

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK FREKANSLI GÜÇ KATSAYISI DÜZELTİCİ DEVRESİ İÇİN
İNDÜKTÖR TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Ömer ALDEMİR
DANIŞMAN: Prof. Dr. Naci GENÇ

VAN-2021

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK FREKANSLI GÜÇ KATSAYISI DÜZELTİCİ DEVRESİ İÇİN
İNDÜKTÖR TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Ömer ALDEMİR

VAN-2021

KABUL VE ONAY SAYFASI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. Naci GENÇ danışmanlığında, Ömer ALDEMİR tarafından sunulan “Yüksek Frekanslı Güç Katsayısı Düzeltici Devresi İçin İndüktör Tasarımı ve Manyetik Analizi” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 13/11/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Naci GENÇ

İmza:

Üye: Doç. Dr. Özkan ATAN

İmza:

Üye: Doç. Dr. Mehmet Recep MİNAZ

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

.....
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ömer ALDEMİR



ÖZET

YÜKSEK FREKANSLI GÜÇ KATSAYISI DÜZELTİCİ DEVRESİ İÇİN İNDÜKTÖR TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ

ALDEMİR, Ömer

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Naci GENÇ

Aralık 2021, 71 sayfa

Doğru akım makineleri, elektronik şarj aletleri, yenilenebilir enerji uygulamaları başta olmak üzere birçok alanda kullanılan doğrultucular, genellikle güç katsayısı düzeltici devreler ile birlikte kullanılır. Güç katsayısı düzeltici devreler, aktif ve pasif devreler olarak ikiye ayrılır. Pasif güç katsayısı düzeltici devreler indüktör ve kondansatör gibi pasif elemanlar kullanılarak tasarlanırken aktif güç katsayısı düzeltici devrelerde ise doğrultucunun giriş akımı kontrol edilerek kaynaktan olabildiğince sinüzoidale yakın ve faz farkının olmadığı bir akım çekilmesi sağlanır. Aktif güç katsayısı düzeltici devrelerinin giriş akımında dalgacıklar gözlemlenir. Bu dalgacıkların oluşmasının sebebi devredeki yarı iletken elemanın anahtarlanmasıdır. Anahtarlama frekansının giriş akımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Giriş akımındaki dalgacıkların frekansı anahtarlama frekansına eşitken genliği ise anahtarlama frekansı ile ters orantılıdır. Aktif güç katsayısı düzeltici devresinde indüktör akımı giriş akımına eşittir. Bu nedenle kaynaktan dalgacıklı bir akım çekilmesi indüktör akımının da dalgacıklı olmasına neden olur ve bu durumda indüktör nüvesinde bir miktar kayıp oluşur. Anahtarlama frekansının hem dalgacıkların frekansı hem de genliği üzerinde etkili olmasından dolayı indüktör kayıpları üzerinde önemli bir etkisi söz konusudur.

Bu tez çalışmasında ortalama akım tekniği kullanılan yükseltilen tip bir güç katsayısı düzeltici devresinin indüktör kayıpları, üç farklı indüktör tasarımı için 25, 40 ve 50 kHz anahtarlama frekansı değerlerinde ANSYS/Maxwell programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Frekans kayıp faktörü, Güç katsayısı düzeltici devresi, İndüktör kayıpları, Sonlu elemanlar yöntemi.



ABSTRACT

DESIGN AND MAGNETIC ANALYSIS OF INDUCTOR FOR HIGH FREQUENCY POWER FACTOR CORRECTOR CIRCUIT

ALDEMİR, Ömer

M. Sc. Thesis, Department of Electrical-Electronics Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Naci GENÇ

December 2021, 71 pages

Rectifiers, which are used in many fields, especially in direct current machines, electronic chargers, renewable energy applications, are generally used with power factor correction circuits. Power factor correction circuits are divided into active and passive circuits. Passive power factor correction circuits are designed by using passive elements such as inductor and capacitor, while active power factor corrector circuits are controlled by controlling the input current of the rectifier, so that a current as close to sinusoidal as possible and without phase difference is drawn from the source. Fluctuations are observed in the input current of active power factor corrector circuits. The reason for this fluctuation is the switching of the semiconductor element in the circuit. The switching frequency has a significant effect on the input current. The frequency of the ripple in the input current is equal to the switching frequency, while its amplitude is inversely proportional to the switching frequency. In the active power factor corrector circuit, the inductor current is equal to the input current. Therefore, a fluctuating current draw from the source causes the inductor current to fluctuate, and in this case, some loss occurs in the inductor core. The switching frequency has a significant effect on the inductor losses since it affects both the frequency and amplitude of the ripple.

In this thesis, the inductor losses of an boost type power factor corrector circuit using the average current technique were analyzed using the ANSYS/Maxwell program at 25, 40 and 50 kHz switching frequency values for three different inductor designs.

Keywords: Frequency losses factor, Power factor correction circuit, Inductor losses, Finite element method.



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, her türlü ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım sayın Prof. Dr. Naci GENÇ'e, değerli katkılarından dolayı sayın Doç. Dr. Mehmet Recep MİNAZ'a ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali MAMIZADEH'e teşekkür ederim. Ayrıca hayatım boyunca bana her zaman destek olan ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

2021
Ömer ALDEMİR



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
EKLER DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ.....	5
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	7
3.1. Steinmetz Denklemi.....	7
3.1.1. Modife Steinmetz denklemi.....	8
3.1.2. Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi.....	8
3.2. Güç Katsayısı Düzeltici Devresi.....	9
3.3. Ortalama Akım Kontrol Tekniği.....	10
3.4. Standartlar.....	12
3.5. Çekirdek Kaybı.....	13
3.5.1. Histerisiz kaybı.....	13
3.5.2. Eddy akımı kaybı.....	14
3.5.3. Aşırı akım kayıpları.....	16
3.6. Bakır Kaybı.....	16
3.7. İndüktör Sarım Sayısı Hesabı ve Tasarımı.....	17
4. BULGULAR.....	25

	Sayfa
4.1. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları	27
4.2. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları	29
4.3. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları	32
4.4. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları	34
4.5. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları	36
4.6. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları	38
4.7. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları	40
4.8. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları	42
4.9. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları	44
4.10. Nüve Kayıp Grafiklerinin Ayrıntılı Görünümü	46
4.11. İndüktör Nüvelerinin Manyetik Analizi	48
4.11.1. İndüktör nüvelerinin mesh görüntüleri	48
4.11.2. İndüktör nüvelerinin manyetik alan ve akı yoğunluğu dağılımları	49
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	57
KAYNAKLAR	59
EKLER	61
ÖZGEÇMİŞ	71

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Aktif GKD devresi parametreleri.	12
Çizelge 4.1. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları.	29
Çizelge 4.2. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları.	31
Çizelge 4.3. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları.	34
Çizelge 4.4. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları.	36
Çizelge 4.5. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları.	38
Çizelge 4.6 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları.	40
Çizelge 4.7. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları.	42
Çizelge 4.8. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları.	44
Çizelge 4.9. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları.	46
Çizelge 5.1. Toplam indüktör kayıpları.	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. İndüktör nüve çeşitleri.....	2
Şekil 3.1. Kondansatörlü doğrultucu devre şeması ve giriş akımı (Çelik, 2015).....	10
Şekil 3.2. Ortalama akım kontrol tekniği devre şeması.....	11
Şekil 3.3. Ortalama akım tekniği Simplorer benzetimi.	11
Şekil 3.4. Histerisiz çevrimi (Çapanoğlu Savaş, 2006) ve nüvenin mıknatıslanması. ...	13
Şekil 3.5. Eddy akımının oluşumu	14
Şekil 3.6. Toroidal indüktörün önden görünümü.	18
Şekil 3.7. Toroidal indüktörün alttan görünümü.	19
Şekil 3.8. Toroidal indüktörün sağdan görünümü.	19
Şekil 3.9. EE(99 sarım) indüktörün önden görünümü.....	20
Şekil 3.10. EE(99 sarım) indüktörün alttan görünümü.....	20
Şekil 3.11. EE(99 sarım) indüktörün sağdan görünümü.	21
Şekil 3.12. EE(52 sarım) indüktörün önden görünümü.....	22
Şekil 3.13. EE(52 sarım) indüktörün alttan görünümü.....	22
Şekil 3.14. EE(52 sarım) indüktörün sağdan görünümü.	23
Şekil 4.1. 25 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.....	25
Şekil 4.2. 40 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.....	26
Şekil 4.3. 50 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.....	26
Şekil 4.4. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.....	27
Şekil 4.5. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.....	27

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	28
Şekil 4.7. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.	28
Şekil 4.8. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	29
Şekil 4.9. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	30
Şekil 4.10. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	30
Şekil 4.11. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.	31
Şekil 4.12. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	32
Şekil 4.13. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	32
Şekil 4.14. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	33
Şekil 4.15. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.	33
Şekil 4.16. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	34
Şekil 4.17. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	35
Şekil 4.18. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	35
Şekil 4.19. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	36
Şekil 4.20. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	37

Şekil	Sayfa
Şekil 4.21. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	37
Şekil 4.22. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	38
Şekil 4.23. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	39
Şekil 4.24. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	39
Şekil 4.25. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	40
Şekil 4.26. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	41
Şekil 4.27. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	41
Şekil 4.28. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	42
Şekil 4.29. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	43
Şekil 4.30. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	43
Şekil 4.31. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.	44
Şekil 4.32. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.	45
Şekil 4.33. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.	45
Şekil 4.34. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.	47
Şekil 4.35. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.	47

Şekil	Sayfa
Şekil 4.36. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.....	47
Şekil 4.37. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiğinin ayrıntılı görünümü.....	48
Şekil 4.38. Toroidal nüvenin mesh görünümü.	48
Şekil 4.39. EE nüvenin mesh görünümü.	49
Şekil 4.40. Toroidal indüktörün manyetik alan dağılımı ($I=3.95$ A).....	49
Şekil 4.41. Toroidal indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I=3.95$ A).....	50
Şekil 4.42. Toroidal indüktörün manyetik alan dağılımı ($I=2.793$ A).....	50
Şekil 4.43. Toroidal indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I=2.793$ A).....	51
Şekil 4.44. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 3.95$ A).	51
Şekil 4.45. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 3.95$ A).....	52
Şekil 4.46. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 2.793$ A).	52
Şekil 4.47. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 2.793$ A)....	53
Şekil 4.48. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 3.95$ A).	53
Şekil 4.49. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 3.95$ A).....	54
Şekil 4.50. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 2.793$ A).	54
Şekil 4.51. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 2.793$ A)....	55

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
μ	Manyetik geçirgenlik
μ_0	Manyetik geçirgenlik sabiti
μ_r	Göreceli geçirgenlik
ϕ	Manyetik akı
ρ	Özdirenç katsayısı
A_L	Manyetik iletkenlik
B	Manyetik akı yoğunluğu
B_m	Manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri
B_{pp}	Manyetik akı yoğunluğunun tepeden tepeye değeri
C	Kapasitans
E	Gerilim
F	Manyetik motor kuvveti
f	Frekans
f_{eq}	Eşlenik frekans
$I_{ind(25kHz)}$	25 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akımı
$I_{ind(40kHz)}$	40 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akımı
$I_{ind(50kHz)}$	50 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akımı
k	Materyal sabiti
k_e	Eddy akımı kaybı katsayısı
k_{ex}	Aşırı akım kayıpları katsayısı

Simgeler	Açıklama
k_h	Histerisiz kaybı katsayısı
L	Endüktans
l_n	Etkin nüve uzunluğu
l_s	Sargı uzunluğu
N	Sarım sayısı
P_{CORE}	Nüve(çekirdek) kaybı
P_{eddy}	Eddy akımı kaybı
P_{his}	Histerisiz kaybı
P_{excess}	Aşırı akım kayıpları
P_{cu}	Bakır kaybı
P_{ind}	İndüktör kaybı
R_e	Eddy akımı direnci
R_n	Nüve relüktansı
R_s	Sargı direnci
S	Kesit alanı
T	Periyot
t	Zaman
w	Açısal frekans

Kısaltmalar	Açıklama
Ω	Ohm
2B	2 boyutlu
3B	3 boyutlu
A	Amper

Kısaltmalar	Açıklama
AA	Alternatif akım
Anh.	Anahtarlama
DA	Doğru akım
EN	European Norm
GKD	Güç katsayısı düzeltici
GSD	Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi
Hz	Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kHz	Kilohertz
kW	Kilowatt
m	Metre
mF	Milifarad
mH	Milihenry
mm	Milimetre
ms	Milisaniye
mW	Miliwatt
MMK	Manyetik motor kuvveti
MSD	Modife Steinmetz denklemi
PI	Oransal - Integral
SEY	Sonlu elemanlar yöntemi
THD	Toplam harmonik distorsiyonu
TS	Türk Standartları
V	Volt
W	Watt



EKLER DİZİNİ

	Sayfa
EK-1. Toroidal nüvenin katalog bilgileri.....	61
EK-2. 2605-SA1 materyalinin katalog bilgileri.....	62
EK-3. E65 nüvenin katalog bilgileri.....	65
EK-4. 3C90 materyalinin katalog bilgileri.....	69





1. GİRİŞ

Günümüzde en popüler güç elektroniği devrelerinden biri de doğrultuculardır. Doğru akım makineleri, elektronik şarj aletleri, yenilenebilir enerji uygulamaları gibi birçok alanda kullanılan doğrultucular alternatif akımın (AA) doğru akıma (DA) dönüştürülmesini sağlayan güç elektroniği devreleridir. Doğrultucuların verimli çalışmasını sağlamak için güç katsayısı düzeltici (GKD) devreler kullanılır. GKD devreleri, doğrultucuların kaynaktan çektiği akımın faz farkının ve harmonik bozunmasının azalmasını sağlayarak daha verimli bir çalışma yapılmasına olanak sağlar.

GKD devreleri, aktif GKD devreleri ve pasif GKD devreleri olarak ikiye ayrılır. Pasif GKD devrelerinde genellikle indüktör ve kondansatör gibi pasif devre elemanları kullanılır. Pasif GKD devreleri genel olarak aktif GKD devrelerine göre daha büyük hacimlidirler ve yalnızca bir frekans veya bant aralığı için filtreleme yaparlar. Bu yönleriyle aktif GKD devrelerine göre dezavantajlıdır. Aktif GKD devrelerinde ise bir kontrol devresi yardımı ile giriş akımının olabildiğince sinüzoidal formda ve düşük faz farkına sahip olması sağlanır. GKD devreleri çıkış geriliminin büyüklüğünün giriş geriliminin büyüklüğünden büyük veya küçük olmasına göre yükselten veya düşüren tip olabilirler. GKD devreleri farklı teknikler kullanılarak tasarlanabilir. Bu tekniklere örnek olarak ortalama akım kontrol tekniği, tepe akım kontrol tekniği, histerisiz akım kontrol tekniği, sınır akım kontrol tekniği gibi teknikler gösterilebilir. Bu tekniklerden en yaygın kullanılanlardan biri de ortalama akım tekniğidir (Genç, 2010).

Bir GKD devresinin genel olarak düşük maliyetli, yüksek verimli ve küçük boyutlu olması istenir. Bu nitelikleri iyileştirmenin bir yolu da anahtarlama frekansını artırmaktır. Anahtarlama frekansının artırılması devrede daha küçük endüktif reaktansa sahip bir indüktör kullanılmasına olanak sağlar (Çelik, 2015). Bu durumda daha küçük bir nüve kullanılarak devrenin boyutu küçültülüp maliyeti azaltılabilir. Bununla birlikte anahtarlama frekansındaki artış, anahtarlama kayıplarının artmasına ve verimin düşmesine neden olabilir. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için yumuşak anahtarlama, köprüsüz tip GKD devresinin kullanılması gibi yöntemler kullanılabilir. Anahtarlama frekansının etkili olduğu diğer bir konu ise giriş akımıdır. Yükselten tip ortalama akım

kontrol tekniği kullanılan bir aktif GKD devresinin giriş akımında bir dalgacık söz konusudur. Bu dalgacık devredeki yarı iletken elemanın anahtarlanması ile oluşur. Dalgacıkların frekansı anahtarlama frekansına eşittir. Dalgacıkların genliği ise anahtarlama frekansı ile ters orantılı olarak değişiklik gösterir (Şahin ve ark., 2014). Yükselten tip ortalama akım kontrol tekniği kullanılan bir aktif GKD devresinin giriş akımı aynı zamanda devrenin indüktör akımıdır. Bu dalgacıklı akım indüktör nüvesinde bir miktar kayba neden olur. Anahtarlama frekansının indüktör akımındaki dalgacıkların hem frekansını hem de genliğini etkilemesi indüktör kaybı üzerinde önemli bir etken olmasına neden olur.

İndüktör tasarımı yapılırken nüve seçimi önemli bir konudur. Elektriksel olarak benzer niteliğe sahip indüktörler farklı nüveler kullanılarak tasarlanabilir. Bu tasarımlar maliyet, boyut, verim gibi konularda farklılık gösterebilir. Bu tasarımların indüktör kayıpları ise nüvenin materyali, tipi, boyutu ile birlikte sargıda kullanılan telin materyaline, uzunluğuna ve kesatine bağlıdır. Farklı nüvelere sahip indüktör tasarımları Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. İndüktör nüve çeşitleri.

İndüktör kayıpları, nüve kayıpları ve bakır kayıpları olarak ikiye ayrılır. Nüve kayıpları, nüvede ısı olarak ortaya çıkan kayıplardır ve histersiz kayıplarının, Eddy

akımı kayıplarının ve aşırı akım kayıplarının toplamıdır (Mu, 2013). Bakır kayıpları ise sargıda ısı olarak ortaya çıkar ve sargının direncinin yanı sıra deri etkisinin neden olduğu kayıplardır.

Bu çalışmada; giriş gerilimi 220 Volt (V) etkin değere sahip, çıkış gerilimi 400 V ve çıkış gücü 600 Watt (W) olan ortalama akım tekniği kullanılan yükselten tip bir GKD devresinin indüktör kayıpları, üç farklı indüktör tasarımı ve 25, 40 ve 50 kHz anahtarlama frekansları için analiz edilmiştir. Analiz işlemi için öncelikle Simplorer programında ortalama akım tekniği kullanılan yükselten tip bir GKD devresinin benzetimi yapılmıştır. Bu benzetim sonucunda indüktör akımının 25, 40 ve 50 kHz anahtarlama frekanslarındaki formları elde edilmiştir. Ardından indüktör tasarımında kullanılacak nüve tipleri belirlenerek sarım sayıları hesaplanmıştır. İndüktör tasarımlarının ANSYS/Maxwell programında benzetimi yapılarak Simplorer programı kullanılarak elde edilen akım formları bu tasarımlara uygulanmıştır. Bu şekilde farklı nüve tipine sahip indüktörlerin farklı anahtarlama frekanslarındaki kayıpları analiz edilmiştir.



2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Chen (1978), yaptığı çalışmada farklı formdaki gerilimler altında çeşitli malzemelerin nüve kayıplarını ölçmüş ve kare dalga formunda voltaj uyarımı için nüve kaybının, aynı AA akı genliğine sahip sinüzoidal voltaj uyarımından daha düşük olduğunu keşfetmiştir.

Albach ve ark. (1996), yaptıkları çalışmada sinüzoidal olmayan uyarımların oluşturduğu nüve kaybını, sadece akı salınımıyla değil akı değişim oranı (dB/dt) ile ilişkilendirerek ölçmüş ve açıklamıştır. Bu açıklamaya göre sinüzoidal olmayan uyarımlar için ilk genelleştirilmiş nüve kayıp modeli önerilmiştir ve bu denklem Modifiye Steinmetz denklemi (MSD) olarak isimlendirilmiştir.

Li ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada anlık nüve kaybını anlık akı yoğunluğu ve anlık akı değişim oranı (dB/dt) ile ilişkilendirerek Genelleştirilmiş Steinmetz denklemini (GSD) elde etmişlerdir.

Noğay (2002), yaptığı çalışmada sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanan bir program aracılığı ile transformatörün kaçak akı dağılımını 2B ve 3B olarak incelemiştir. Yaptığı inceleme sonucunda 3B olarak yapılan analizin sonuçlarının 2B olarak yapılan analizin sonuçlarına göre daha doğru olduğu görülmüştür.

Shilyashki ve ark. (2014), yaptıkları çalışmada transformatörün 2B ve 3B olarak manyetik analizini yapmış ve z ekseninin manyetik analiz için önemli bir etken olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bakhtiarzadeh (2017), yaptığı çalışmada ANSYS/Maxwell programını kullanarak bir asansör uygulaması için tasarlanan sabit mıknatıslı senkron motorun manyetik analizini yapmıştır.

Özüpak (2020), yaptığı çalışmada transformatörlerin nüvesinde akı yoğunluğunun asimetrik dağılımını ANSYS/Maxvel programını kullanarak 2B ve 3B olarak göstermiştir. Ayrıca farklı çeşitlerdeki transformatörlerin nüve akı yoğunluğu dağılımını ve kayıplarını analiz etmiştir. Buna ek olarak elektromanyetik kuvvet dağılımlarını ve yıldırım darbe analizlerini bu program aracılığı ile ayrıntılı bir şekilde gözlemlemiştir.

Vasilija (2017), yaptığı çalışmada ANSYS/Maxwell programını kullanarak transformatörlerin 2B ve 3B olarak nüve kayıplarını 50 ve 60 Hz gibi farklı frekans değerlerinde analiz ederek karşılaştırmıştır.

Karakaş ve ark. (2018), yaptıkları çalışmada yükselten tip aktif GKD devresi indüktörünün kaybını sarım sayısına göre optimize etmişlerdir.

Li ve ark. (2011), yaptıkları çalışmada 3.2 kW gücünde yükselten tip köprüsüz aktif GKD devresinin indüktör kayıplarını optimize etmişlerdir. Bununla birlikte yaptıkları tasarımın kayıplarını deneysel olarak da gözlemlemişlerdir.

