C kondansatörün sığa değeri, R_1 omik direnç değeri, V_c kondansatör üzerindeki gerilim olarak verilmektedir. Yukarıdaki denklemden anlaşılacağı üzere manyetik akı yoğunluğu kondansatör üzerindeki gerilimle doğru orantılıdır. İstenirse devrede RC elemanları kullanılmadan da B değerleri bulunabilir. Yukarıdaki denklemlerden akı yoğunluğunun besleme geriliminin integrali ile doğru orantılı olduğu görülür. Besleme gerilimi sinüzoidal olduğu takdirde akı yoğunluğu da sinüzoidal olacaktır. Fakat akı yoğunluğu 90° faz farkına sahip olacaktır. Besleme geriliminin ani değeri bilinirse, ani değerinin integrali alınıp sayım sayısı ile etkin kesite bölüldüğünde akı yoğunluğunun ani değeri bulunur. Manyetik alan şiddeti için de yukarıdakine benzer bir ifade bulunabilir. Genel amper-sarım yasasından, $H = \frac{N \cdot I}{lc}$ yazılabilir. Burada lc, ortalama manyetik yoldur. Direnç üzerindeki gerilim,

$V_{RS} = I \cdot R_s$ 'dir. Bir önceki denklemdeki akım yerine yukarıdaki akım ifadesi yazılıp manyetik alan şiddeti çekilirse;

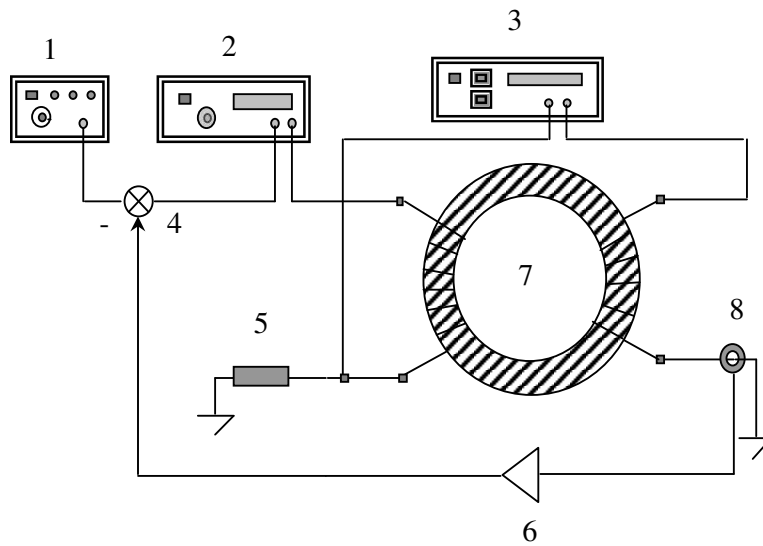
$$H = \frac{N}{R_s \cdot I_c} V_{RS} \quad (4.12)$$

bulunur. Yukarıdaki denklemden manyetik alan şiddetinin 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 direncindeki gerilim düşümünün ise besleme gerilimi V_s yeterince küçük olmalıdır.

Çekirdek kaybının bulunmasında elektriksel büyüklüklerden faydalanılabilir. 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 [20]. Çekirdeğin çektiği elektriksel gücün bulunmasında iki yöntem kullanılabilir.

1. Besleme geriliminin sinüzoidal olması durumunda, akımın ve gerilimin efektif değeri ve bir $\cos \Phi$ metre yardımı ile aralarındaki açı bulunur. Çarpımları çekilen gücü verir.
2. Dijital osiloskop yardımıyla besleme gerilimi ve akımın ani değerleri örneklenir. Gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımı ani gücü, bir periyot için ortalaması ise çekilen ortalama gücü verir.
3. Ölçme devresi olarak manyetik malzemenin B-H kapalı eğrisinin çıkarılması için Şekil 4.2, çekirdek kaybının çıkarılması için de Şekil 4.3 kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekilde deneylerde kullanılan deney setinin şematik gösterimi ifade edilmiştir.



Şekil 4.4 Deney düzeneğinin şematik gösterimi [3].

Şekil 4.4'te verilen deney düzeneği için kullanılan cihazlar ve aygıtlar aşağıda listelenmiŐtir.

- (1) Sinyal Üretci (GW Instek GFG-8255A)
- (2) Güç Yükselteci (QSC-RMX2450)
- (3) Sayısal Osiloskop (GW Instek GDS-806S)
- (4) Toplayıcı İşlemsel Kuvvetlendirici Devresi
- (5) Direnç (1Ω)
- (6) Gerilim Yükseltici Devre
- (7) Toroidal Nüve
- (8) Transdüser (RS "Hall Effect" Gerilim Transdüseri)

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

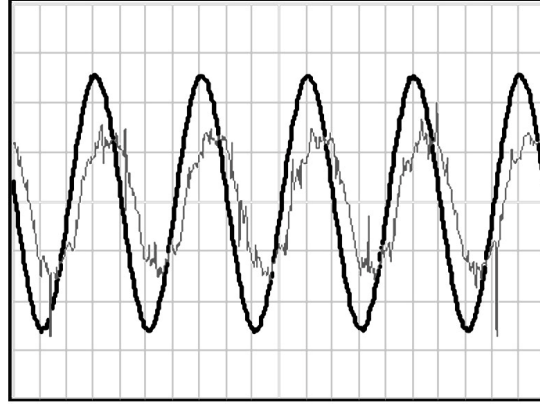
Yapılan çalışmada kullanılan non-oriented (tanecikleri yönlendirilmemiş) %3 oranında silisyum alaşımlı elektrik çeliğinden yapılan 1,3 kg ağırlığındaki toroidal nüveye 25, 50, 75 ve 100 Hz frekanslarda üçgen, sinüzoidal ve kare dalga şeklinde, manyetik alan yoğunluğunu 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, ve 1.7T olarak sağlanacak şekilde gerilim uygulanmıştır.

Toroidal nüvenin primer ucuna 1 Ω 'luk bir direnç bağlanmıştır. Devreye bir sinyal jeneratöründen alınan gerilim güç yükselteç ile kuvvetlendirilerek verilmiştir. Gerekli ölçü aletleri ve osiloskop da bağlanarak istenilen ölçümlerin sağlıklı bir biçimde yüksek hassasiyet ile yapılması ve ölçümlerin osiloskoptan da bir arayüz programı ve RS-232 bağlantısı vasıtasıyla bilgisayar ekranında izlenmesi sonucu dalga şekilleri elde edilmiştir.

İlk olarak sinüzoidal gerilim dalga şekliyle 25 Hz frekansta enerjilendirilen toroidal nüvenin manyetik akı ve alan yoğunluğu değişimi aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Burada Manyetik akı yoğunluğu 0,5 T, akımın rms (root mean square değeri) 43mA, gerilimin rms değeri 9,095 V, gerilim ve akım arasındaki faz farkı $\alpha=32,4^\circ$, harcanan aktif güç 0,329 W/kg, ve harcanan güç 0,39 VA olarak tespit edilmiştir.

Osiloskoptan elde edilen dalga şekillerinin hepsinde açık renkte ve ince çizgiyle ifade edilen dalga şekilleri manyetik akı yoğunluğunu, daha koyu renk ve daha kalın çizgiyle ifade edilen dalga şekilleri ise manyetik alan yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu dalga şekilleri sayısal osiloskoptan alındığı için yatay ve dikey eksen bilgileri verilememiştir. Bu yüzden, bütün bu bahsi geçen şekillerde dikey eksen, gerilim ve akımın genliğini, yatay eksen ise zamanı göstermektedir.

Şekil 5.1'de sinüzoidal ve 25 Hz frekansta mıknatıslanmış nüveye ait dalga şekilleri gösterilmiştir.

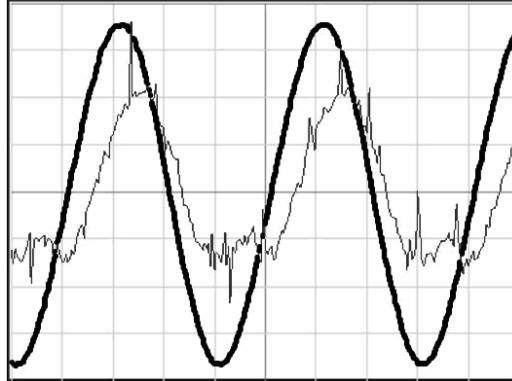


Şekil 5.1 0.5T, 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.1 0.5T, 25 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
0.5	43	9.095	32,4°	0.329	0.39

Çizelge 5.1'de verilen değerler ve şekilde elde edilen dalga şekilleri 25 Hz sinüzoidal uyarım altında mıknatıslandırılmış 0.5 T manyetik akı yoğunluğuna sahip toroidal nüveye aittir. Şekil 5.2'deki dalga şekilleri ise aynı toroidal nüvenin, yine aynı frekans ve dalga şekli, fakat 0.7 T manyetik akı sağlayacak şekilde mıknatıslanması ile elde edilmiştir.

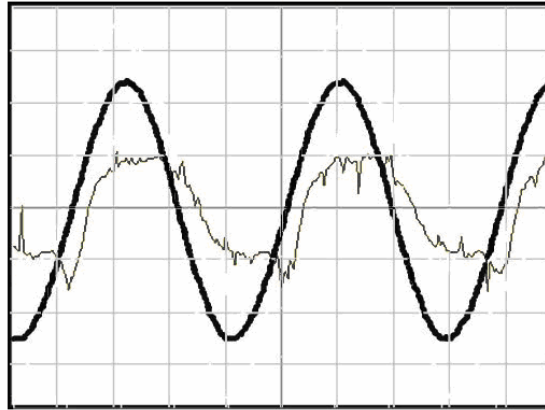


Şekil 5.2 0.7T, 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.2 0.7T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
0.7	52	12.733	25.2°	0.598	0.662

Çizelge 5.2'de ve şekil 5.2'de verilen değerler ve dalga şekilleri 0.7 T manyetik akı yoğunluğuna sahip toroidal nüveye aittir. Şekil 5.3 ve çizelge 5.3'te ise aynı toroidal nüve aynı frekans ve dalga şekli ile fakat 1T manyetik akı sağlayacak şekilde mıknatıslanmıştır.

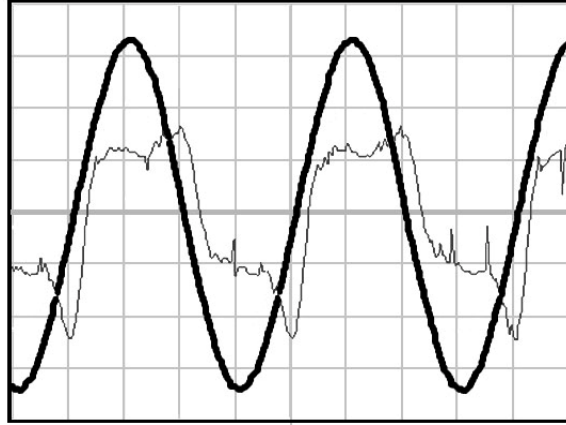


Şekil 5.3 1T, 25 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.3 1.0T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
1.0	63	18.190	23.85°	1.048	1.147

Şekil 5.3 ve Çizelge 5.3'te 1T manyetik akı yoğunluğu elde etmek için mıknatıslanan toroidal nüve, 1.3T manyetik akı yoğunluğu elde etmek amacıyla mıknatıslandığında ise aşağıdaki çizelge 5.4 ve şekil 5.4 elde edilmiştir.

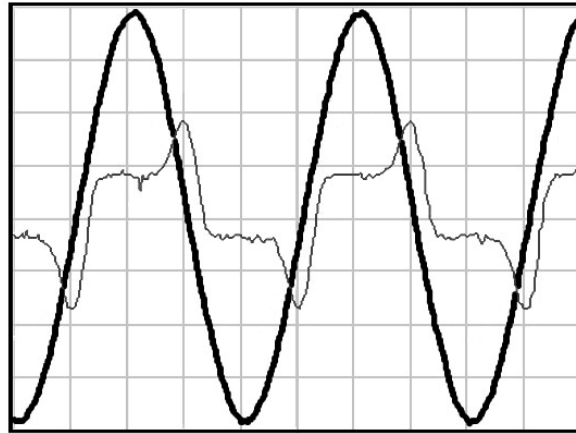


Şekil 5.4 1.3T, 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.4 1.3T, 25 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
1.3	88	23.647	23.4°	1.908	2.080

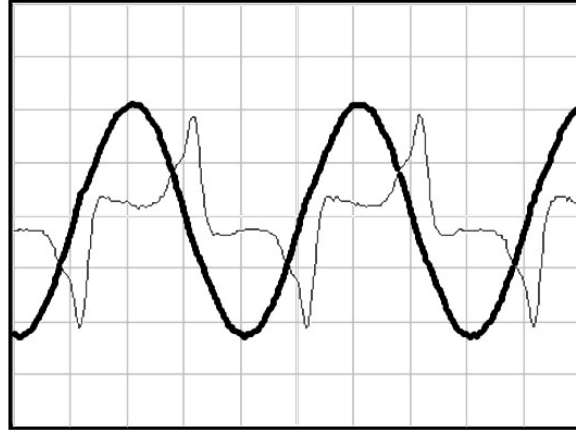
Şekil 5.5 ve çizelge 5.5'te ise, kullanılan toroidal nüve 1.5T manyetik akı yoğunluğu elde etmek amacıyla mıknatıslandığında elde edilen sonuçlar verilmiştir.



Şekil 5.5 1.5T, 25 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.5 1,5T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
1.5	184	27.285	21.6°	4.667	5.02

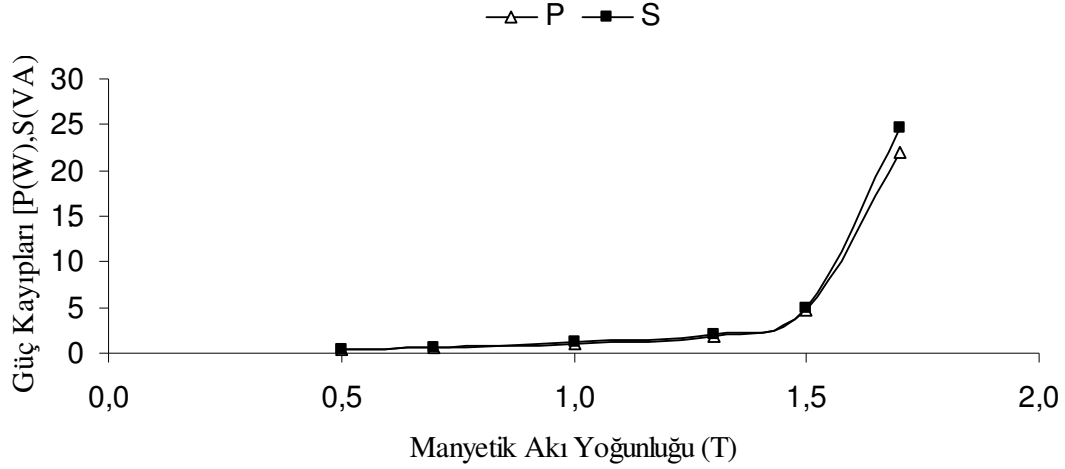


Şekil 5.6. 1.7T , 25 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.6 1.7T, 25 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
1.7	800	30.923	27°	22.045	24.739

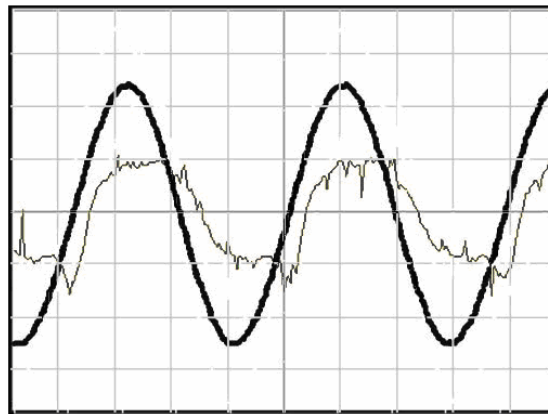
Şekil 5.6 ve çizelge 5.6'da elde edilen değerler ve dalga şekilleri, toroidal nüve 1.7T manyetik akı yoğunlu elde edilecek şekilde enerjilendirildiğinde elde edilmiştir.



Şekil 5.7 25 Hz sinüzoidal uyarım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

Şekil 5.7’de 25 Hz sinüzoidal uyarım altında enerjilendirilen sargılı toroidal nüvenin, manyetik akı yoğunluğu ile güç kaybı değerlerinin karşılaştırılması ifade edilmiştir. Şekil 5.7’den de görülmüş olduğu gibi manyetik akı yoğunluğu arttırıldıkça toroidal nüvede güç kayıpları giderek artmaktadır.

Şekil 5.8 ve çizelge 5.7’de ise yine sinüzoidal dalga şekli ile 0.5T manyetik akı yoğunluğu elde edilecek şekilde, fakat 50 Hz mıknatıslanma frekansı ile enerjilendirilmiş toroidal nüvenin deneysel sonuçları sunulmuştur.

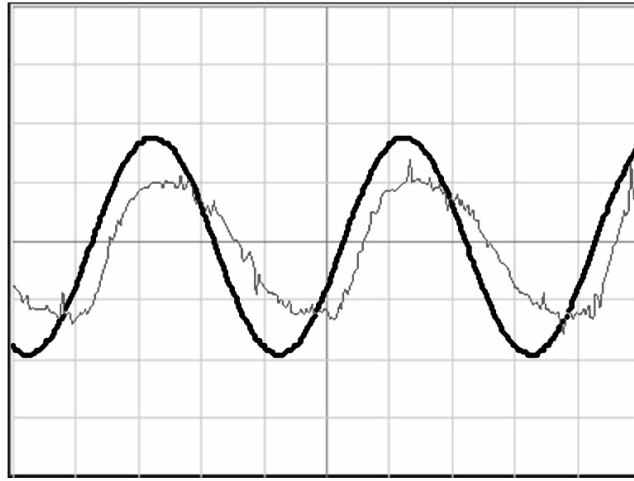


Şekil 5.8 0.5T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.7 0.5T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
0.5	50	18.190	32.4°	0.767	0.909

Çizelge 5.7 ve şekil 5.8'de 50 Hz mıknatıslanma frekansında sinüzoidal dalga şekli ile 0.5T manyetik akı yoğunluğu elde edilecek şekilde manyetize edilmiş toroidal nüvenin değerleri görülmektedir. Şekil 5.9 ve çizelge 5.8'de ise bu kez aynı frekans ve dalga şeklinde fakat bu kez 0.7T manyetik akı yoğunluğu elde etmek amacıyla mıknatıslandırılmış toroidal nüvenin değerleri yer almaktadır.

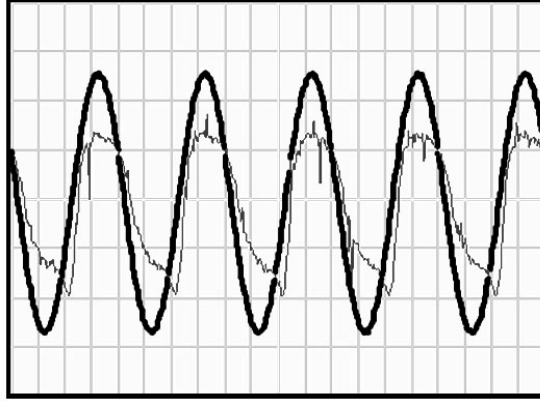


Şekil 5.9 0.7T, 50 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.8 0.7T, 50 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
0.7	56.540	25.466	25.2°	1.303	1.440

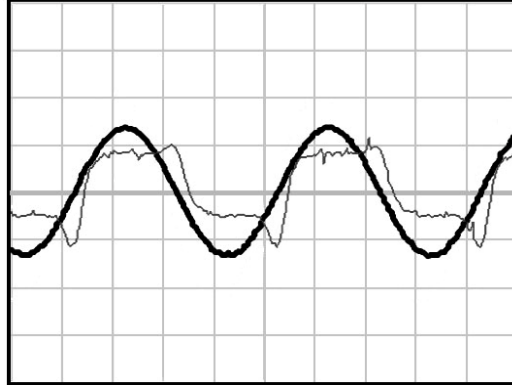
Çizelge 5.9 ve şekil 5.10'da ifade edilen değerler ise 1.0T manyetik akı yoğunluğu altında elde edilmiştir.



Şekil 5.10 1T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.9 1.0T, 50 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.0	75	36.380	19.8°	2.568	2.729

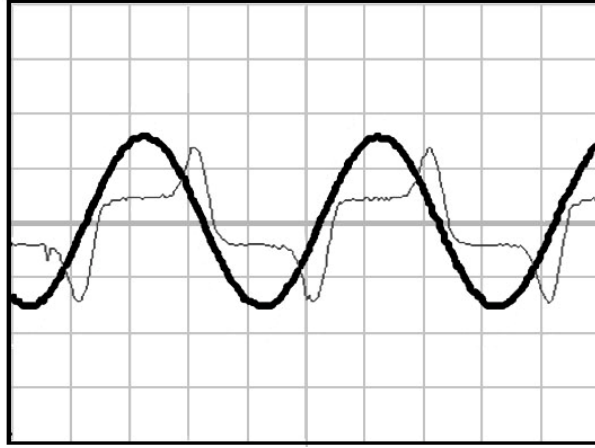


Şekil 5.11 1.3T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.10 1.3T, 50 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.3	104	47.294	18°	4.978	4.919

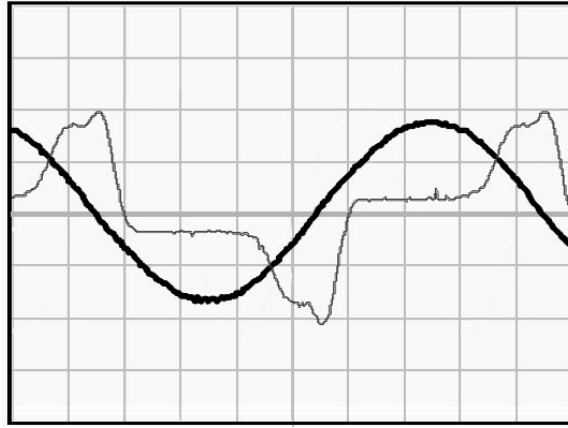
Şekil 5.11'de 1.3 T manyetik akı yoğunluğu elde etmek üzere 50 Hz sinüzoidal gerilim dalga şekli ile mıknatıslandırılmış toroidal nüvenin manyetik akı ve alan yoğunluğu değişimi gösterilmiş ve deneyde elde edilen veriler çizelge 5.10'da sunulmuştur.



Şekil 5.12 1.5T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.11 1.5T, 50 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.5	200	54.570	17.1°	10.431	10.414

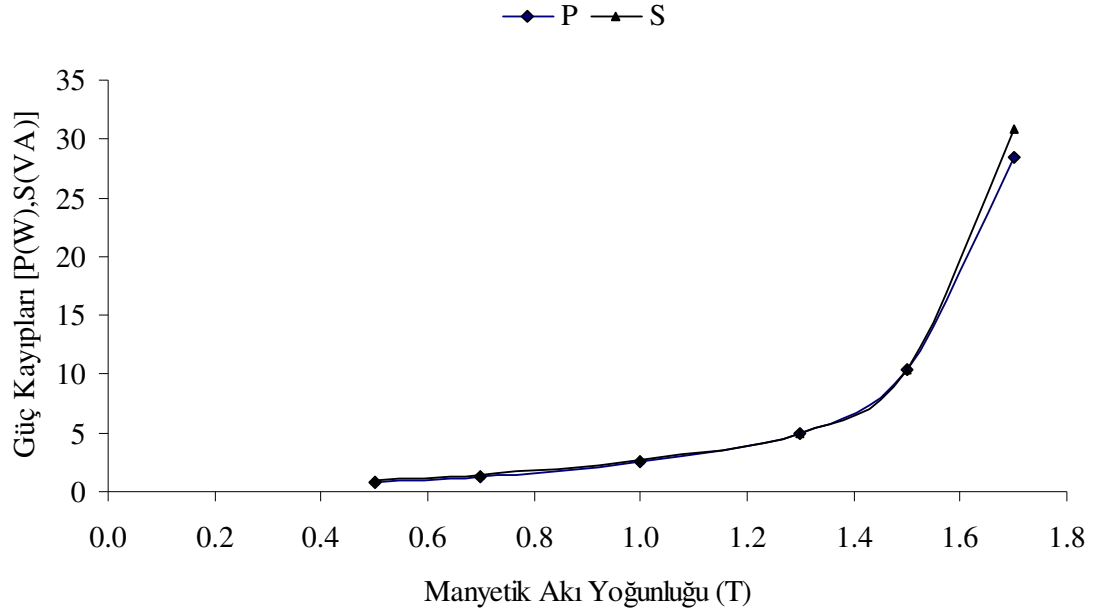


Şekil 5.13 1.7T, 50 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.12 1.7T, 50 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.7	500	61.846	23.4°	28.379	30.923

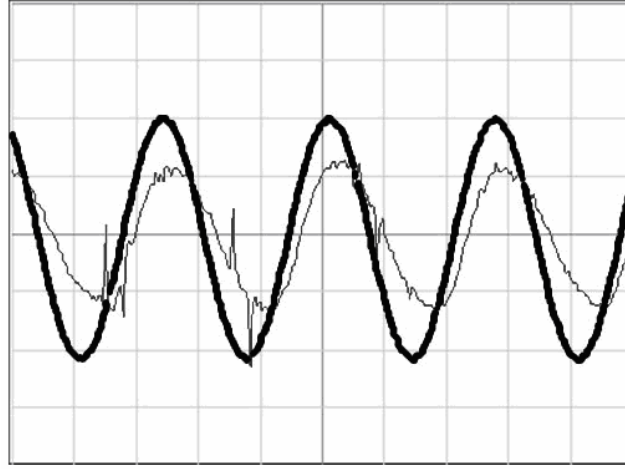
Çizelge 5.12 ve şekil 5.13’de 1.7T ve 50 Hz sinüzoidal uyartım altında elde edilen sonuçlar ifade edilmiştir. Şekil 5.14’te ise 50 Hz sinüzoidal uyartım altında elde edilen sonuçlara göre manyetik alan yoğunluğu ile güç değerlerinin karşılaştırılmasını ifade eder.



Şekil 5.14 50 Hz sinüzoidal uyartım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

Bu grafikten de görüldüğü gibi manyetik akı yoğunluğu değeri arttıkça güç değerlerinde artış görülmektedir. Daha önceki bölümlerde ifade edilen histerezis kaybı, girdap akımları ve fazladan girdap akımları (eksess) kayıplarının formüllerine bakıldığında beklendiği gibi, demir kayıplarındaki artış B_m değeri arttıkça giderek yükselen bir trend izlemiştir.

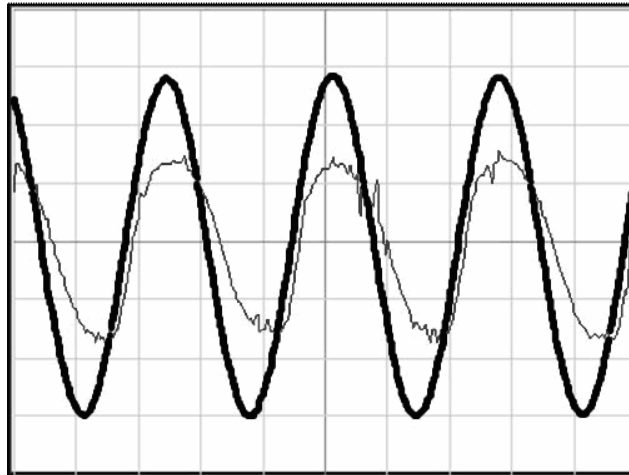
Şekil 5.15 ve Çizelge 5.13’te ise 0.5T manyetik alan yoğunluğu altında 75 Hz mıknatıslanma frekansında elde edilmiş dalga şekilleri ve deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.15 0.5T, 75 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.13 0.5T, 75 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
0.5	60	27.285	22.8°	1.509	1.637

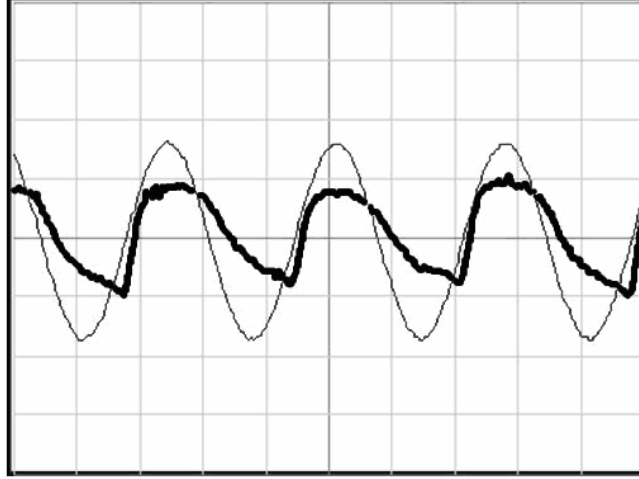


Şekil 5.16 0.7T, 75 Hz sinüzoidal uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.14 0.7T, 75 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	P(W)	S(VA)
0.7	73	38.199	19.2°	2.634	2.789

Şekil 5.16 ve çizelge 5.14 0.7T ve 75 Hz sinüzoidal uyartım altında yapılmış deney verileridir.

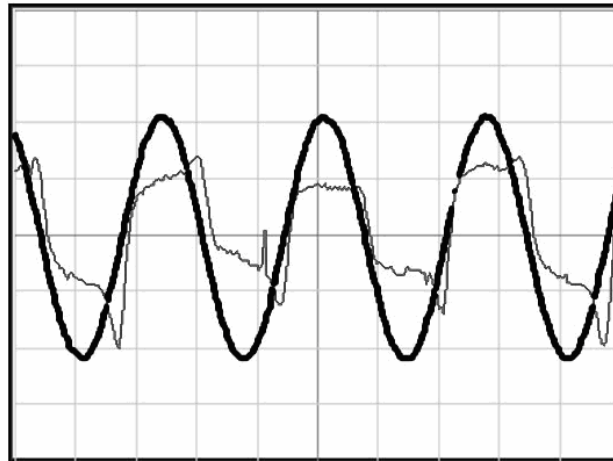


Şekil 5.17 1.0T, 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.15 1.0T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.0	92	54.570	14.4°	4.862	5.021

Şekil 5.17 ve çizelge 5.15te 1.0T ve 75 Hz sinüzoidal uyartım altında yapılmış deney verileridir sunulmuştur.

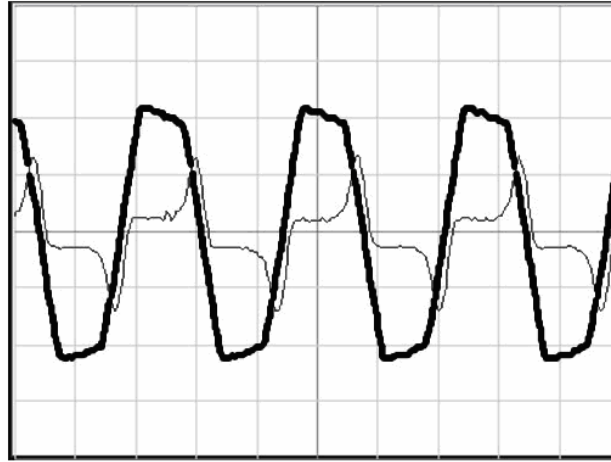


Şekil 5.18 1.3T, 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.16 1.3T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.3	140	70.941	12°	9.715	9.932

Şekil 5.18 ve Çizelge 5.16 1.0T ve 75 Hz sinüzoidal uyartım altında yapılmış deney verilerini temsil etmektedir.

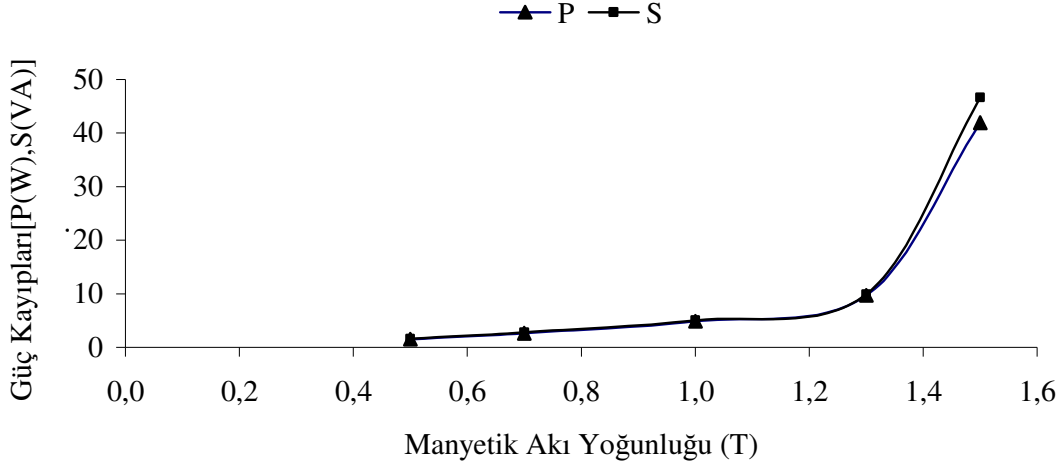


Şekil 5.19 1.5T, 75 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.17 1.5T, 75 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (rms, V)	α	P(W)	S(VA)
1.5	570	81.855	10.8°	41.931	46.657

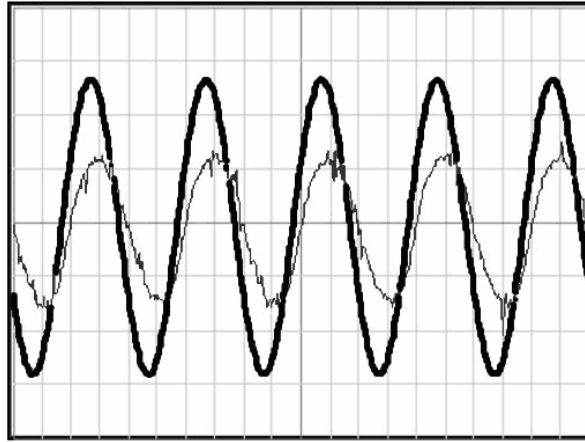
Çizelge 5.17 ve Şekil 5.19'da ise 75 Hz ve 1.5 T'de yapılan deneyin sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5.20 75 Hz sinüzoidal uyartım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

Yukarıda 75 Hz sinüzoidal uyartım altında nüvenin manyetik akı yoğunluğu ile güç kayıplarının karşılaştırılması grafik yardımıyla ifade edilmiştir. Şekil 5.20’de de beklenildiği gibi manyetik akı yoğunluğu arttıkça güç kayıpları da artmaktadır. Bu durum (2.3), (2.12) ve (2.13)’te de ifade edilen kayıp denklemlerini doğrular.