Yapılan literatür taraması sonucunda ANSYS/Maxwell programı kullanılarak birçok transformatör, doğru akım makinesi, alternatif makinesi ve indüktör tasarımı için analiz yapıldığı görülmüştür. Ancak literatürde yükselten tip aktif GKD devresinde kullanılmak üzere tasarlanan indüktörün kaybı ile ilgili bir boşluk söz konusudur. Bu çalışmada yükselten tip aktif GKD devresi indüktörünün farklı nüveler ve anahtarlama frekansları için kayıpları ANSYS/Maxwell programı aracılığı ile incelenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında 25, 40 ve 50 kHz anahtarlama frekanslarında çalışan GKD devresinin farklı indüktör tasarımları için oluşan indüktör kayıpları ANSYS/Maxwell programı kullanılarak analiz edilmiştir. İndüktör kaybının hesaplanması için öncelikle GKD devresinin benzetimi Simplorer programında yapılarak 25, 40, 50 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılmıştır. Bu benzetim çalışması ile belirlenen akımlar ANSYS/Maxwell programında tasarlanan indüktörlere uygulanarak indüktörlerin kayıpları hesaplanmıştır. Bu başlık altında nüve kaybı hesabı ile ilgili yapılmış bazı literatür çalışmaları, GKD devreleri, nüve kayıpları ve bazı temel konular hakkında bilgi verilip benzetim çalışmasının aşamaları gösterilmiştir.

3.1. Steinmetz Denklemi

İndüktör kayıpları ısıl olarak ortaya çıkması nedeni ile kaybın ısıl değişim incelenerek belirlenmesi en doğru sonucu veren metottur. Ancak kaybın bu şekilde ölçülmesi meşakkatli olmasından dolayı çeşitli matematiksel formüller geliştirilmiştir.

Bir indüktörün birim hacim başına ortalama çekirdek kaybı Steinmetz denklemi ile bulunabilir. Steinmetz denklemi anlaşılır ve pratik olmasından dolayı tercih edilen bir denklemdir. Steinmetz denklemi, sinüzoidal formdaki uyarılar altında ölçülen veriler kullanılarak türetilir. Steinmetz denklemi aşağıda verilmiştir (Mu, 2013).

$$P_{CORE} = kf^{\alpha}B_m^{\beta} \quad (3.1)$$

Burada f frekans, B_m manyetik akı yoğunluğunun tepe değeridir. k , α ve β ise deneysel ölçüm sonucu elde edilen katsayılarıdır.

Steinmetz denklemi elde edilirken sinüzoidal uyarılar kullanılır ancak birçok uygulamada akım, farklı frekansta veya sinüzoidal olmayan formda bileşenlere sahiptir. Bu bileşenlerin nüve kaybı üzerinde önemli etkileri olabilir. Dolayısıyla Steinmetz denkleminin bu tür uygulamalarda kullanılması nispeten hatalı sonuçlar verir. Hata oranı daha düşük sonuçların elde edilebilmesi için Steinmetz denkleminin farklı varyasyonları geliştirilmiştir.

3.1.1. Modife Steinmetz denklemi

Nüve kaybının, doğrudan ortalama akı değişim oranının ile ilişkili olduğu varsayılarak türetilmiştir. Sinüzoidal olmayan bir dalga ile sinüzoidal bir dalganın bir periyodundaki ortalama akı değişim oranı ve akı salınımının eşit olması durumunda aynı nüve kaybının olduğu varsayılır. Burada sinüzoidal olmayan dalganın belirtilen şartları sağlayan ve sinüzoidal formda olan bir dalga türetilir. Bu dalganın frekansı f_{eq} aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır.

$$f_{eq} = \frac{2}{B_p^2 \pi^2} \int_0^T \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 dt \quad (3.2)$$

Elde edilen f_{eq} ifadesinin normal Steinmetz denkleminde yazılması ile her yeniden mıknatıslanma döngüsünün enerji kaybı p değeri bulunabilir.

$$P = k f_{eq}^{\alpha-1} B_m^\beta \quad (3.3)$$

Elde edilen p ifadesinin yeniden mıknatıslanma frekansı ile çarpımı ile güç kaybı ifadesi bulunabilir.

$$P_v = p \times f = (k f_{eq}^{\alpha-1} B_m^\beta) f \quad (3.4)$$

Modife Steinmetz denklemi sinüzoidal formda olmayan sinyaller için kullanılan ilk varyasyonlardandır. Ortalama akının sinüzoidal formda olmayan sinyallerin oluşturduğu nüve kaybıyla ilişkilendirilmesi Steinmetz denkleminin birçok varyasyonu için fikir kaynağı olmuştur. Ancak bu yöntem hata oranı açısından özellikle α değerine bağlı olarak tartışmaya açıktır (Albach, 1996)

3.1.2. Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi

Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi anlık çekirdek kaybının, anlık akı yoğunluğu $B(t)$ ve anlık akı değişim oranı $(d\phi/dt)$ ile ilişkili olduğu hipotezine dayanır. Bu hipoteze göre anlık çekirdek kaybını veren $P(t)$ ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$P(t) = k_1 \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha |B(t)|^{\beta-\alpha} \quad (3.5)$$

Elde edilen $P(t)$ ifadesinin bir periyot için ortalaması hesaplanarak ortalama çekirdek kaybı bulunabilir.

$$P_v = \frac{1}{T} \int_0^T k_1 \left| \frac{dB}{dt} \right|^\alpha |B(t)|^{\beta-\alpha} dt \quad (3.6)$$

Bu şekilde genelleştirilmiş Steinmetz denklemi elde edilmiş olur. Denklemin Steinmetz denklemi ile tutarlı olması için k_1 parametresi aşağıda verilen ifadeye göre hesaplanmalıdır.

$$k_1 = \frac{k}{(2\pi)^{\alpha-1} \int_0^{2\pi} |\cos \theta|^\alpha |\sin \theta|^{\beta-1} d\theta} \quad (3.7)$$

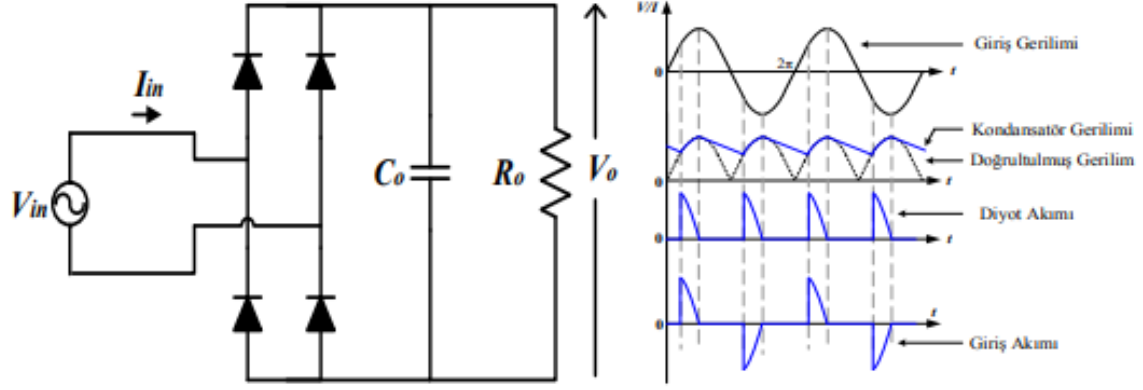
Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi anlık nüve kaybının anlık akı yoğunluğu ile ilişkili olduğunu varsayar. Genelleştirilmiş Steinmetz denklemi bazı durumlarda Modife Steinmetz denkleme göre daha hatalı sonuçlar verir. Ayrıca α değeri β değerinden küçük olmalıdır. Aksi takdirde denklem Eş. 3.6 ifadesinin sonucu tanımsız olur. Bununla birlikte α değerinin β değerinden büyük olduğu birçok durum vardır (Li, 2001).

Farklı durumlarda nüve kaybının hesaplanabilmesi için Steinmetz denkleminin birçok varyasyonu geliştirilmiştir. Bununla birlikte günümüzde çeşitli benzetim programları aracılığı ile de nüve kaybı hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada nüve kayıpları ANSYS/Maxwell programı kullanılarak hesaplanmıştır.

3.2. Güç Katsayısı Düzeltici Devresi

Temel tip doğrultucu devrelerinde yarı iletken elemanların iletim sürelerinin çok kısa olması nedeniyle kaynaktan yüksek harmanokli bir akım çekilir. Ayrıca çıkış gerilimini regüle etmek için kullanılan kondansatör kaynaktan reaktif bir güç çekilmesine neden olur ve bu durum güç faktörünün düşmesine yol açar. Bu şartlar altında çalışan doğrultucu devresi şebeke akımını kirletir ve verimsizdir. Enerji verimliliğinin önemli bir konu olduğu günümüzde gelişmiş ülkeler harmonikler için

belli standartlar belirlemiştir. Doğrultucuların bu standartlara uygun bir çalışma yapmasını sağlamak için GKD devreleri kullanılır (Al-Saffar ve ark., 2009).



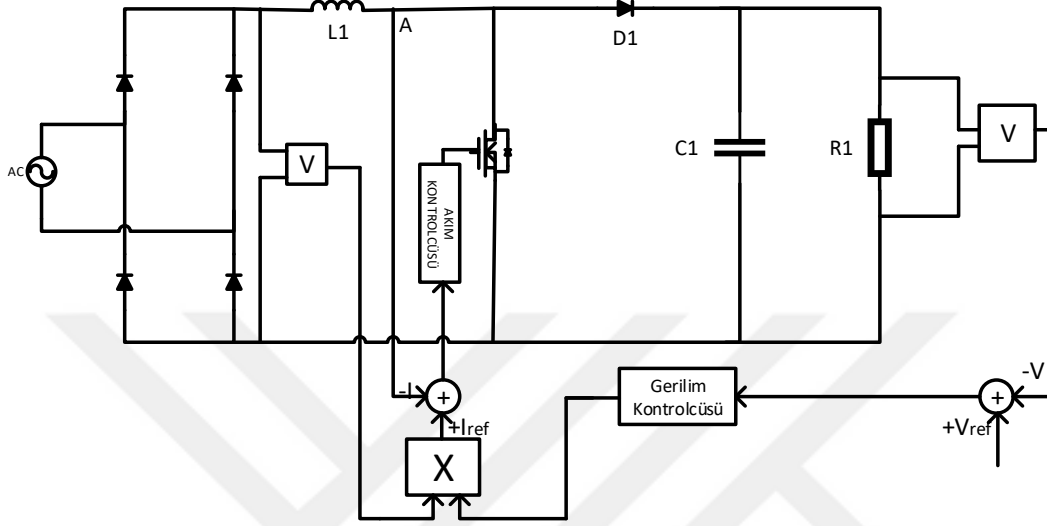
Şekil 3.1. Kondansatörlü doğrultucu devre şeması ve giriş akımı (Çelik, 2015).

GKD devreleri, pasif ve aktif GKD olarak ikiye ayrılır. Pasif GKD devrelerinde kondansatör ve indüktör gibi pasif devre elemanları kullanılarak filtreleme yapılır. Pasif GKD devrelerinde kontrol devrelerine gereksinim duyulmaması önemli bir avantajdır. Bununla birlikte pasif GKD devrelerinin yalnızca bir frekans veya bant aralığı için filtreleme yapması ve yüksek frekanslar için devre boyutunun ve maliyetinin artması pasif GKD devrelerinin dezavantajlı yönleridir. Aktif GKD devreleri ise temel tip doğrultucunun köprü diyodunun çıkışına bir DA/DA dönüştürücü eklenmesi ile elde edilir. Bu devreler giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişkiye göre yükselten, düşüren veya hem yükselten hem düşüren tip olabilirler. DA/DA dönüştürücünün anahtarlanması, kontrolcü veya kontrolcüler vasıtası ile çıkış geriliminin istenilen değerde ve giriş akımının sinüzoidal formda olacak şekilde yapılır. Aktif GKD devrelerinde birçok kontrol tekniği vardır. Bu tekniklere örnek olarak ortalama akım kontrol tekniği, tepe akım kontrol tekniği, histerisiz akım kontrol tekniği, sınır akım kontrol tekniği gibi teknikler gösterilebilir (Çelik, 2015).

3.3. Ortalama Akım Kontrol Tekniği

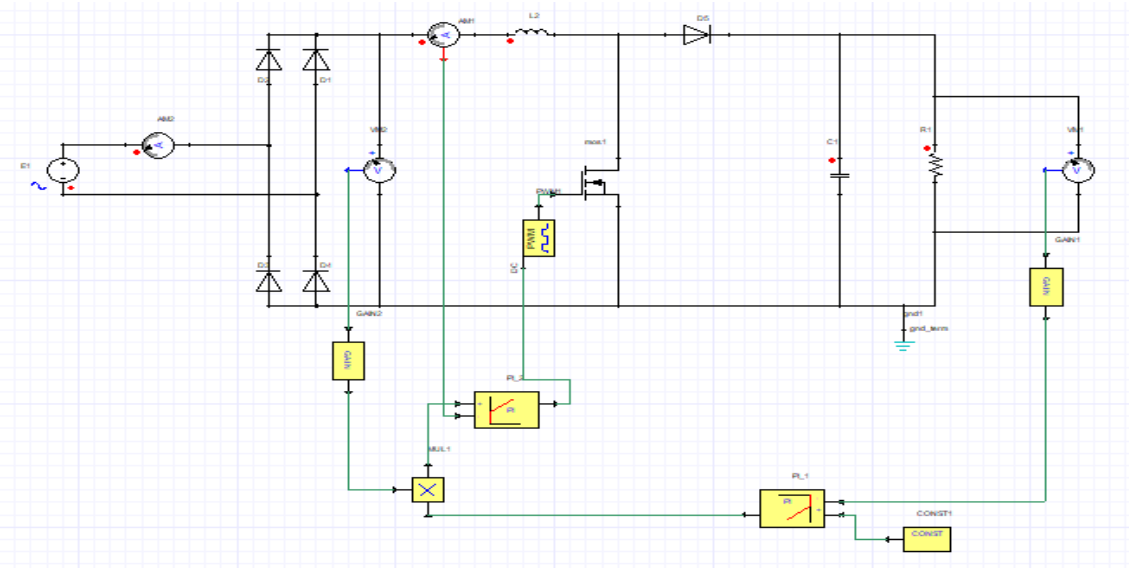
Yükselten tip ortalama akım tekniği devre şeması Şekil 3.2’de gösterilmiştir. Ortalama akım tekniğinde iki adet PI kontrolcü kullanılmıştır. Bu kontrolcülerden biri çıkış gerilimini kontrol ederken diğeri indüktör akımını kontrol eder. Bu teknikte akım

kontrolcüsünün referans sinyali elde edilirken köprü doğrultucunun çıkış gerilimi ile gerilim kontrolcüsünün çıkış sinyali çarpılır. Böylece doğrultulmuş sinüs formunda bir indüktör akımı referansı elde edilir. Boost dönüştürücünün anahtarlaması bu referans indüktör akımına göre yapılarak kaynaktan sinüzoidal formda bir akım çekilir.



Şekil 3.2. Ortalama akım kontrol tekniği devre şeması.

Yükseltilen tip ortalama akım kontrol tekniği kullanılan bir aktif GKD devresinin benzetimi Simplerer programında yapılarak devre ile ilgili bilgiler Çizelge 3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Ortalama akım tekniği Simplerer benzetimi.

Çizelge 3.1. Aktif GKD devresi parametreleri

Aktif GKD devresi parametreleri	
Giriş gerilimi - frekansı	220 V – 50 Hz
Çıkış gerilimi - gücü	400 V – 600 W
L	1 mH
C	0.47 mF
Anahtarlama frekansları	50 kHz – 40 kHz – 25 kHz

Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de GKD devresinin giriş akımındaki dalgacıklar gösterilmiştir. Bu dalgacıklar yarı iletken malzemenin anahtarlanması ile oluşur ve dalgacıkların frekansı ile anahtarlama frekansı eşittir. Anahtarlama frekansının artırılması dalgacıkların frekansının artmasına neden olurken genliğinin azalmasına neden olur. Steinmetz denkleminde de görüldüğü üzere frekansın artması nüve kayıplarının artmasına neden olurken genliğin azalması kayıpların azalmasına neden olur. Bu durum anahtarlama frekansının ve indüktör tasarımı nüve kaybı üzerindeki önemini ortaya koymaktadır (Li, 2011).

İndüktör kayıpları çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları olarak ikiye ayrılır. Bakır kayıpları sargı direnci ve deri etkisi nedeni ile oluşan kayıpların toplamıdır. Sargı direnci, sargıda kullanılan telin materyal cinsine, kesitine ve uzunluğuna bağlıdır. Sargı direncinin artması bakır kayıplarının artmasına neden olur. Bununla birlikte sargıda alternatif akımın sebep olduğu deri etkisi nedeniyle de bir miktar kayıp oluşur. (Karakaş, 2018). Bu çalışmada deri etkisi çok küçük bir etkiye sahip olduğu için ihmal edilmiştir.

3.4. Standartlar

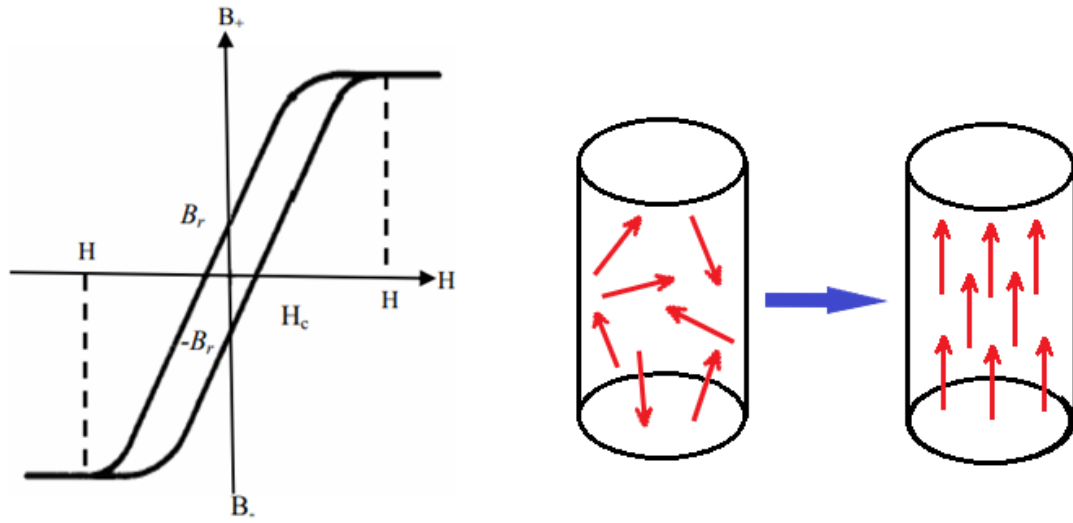
Önceki bölümlerde belirtildiği gibi şebeke kirliliğinin azaltılması için bazı standartlar bulunmaktadır ve çeşitli elektrikli aletlerin bu standartlara uygun olarak kullanılması gerekmektedir. Bu standartlardan biri de EN 61000-3-2 kodlu Avrupa Birliği standardıdır. Türkiye’de Avrupa Birliği uyum yasaları kapsamında bu standarda tabidir. EN 61000-3-2 kodlu Avrupa Birliği standardı Türkiye’de TS EN 61000-3-2

kodu ile kullanılmaktadır. Bu standarda göre elektrikli cihazlar A, B, C ve D olmak üzere 4 sınıfta gruplandırılır ve her cihaz bulunduğu sınıfta belirtilen THD değerlerine uygun olarak çalışmalıdır. EN 61000-3-2 dışında IEEE 519 vb. gibi farklı standartlar da mevcuttur. Bu standartlar gelişen teknoloji ile birlikte günün koşullarına göre zaman zaman güncellenir (Çelik, 2015).

3.5. Çekirdek Kaybı

Transformatörler, indüktörler, elektrik motorları vb. elektrikli aygıtlarda kullanılan manyetik çekirdekler değişken bir manyetik alana maruz kaldıklarında bir miktar kayıp oluştururlar. Bu kayıplar histerisiz kayıpları, eddy akımı kayıpları ve aşırı akım kayıpları olarak üçe ayrılır. (Karakaş, 2018).

3.5.1. Histerisiz kaybı



Şekil 3.4. Histerisiz çevrimi (Çapanoğlu Savaş, 2006) ve nüvenin mıknatıslanması.

Etrafında sargı bulunan bir ferromanyetik nüve düşünelim. Bu sargıdan akım geçmesi durumunda bir manyetik alan oluşur. Bu manyetik alan etkisi ile nüve mıknatıslık özelliği kazanır ve nüvenin içinde manyetik akı oluşur. Manyetik alan ile manyetik akı arasında lineer bir ilişki vardır. Ancak belli bir noktadan sonra bu lineer ilişki kaybolur ve manyetik alan artırılrsa bile manyetik akı sabit kalır. Bu değer doyma noktası olarak ifade edilir. Sargıya sinüzoidal bir akım uygulanması ile oluşan manyetik

alan ve manyetik akı yoğunluğu ilişkisi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Manyetik akı değerini veren ifade Eş. 3.8'de gösterilmiştir. Denklemdaki μ manyetik geçirgenlik katsayısıdır ve Eş. 3.9'da verildiği üzere manyetik geçirgenlik sabiti (μ_0) ve göreceli geçirgenlik (μ_r) ifadelerinin çarpımına eşittir.

$$B = H \cdot \mu \quad (3.8)$$

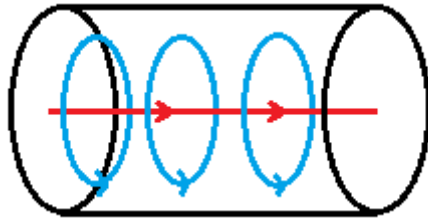
$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3.9)$$

Nüvedeki manyetik akının değişmesi esnasında nüve tanecikleri arasında sürtünme sonucunda bir miktar ısı kayıp oluşur. Bu kayıp histerisiz kaybı olarak adlandırılır (Çapanoğlu Savaş, 2006). Sinüzoidal forma sahip bir uyartım için birim hacimdeki histerisiz kaybını veren ifade Eş. 3.10'da verilmiştir.

$$P_{his} = k_h f B_m \quad (3.10)$$

Burada k_h ile ifade edilen terim materyal katsayısı, f frekans, B_m manyetik akının tepe değeri ve n materyalin niteliğine göre belirlenen bir katsayıdır.