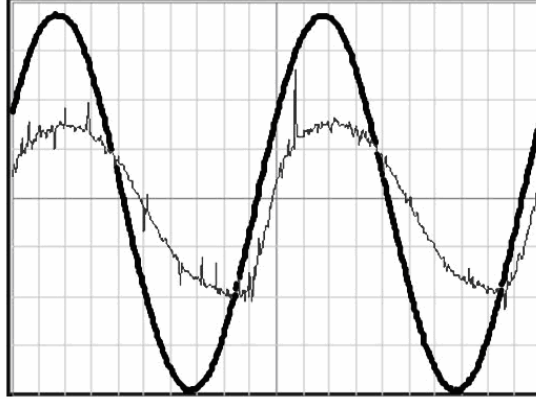
Şekil 5.21 ve Çizelge 5.18’de 100Hz sinüzoidal mıknatıslanma frekansında 0.5T manyetik akı yoğunluğu elde etmek amacıyla mıknatıslanmış toroidal nüvenin deney sonuç ve verileri sunulmuştur.



Şekil 5.21 0.5T, 100 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.18 0.5T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
0.5	65	36.380	32.4°	1.997	2.364

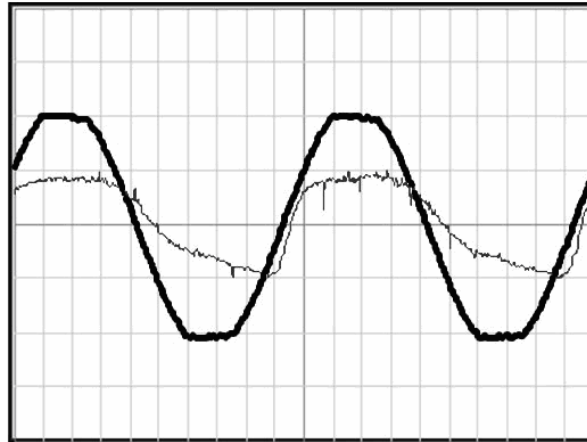


Şekil 5.22 0.7T, 100 Hz sinüzoidal uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.19 0.7T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Sinüzoidal Uyartım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
0.7	80	50.932	18°	3.875	4.074

Çizelge 5.19 ve şekil 5.22 ise 0.7T ve 100 Hz sinüzoidal uyartım altında elde edilen verileri içerir.

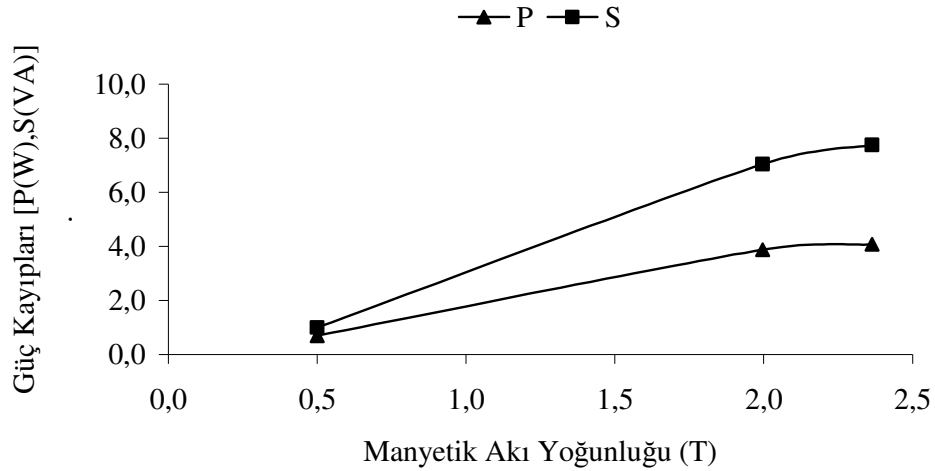


Şekil 5.23 1.0T, 100 Hz sinüzoidal uyartım altında ölçülen değerler.

Çizelge 5.20 1.0T, 100 Hz sinüzoidal uyarım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Sinüzoidal Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	P(W)	S(VA)
1.0	100	72.760	14.4°	7.046	7.758

Çizelge 5.20 ve Şekil 5.23'te ise 100Hz'de 1.0T altında yapılan deneyden elde edilen dalga şekilleri ve değerler gösterilmiştir.

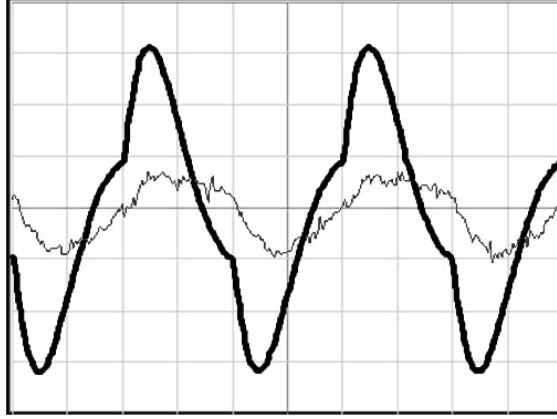


Şekil 5.24 100 Hz sinüzoidal uyarım altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

Yukarıda 100 Hz sinüzoidal uyarım altında sargılı toroidal nüvenin manyetik akı yoğunluğu ile güç kayıplarının karşılaştırılması grafik yardımıyla ifade edilmiştir.

Yukarıdaki şekiller ve çizelgelerde 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz ve 100 Hz'lik sinüzoidal gerilim dalga şekli ile değişik manyetik akı yoğunlukları altında uyarılmış toroidal nüvenin manyetik akım ve alan yoğunluğu şekilleri, faz açıları gerilim ve akım değerleri güç kaybı değerleri ve manyetik akı yoğunluklarına göre güç kayıpları karşılaştırma grafikleri verilmiştir. Bu durum (2.3), (2.12) ve (2.13)'te verilen ifadelerde frekans ve güç kayıpları arasındaki ilişkiyi doğrulayıcı niteliktedir.

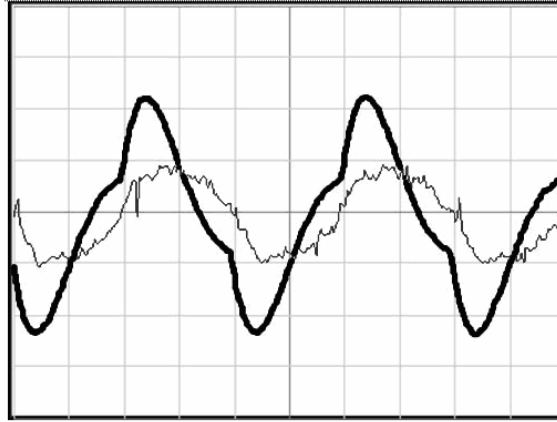
Üçgen dalga uyarımı altındaki aynı toroidal nüvenin deneysel verileri de sinüzoidal dalga şeklinde mıknatıslanmış nüve ile benzerlik gösterir. Aşağıda verilen Şekil 5.25 ve Çizelge 5.21'de 0.5T'da 25Hz üçgen dalga uyarımı altında gerçekleştirilen deneylerin verileri sunulmuştur.



Şekil 5.25 0.5T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.21 0.5T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.5	10.5	9.095	54°	0.099	9.5 V

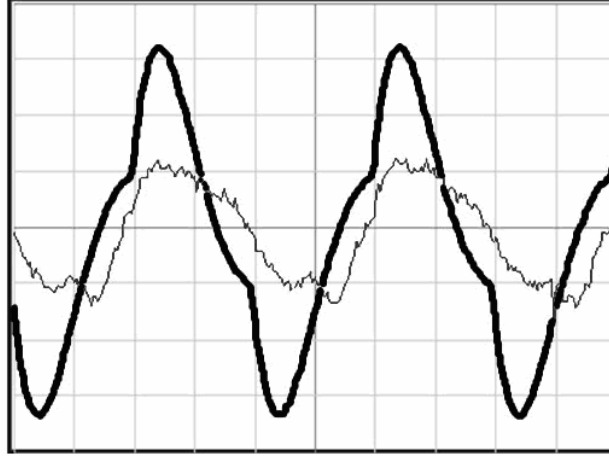


Şekil 5.26 0.7T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.22 0.7T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.7	13.5	12.733	45°	0.186	13.8 V

Çizelge 5.22 ve Şekil 5.26'da aynı toroidal nüvenin yine 25 Hz mıknatıslanma frekansında 0.7T'daki deneysel sonuçları verilmiştir.

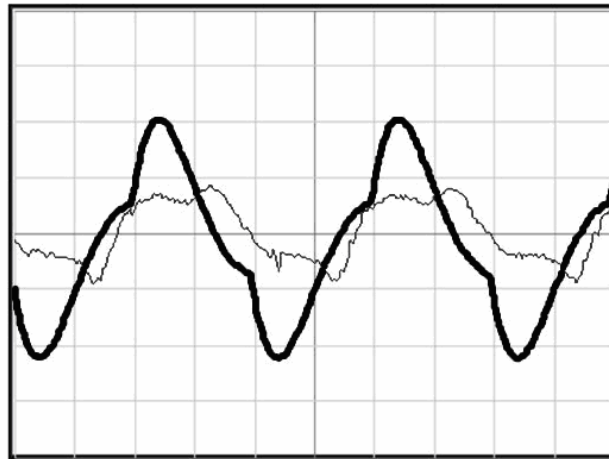


Şekil 5.27 1.0T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.23 1.0T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
B _m (T)	I (mA)	V _s (V)	α	S(VA)	V _s (RMS)
1.0	17	18.190	36°	0.336	19.8 V

Çizelge 5.23 ve Şekil 5.27 ise 1.0T ve 25 Hz üçgen dalgada elde edilen verileri içerir.

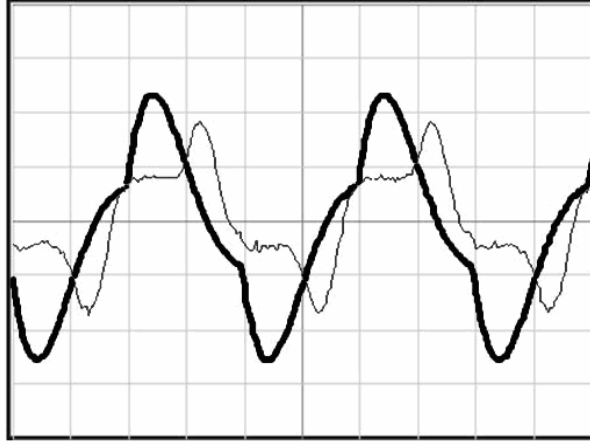


Şekil 5.28 1.3T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.24 1.3T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
1.3	26.9	23.647	31.5°	0.696	25.9 V

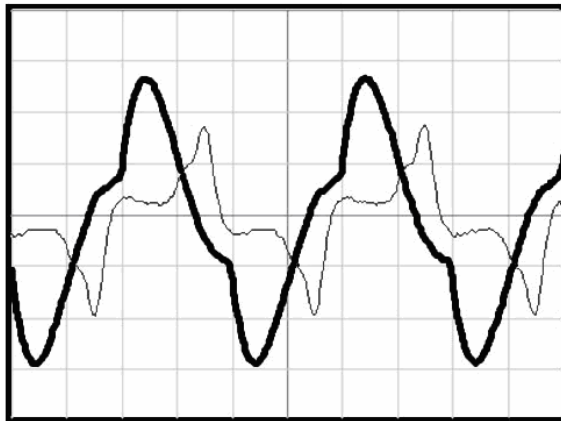
1.3T ve 25Hz üçgen dalga uyarımda elde edilen veriler Çizelge 5.24'te ve Şekil 5.28'de sunulmuştur.



Şekil 5.29 1.5T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.25 1.5T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

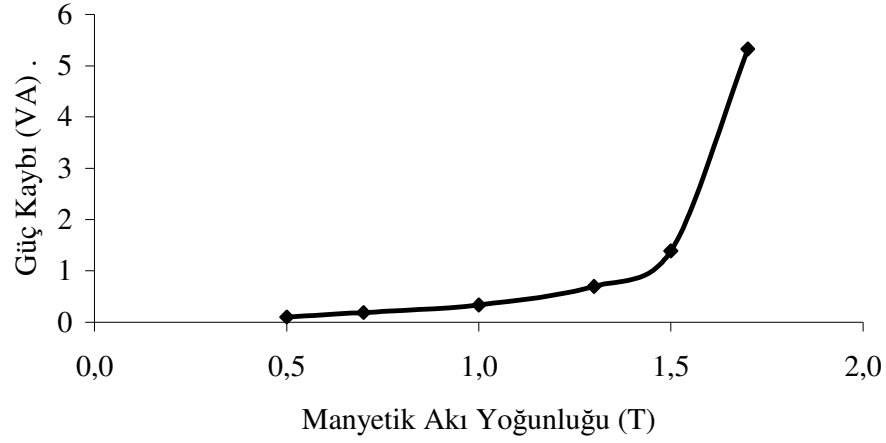
25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
1.5	47	27.285	27°	1.386	29.5 V



Şekil 5.30 1.7T, 25 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.26 1.7T, 25 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

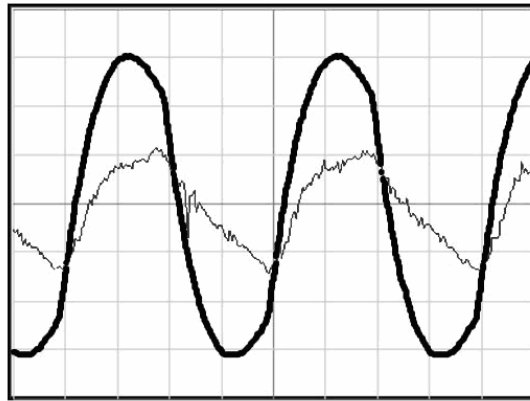
25 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
1.7	160	30.923	33.75	5.327	33.3 V



Şekil 5.31 25 Hz üçgen dalga uyarımda Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması.

Yukarıdaki şekilde de yine sinüzoidal mıknatıslanma gerilimi uygulanan sargılı toroidal nüveye ait deney sonuçları ile daha önceki bölümlerde ifade edilen formüller paralellik göstermiştir.

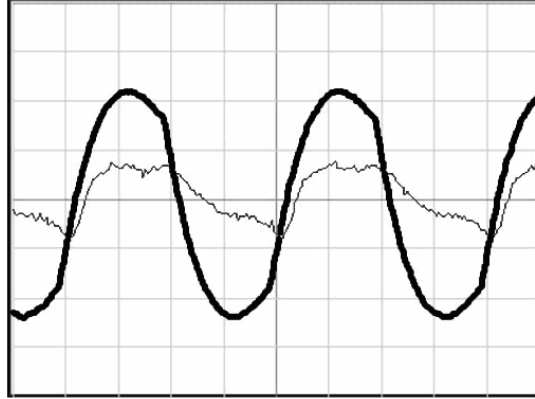
Çizelge 5.27'de verilen deney verileri ve Şekil 5.32'de 50 Hz mıknatıslanma frekansında 0.5T manyetik akı yoğunluğunda elde edilen dalga şekilleri aynı deneye aittir.