3.5.2. Eddy akımı kaybı



Şekil 3.5. Eddy akımının oluşumu

Bir nüveden zamanla değişen bir manyetik akı aktığı zaman nüvede gerilim indüklenir. Bu gerilim nüve üzerinde akım akmasına neden olarak ısı kayıp meydana getirir. Bu akım Eddy akımı olarak isimlendirilir. Şekil 3.5'de manyetik akı kırmızı renk ile belirtilmiştir. Manyetik akının değişmesi ile oluşan Eddy akımları ise

mavi renk ile gösterilmiştir. Eddy akımlarının yönü sağ el kuralı kullanılarak bulunabilir. Eddy akımları kaybını gösteren ifade Eş. 3.11’de verilmiştir.

$$P_{eddy} = \frac{e^2}{R_e} \quad (3.11)$$

Burada e nüvede indüklenen gerilimi R_e ise Eddy akımı direncini ifade etmektedir. Dikey kesit alanı S olan bir nüve düşünelim. Nüvenin manyetik akısının değişmesi ile birlikte nüvede gerilim indüklenir. Bu gerilim Faraday yasası kullanılarak elde edilebilir. İndüklenen gerilimi gösteren ifade Eş. 3.13’de verilmiştir.

$$\phi = BS \quad (3.12)$$

$$e = \frac{d\phi}{dt} = S \frac{dB}{dt} \quad (3.13)$$

Nüvenin zamanla sinüzoidal değişen olarak değişen bir manyetik alana maruz kaldığını düşünelim. Bu durumda nüvede sinüzoidal bir manyetik akı oluşur.

$$\vec{B} = \vec{B} \sin(\omega t) \quad (3.14)$$

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = \omega \hat{B} \cos(\omega t) \quad (3.15)$$

$$\frac{d\vec{B}}{dt} = 2\pi f \hat{B} \cos(\omega t) \quad (3.16)$$

$$e = S 2\pi f \hat{B} \cos(\omega t) \quad (3.17)$$

Verilen denklemlerin düzenlenmesi ile Eş. 3.18’ de gösterilen birim hacimdeki Eddy akımı kaybı ifadesi elde edilir.

$$P_{eddy} = k_e f^2 B_m^2 \quad (3.18)$$

Verilen ifade görüldüğü üzere Eddy akımı kaybı frekansın karesi ile doğru orantılı olarak değişir. Bu nedenle anahtarlama frekansının artması ile artan dalgacık frekansının yükselmesi Eddy akımı kaybında önemli bir yükselişe neden olur. Eş.

3.11’de görüldüğü üzere Eddy akımı kaybı Eddy akımı direnci ile ters orantılıdır. Nüve materyali çeşitli kompozit materyallerden oluşan tasarımlar yapılarak Eddy akımı kaybı azaltılabilir. Nüve relüktansını artırmanın bir yolu da birkaç plakanın birleştirilmesi ile veya toz haine getirilmiş nüve materyalinin sıkıştırılması ile elde edilmiş nüve tasarımlarıdır (Yıldız, 2007).

3.5.3. Aşırı akım kayıpları

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda toplam çekirdek kaybının her zaman histerisiz kaybı ve Eddy akımı kaybının toplamına eşit olmadığı görülmüştür. Bu kayıp manyetik devrenin homojenliğini kaybederek düzgün olmayan manyetik alan ve manyetik akı yolları oluşması ile ilişkilidir. Birim hacimdeki aşırı akım kayıplarını veren ifade Eş. 3.19’da gösterilmiştir (Zhang, 2009).

$$P_{excess} = k_{ex} f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (3.19)$$

3.6. Bakır Kaybı

Bakır kaybı, nüve sargısının elektriksel güç harcaması nedeniyle oluşan kayıptır. Bir dirence sahip olan sargıdan akım geçmesi ile birlikte ısı olarak ortaya çıkar. Deri etkisinin de bakır kaybı üzerinde etkisi söz konusudur. Bu çalışmada deri etkisi ile oluşan kayıplar çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. Bakır kaybı değerini veren ifade Eş. 3.20’de verilmiştir.

$$P_{cu} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T f(I) \right]^2 R_s \quad (3.20)$$

Denklemden $f(I)$ olarak verilen ifade akım fonksiyonunu, R_s ifadesi ise sargı direncini belirtmektedir. Sargı direnci Eş. 3.21’de verilen ifade ile hesaplanabilir.

$$R_s = \rho \frac{l_s}{S} \quad (3.21)$$

Denklemden ρ ile belirtilen ifade sargı materyalinin öz direnç katsayısı, l_s sargının uzunluğu ve S kesit alanıdır.

3.7. İndüktör Sarım Sayısı Hesabı ve Tasarımı

Manyetik bir devrede akıyı oluşturan kuvvete manyetik motor kuvveti (MMK) denir. Manyetik devrenin akısı ise MMK'nin relüktansa oranlanması ile elde edilir. Bir nüvenin relüktansı, nüvenin etkin uzunluğunun nüve materyalinin manyetik geçirgenliğinin akıya dik kesit ile çarpımının oranına eşittir.

$$F = N \cdot i \quad (3.22)$$

$$R_n = A_L^{-1} = \frac{l_n}{\mu \cdot A} \quad (3.23)$$

$$\phi = \frac{F}{R_n} = \frac{N \cdot i}{R_n} \quad (3.24)$$

Manyetik bir devrenin endüktansını veren ifade Eş. 3.25'de gösterilmiştir. Bu eşitlikteki akı ifadesi yerine Eş. 3.24'ün yazılmasıyla Eş. 3.26 elde edilir.

$$L = \frac{N \cdot \phi}{i} \quad (3.25)$$

$$L = \frac{N^2}{R_n} \quad (3.26)$$

Eş. 3.26'daki relüktans ifadesinin yerine Eş. 3.23'ün yazılması ile Eş. 3.27 elde edilmiş olur (Hurley ve Wölfle, 2013).

$$L = \frac{\mu \cdot A \cdot N^2}{l_s} \quad (3.27)$$

$$L = N^2 \cdot A_L \quad (3.28)$$

Kayıp analizi yapılacak hava aralıklı 2605-SA1 materyalden üretilmiş toroidal tip nüveye sahip indüktörün sarım sayısı hesabı aşağıda verilmiştir. Burada tasarlanan indüktörün endüktansının 1 mH olması istenmektedir. 1 mH endüktansın elde edilmesi

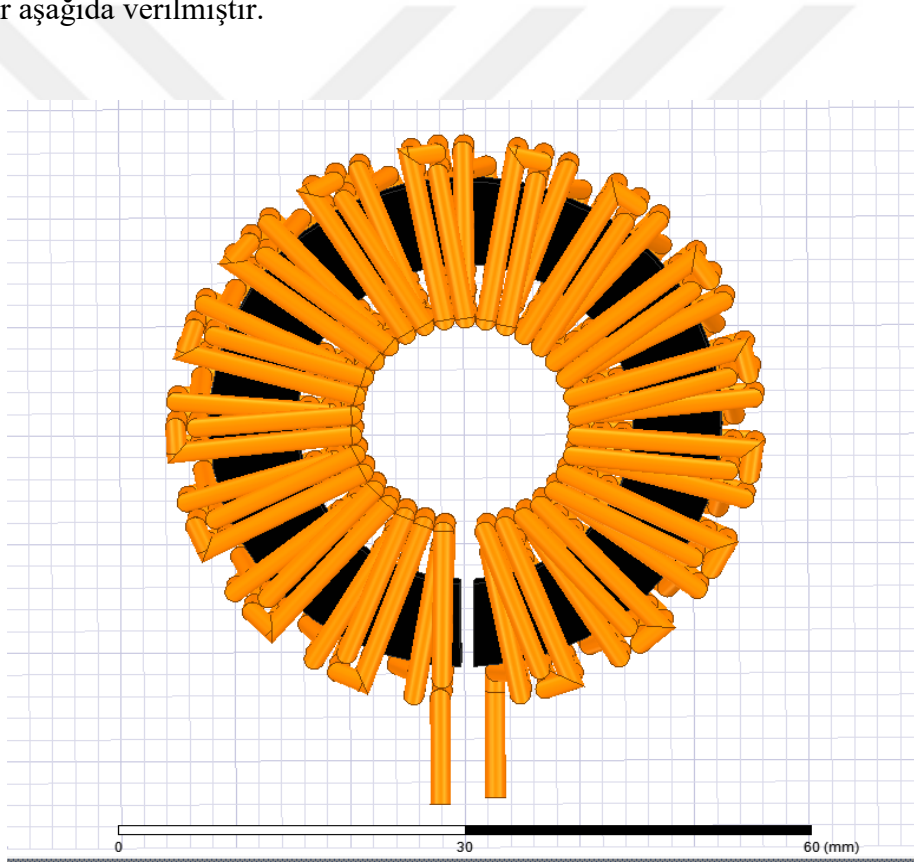
için gerekli sarım sayısı denklem kullanılarak hesaplanabilir. Denklemdeki A_L ifadesi nüve kataloğunda 101 nH olarak verilmiştir.

$$1 \cdot 10^{-3} = N^2 \cdot 101 \cdot 10^{-9} \quad (3.29)$$

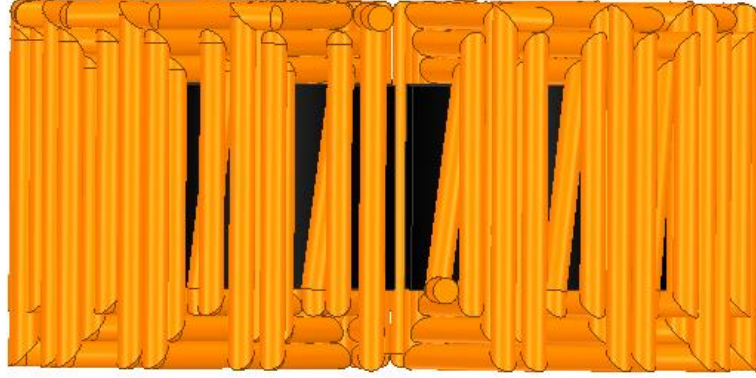
$$N^2 = 9900.9901 \quad (3.30)$$

$$N \cong 99 \quad (3.31)$$

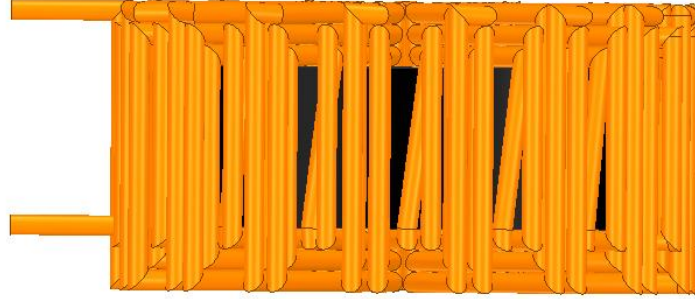
Sarım sayısının hesaplanmasının ardından toroidal tip nüveye sahip indüktörün tasarımı ANSYS/Simplorer programında üç boyutlu olarak yapılmıştır. Tasarıma ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.6. Toroidal indüktörün önden görünümü.

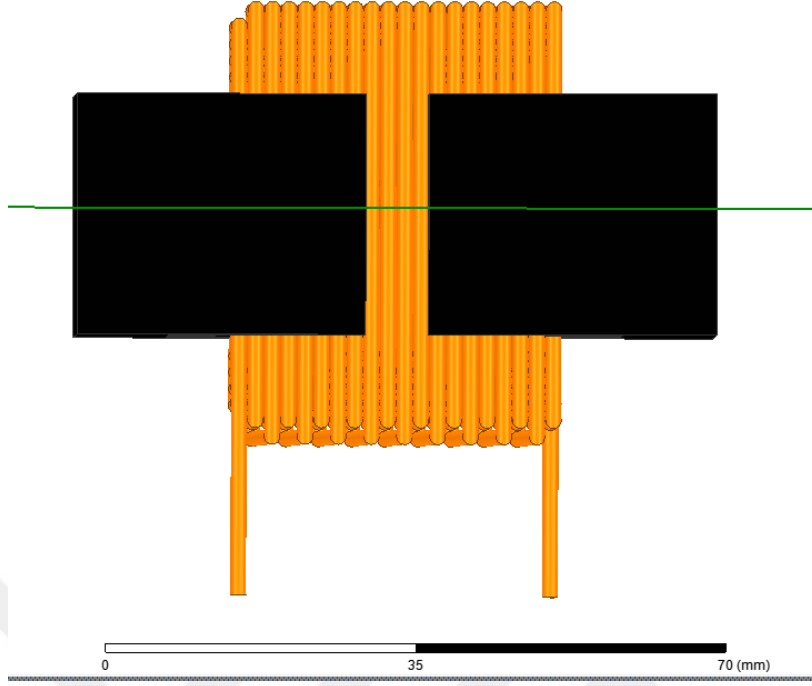


Şekil 3.7. Toroidal indüktörün alttan görünümü.

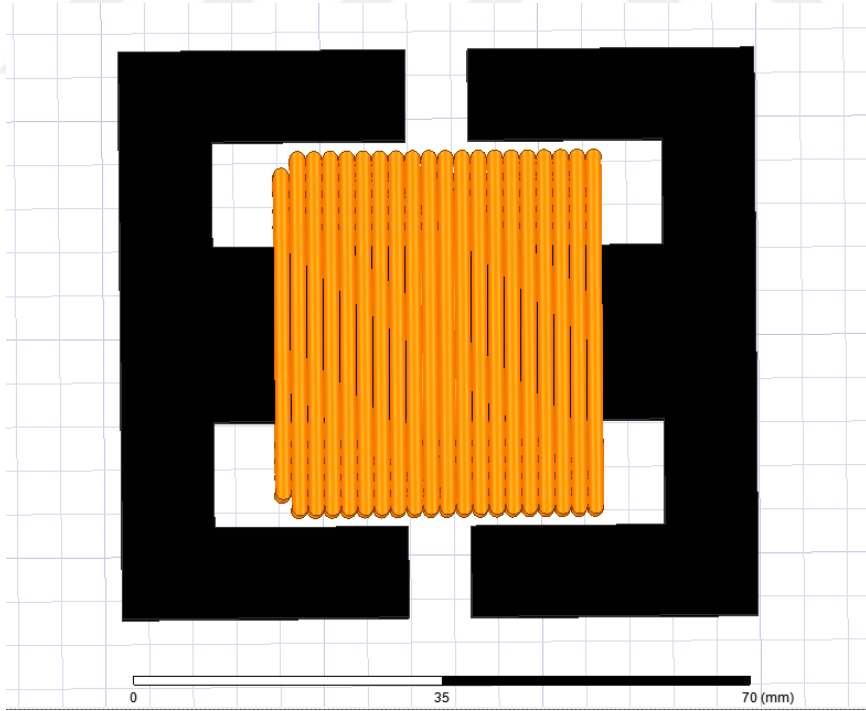


Şekil 3.8. Toroidal indüktörün sağdan görünümü.

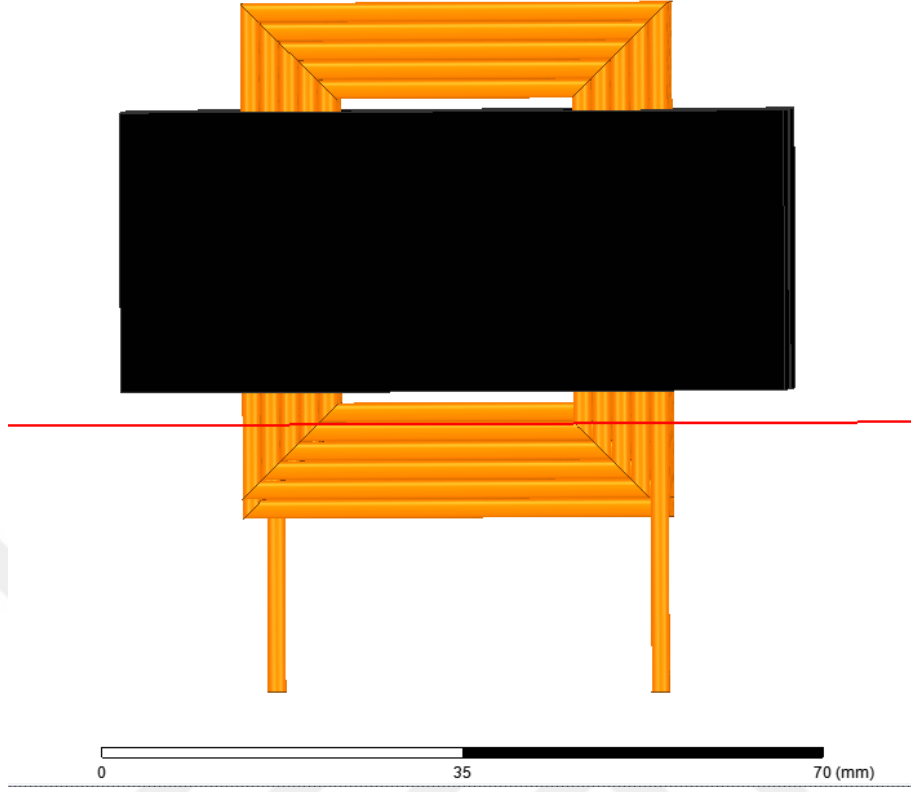
Toroidal indüktörün sarım sayısı 99 olarak hesaplanmıştır. İndüktör kayıplarının aynı akım yoğunluğunda analiz edilmesi için 3C90 materyalden üretilmiş EE tipi indüktör de 99 sarım olarak tasarlanmış ve EE tipi nüvenin toroidal tip nüve ile eşit A_L değerine sahip olması için gerekli hava aralığı bırakılmıştır. Toplam hava aralığı katalogta verilen değerlere göre yaklaşık 14.38 mm olarak belirlenmiştir. EE tipi nüveye sahip 99 sarımlık indüktörün ANSYS programında yapılan üç boyutlu tasarıma ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.9. EE(99 sarım) indüktörün önden görünümü.



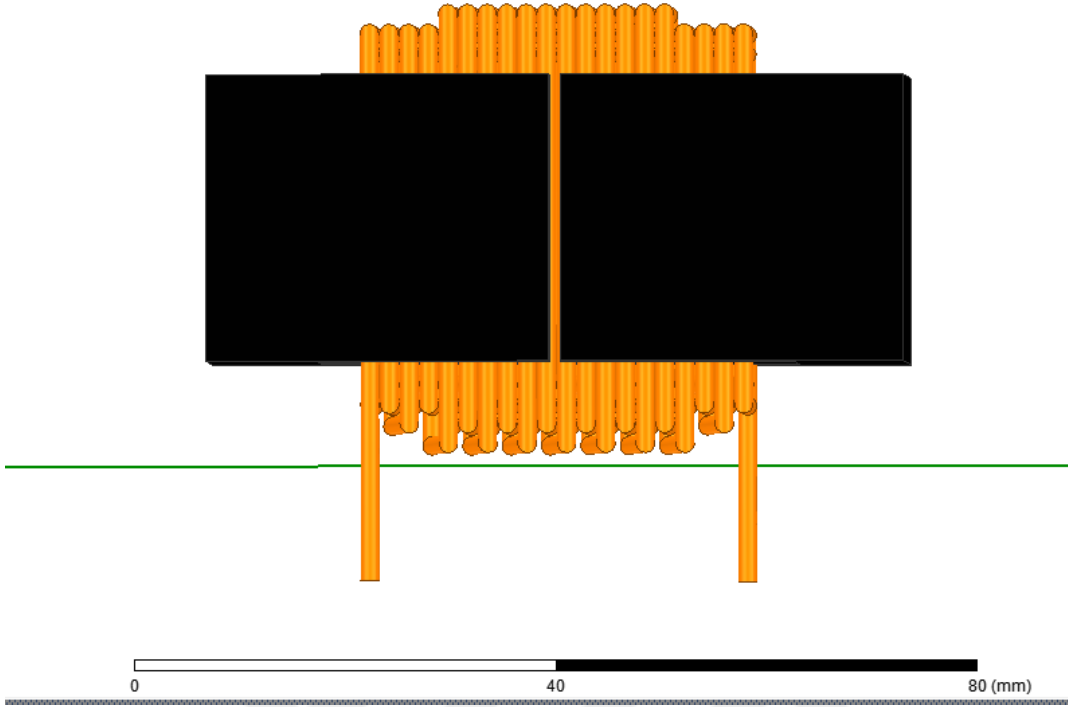
Şekil 3.10. EE(99 sarım) indüktörün alttan görünümü.



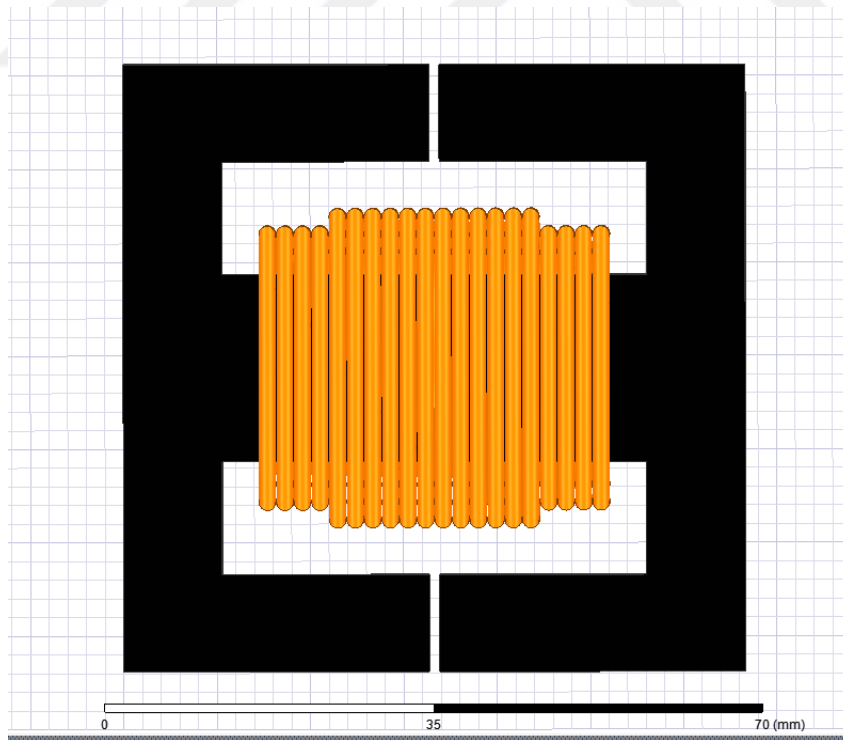
Şekil 3.11. EE(99 sarım) indüktörün sağdan görünümü.

EE tipi nüve kullanılan indüktör tasarımlarında hava aralığı değiştirilerek farklı nitelikte indüktörlerin tasarlanması mümkündür. Bu yönleriyle EE nüve tipi sabit hava aralıklı nüvelere göre avantajlıdır (Zheng ve ark., 2018).

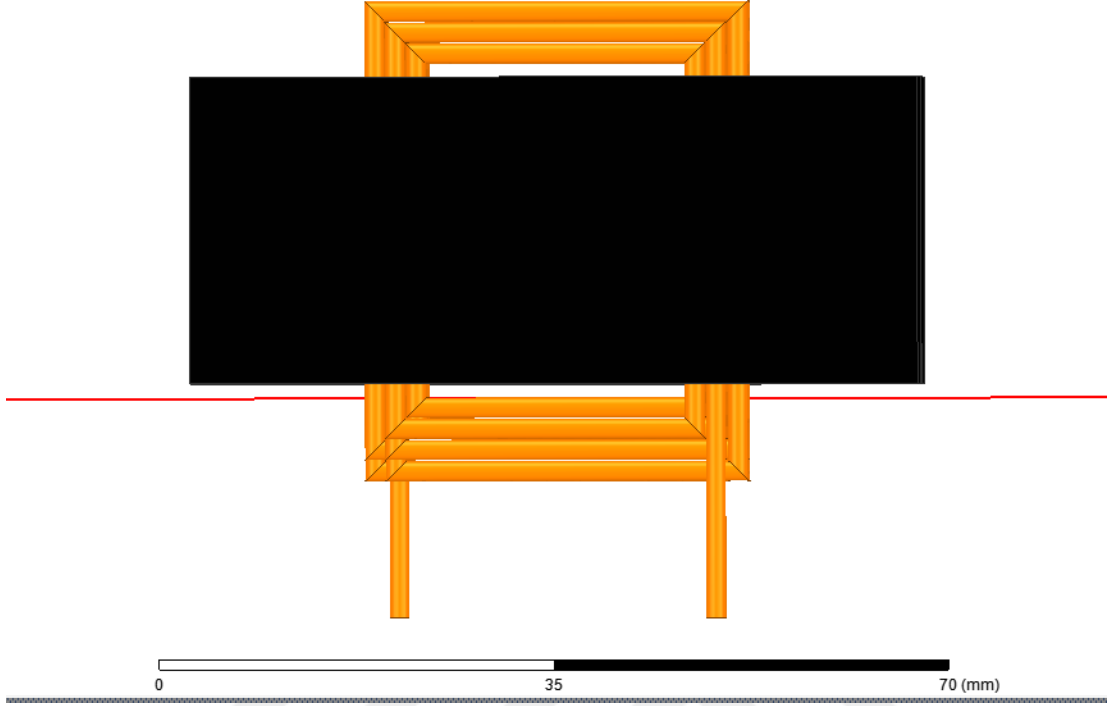
Aynı EE tipi nüvenin toplam hava aralığı 2.3 mm olarak ayarlanarak A_L değerinin 370 nH olması sağlanmıştır. Bu nüveye 52 sarım yapılarak 1 mH lik indüktans elde edilmiştir. Bu tasarımın yapılmasındaki amaç toroidal nüveye sahip indüktörle yaklaşık olarak aynı bakır kaybına sahip bir EE tipi indüktörün çekirdek kayıplarının incelenmesidir. EE tipi nüveye sahip olan 52 sarımlık indüktöre ait ANSYS programında yapılan üç boyutlu tasarımlara ait görseller aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.12. EE(52 sarım) indüktörün önden görünümü.



Şekil 3.13. EE(52 sarım) indüktörün alttan görünümü.



Şekil 3.14. EE(52 sarım) indüktörün sağdan görünümü.



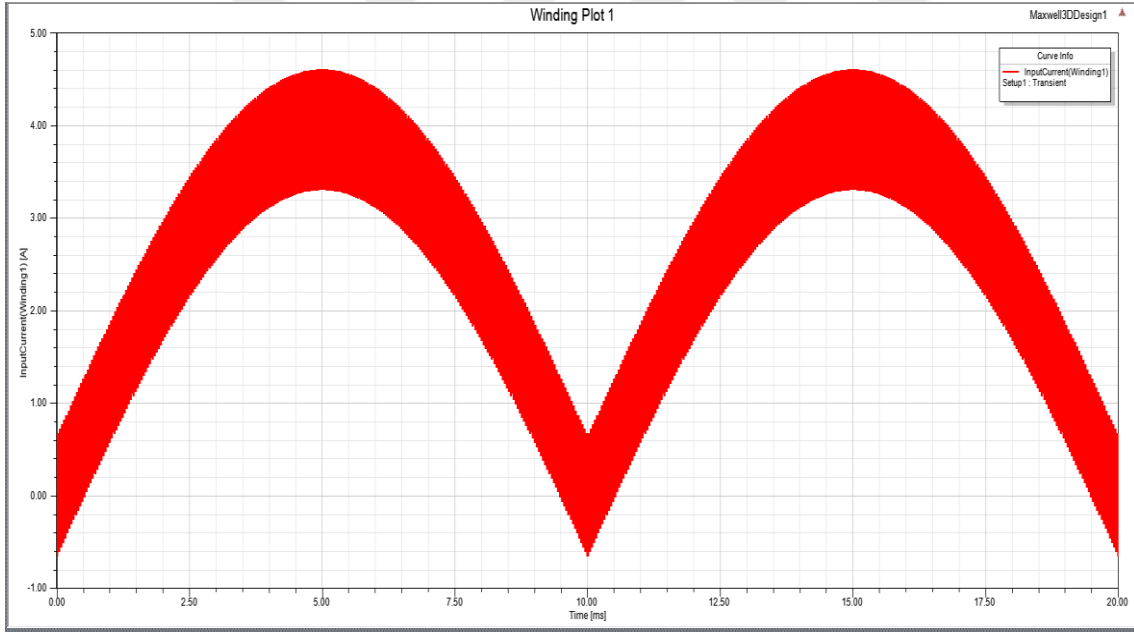
4. BULGULAR

Simplorer programında yapılan benzetim çalışması ile 25, 40 ve 50 kHz anahtarlama frekansları için indüktör akım formları elde edilmiştir. İndüktör akımları incelendiğinde anahtarlama frekansının artmasıyla birlikte dalgacıkların genliğinin azaldığı görülmektedir. Farklı anahtarlama frekansları için indüktör akımlarının matematiksel ifadeleri ve iki periyotluk grafikleri aşağıda verilmiştir. Sıfır noktalarında azalan dalgacık genliği ihmal edilmiştir.

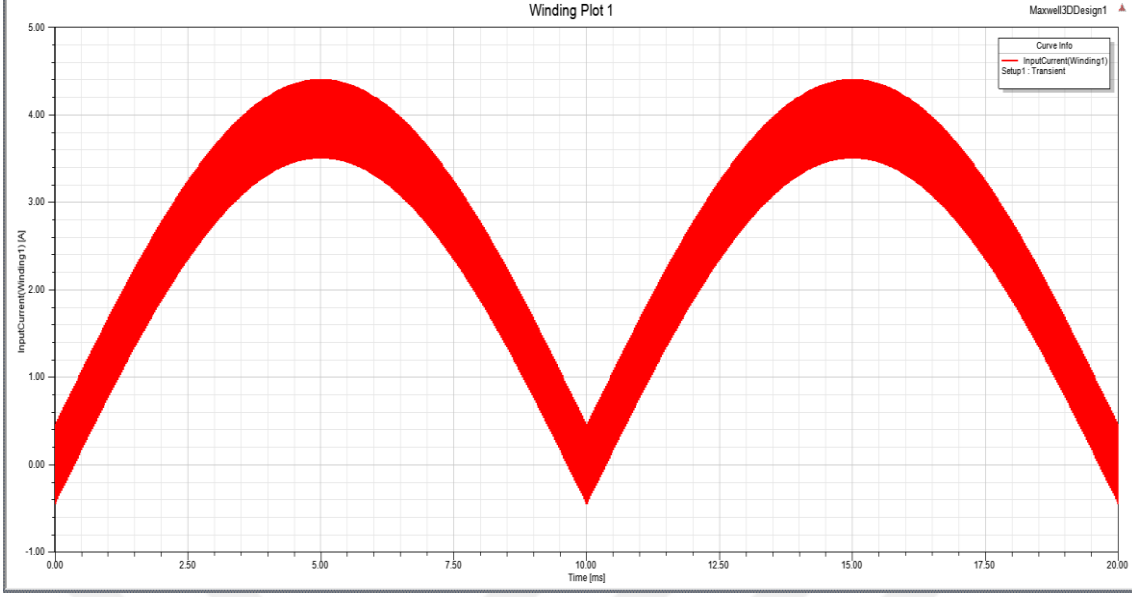
$$I_{ind(25kHz)} = |3.95 \sin(2\pi 50t)| + 0.65 [|\sin(2\pi 12500t)| - |\cos(2\pi 12500t)|] \quad (4.1)$$

$$I_{ind(40kHz)} = |3.95 \sin(2\pi 50t)| + 0.45 [|\sin(2\pi 20000t)| - |\cos(2\pi 20000t)|] \quad (4.2)$$

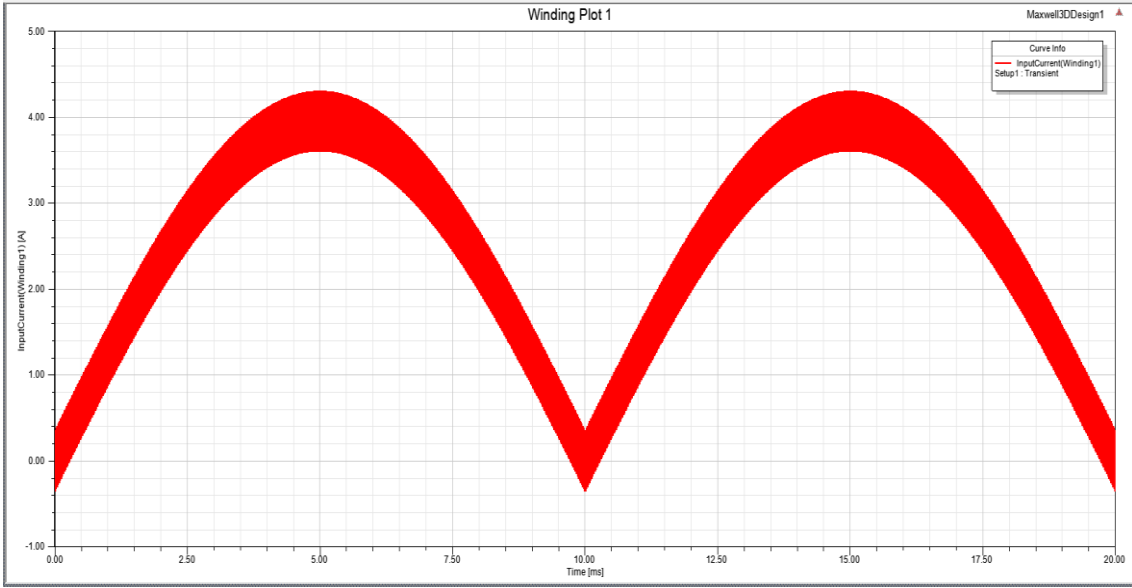
$$I_{ind(50kHz)} = |3.95 \sin(2\pi 50t)| + 0.35 [|\sin(2\pi 12500t)| - |\cos(2\pi 25000t)|] \quad (4.3)$$



Şekil 4.1. 25 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.



Şekil 4.2. 40 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.

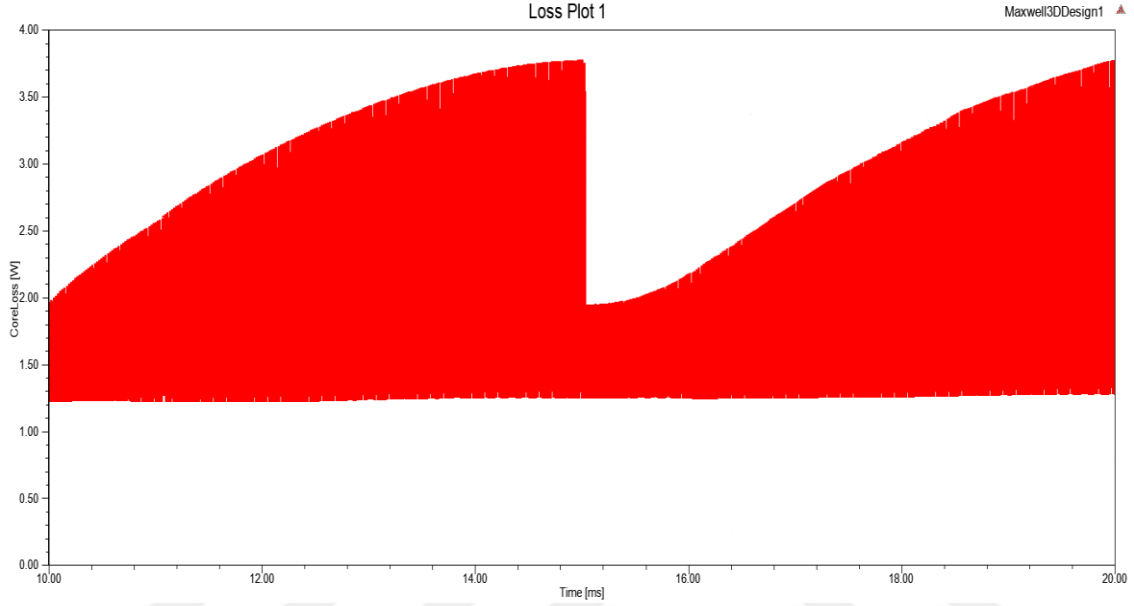


Şekil 4.3. 50 kHz anahtarlama frekansı için indüktör akım grafiği.

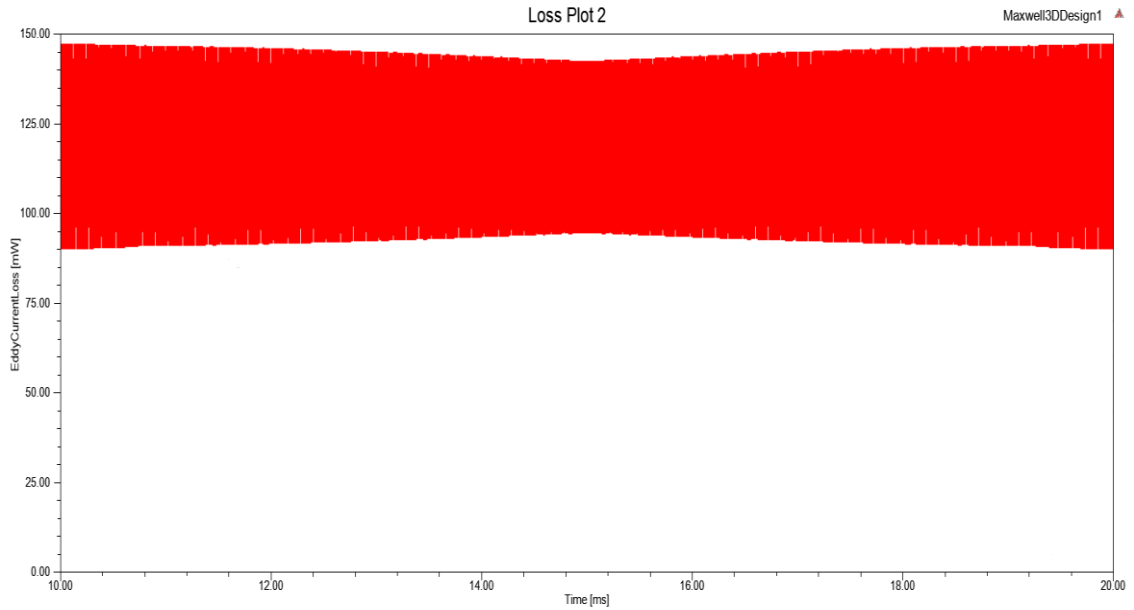
Eş. 4.1, Eş. 4.2 ve Eş. 4.3’de belirtilen akımların üç indüktöre uygulanması ile oluşan kayıplar aşağıdaki başlıklarda verilmiştir. Sargıda bakırdan yapılmış 2.5 mm^2 kesit alanın sahip kablo kullanılmıştır. Bakırın özdirenci $1.72 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ ’dir. Bu durumda toroidal ve 52 sarımlı EE indüktörün 6.7 m uzunluğundaki sargılarının oluşturacağı bakır kaybı 0.36 W olarak hesaplanmıştır. Sargı uzunluğu 14.8 m olan 99 sarımlı EE indüktörün bakır kaybı ise 0.794 W olarak hesaplanmıştır.

4.1. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları

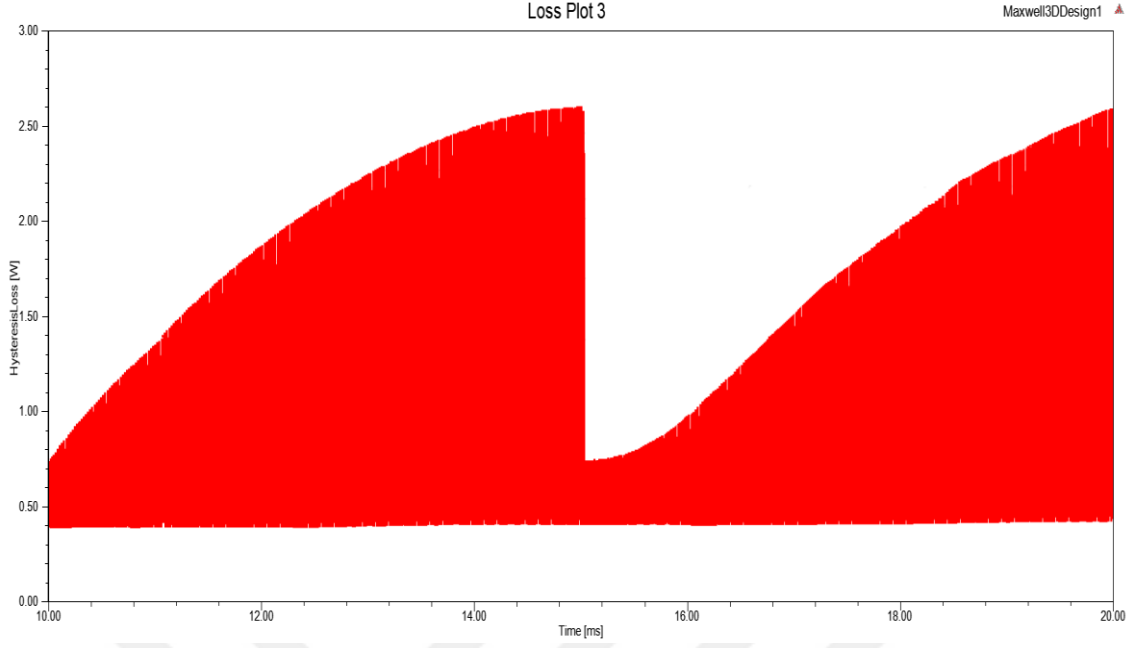
Aşağıdaki grafiklerde 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



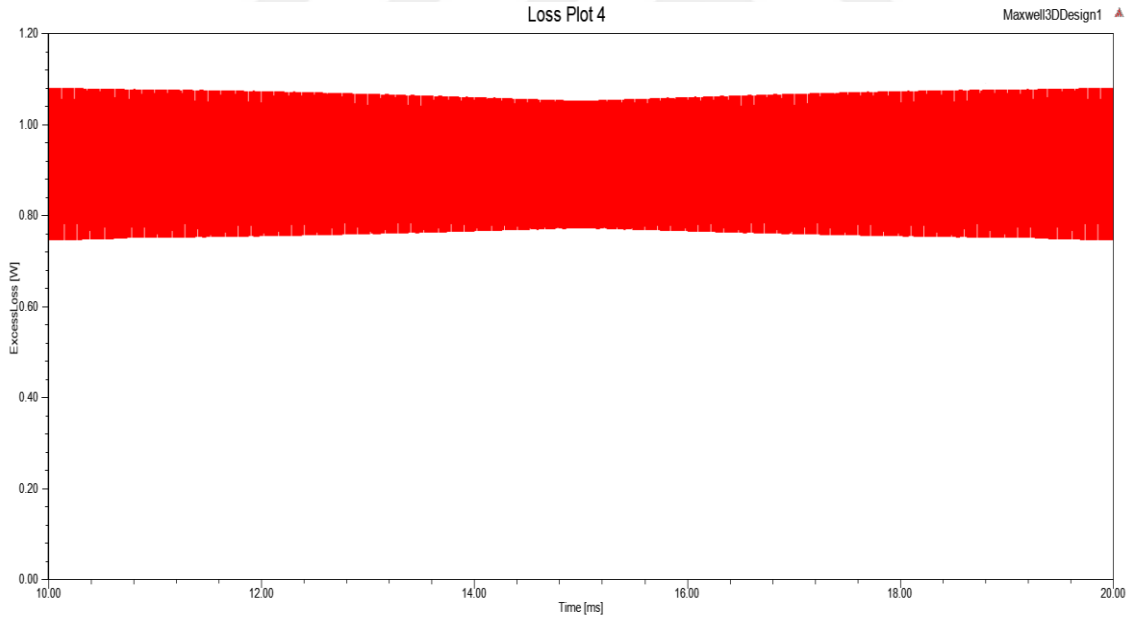
Şekil 4.4. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.5. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği



Şekil 4.6. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.