Şekil 5.32 0.5T ,50 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.27 0.5T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.5	15	18.190	23.4°	0.354	23.6 V

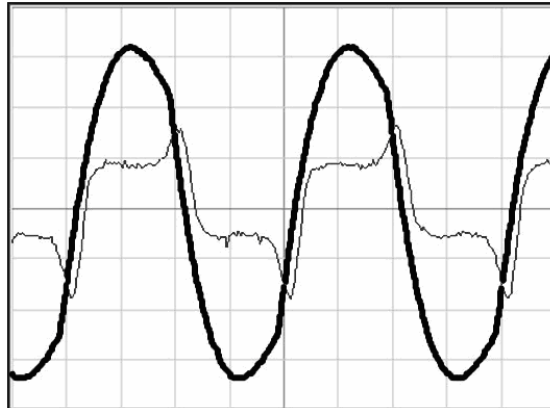


Şekil 5.33 0.7T, 50 Hz üçgen dalga uyarımında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.28 0.7T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

50 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.7	24	25.466	19.8°	0.840	35 V

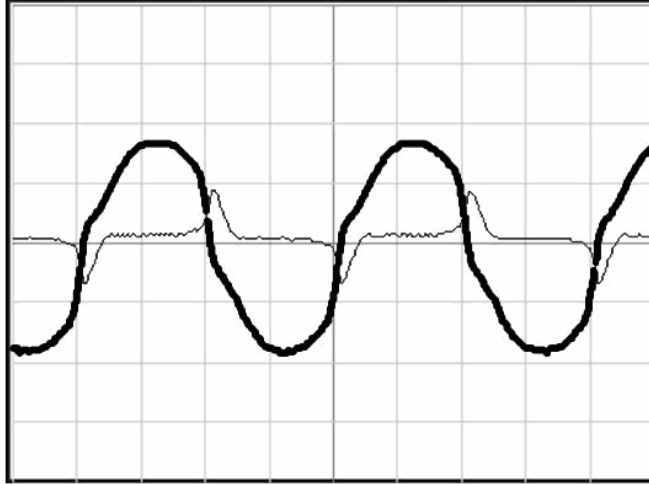
Şekil 5.33 ve Çizelge 5.28'deki veriler de üçgen dalga şekli ve 50 Hz 0.7T değerleri için elde edilmiştir.



Şekil 5.34 1.0T, 50 Hz üçgen dalga uyarımında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.29 1.0T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

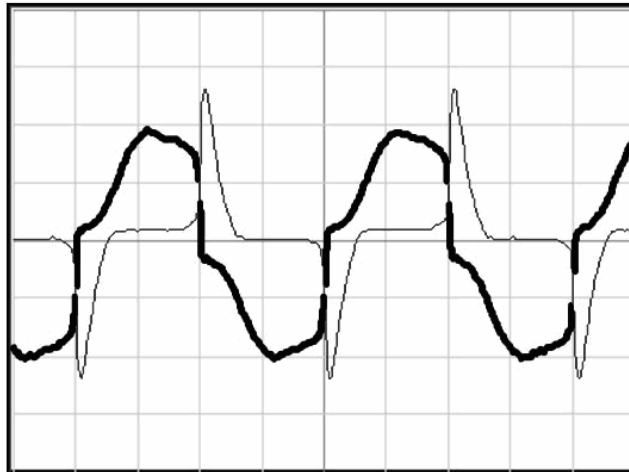
50 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
1.0	40	36.380	14.4°	2	50 V



Şekil 5.35 1.3T, 50 Hz üçgen dalga uyarımında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.30 1.3T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

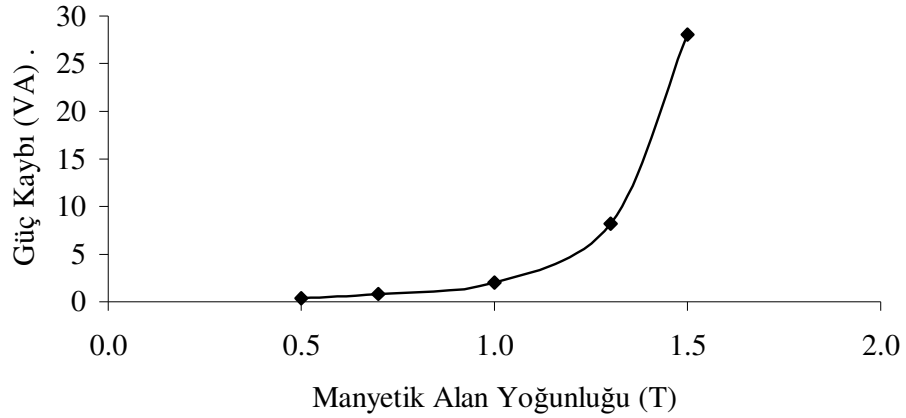
50 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
1.3	122	47.294	32.4°	8.174	67 V



Şekil 5.36 1.5T, 50 Hz üçgen dalga uyarımında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.31 1.5T, 50 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

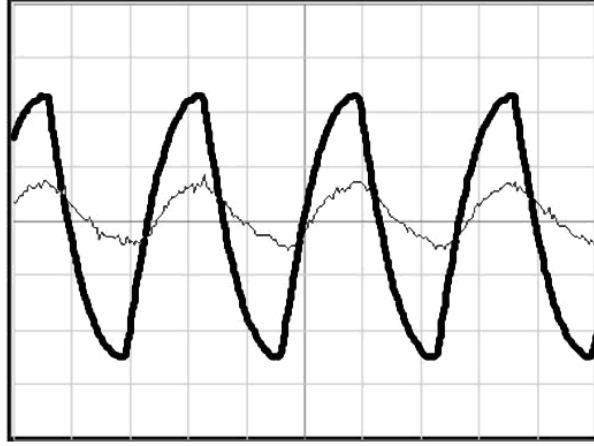
50 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	A	S(VA)	Vs(RMS)
1.5	395	54.570	48.6°	28.045	71 V



Şekil 5.37 50 Hz üçgen dalga uyarımda Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması.

Deneylerde kullandığımız toroidal nüveyi 50 Hz üçgen dalga ile farklı manyetik akı yoğunluklarını elde edecek şekilde mıknatıslandırdığımızda da Şekil 5.37'de manyetik akı-güç dağılımı grafiğinde de görüldüğü üzere, sinüzoidal dalga şekli ile yapılan deneylerde elde edilen verilere paralel sonuçlar gözlemlenmiştir. Yani yine manyetik akı yoğunluğu arttıkça güç kayıpları da artış göstermiştir.

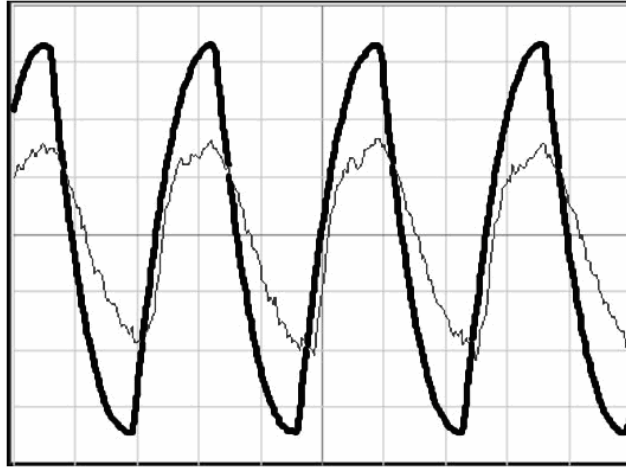
Şekil 5.38 ve Çizelge 5.32'de de sargılı toroidal nüvenin bu kez de 0.5, 07T manyetik akı yoğunluğu ve 75 Hz mıknatıslanma frekansında üçgen dalga ile mıknatıslandırıldığında elde edilen sonuçlar sunulmuştur.



Şekil 5.38 0.5T, 75 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.32 0.5T, 75 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.5	20	27.285	21.6°	0.680	34 V



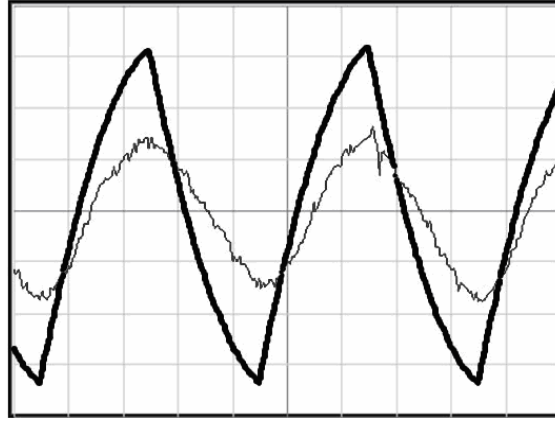
Şekil 5.39 0.7T, 75 Hz üçgen dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.33 0.7T, 75 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

75 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.7	25	38.199	16.8°	1.190	47.6 V

75 Hz üçgen dalga ve 0.5 T ve 0.7 T manyetik akı yoğunluklarında yapılan deneylerde de beklenildiği gibi manyetik akı yoğunluğu arttıkça kayıplar da artış göstermiştir. Bu frekans ve dalga şeklinde toroidal nüve 0.7T'dan sonra doyuma ulaştığı için daha yüksek manyetik akı yoğunluklarına ulaşamamıştır.

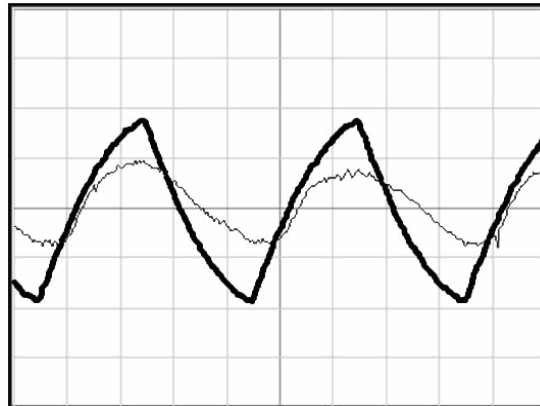
Şekil 5.40 ve 5.41'de ve Çizelge 5.34 ve 5.35'de 0.5T ve 0.7T değerleri için 100Hz'de üçgen dalga ile mıknatıslandırılmış toroidal nüvenin deney sonuçları sunulmuştur.



Şekil 5.40 0.5T, 100 Hz üçgen dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.34 0.5T, 100 Hz üçgen dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarıtım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.5	20	36.380	23.4°	0.820	41 V



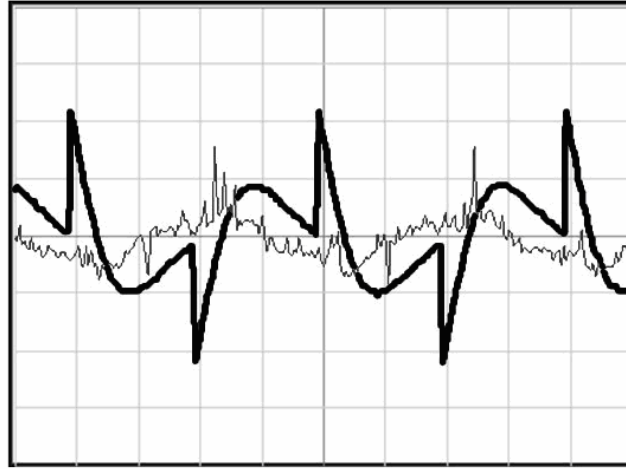
Şekil 5.41 0.7T, 100 Hz üçgen dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.35 0.7T, 100 Hz üçgen dalga uyarım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Üçgen Dalga Uyarım					
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)	Vs(RMS)
0.7	27	50.932	18°	1.565	58 V

Toroidal nüve 100 Hz üçgen dalgada da 0.7T'dan daha büyük değerlerde doyuma ulaşmış ve daha büyük manyetik akı yoğunlukları elde edilememiştir. Fakat elde edilen sonuçlar, beklenildiği gibi sinüzoidal mıknatıslanma ile yapılan deneylerle paralel sonuçlar vermiştir.

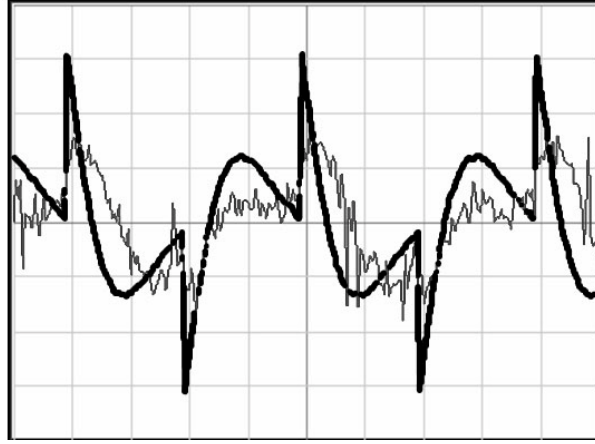
Şekil 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 ve Çizelge 5.36, 5.37, 5.38, 5.39, 5.40, 5.41 sırasıyla deneylerde kullanılan toroidal nüvenin 25 Hz kare dalga ile 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5 ve 1.7T manyetik akı yoğunlukları elde edilerek mıknatıslandırılması ile varılan deneysel sonuçları içermektedir.



Şekil 5.42 0.5T, 25 Hz kare dalga uyarımında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.36 0.5T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

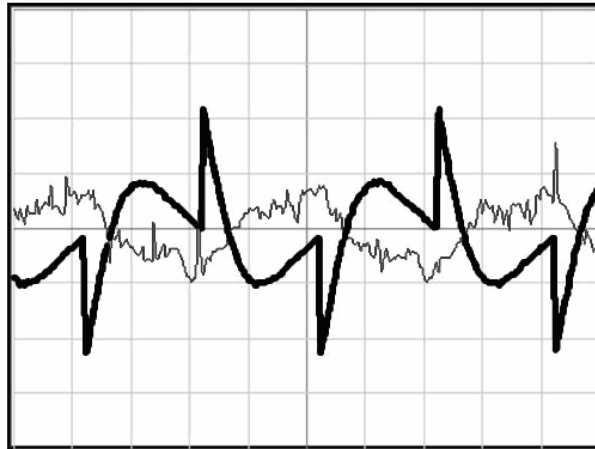
25 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.5	6	9.095	27°	0.055 VA



Şekil 5.43 0.7T, 25 Hz kare dalga uyarıtında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.37 0.7T, 25 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

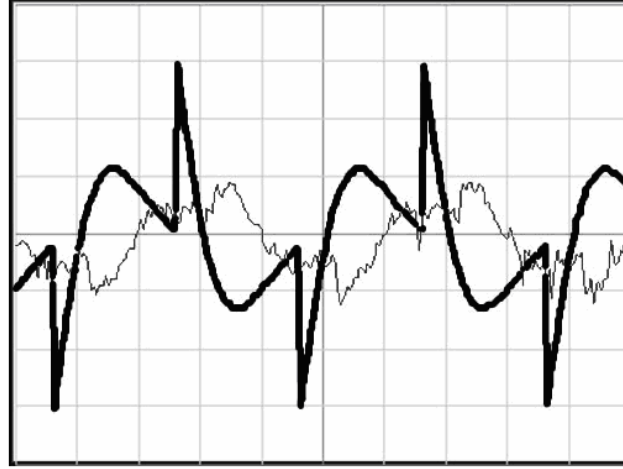
25 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (Max, T)	I (rms, A)	Vs (rms, V)	α	S(VA)
0.7T	8mA	12.7330875V	24.3°	0.102 VA



Şekil 5.44 1.0T, 25 Hz kare dalga uyarıtında manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.38 1.0T, 25 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

25 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.0	9.2	18.190	22.5°	0.168



Şekil 5.45 1.3T, 25 Hz kare dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.39 1.3T, 25 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

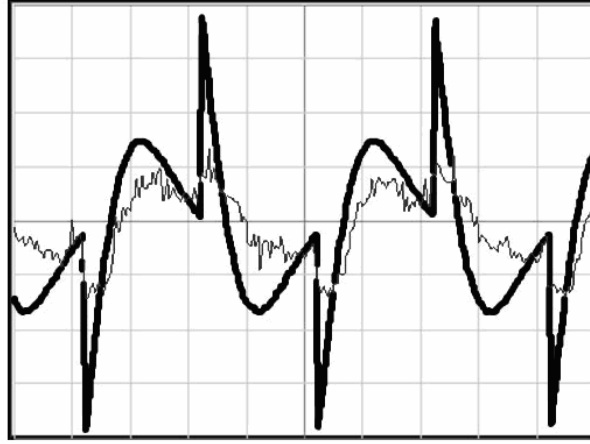
25 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.3	11.2	23.647	18.9°	0.265



Şekil 5.46 1.5T, 25 Hz kare dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.40 1.5T, 25 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

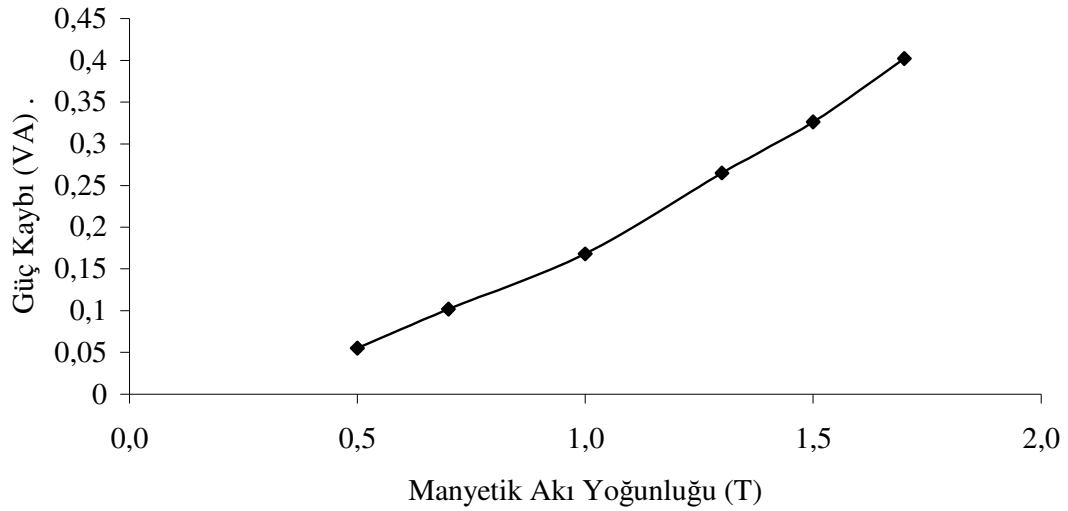
25 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.5	12	27.285	18°	0.326



Şekil 5.47 1.7T, 25 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.41 1.7T, 25 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

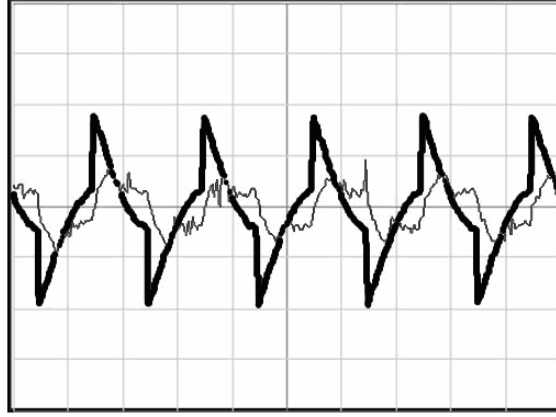
25 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.7	13	30.923	16.2°	0.402



Şekil 5.48 25 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı Karşılaştırması.

25 Hz üçgen uyarımla değişik manyetik akı yoğunlukları elde edecek şekilde mıknatıslandırılmış toroidal nüvenin güç değerleri ile manyetik akı yoğunlukları değerlerinin karşılaştırıldığı yukarıdaki şekilde, beklenen grafiksel sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Yani manyetik akı yoğunluğu arttıkça güç kayıpları da artış göstermiştir.

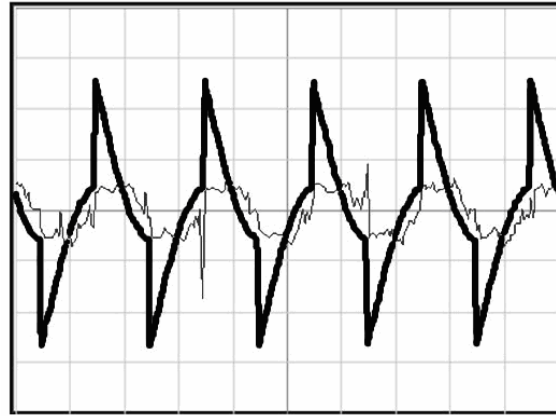
Şekil 5.49, 5.50, 5.51, 5.52, 5.53, 5.4 ve Çizelge 5.42, 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47 ise aynı toroidal nüvenin sırasıyla 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5 ve 1.7T manyetik akı yoğunluğu elde etmek üzere 50 Hz kare dalga ile mıknatıslanması sonucu elde edilen verileri içerir.



Şekil 5.49 0.5T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.42 0.5T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

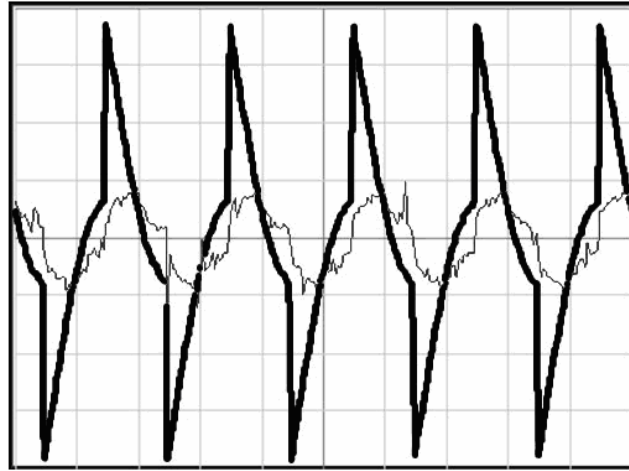
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
B_m (T)	I (mA)	V_s (V)	α	S(VA)
0.5	9.7	18.190	61.2°	0.177



Şekil 5.50 0.7T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.43 0.7T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

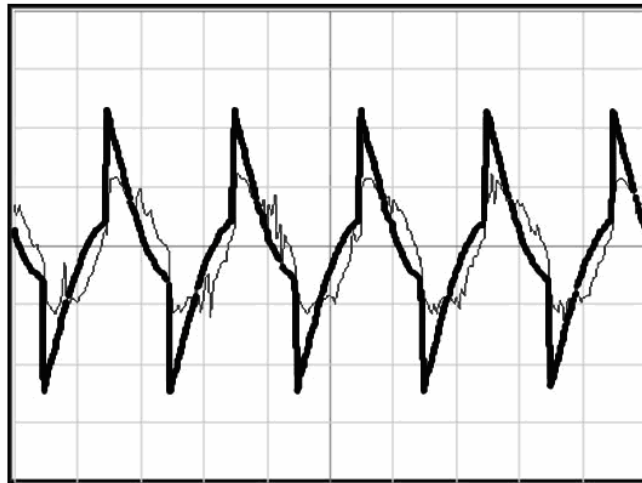
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.7	10.2	25.466	61.2°	0.260



Şekil 5.51 1.0T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.44 1.0T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

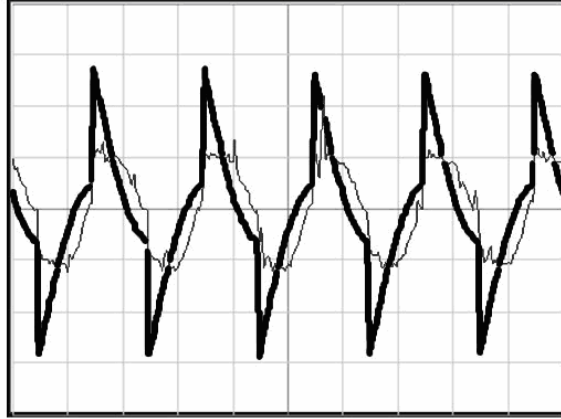
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.0	11	36.380	61.2°	0.400



Şekil 5.52 1.3T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.45 1.3T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

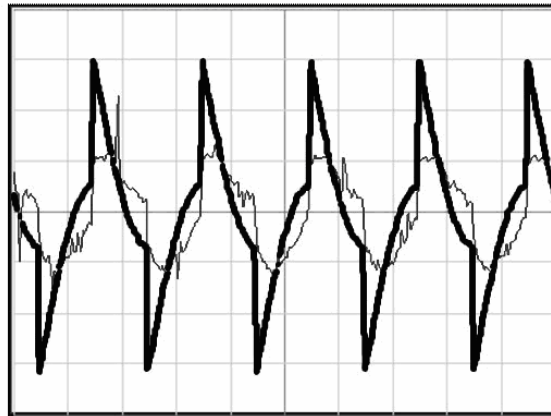
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.3	14.5	47.294	61.2°	0.686



Şekil 5.53 1.5T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.46 1.5T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

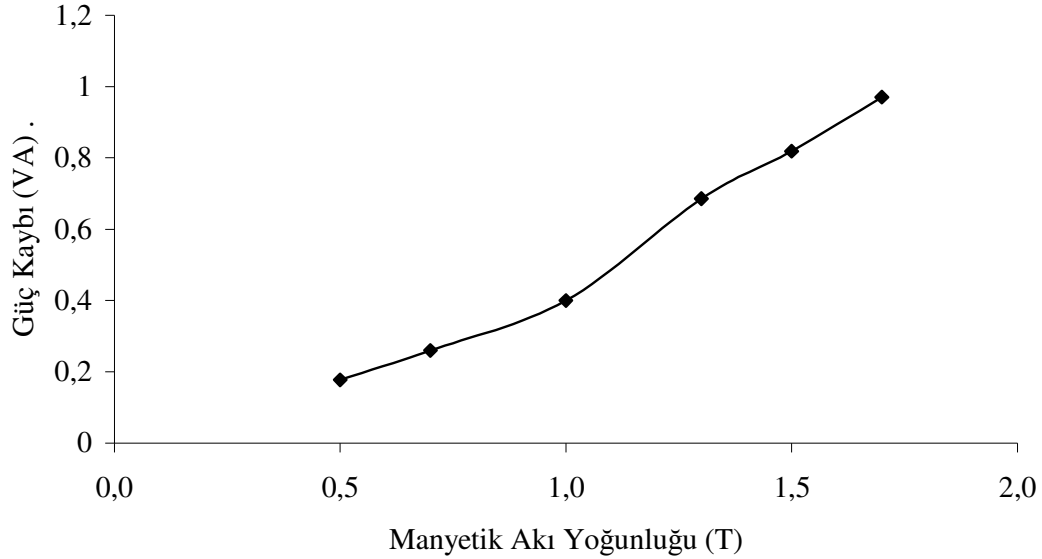
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.5	15	54.570	57.6°	0.819



Şekil 5.54 1.7T, 50 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.47 1.7T, 50 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

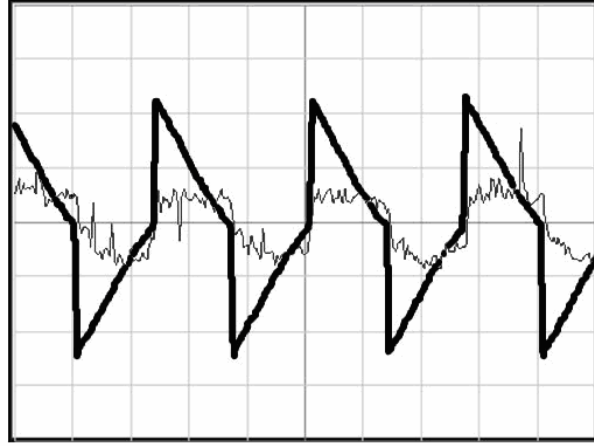
50 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.7	15.7	61.846	55.8°	0.971



Şekil 5.55 50 Hz Kare Dalga Uyarım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

Şekil 5.57'de de 0.5, 0.7, 1.0, 1.3, 1.5, ve 1.7T manyetik akı yoğunluğu altında manyetik akı yoğunluğu - güç dağılımı karşılaştırması ifade edilmiş olan 50 Hz kare dalga ile mıknatıslanmış toroidal nüvenin kayıpları da beklendiği gibi manyetik akı yoğunluğu yükseldikçe, artış göstermiştir.

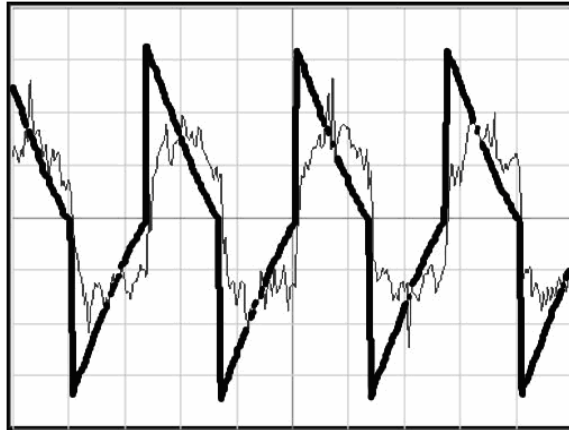
Şekiller 5.56, 5.57, 5.58, 5.59, 5.60 ve 5.61 ve Çizelge 5.48, 5.49, 5.50, 5.51, 5.52 ve 5.53'te ise aynı toroidal nüvenin yine kare dalga uyarımını altında 75 Hz mıknatıslanma frekansı ile ve değişik manyetik akı yoğunluklarında mıknatıslanmalarına ait verileri içerir.



Şekil 5.56 0.5T, 75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.48 0.5T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

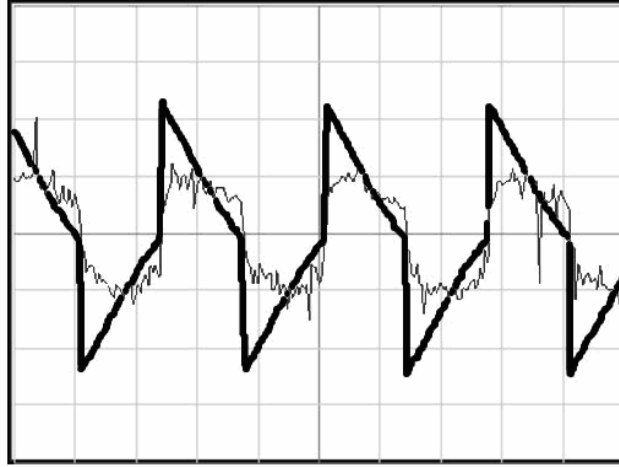
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.5	11	27.285	0.2°	0.300



Şekil 5.57 0.7T, 75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.49 0.7T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

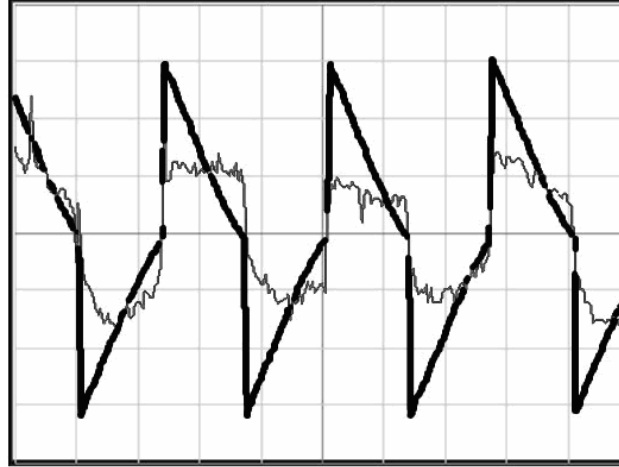
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.7	13	38.199	0.2°	0.497



Şekil 5.58 1.0T, 75 Hz kare dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.50 1.0T, 75 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

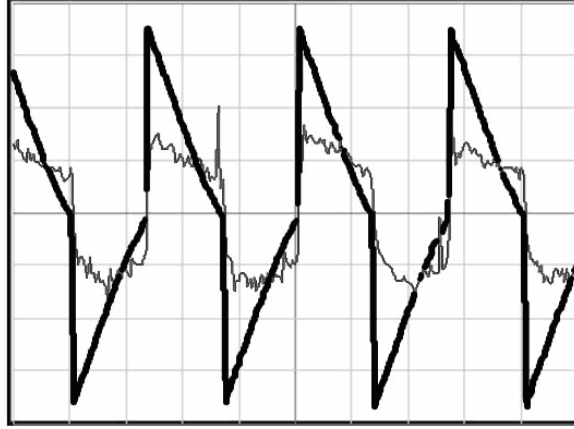
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.0	16	54.570	0.2°	0.873



Şekil 5.59 1.3T, 75 Hz kare dalga uyarıtımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.51 1.3T, 75 Hz kare dalga uyarıtım altında ölçülen değerler.

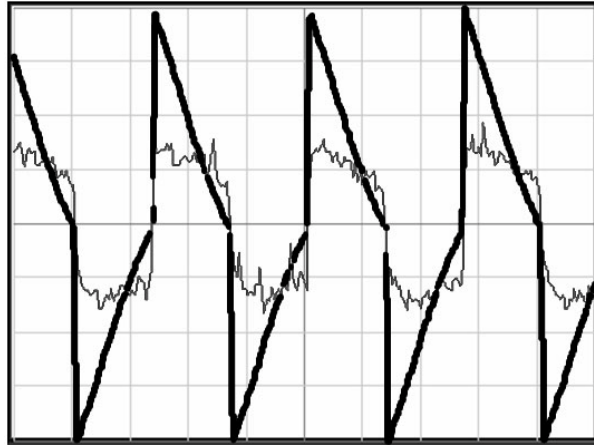
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarıtım				
Bm (T)	I (A)	Vs (V)	α	S(VA)
1.3T	20	70.941	0.2°	1.418



Şekil 5.60 1.5T, 75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.52 1.5T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

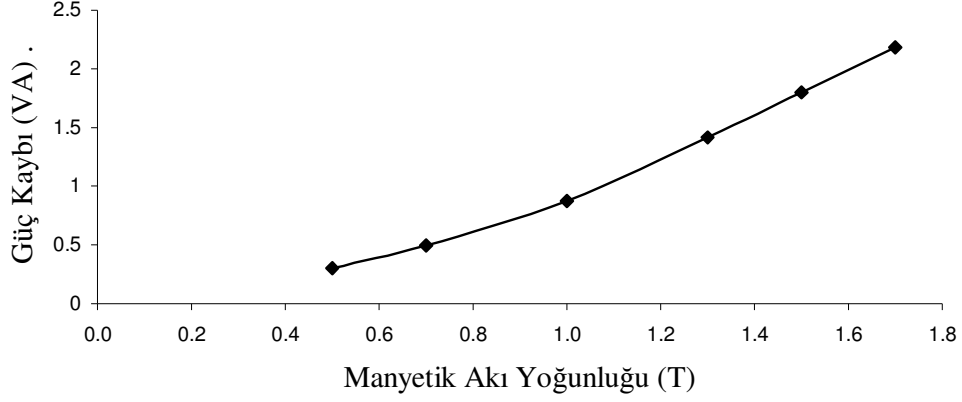
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (Max, T)	I (rms, A)	Vs (rms, V)	α	S(VA)
1.5T	22mA	81.8555625V	0.2°	1.800 VA



Şekil 5.61 1.7T, 75 Hz kare dalga uyarımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.53 1.7T, 75 Hz kare dalga uyarım altında ölçülen değerler.