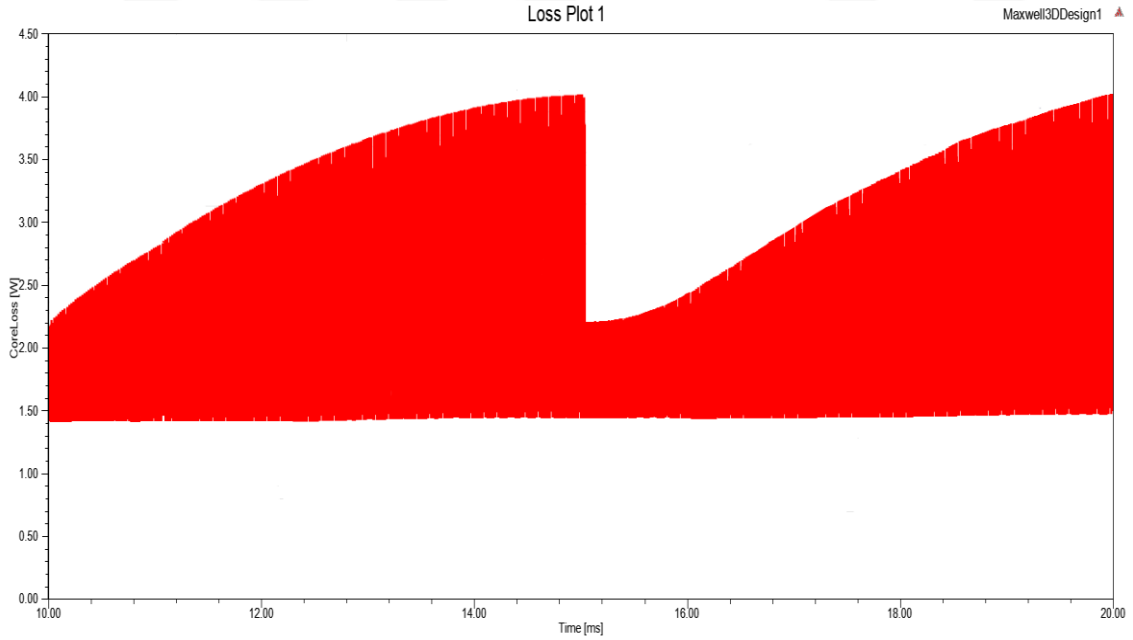
Şekil 4.7. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.

Çizelge 4.1. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları

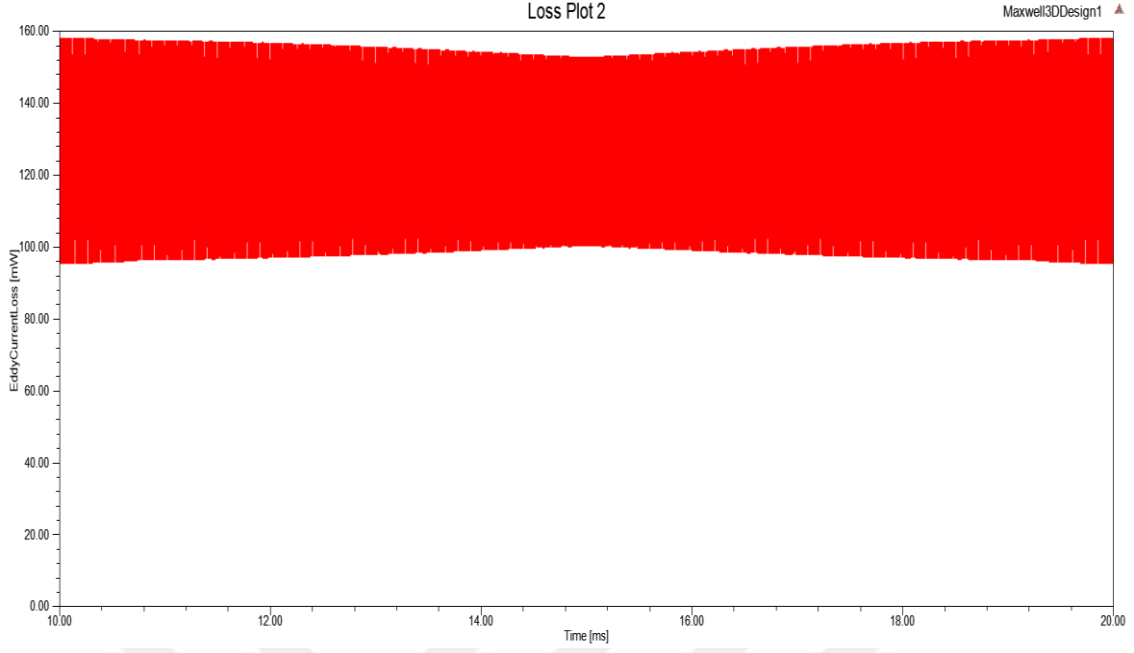
Kayıplar	W
Çekirdek Kaybı (P_{core})	2.09
Eddy Kaybı (P_{eddy})	0.119
Histerisiz Kaybı (P_{his})	1.061
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0.91
Bakır Kaybı (P_{cu})	0.36
Toplam Kayıp (P_{ind})	2.45

4.2. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları

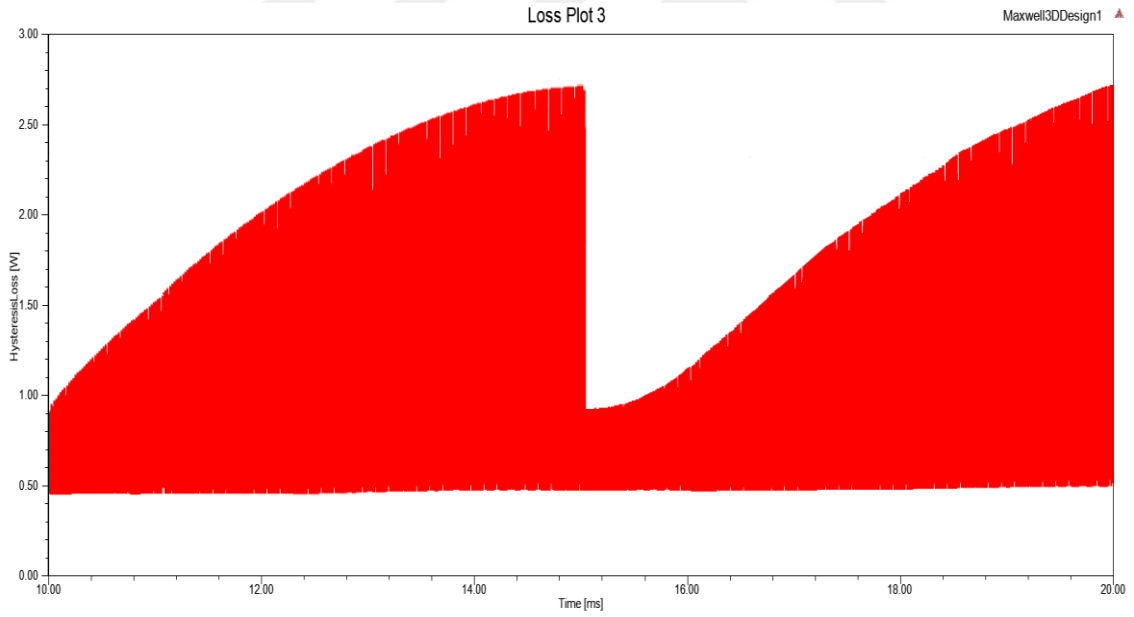
Aşağıdaki grafiklerde 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.



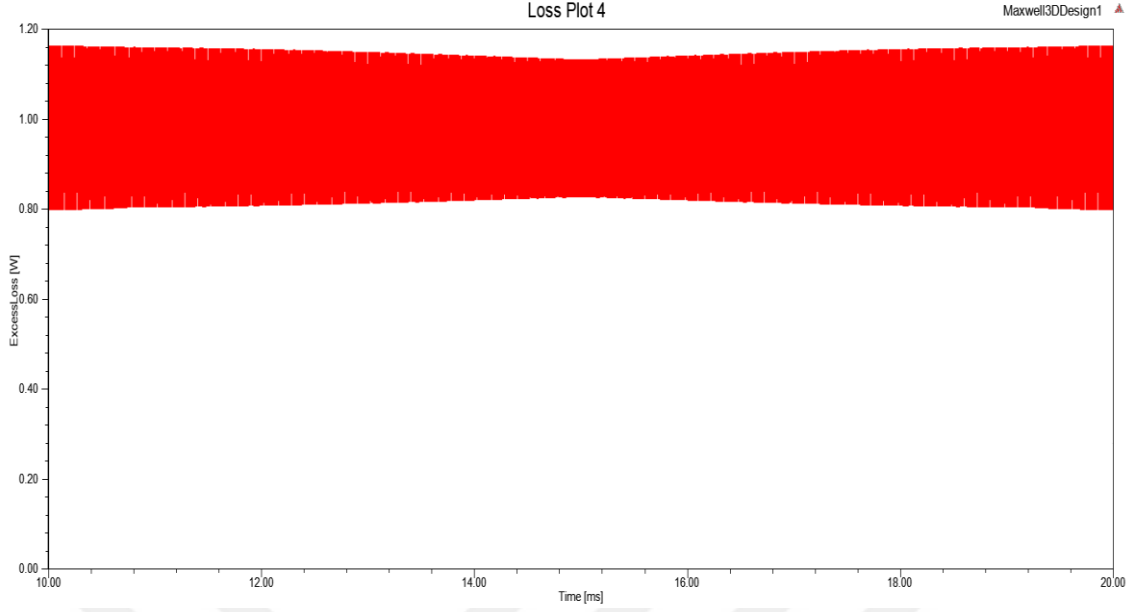
Şekil 4.8. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.9. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



Şekil 4.10. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.



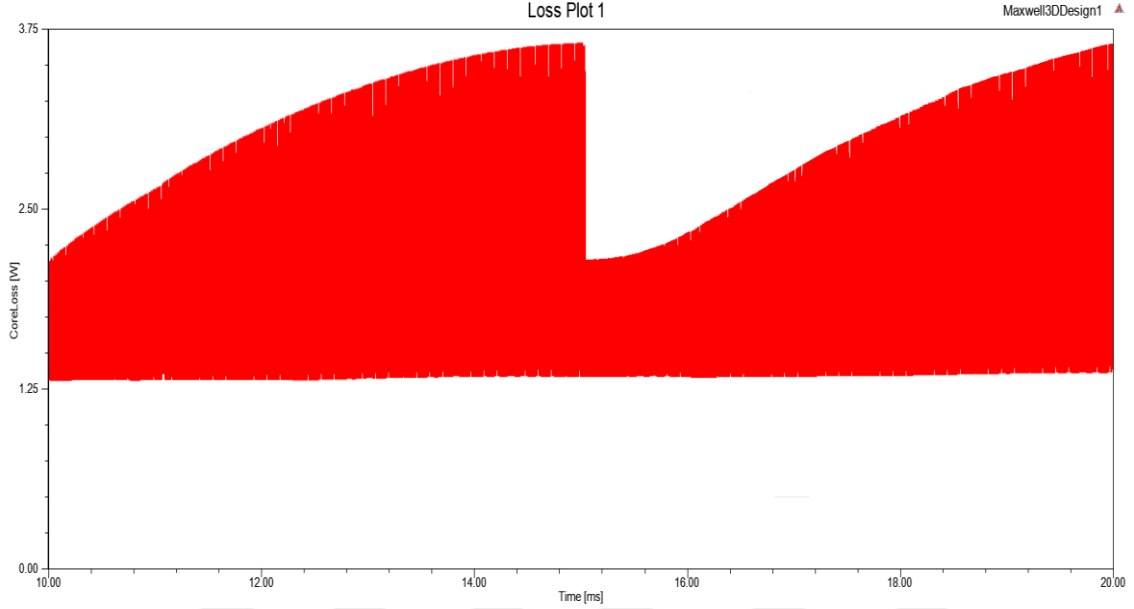
Şekil 4.11. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.

Çizelge 4.2. 40 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları

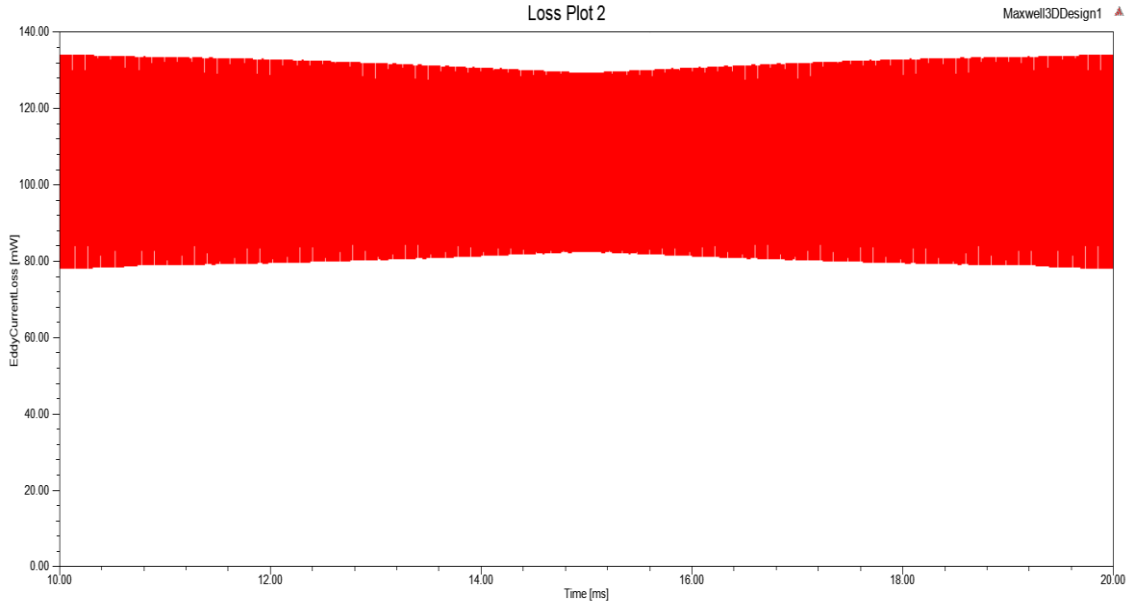
Kayıplar	W
Çekirdek Kaybı (P_{core})	2.345
Eddy Kaybı (P_{eddy})	0.126
Histerisiz Kaybı (P_{his})	1.239
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0.98
Bakır Kaybı (P_{cu})	0.36
Toplam Kayıp (P_{ind})	2.705

4.3. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin Toroidal İndüktörün Kayıpları

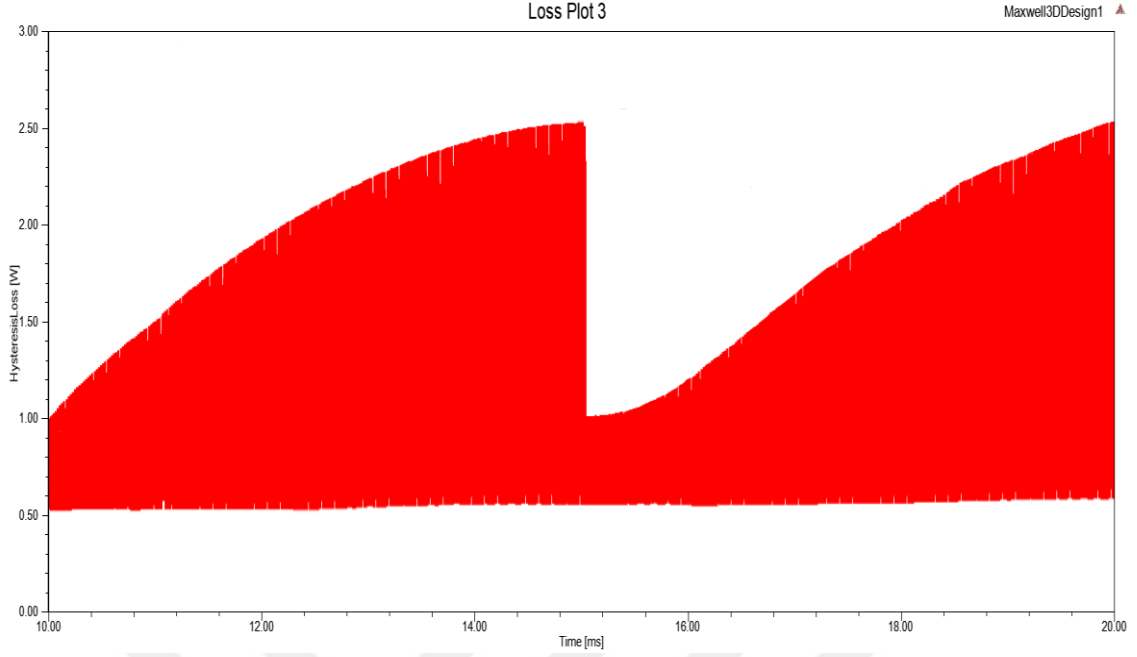
Aşağıdaki grafiklerde 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.



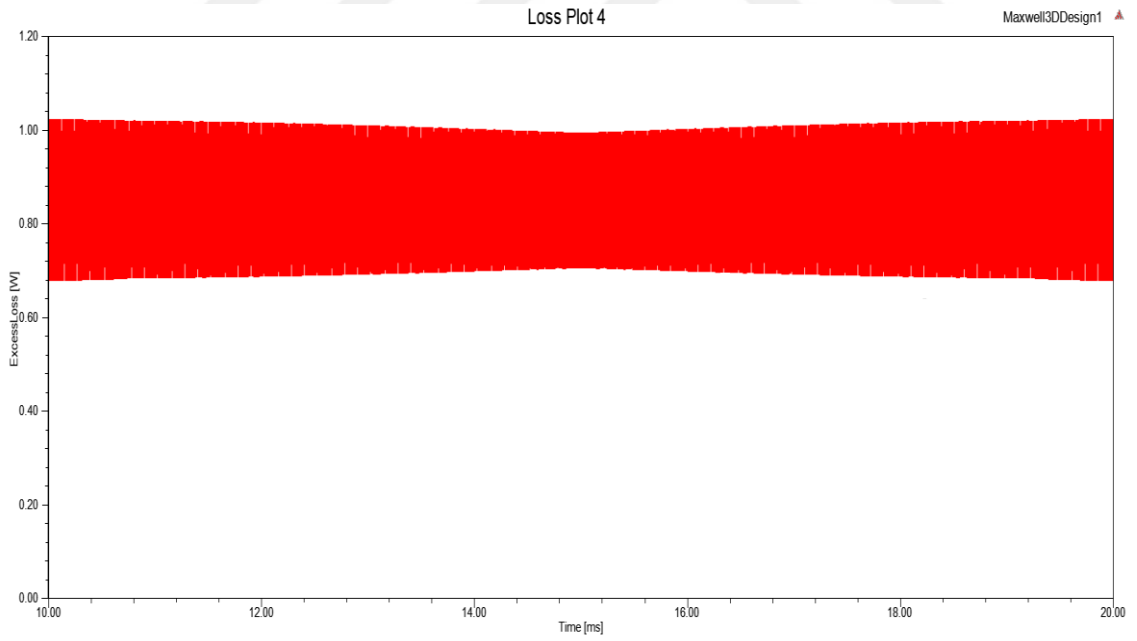
Şekil 4.12. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.13. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



Şekil 4.14. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiği.



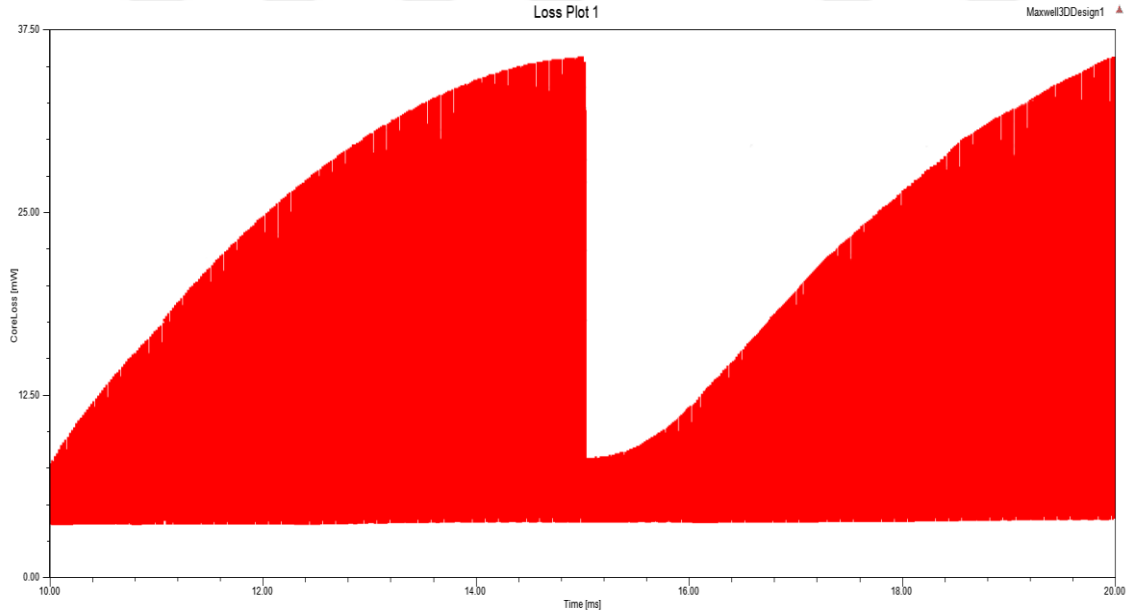
Şekil 4.15. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiği.

Çizelge 4.3. 25 kHz anahtarlama frekansı için toroidal nüve kayıpları

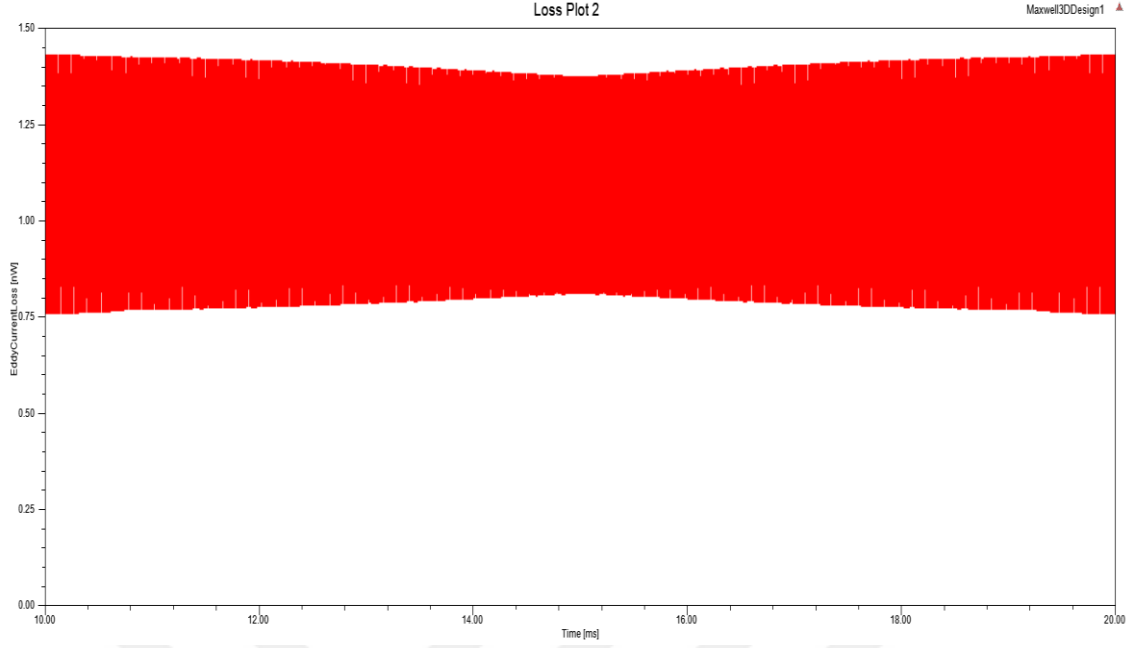
Kayıplar	W
Çekirdek Kaybı (P_{core})	2.166
Eddy Kaybı (P_{eddy})	0.106
Histerisiz Kaybı (P_{his})	1.21
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0.85
Bakır Kaybı (P_{cu})	0.36
Toplam Kayıp (P_{ind})	2.526

4.4. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları

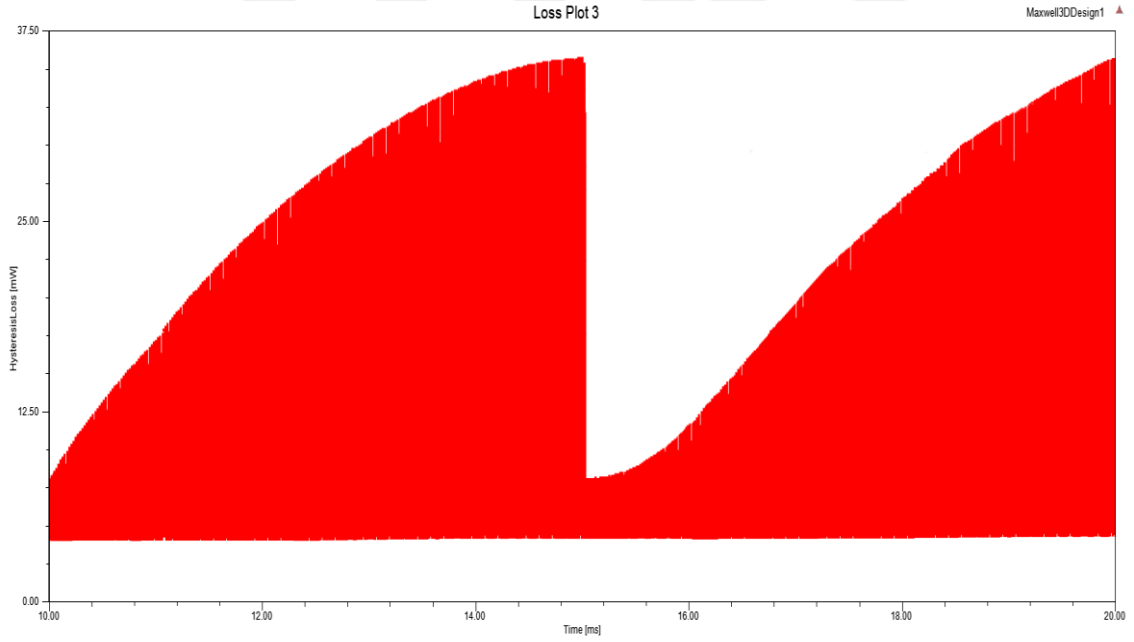
Aşağıdaki grafiklerde 50 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.16. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.17. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



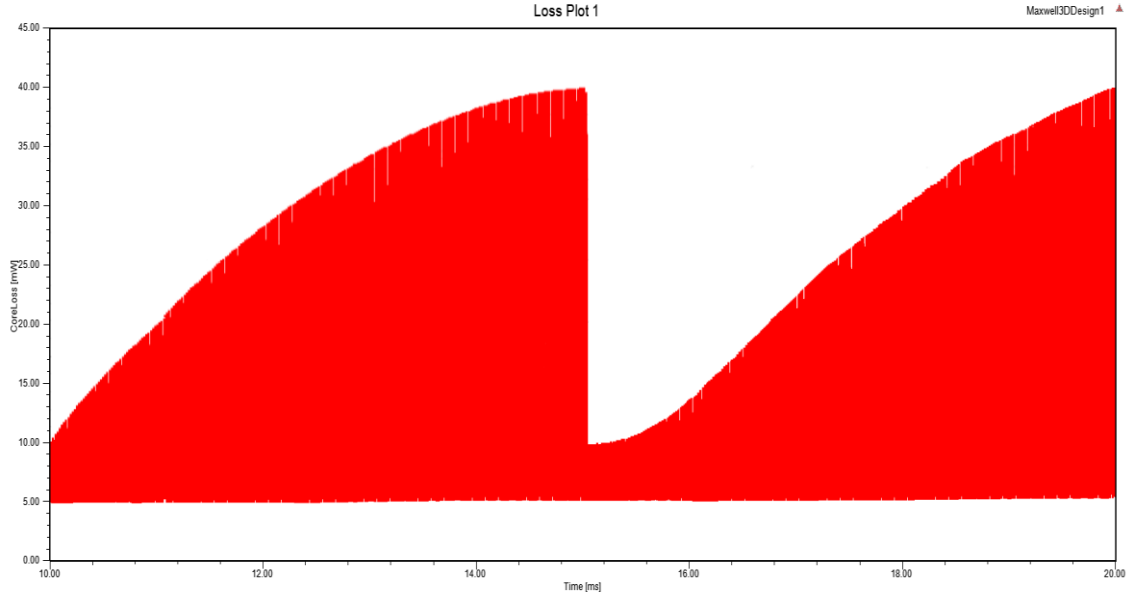
Şekil 4.18. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

Çizelge 4.4. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları

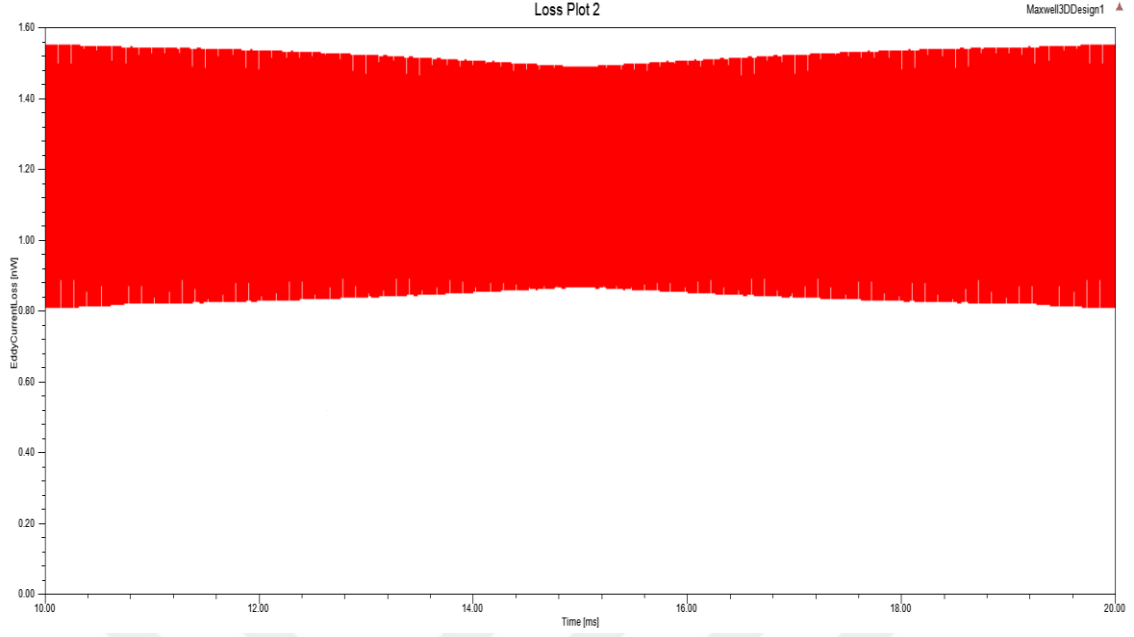
Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	14.53
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$1.1 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	14.53
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	794
Toplam Kayıp (P_{ind})	808.53

4.5. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları

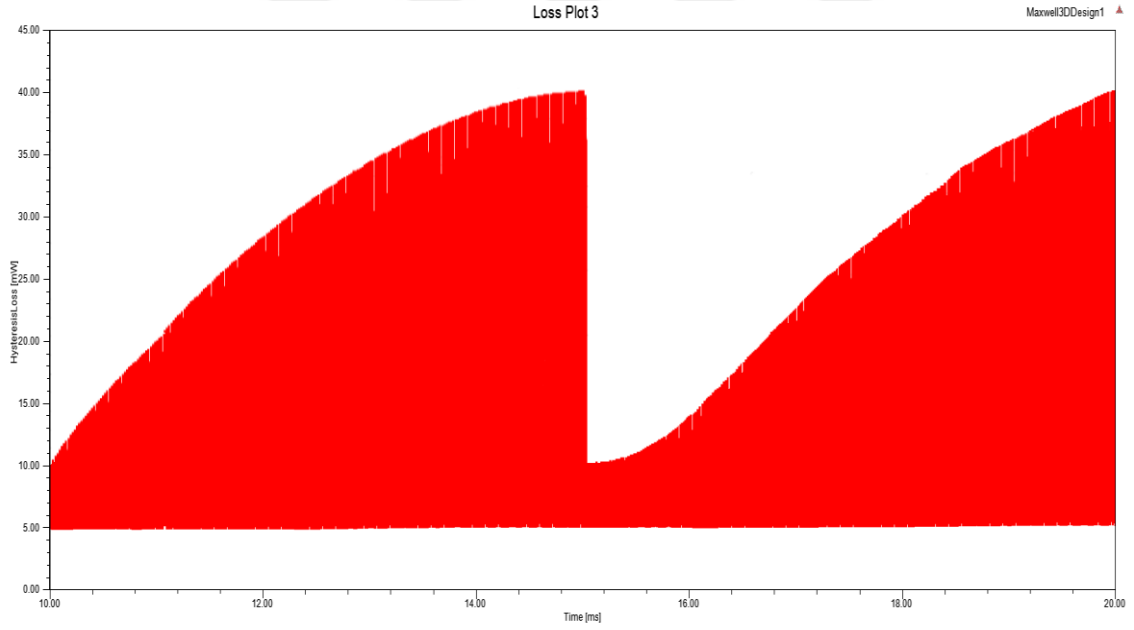
Aşağıdaki grafiklerde 40 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.19. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.20. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



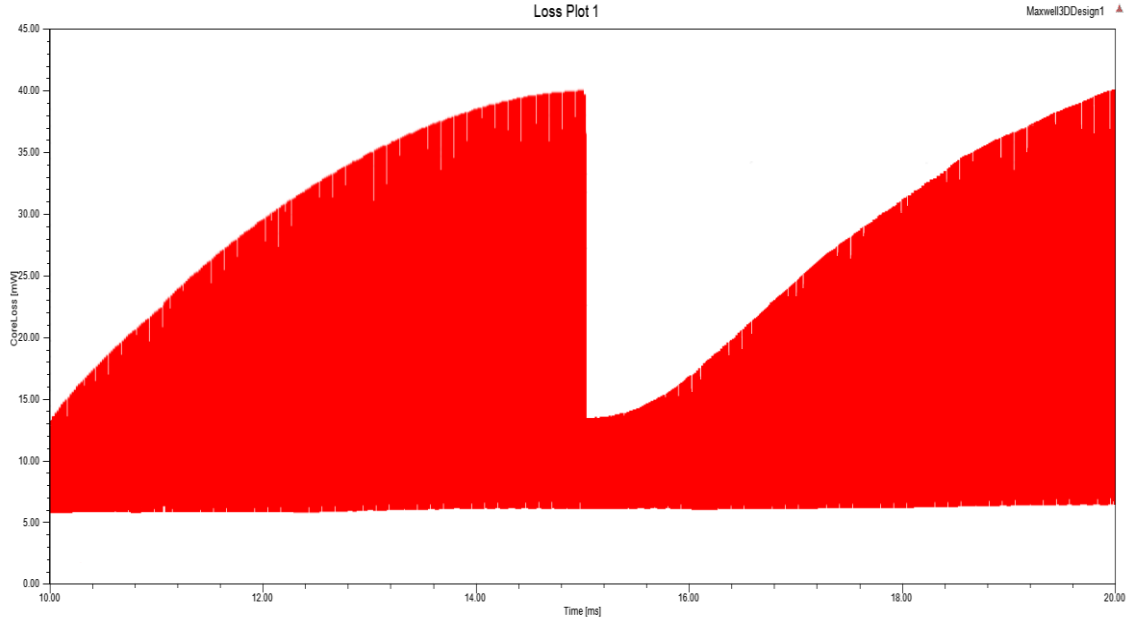
Şekil 4.21. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

Çizelge 4.5. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları

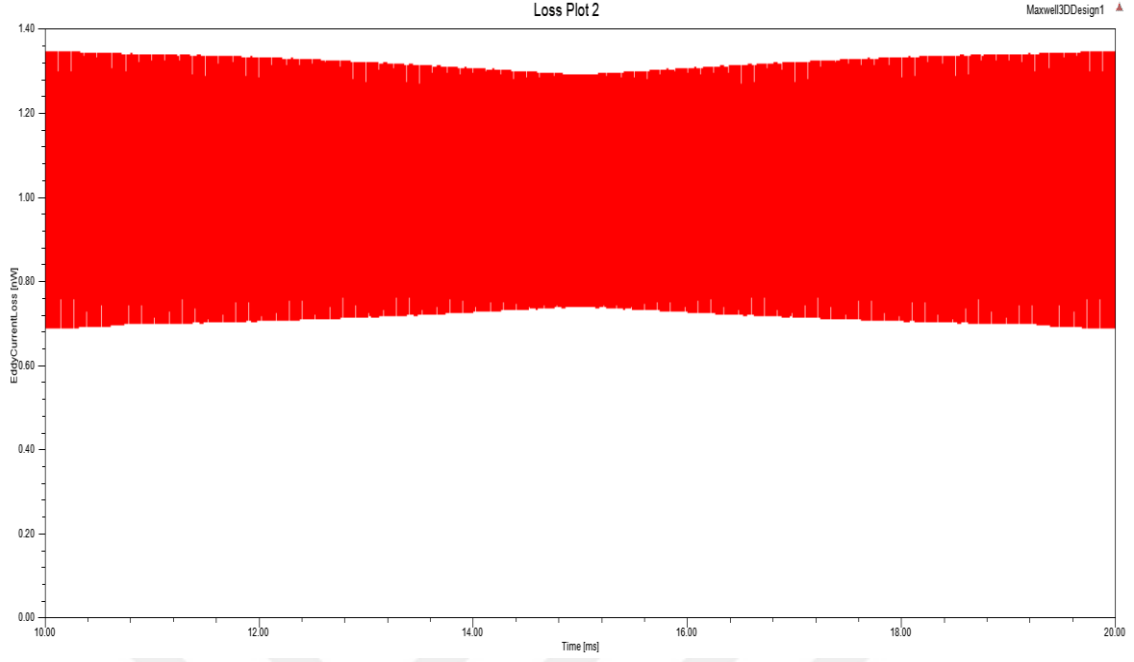
Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	16.59
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$1.185 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	16.59
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	794
Toplam Kayıp (P_{ind})	810.59

4.6. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (99 sarım) İndüktörün Kayıpları

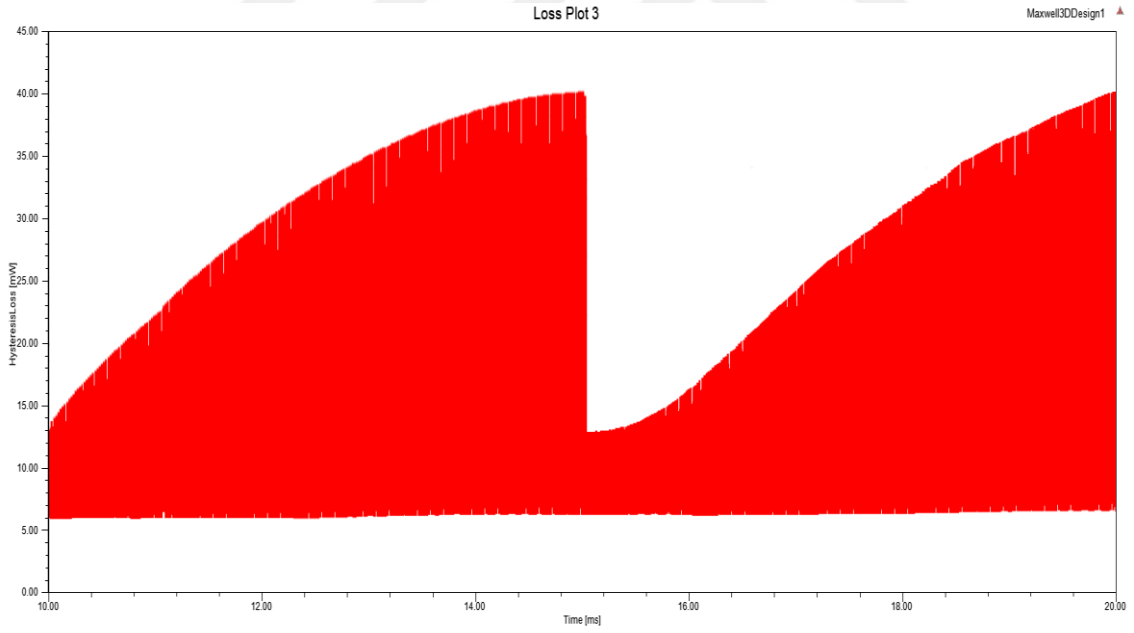
Aşağıdaki grafiklerde 25 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.22. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.23. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



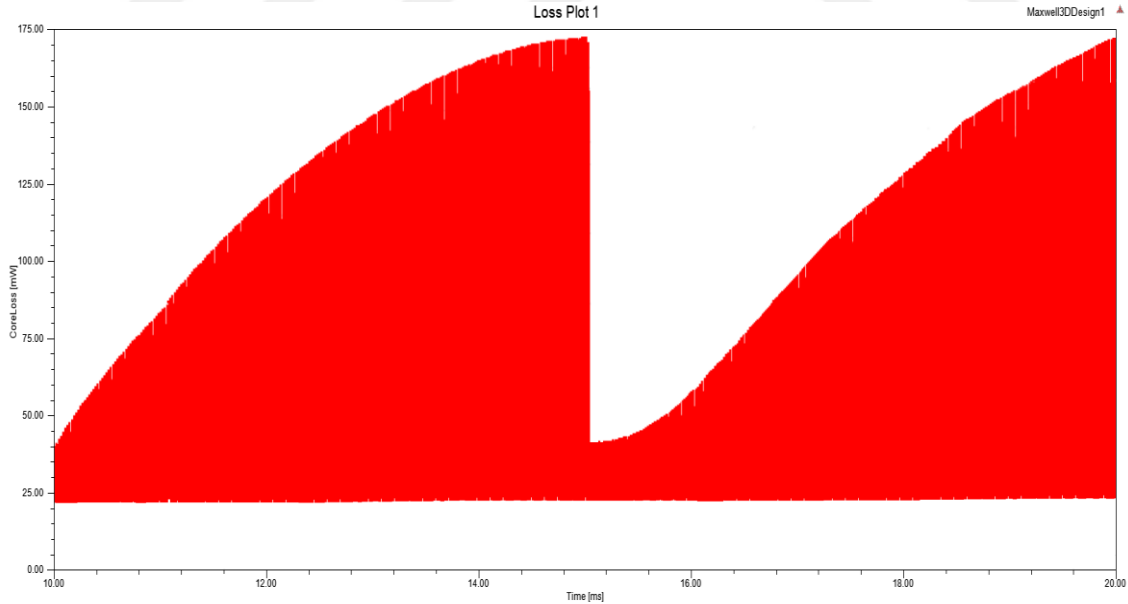
Şekil 4.24. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