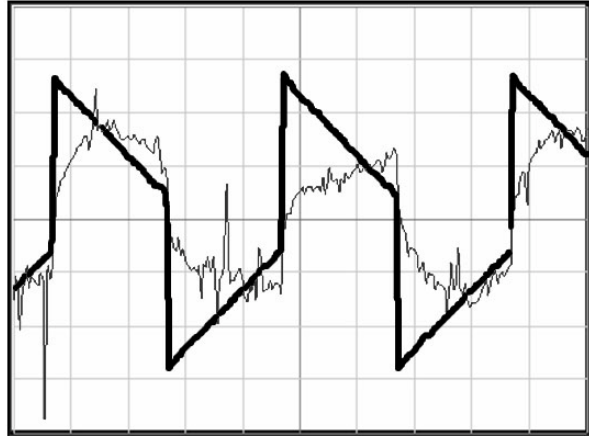
75 Hz'lik Kare Dalga Uyarım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.7	23.5	92.769	0.2°	2.184



Şekil 5.62 75 Hz Kare Dalga Uyartım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

75 Hz kare dalga uyartımı altında ve değişik manyetik akı yoğunlukları elde edilecek şekilde mıknatıslanan toroidal nüvede de daha önceki frekans ve dalga şekillerindeki gibi beklenen sonuçlar elde edilmiştir. Yani manyetik akı yoğunluğu ile güç kayıpları arasında bir doğru orantı gözlemlenmiştir.

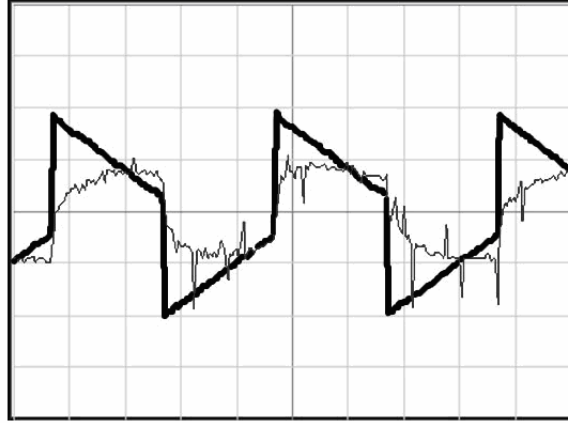
Şekil 5.63, 5.64, 5.65, 5.66, 5.67 ve 5.68’da ve Çizelge 5.54, 5.55, 5.56, 5.57, 5.58 ve 5.59’da ise değişik manyetik akı yoğunlukları elde edilecek şekilde 100 Hz frekansta kare dalga ile mıknatıslanmış toroidal nüveye ait değerler kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 5.63 0.5T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.54 0.5T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

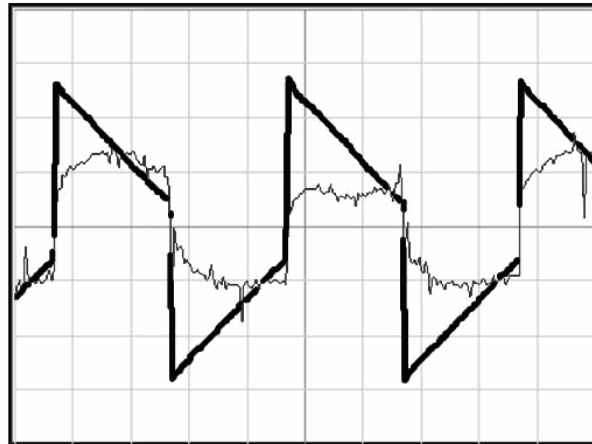
100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.5	12	36.380	0.1°	0.605



Şekil 5.64 0.7T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.55 0.7T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

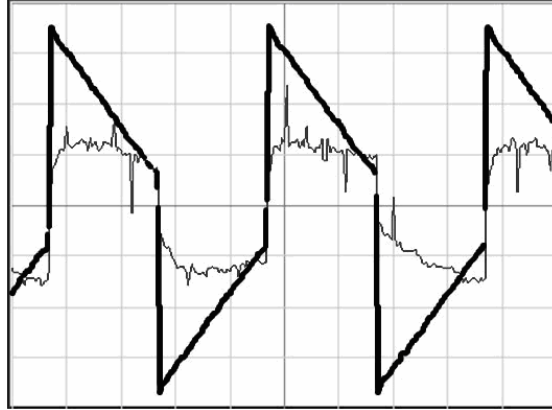
100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
0.7	14	50.932	0.1°	0.714



Şekil 5.65 1.0T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.56 1.0T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

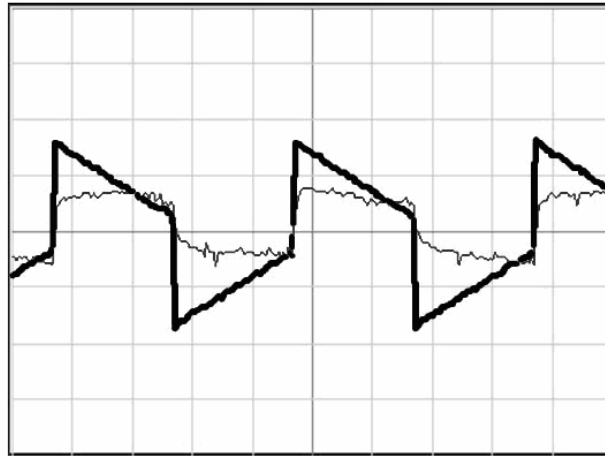
100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.0	18.4	72.760	0.1°	1.339



Şekil 5.66 1.3T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.57 1.3T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

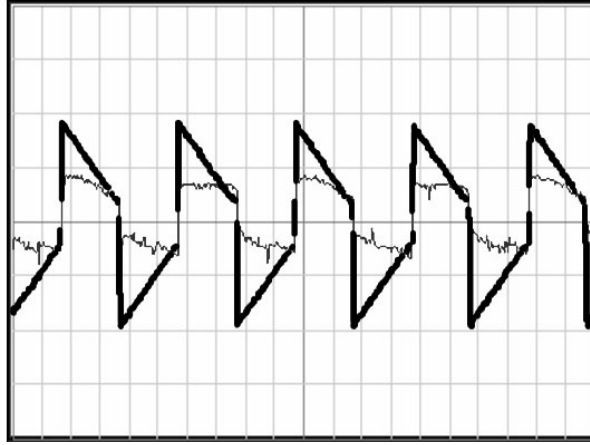
100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.3	22	94.588	0.1°	2.081



Şekil 5.67 1.5T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.58 1.5T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

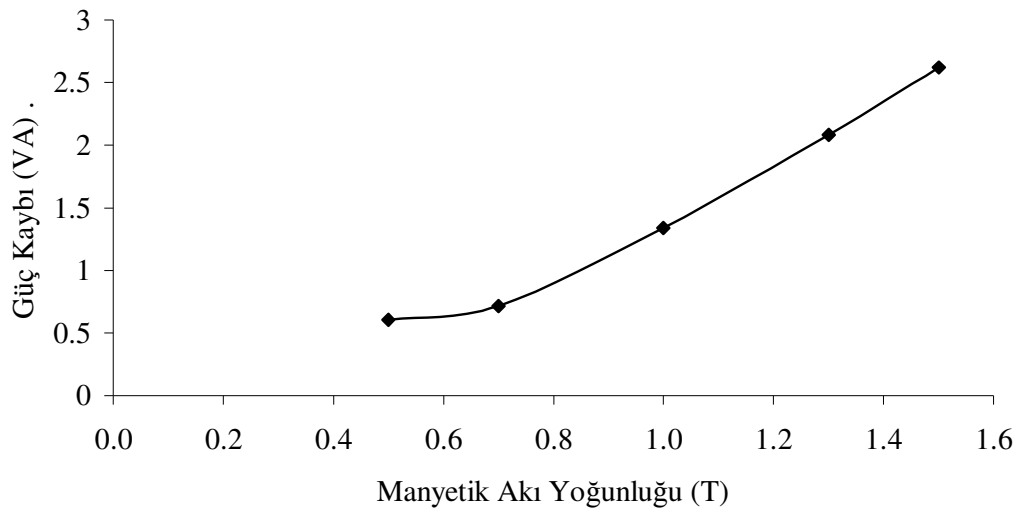
100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (mA)	Vs (V)	α	S(VA)
1.5	24	109.140	0.1°	2.620



Şekil 5.68 1.7T, 100 Hz kare dalga uyartımda manyetik akı ve alan yoğunluğunun değişimi.

Çizelge 5.59 1.7T, 100 Hz kare dalga uyartım altında ölçülen değerler.

100 Hz'lik Kare Dalga Uyartım				
Bm (T)	I (A)	Vs (V)	α	S(VA)
1.7	27	123.692	0.1°	2.339

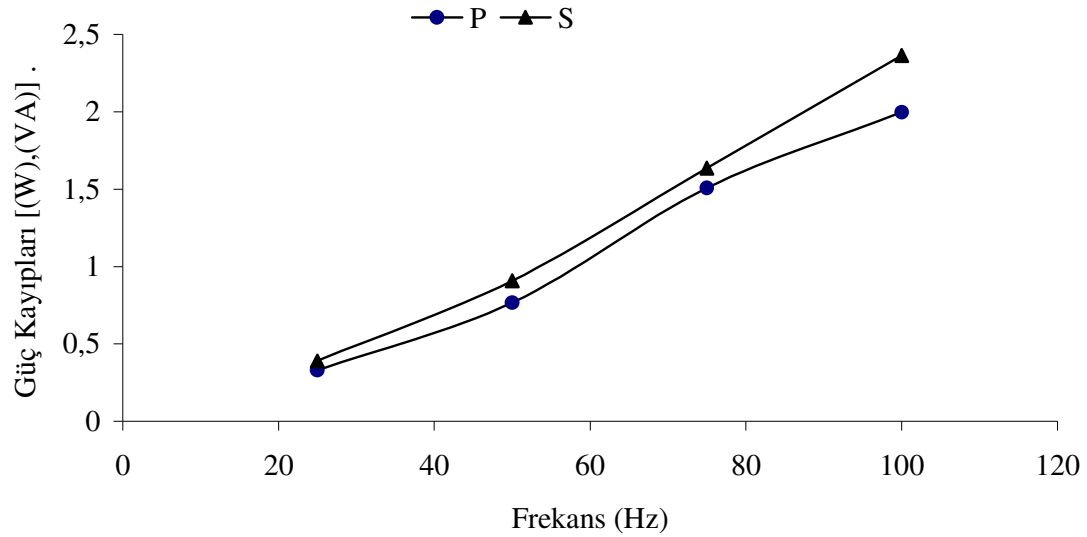


Şekil 5.69 100 Hz Kare Dalga Uyartım Altında Manyetik Akı Yoğunluğu-Güç Kaybı karşılaştırması.

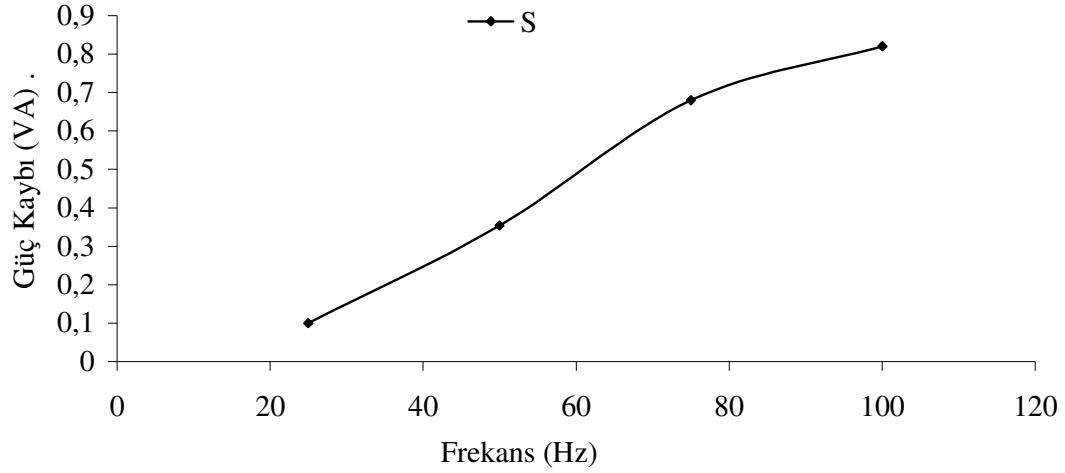
100 Hz frekansta kare dalga ile değişik manyetik akı yoğunlukları elde edebilmek amacıyla mıknatıslanan sargılı toroidal nüvenin manyetik akı yoğunluğu ve güç kayıpları değerlerini karşılaştıran grafiği içeren Şekil 5.69 yukarıda sunulmuştur ve yine manyetik akı yoğunluğu değeri artışının güç artışına neden olduğu görülmüştür.

Eğer dalga şekillerine göre manyetik akı yoğunluğunu sabit tutup, frekans değişimine göre güç kayıplarını karşılaştırmak istersek aştığıdaki Şekil 5.70, 5.71 ve 5.72’te verilen grafikleri elde ederiz.

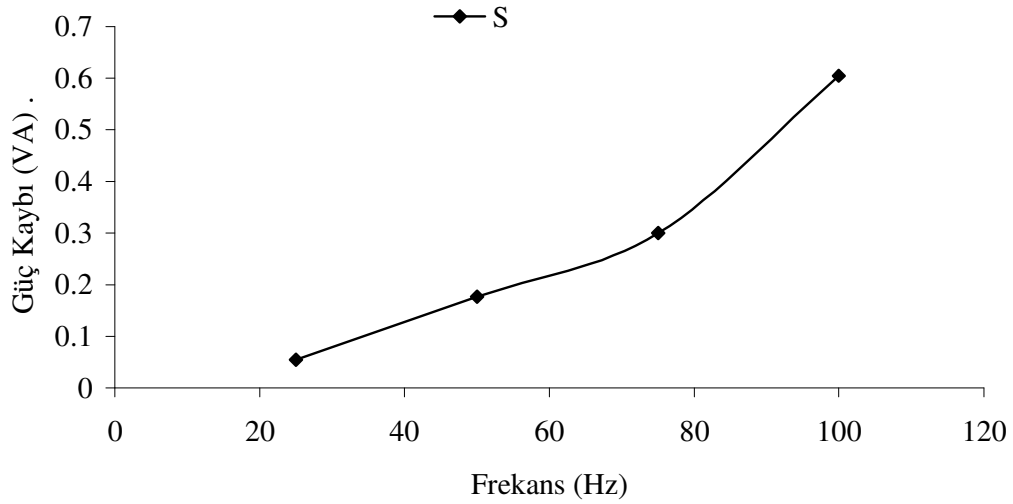
Sinüzoidal dalga şekli için;



Şekil 5.70 Sinüzoidal dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması.



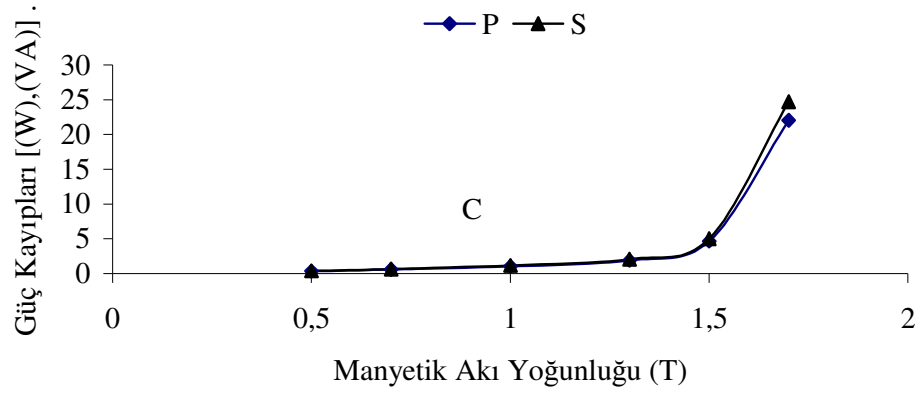
Şekil 5.71 Kare dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması.