Çizelge 4.6 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(99 sarım) nüve kayıpları

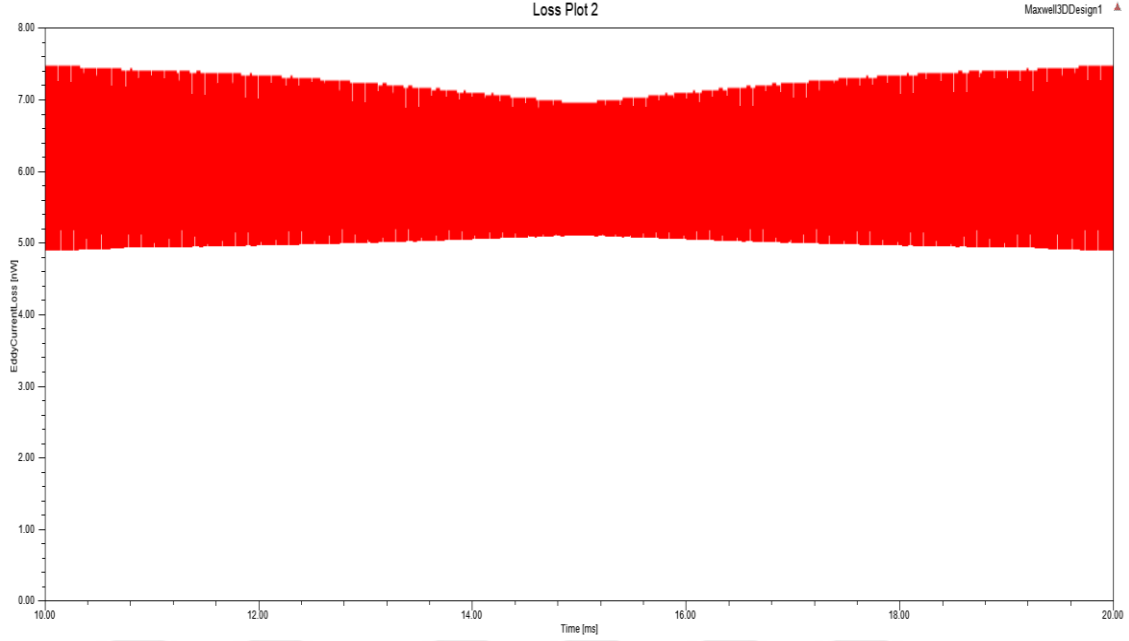
Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	17.68
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$1.01 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	17.68
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	794
Toplam Kayıp (P_{ind})	811.68

4.7. 50 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları

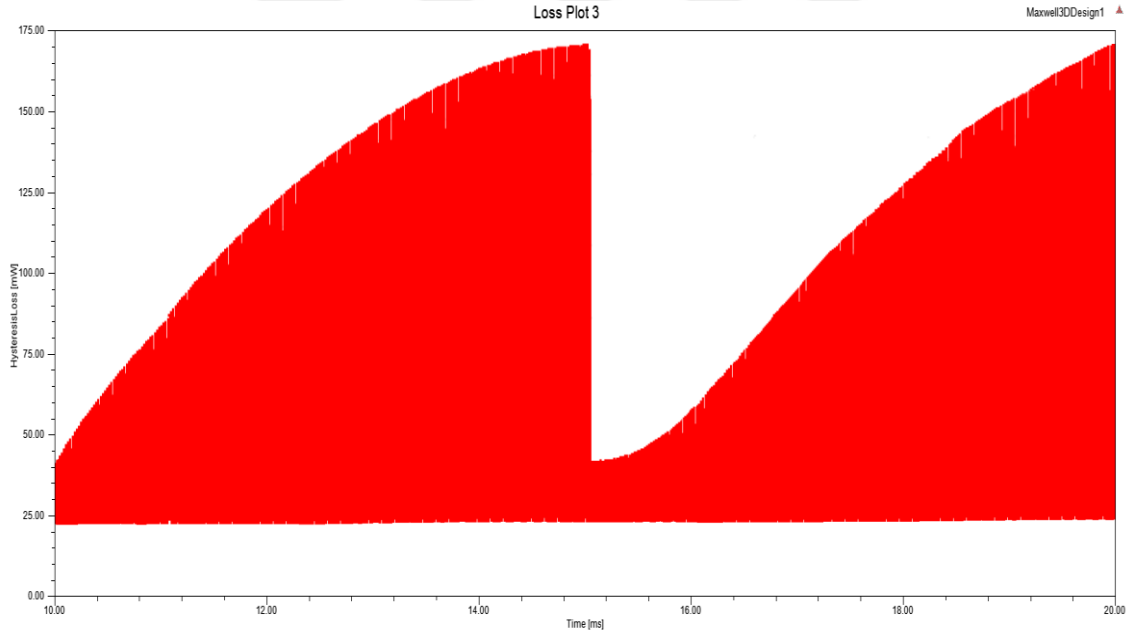
Aşağıdaki grafiklerde 50 kHz anahtarlama frekansı için 52 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.25. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.26. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



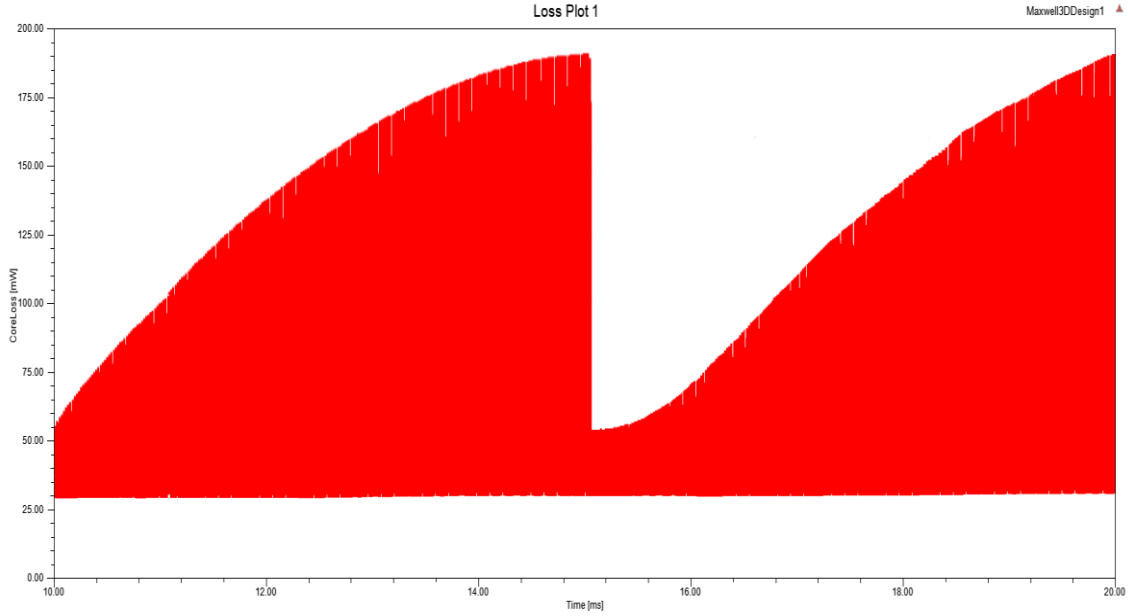
Şekil 4.27. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

Çizelge 4.7. 50 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları

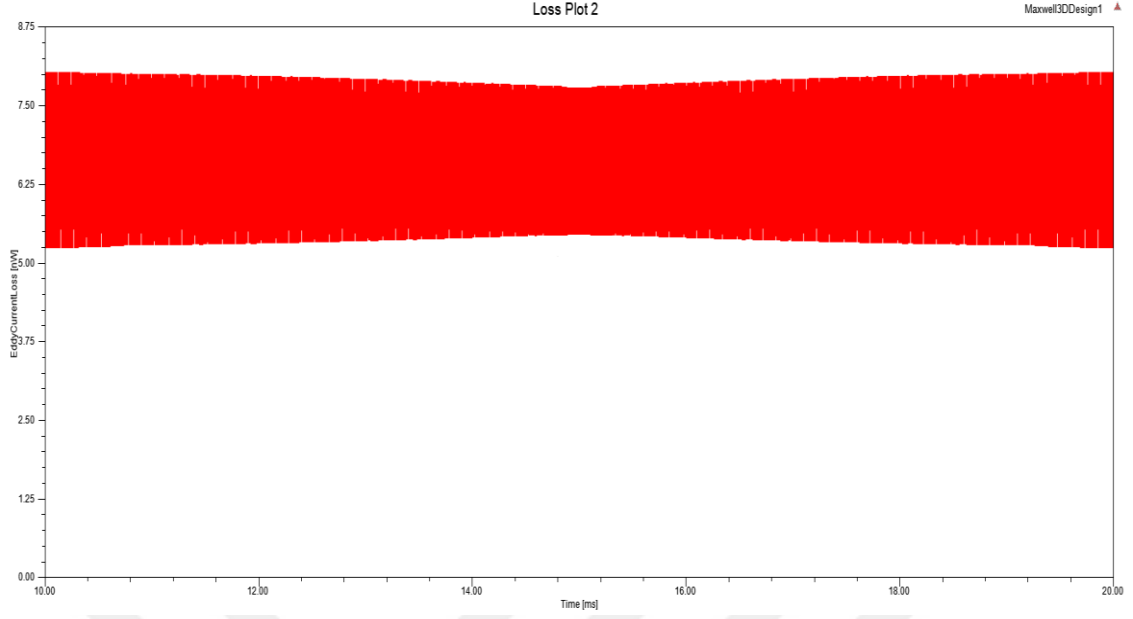
Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	71.3
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$5.35 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	71.3
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	360
Toplam Kayıp (P_{ind})	431.3

4.8. 40 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları

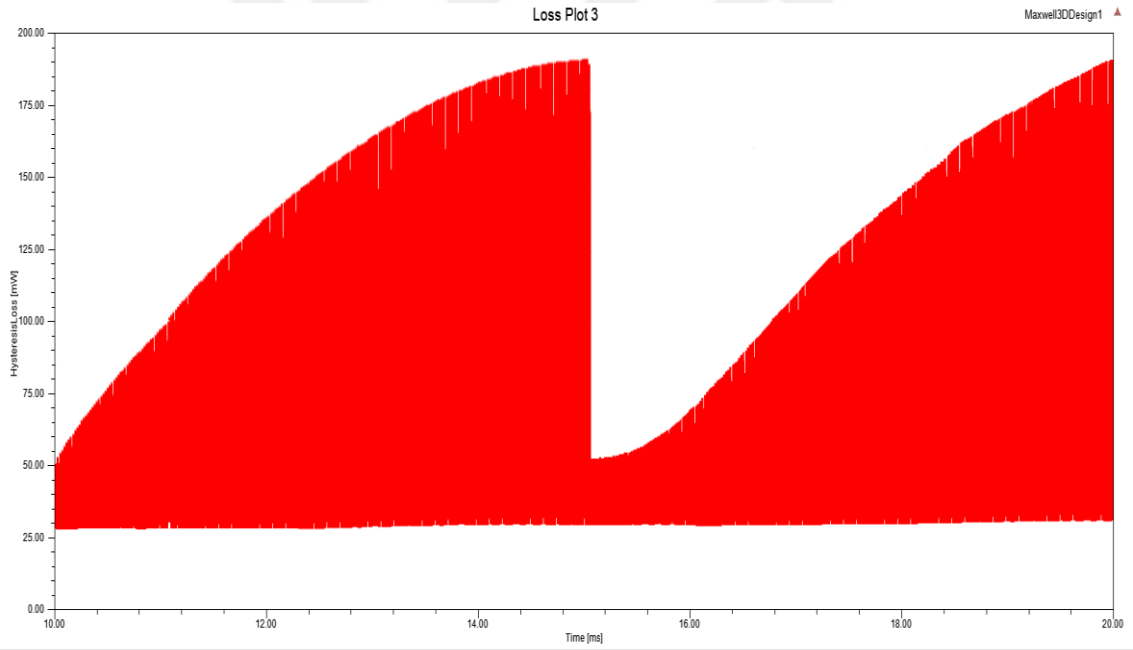
Aşağıdaki grafiklerde 50 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.28. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.29. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



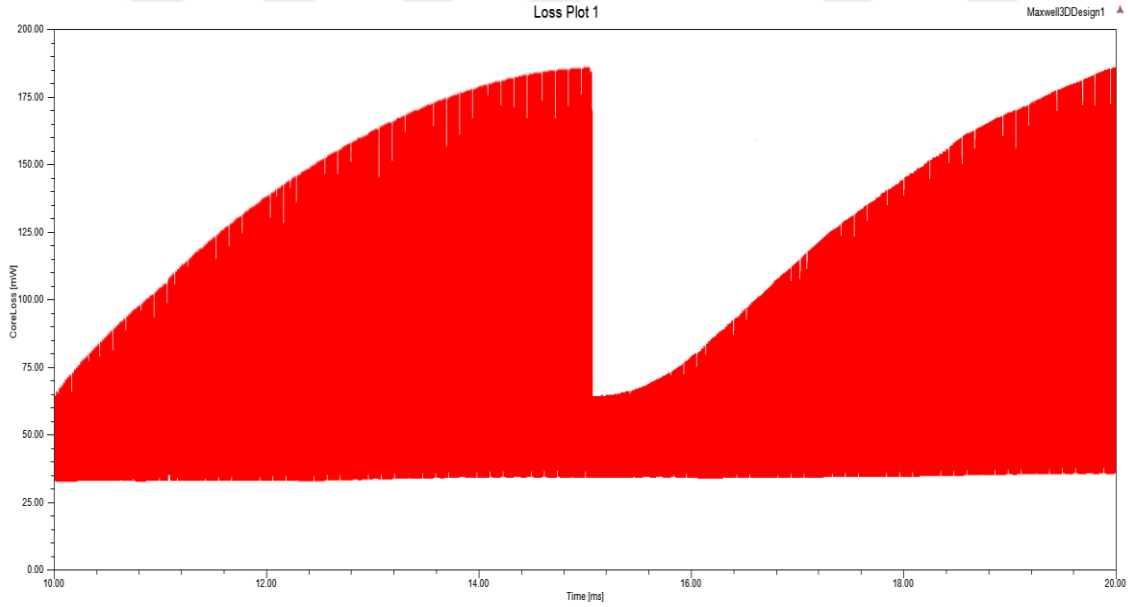
Şekil 4.30. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

Çizelge 4.8. 40 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları

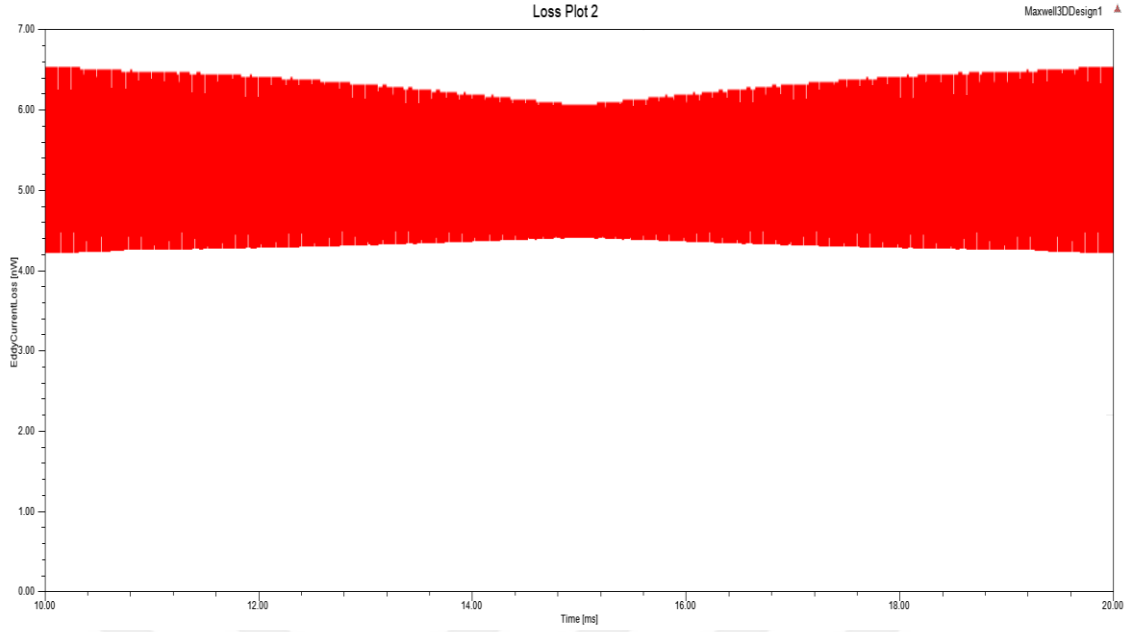
Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	83.51
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$6.65 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	83.51
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	360
Toplam Kayıp (P_{ind})	443.51

4.9. 25 kHz Anahtarlama Frekansı İçin EE (52 sarım) İndüktörün Kayıpları

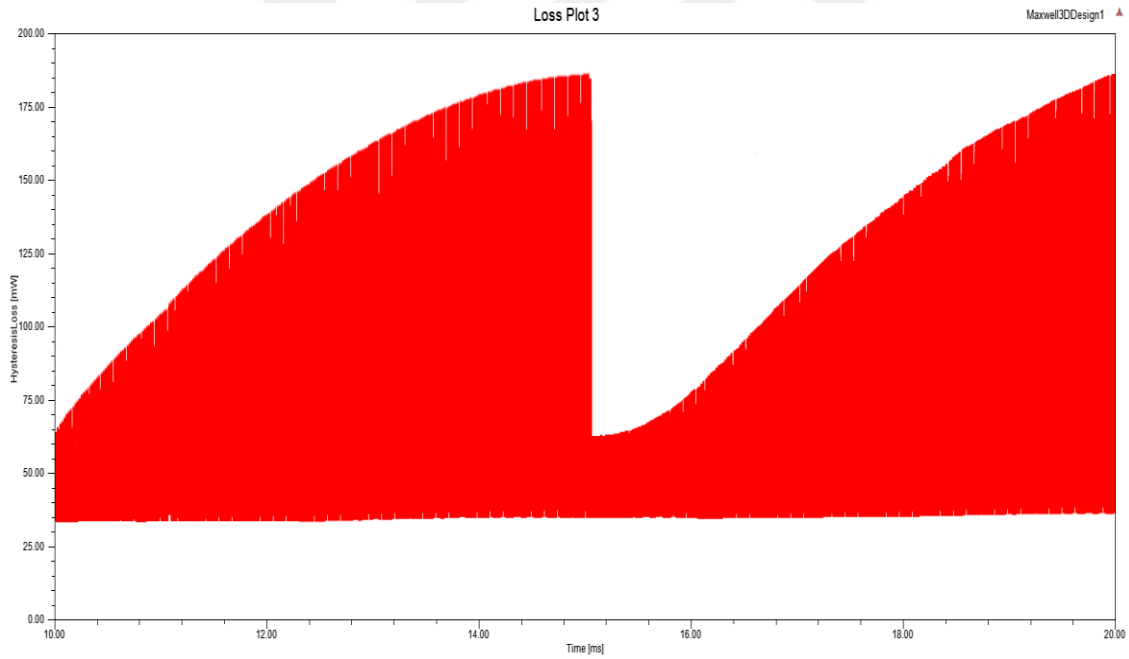
Aşağıdaki grafiklerde 25 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde oluşan kayıpların bir periyodu gösterilmiştir. Ayrıca bu kayıpların ortalama değerleri Çizelge 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.31. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün çekirdek kaybı grafiği.



Şekil 4.32. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün Eddy akımı kaybı grafiği.



Şekil 4.33. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52 sarım) indüktörün histerisiz kaybı grafiği.