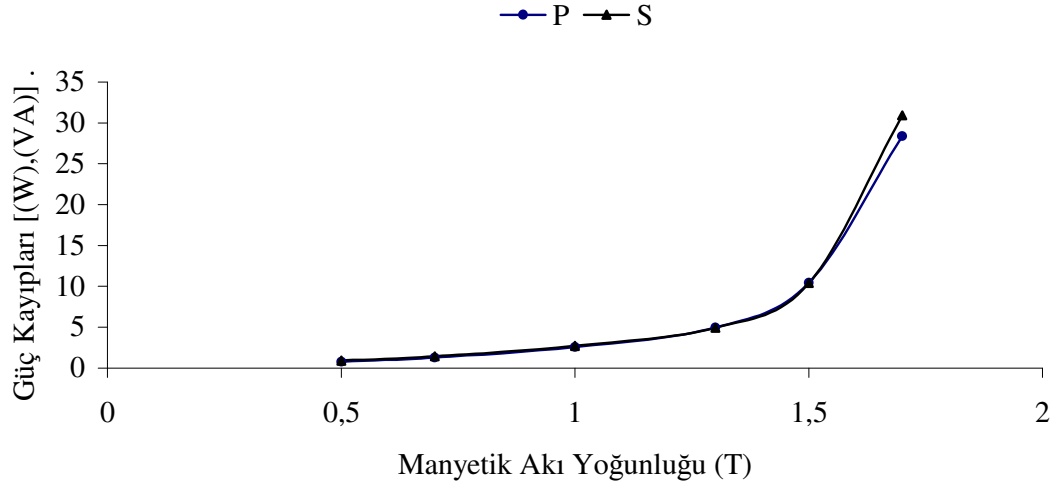
Şekil 5.72 Üçgen dalga için 0.5 T manyetik akı yoğunluğunda frekans ve güç kayıpları karşılaştırması.

Şekil 5.70, 5.71 ve 5.72’te de ifade edildiği gibi sırasıyla sinüzoidal, kare ve üçgen dalga ile toroidal nüve mıknatıslandırıldığında, beklenildiği üzere frekans değerleri arttıkça güç kayıplarında anlamlı artışlar gözlemlenmiştir.

Manyetik akı yoğunluğunun güç kayıplarını nasıl etkilediğini görmek için frekans sabit kalmak kaydıyla manyetik akı yoğunlukları değiştirilerek güç kayıplarının mıknatıslanma frekansı ile karşılaştırması ise Şekil 5.73 ve 5.74’deki grafiklerde gösterilmiştir.



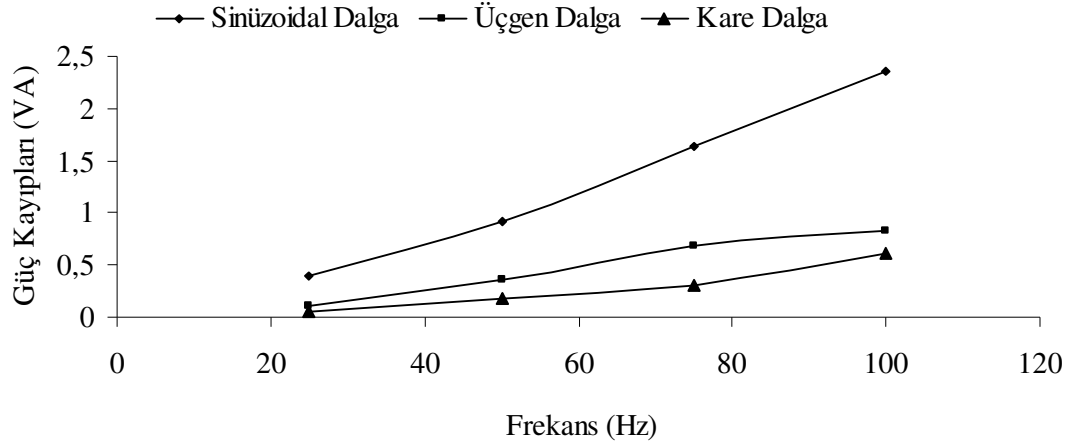
Şekil 5.73 25 Hz mıknatıslanma frekansı altında manyetik akı yoğunluğu ile güç kayıplarının karşılaştırılması.



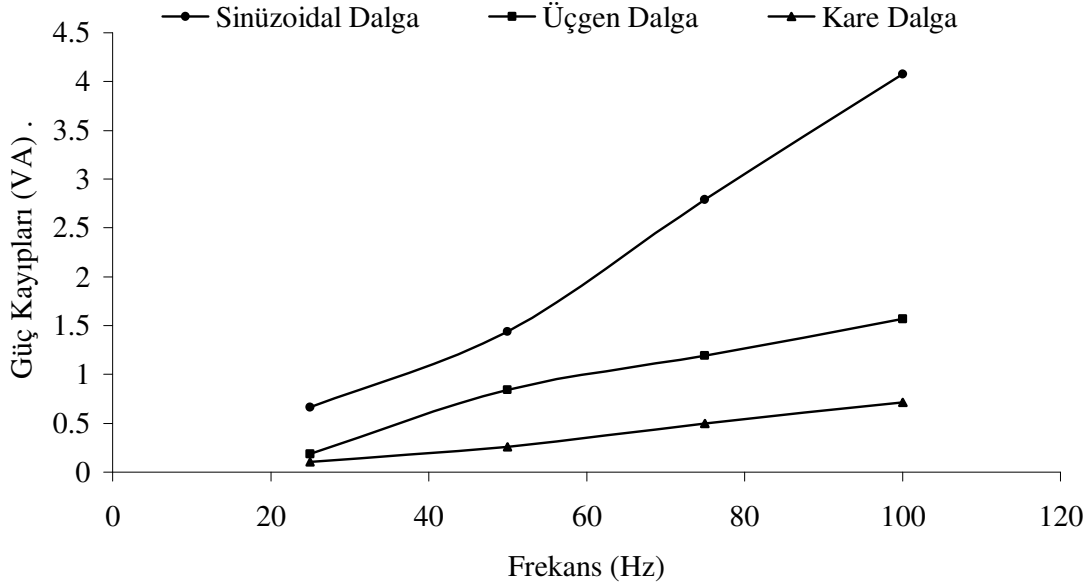
Şekil 5.74 50 Hz mıknatıslanma frekansı altında manyetik akı yoğunluğu güç kayıplarının karşılaştırılması.

Şekil 5.73 ve 5.74'deki grafiklerden de anlaşılacağı gibi, aynı frekanslarda, manyetik akı yoğunlukları arttıkça, güç kayıpları da artış göstermiştir.

Manyetik akı yoğunlukları sabit tutularak, frekansların değişimi ile dalga şekillerinin buna tepkilerinin karşılaştırılması, Şekil 5.75 ve 5.76'da sunulmuştur.



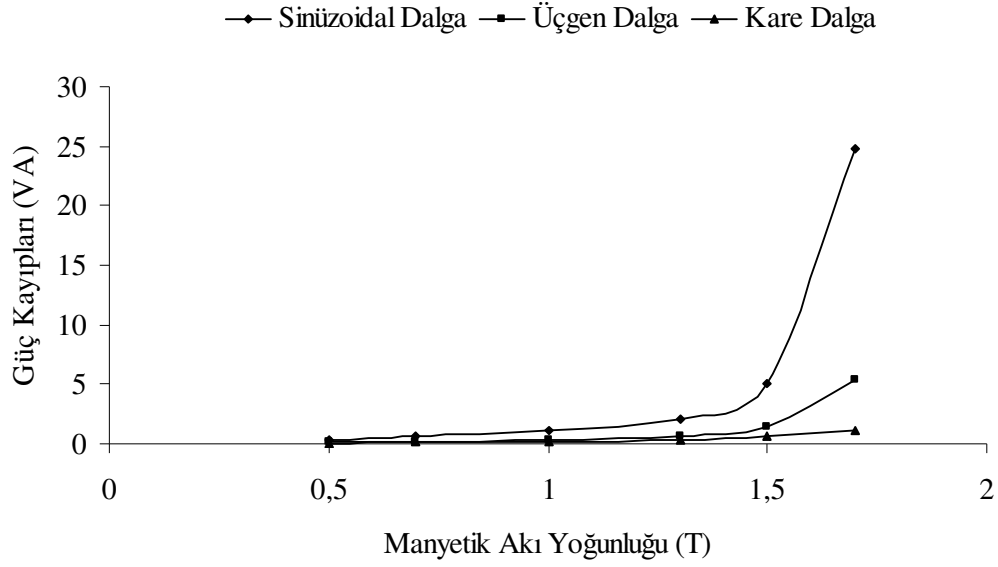
Şekil 5.75 0.5T manyetik akı yoğunluğunda frekans değişimleri ile dalga şekillerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.76 0.7T manyetik akı yoğunluğunda frekans değişimleri ile dalga şekillerinin karşılaştırılması.

Ayrıca, Şekil 5.75 ve 5.76'de 0.5T ve 0.7T için yapılan karşılaştırmalar sonucunda elde edilen gerilim dalda şekilleri arasında güç kayıpları açısından görülen farkın nedeni, sinüzoidal dalga, üçgen dalga ve kare dalgaların şekil faktörleri arasındaki farktır.

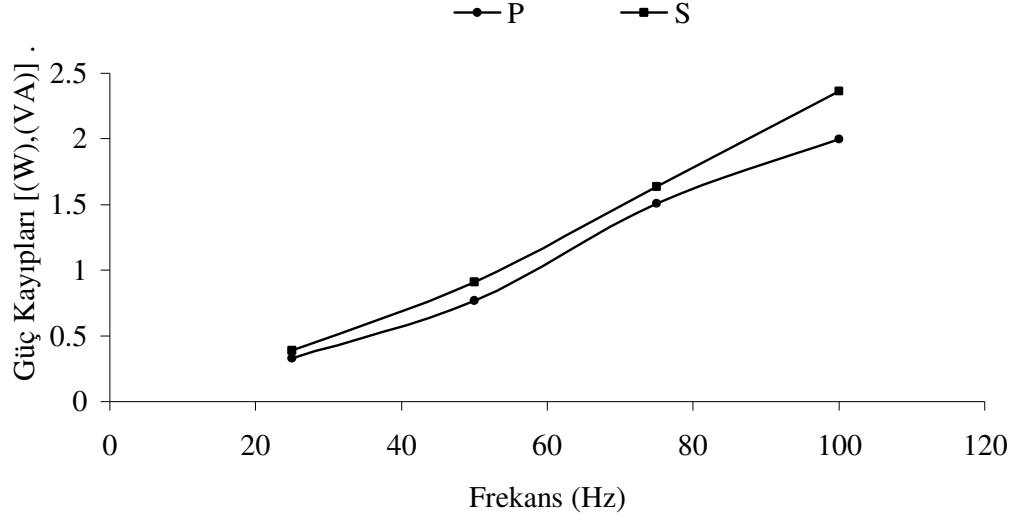
Şekil 5.77'da verilen grafikte ise frekans sabit tutularak, manyetik akı yoğunlukları değişimi ile dalga şekillerinin değişimi güç kayıpları açısından karşılaştırılmıştır.



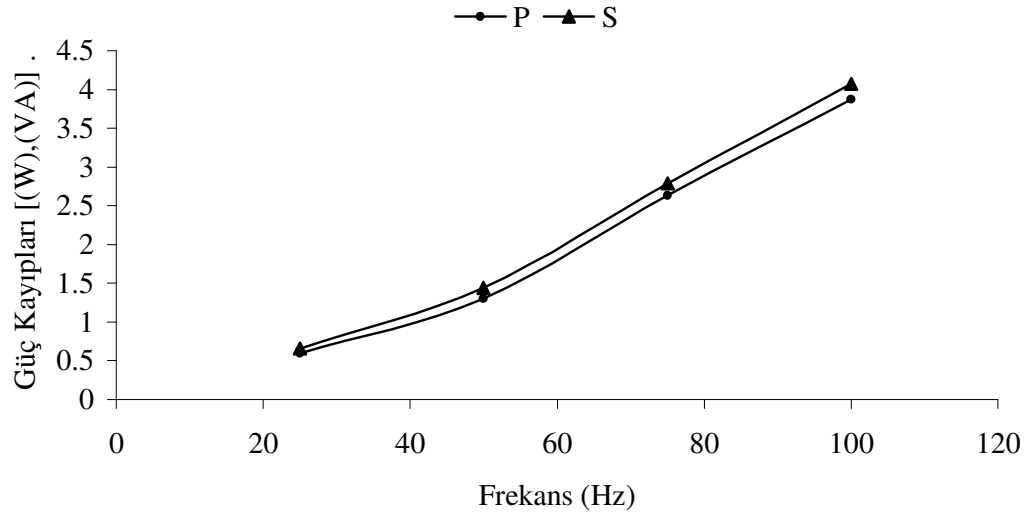
Şekil 5.77 25 Hz frekansta manyetik akı yoğunlukları ile dalga şekillerinin değişimleri karşılaştırması.

Şekil 5.77’de de bu kez frekans sabit tutulup, manyetik akı yoğunluğu değişiminin, dalga şekilleri arasındaki değişim farkını nasıl etkileyeceği konusu ele alınarak çizilmiş bir grafik görülmektedir. Bu grafikte de yine frekans farklılıkları ile karşılaştırma yapıldığında elde edilen sonuca paralel bir sonuçla karşılaşmıştır. Burada da manyetik akı yoğunluğu arttıkça en fazla güç kaybına neden olan dalga şekli şekil faktöründen dolayı sinüzoidal dalga şekli, daha sonra üçgen dalga şekli ve güç kayıplarının en az seviyede görüldüğü dalga şekli de kare dalga şeklindedir.

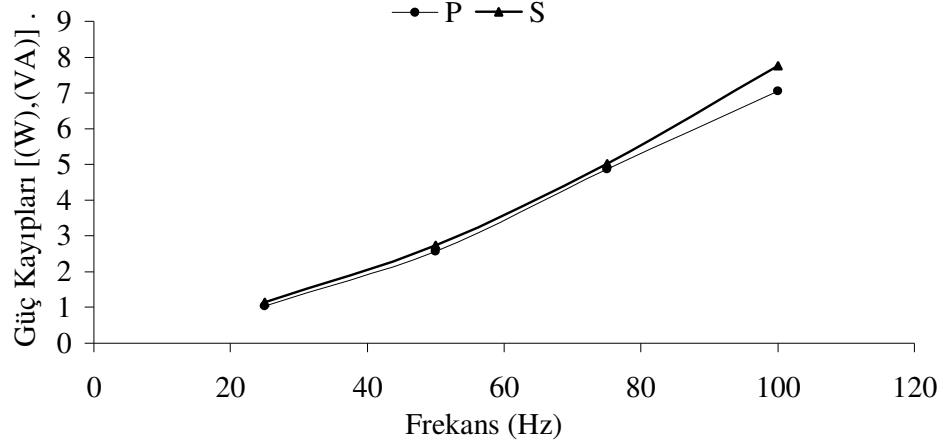
Şekil 5.78, 5.79 ve 5.80’de ise sabit manyetik akı yoğunlukları değerlerinde frekansın artışı ile güç kayıpları değerlerinin artış miktarlarının karşılaştırılmasına yer verilmiştir.



Şekil 5.78 0.5T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması.



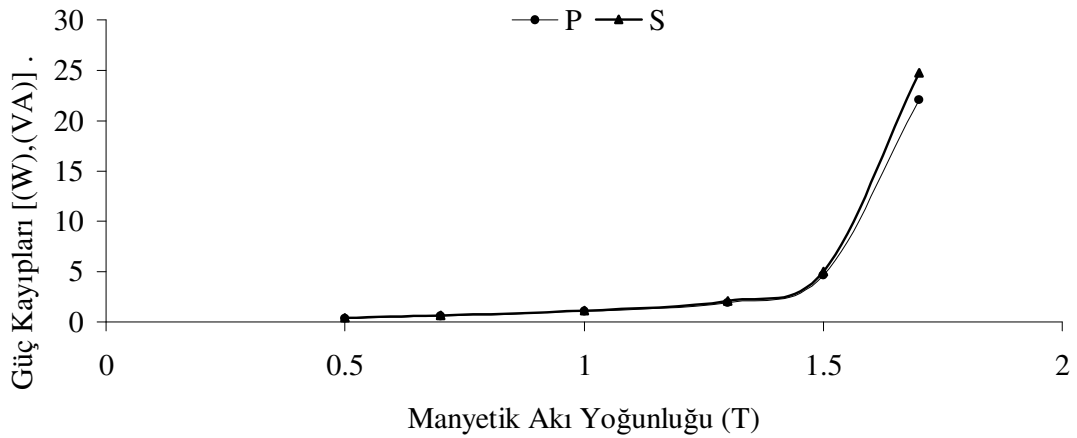
Şekil 5.79 0.7T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması.



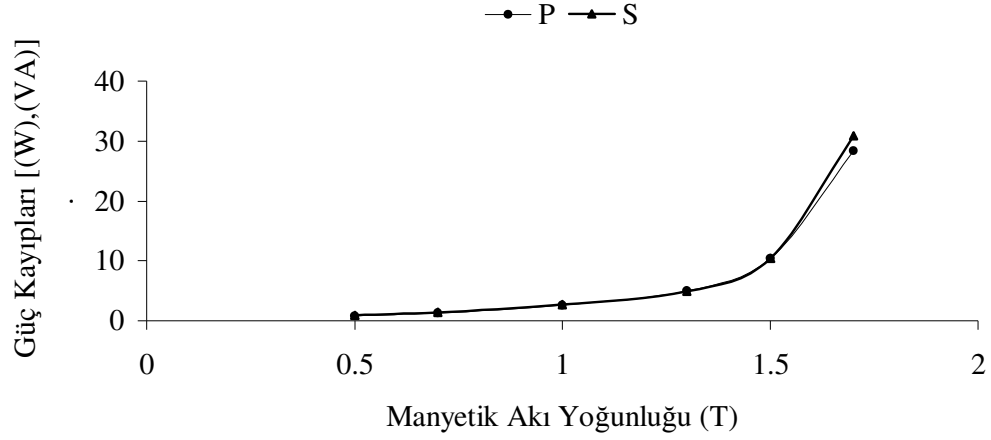
Şekil 5.80 1.0T için sinüzoidal dalga şeklinde frekansın artışı ile S(VA) ve P(W) karşılaştırması.

Şekil 5.78, 5.79 ve 5.80'den de anlaşılacağı gibi frekans değerleri arttıkça, (2.3), (2.12) ve (2.13)'te de ifade edildiği gibi her üç dalga şekli altında mıknatıslandırılmış toroidal nüvenin güç kayıpları artış göstermektedir.

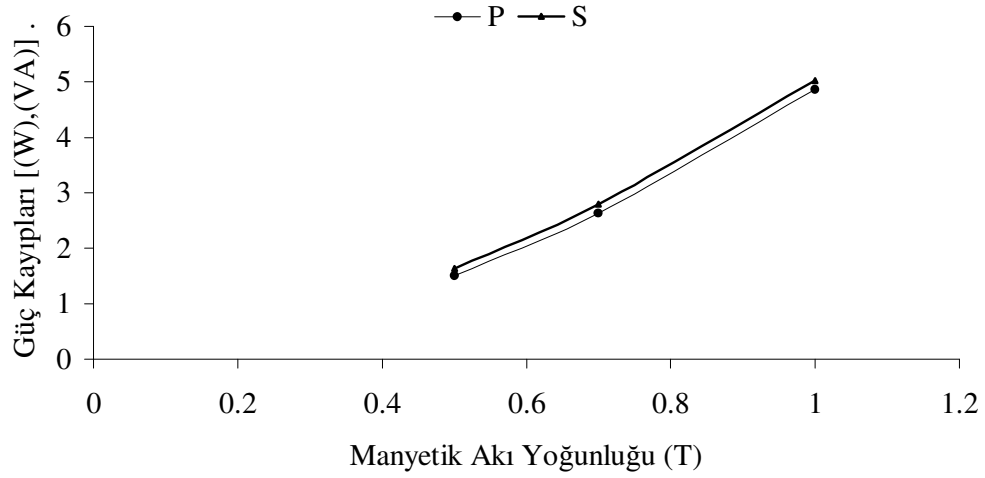
Şekil 5.81, 5.82, 5.83 ve 5.84'te frekans değerleri sabit tutularak manyetik akı yoğunlukları değişimi ile güç kaybı değerlerinin artış miktarları arasındaki değişimi karşılaştıran grafiklere yer verilmiştir.



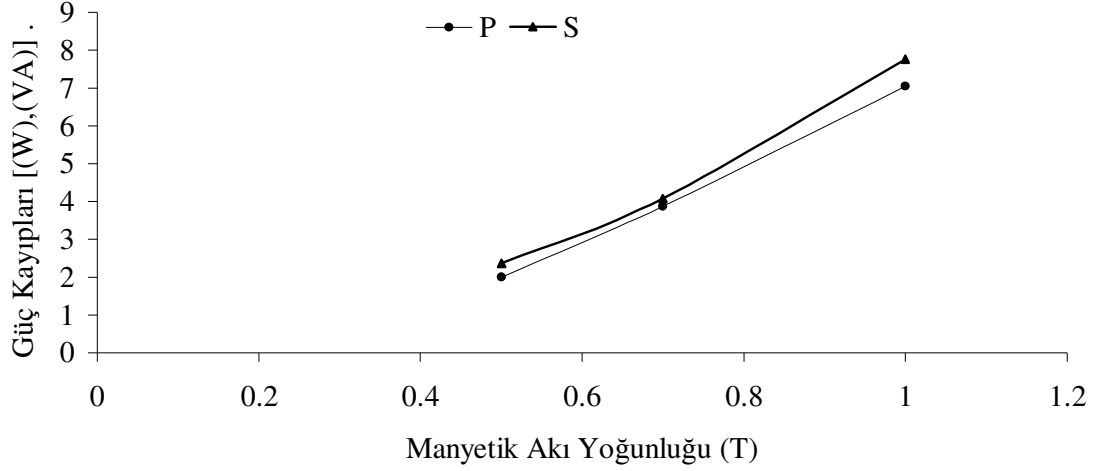
Şekil 5.81 25 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.82 50 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.83 75 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.84 100 Hz sinüzoidal dalga şekli için manyetik akı yoğunluğu ile S(VA) ve P(W) değerlerinin karşılaştırılması.

Yukarıda verilen 25, 50, 75 ve 100 Hz frekansları için manyetik akı yoğunluğu ile güç kaybı arasındaki ilişkiyi ele alan Şekil 5.81, 5.82, 5.83 ve 5.84'da daha önceki bölümlerde kayıplarla ilgili verilmiş ilgili formüllerinden de bilindiği ve beklendiği üzere güç kayıpları, manyetik akı yoğunluğu değeri arttıkça giderek artan bir grafik sergilemişlerdir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmalar manyetik devreye sahip olan elektrik makinelerinin demir kayıplarının dalga şekline, uyartım frekansına, uyartım dalga şekline, giriş gerilimi ve manyetik akı yoğunluğuna göre gösterdiği farklılıklar gözlemlenmiştir.

Bilindiği gibi manyetik devrelerde ve tabii ki bu çalışmada incelenen toroid nüvede de demir kayıpları, yani histerezis ve girdap akımı kayıpları ile fazladan (eksess) girdap akımları kayıpları, (2.3), (2.12) ve (2.13)'te de ifade edildiği gibi frekans arttıkça ve manyetik akı yoğunluğu büyüdükçe, beklenildiği üzere artış gösterecektir. Ayrıca girdap akımları kaybını etkileyen önemli faktörlerden birisi de toroidal nüvenin yapısındaki dilimlenmiş elektrik çeliğinin kalınlığıdır. Dilimlenmiş elektrik çeliğinin dilimleri inceldikçe girdap akımları kayıpları azalmaya başlar. Bunun nedeni malzemenin kesit alanının küçülmesi, dolayısıyla girdap akımlarına karşı uygulanan direncin artması olarak ifade edilebilir. Histerezis kayıpları da bilindiği gibi histerezis eğrisinin altında kalan alan olarak da ifade edilebilmektedir. Buradan şu sonucu çıkarabiliriz; her çevrim, yani yönlenmeler arasındaki gidiş geliş farkı bu alanı arttıracaktır. Yani frekans arttıkça histerezis kayıpları da artacaktır.

Çekirdek kayıpları olarak da ifade edebilen demir kayıpları da histerezis kayıpları, girdap akımı kayıpları ve fazladan girdap akımları kayıplarının toplamı olduğuna göre adı geçen bu kayıpların kayıplarının artması demir kayıplarının da artması anlamına gelir. Çizelgedeki, verilerden elde edilen izlenimler de bu yöndedir. Bu ifadeye göre, aynı gerilim dalga şeklinde frekans arttıkça ve manyetik akı yoğunluğu arttıkça, gerilim, akım, histerezis alanı, girdap akımları artış gösterir ve demir kayıpları artar. Elbette bu sistemde kullanılan toroidal nüvenin malzeme yapısı, yönlendirilmiş veya yönlendirilmemiş çelikten olması, kalınlığı gibi faktörler de mutlaka önemli rol oynar.

Ayrıca yine çizelgelerdeki deneysel verilerden ve şekillerden sinüzoidal mıknatıslanma uyarımı altında, kare dalga mıknatıslanma uyarımı altındaki ve üçgen dalga mıknatıslanma uyarımı altındaki duruma göre, aynı manyetik akı yoğunluğunu sağlayabilmek için daha fazla güç harcamak gerekmektedir. Bu da aynı işi yapabilmek için daha fazla güç harcamak, yani diğer bir deyişle güç kayıplarının artması anlamına gelir. Bu üç gerilim dalga şekli içinden, en az kayba yol açan gerilim dalga şekli uyarımı kare dalgadır.

Daha sonraki çalışmalarda, konunun paralelinde dalga şekillerinin kayıplara etkilerinin incelenmesi üzerinde daha ayrıntılı bilgiler edebilmek amacıyla çalışmalar yapılabilir. Demir kayıplarının azaltılması amacıyla malzeme ve toroidal nüve yapısı optimizasyonu veya kayıpları minimum düzeye taşıyabilecek yöntemler üzerinde durulabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Wildi, T.** (1991) *Electrical Machines, Drives and Power Systems*. Second Edition, Prentice Hall International Editions.
- [2] **Cheng, D.K.** (2003) *Dalga ve Alan Elektromanyetizması*. Akademi Yayın Hizmetleri.
- [3] **Çerezci, O. ve Şeker, S.** (1996) *Mühendislik Elektromagnetizmasının Temelleri*. Saray Bilimsel Yayıncılık.
- [4] **Tutkun, N.** (1998) Ph.D. Thesis, Investigation of Power Loss Under Pwm Voltage Excitation in Wound Toroidal and Stator Cores. Cardiff University, Department of Electrical and Electronics Engineering Wales.
- [5] **Tyler, D.W.** (1991) *Electrical Principles. Second Edition*, Blackwell Scientific Publications.
- [6] **Krishnan, R.** (2001) *Electrical Motor Drives Modeling, Analysis and Control*, Prentice Hall.
- [7] **Edminister, J.A.** (1993) *Elektromanyetik, 2. Baskıdan Çeviri*, Schaum's Outlines, Mc Graw Hill.
- [8] **Griffiths, D.J.** (2003) *Elektromagnetik Teori*, Gazi Kitabevi.
- [9] **Sen, P.C.** (1997) *Principles of Electrical Machines and Power Electronics* (Second Edition), John Wiley & Sons.
- [10] **Wee, S. D., Shin, M. H. and Hyun, D. S.** (2002) Stator-flux-oriented control of induction motor considering iron loss, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 48, Issue 3, Page(s):602 – 608.
- [11] **Ritchie, E** (1998) Lectures Notes, Iron Losses and Properties of Soft Magnetic Materials for Electrical Machines , Institution, Inst. of Energy Technology, Aalborg University.
- [12] **Tutkun, N. and Moses, A. J.** (2004) A simplified method for estimation of iron loss in wound toroidal cores energised by pulse width modulated voltage sources, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 281, pp. 110–114.
- [13] **Tutkun, N. and Moses, A. J.** (2004) Effects of Geometrical Factors on Iron Loss Increase in Wound Toroidal Cores Energized by Pulse Width Modulated Voltage Sources, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 284, pp. 201–205.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [14] **D'Alessandro, L. and Ferrero A.** (1994) A Method for the Determination of the Parameters of the Hysteresis Model of Magnetic Materials, *IEEE Transactions on Instruments and Measurement*, Vol.43 No.4.
- [15] **Sarıkaya, T.** (2006) Küçük Güçlü Toroidsel Transformatör Nüvelerinin Optimal Tasarımında Genetik Algoritmaların Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak.
- [16] **Moses, A J. and Tutkun, N.** (1997) Investigation of power loss in wound toroidal cores under PWM excitation, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3763-3765.
- [17] **Loisos, G. and Moses, A J.** (2001) Critical Evaluation and Limitations of Localized Flux Density Measurements in Electrical Steels, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 37, No. 4.
- [18] **Gürdal, O.** (2001) *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Nobel Yayın Dağıtım.
- [19] **De Leon, F. and Semlyen, A.** (1995) A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.1.
- [20] **Küçük, F.** (2002) Yüksek Lisans Tezi, Magnetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- [21] **Jiles, D. C. and Tholke, J. B.** (1989) Theory of Ferromagnetic Hysteresis: Determination of Model Parameters From Experimental Hysteresis Loops, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 25, No. 5,
- [22] **Derebasi, N., Kucuk, İ. and Moses, A. J.** (2003) Mathematical Model for Estimation of Dynamic Losses of Grain Oriented 3% SiFe Toroidal Wound Cores up to 1 kHz., *Sensors and Actuators A*, Volume 106, Issues 1-3, Pages 101-103.
- [23] **Yu, Y. and Atherton, D. L.** (1997) Study of Magnetization Vector Rotation Process Using Tensor Magnetic Hysteresis Loops, *Hysteresis Loops, IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 33, No. 5.
- [24] **Levi, E., Sokola M., Boglietti, A. and Pastorelli, M.,** (1996) Iron loss in rotor-flux-oriented induction machines: identification, assessment of detuning, and compensation *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 11, Issue 5, Sept. Page(s):698 – 709.
- [25] **Nam, H., Ha, K. H., Lee, J. J., Hong, J. P. and Kang, G. H.** (2003) A study on iron loss analysis method considering the harmonics of the flux density waveform using iron loss curves tested on Epstein samples, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 39, Issue 3, Part 1, Page(s):1472 – 1475.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [26] **Levi, E., Sokola, M., Boglietti, A. and Pastorelli, M.** (1996) Iron loss identification and detuning evaluation in rotor flux oriented induction machines, *Power Electronics Specialists Conference*, 1996. PESC '96 Record., 27th Annual IEEE Volume 2, 23-27 Page(s):1555 - 1561 vol.2.
- [27] **Sokola, M., Levi, E., Jamieson, G. and Williams, D.** (1996) Representation and compensation of iron loss in rotor flux oriented induction machines, *International Conference on Proceedings of the Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996 Page(s):243 - 249 vol.1.
- [28] **Nam, H., Lee J. J., Chang, K. C., Hong, J. P. and Lee, J. H.** (2003) Iron loss analysis method considering harmonics of magnetic flux density waveforms, *Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2003. ICEMS., Volume 2, 9-11 Nov. 2003 Page(s):736 - 739 vol.2.
- [29] **Cassat, A., Espanet, C. and Wavre, N.** (2002) BLDC motor stator and rotor iron losses and thermal behavior based on lumped schemes and 3D FEM analysis, *Industry Applications Conference*, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Volume 4, 13-18 Oct. Page(s):2469 – 2476. vol.4
- [30] **Georgilakis, P.S., Doulamis, N.D., Doulamis, A.D., Hatziargyriou, N.D and Kollias, S. D.** (2003) A novel iron loss reduction technique for distribution transformers based on a combined genetic algorithm - neural network approach, *Systems, IEEE Transactions on Man and Cybernetics*, Part C, Volume 31, Issue 1, Page(s):16 – 34.
- [31] **Yunkai, Huang, Kungpeng, Li and Qiansheng, Hu.** (2005) Research on computational model of iron losses in SPWM fed induction motors, *Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Volume 3, Page(s):2002 - 2004 Vol. 3.
- [32] **Kohsaka T., Takahashi N., Nogawa, S. and Kuwata, M.** (2000) Analysis of magnetic characteristics of three-phase reactor made of grain-oriented silicon steel, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 36, Issue 4, Part 1, Page(s):1894 – 1897.
- [33] **Lei, M., Sanada, M., Morimoto, S. and Takeda, Y.** (2003) Prediction of iron loss in rotating machines with rotational loss included, *IEEE Transactions on Magnetics*, Volume 39, Issue 4, Part 2, Page(s):2036 – 2041.
- [34] **Hipper, M.** (2002) Iron loss analysis in linear DC motor: laminated vs. solid core, *IEEE Africon. 6th* Volume 2, Page(s):711 - 714 vol.2.

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Bolu'nun Gerede ilçesinde doğan Mehmet ŞİMŞİR ilköğrenimini 1993 yılında Gerede Halil Nom İlkokulu'nda tamamladı. Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nde 1997 yılında orta okulu 2000 yılında liseyi bitirdikten sonra aynı yıl Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı. 2004 yılında Elektrik ve Elektronik Mühendisi olarak Sakarya Üniversitesi'nden lisans diplomasını alan Mehmet ŞİMŞİR yine 2004 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Aralık 2005'te Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başlayan Mehmet ŞİMŞİR, halen Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak görevine devam etmektedir.