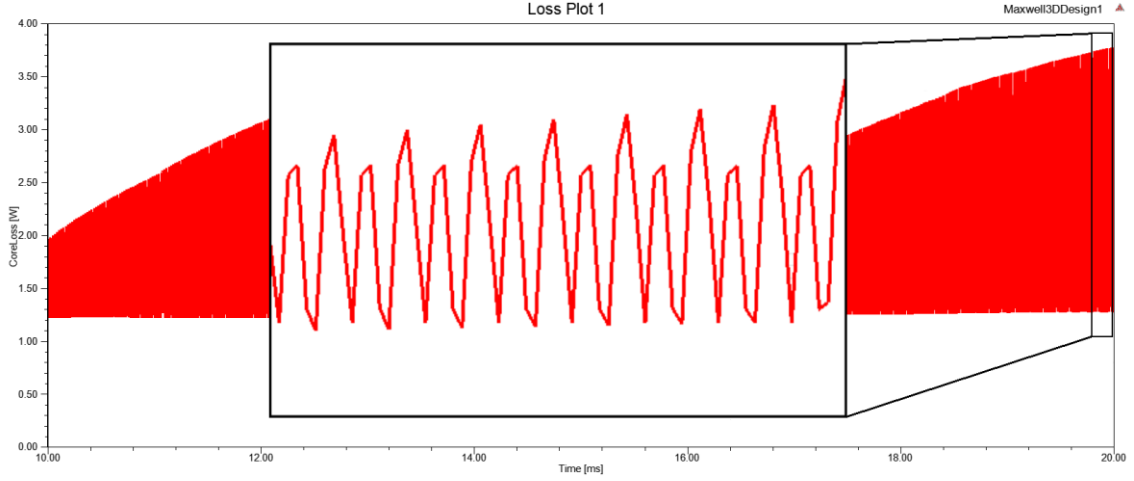
Çizelge 4.9. 25 kHz anahtarlama frekansı için EE(52sarım) nüve kayıpları

Kayıplar	mW
Çekirdek Kaybı (P_{core})	85.57
Eddy Kaybı (P_{eddy})	$5.35 \cdot 10^{-6}$
Histerisiz Kaybı (P_{his})	85.57
Bilinmeyen Kayıplar (P_{excess})	0
Bakır Kaybı (P_{cu})	360
Toplam Kayıp (P_{ind})	445.57

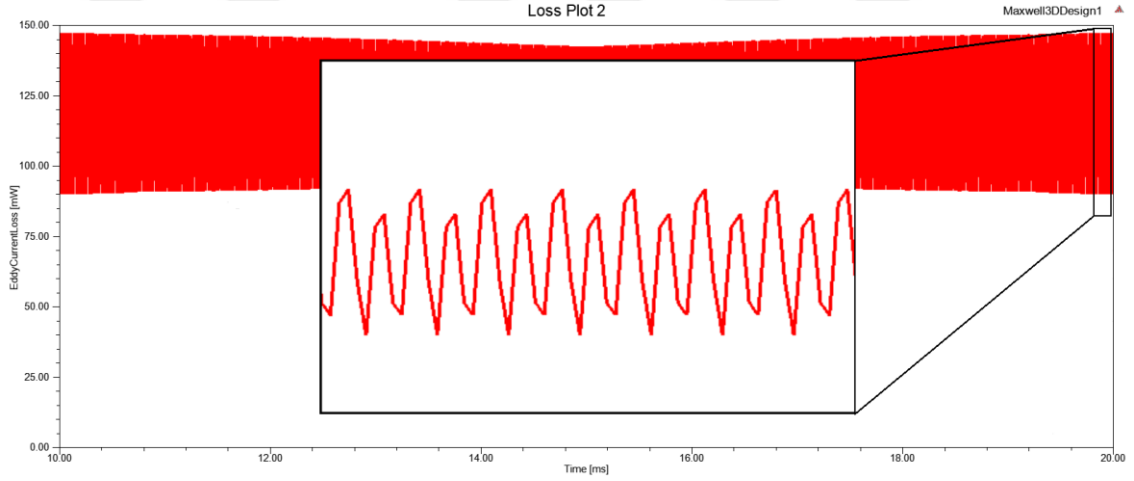
Yapılan dokuz benzetim çalışmasının sonuçları incelendiğinde kayıp grafiklerinin şekilsel olarak benzer olduğu görülmektedir. Şekil 4.4'te verilen toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiği incelendiğinde 15'inci ms'de anlık kayıp değeri 3.75 W değerinden 1.22 W değerine kadar düştüğü gözlemlenmektedir. Bu düşüşün sebebi histerisiz kaybındaki ani düşüştür. 15'inci ms'de 50 Hz frekansa sahip sinüzoidal akım bileşeninin tepe değerinde olması ve bu değerde türevinin sıfır olması histerisiz kaybında ani bir düşüşe neden olmaktadır.

4.10. Nüve Kayıp Grafiklerinin Ayrıntılı Görünümü

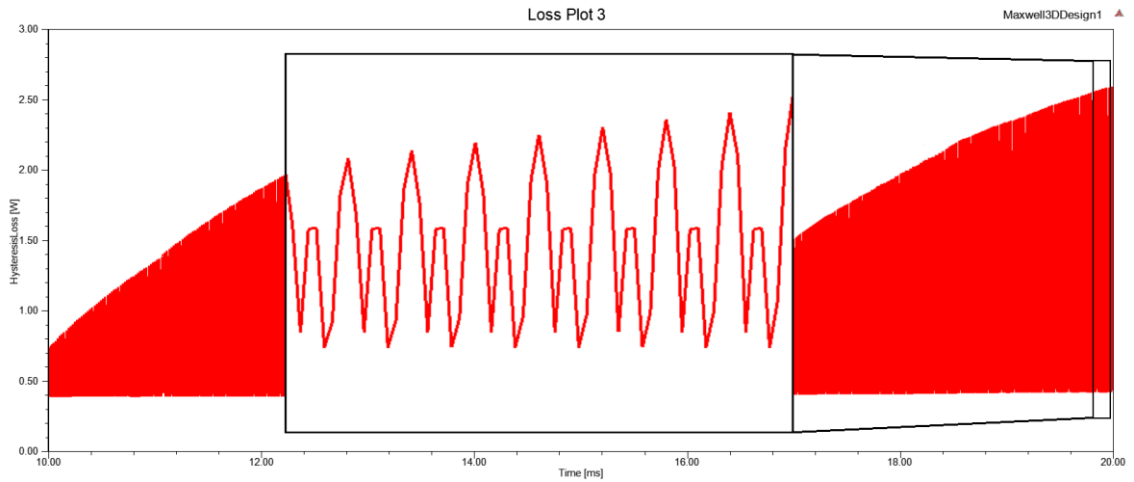
Benzetim çalışmalarının sonucu elde edilen kayıp grafikleri çalışma frekansının yüksek olması nedeni ile yeterince ayrıntı içermemektedir. Aşağıdaki grafiklerde anlık değişimin görülmesi amacıyla 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün kayıp grafiklerinin bir kesiti verilmiştir. Histerisiz kaybı grafiği incelendiğinde grafiğin tepe değerinin yükselerek ilerlediği görülmektedir. Eddy akımı kaybı ve aşırı akım kayıplarında ise önemli bir değişiklik görülmemektedir. Histerisiz kaybının anlık olarak tepe noktalara ulaştığı esnada akımın iki bileşeninin türevleri de pozitif veya negatif olarak aynı işarete sahiptir. Diğer bir deyişle 50 Hz frekanslı sinüzoidal bileşenin yükselen kanadı ile 50 kHz frekanslı üçgensel dalgacığın yükselen kanadının çakıştığı esnada histerisiz kaybının tepe değerinde bir miktar artış görülmektedir. Aynı durum akımın iki bileşenin düşen kanatlarının çakıştığı anlarda da görülmektedir.



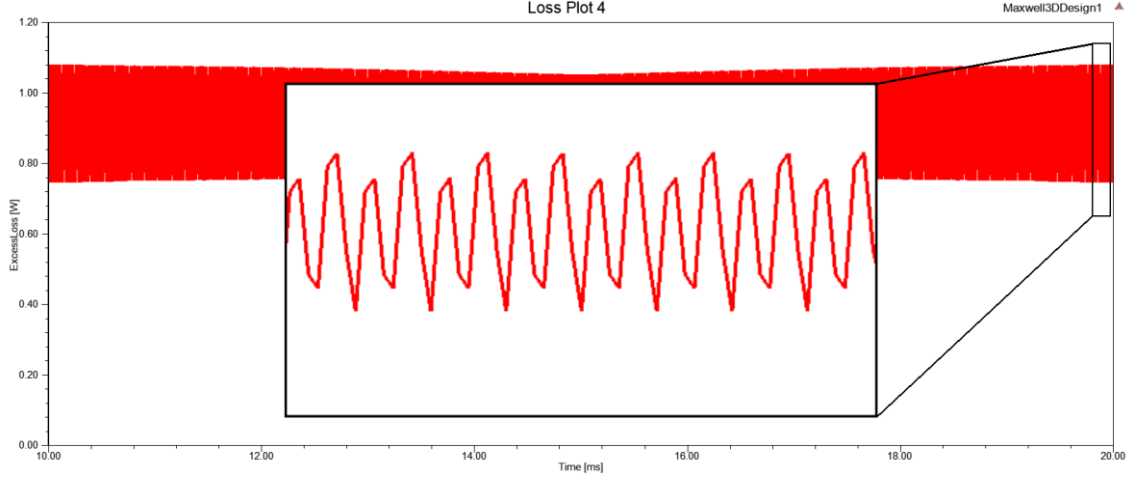
Şekil 4.34. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün çekirdek kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.



Şekil 4.35. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün Eddy akımı kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.



Şekil 4.36. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün histerisiz kaybı grafiğinin ayrıntılı görünümü.

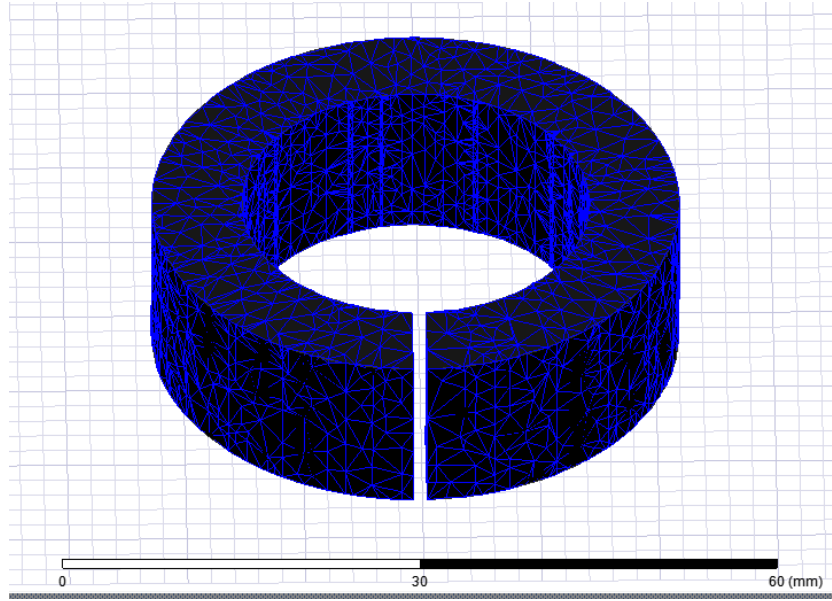


Şekil 4.37. 50 kHz anahtarlama frekansı için toroidal indüktörün aşırı akım kayıpları grafiğinin ayrıntılı görünümü.

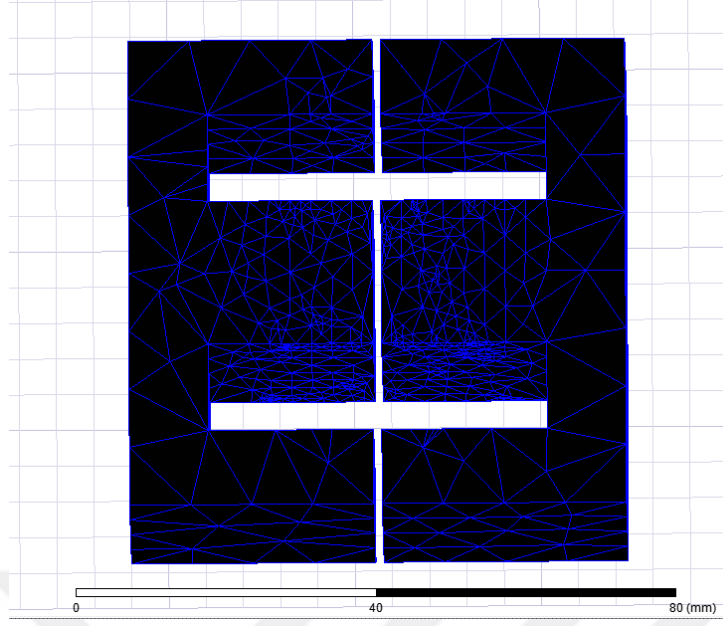
4.11. İndüktör Nüvelerinin Manyetik Analizi

Aşağıda indüktör nüvelerinin ANSYS/Maxwell programı kullanılarak elde edilen manyetik analiz sonuçları verilmiştir.

4.11.1. İndüktör nüvelerinin mesh görünümleri



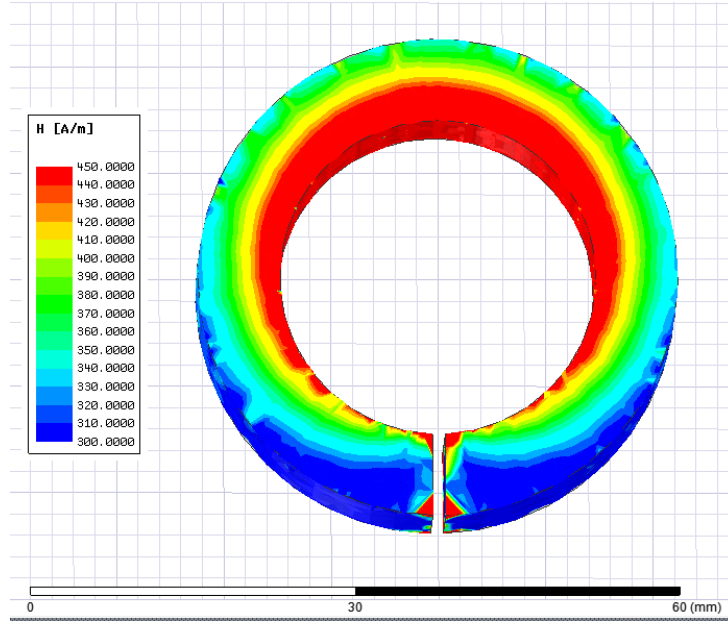
Şekil 4.38. Toroidal nüvenin mesh görünümü.



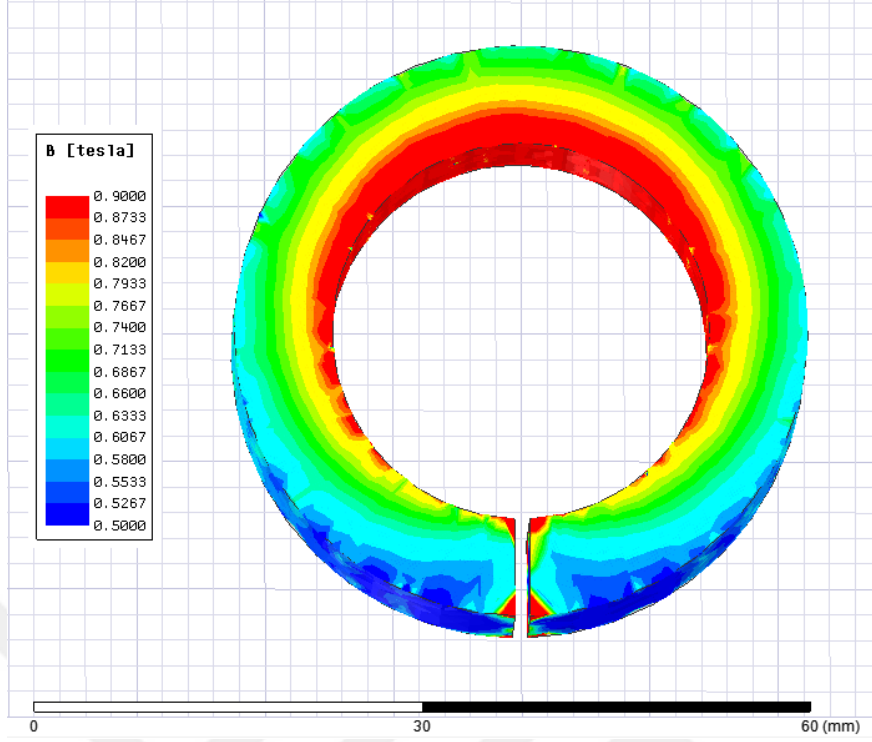
Şekil 4.39. EE nüvenin mesh görünümü.

4.11.2. İndüktör nüvelerinin manyetik alan ve akı yoğunluğu dağılımları

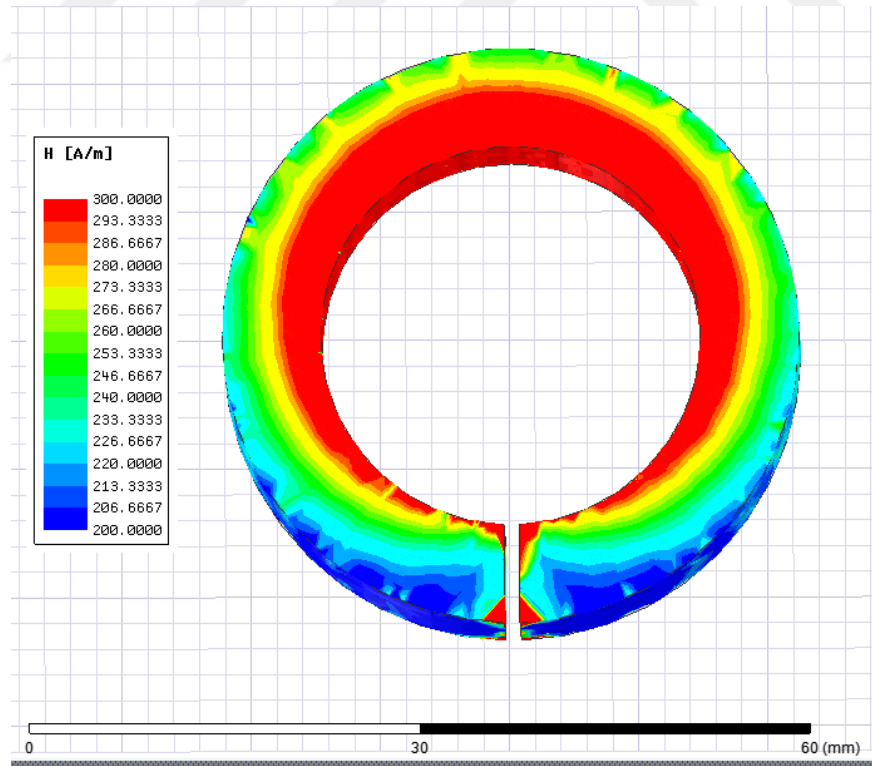
Aşağıda üç indüktör tasarımı için ANSYS/Maxwell programı kullanılarak elde edilen manyetik alan ve akı yoğunluğu dağılımı sonuçları verilmiştir. Manyetik alan ve akı yoğunluğu dağılımı analizi dalgacıkların olmadığı durumda elde edilen giriş akımının tepe değeri olan 3.95 A ve etkin değeri olan 2.793 A için yapılmıştır.



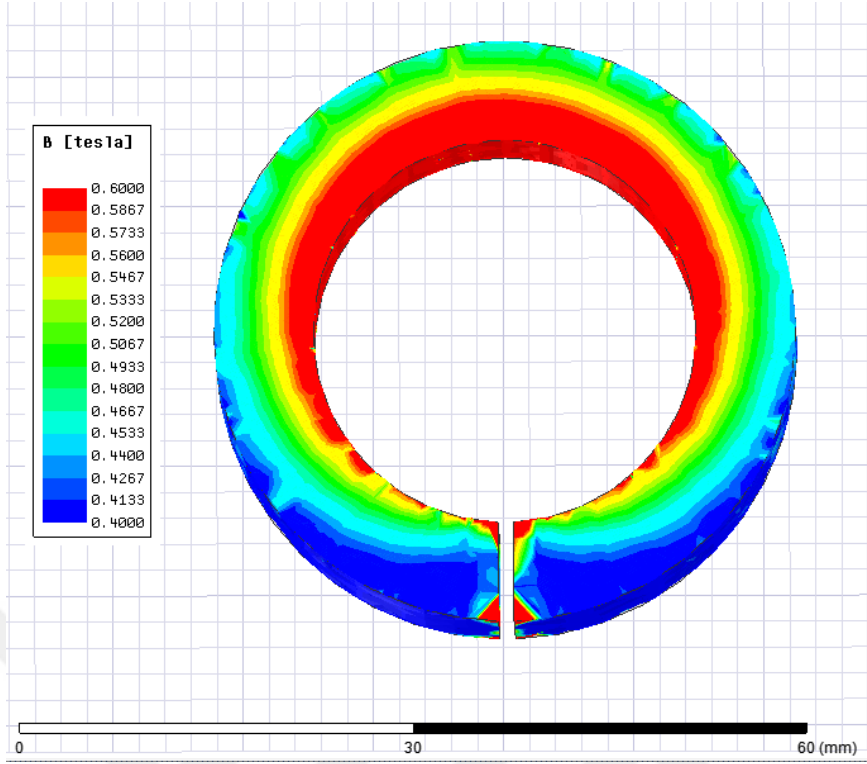
Şekil 4.40. Toroidal indüktörün manyetik alan dağılımı ($I=3.95$ A).



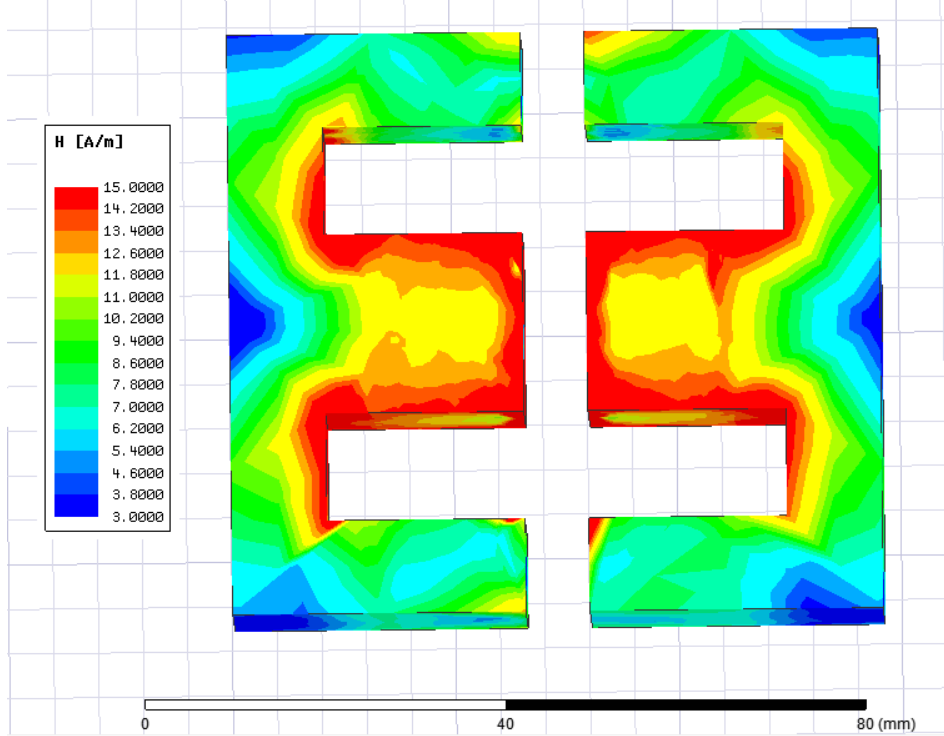
Şekil 4.41. Toroidal indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I=3.95$ A).



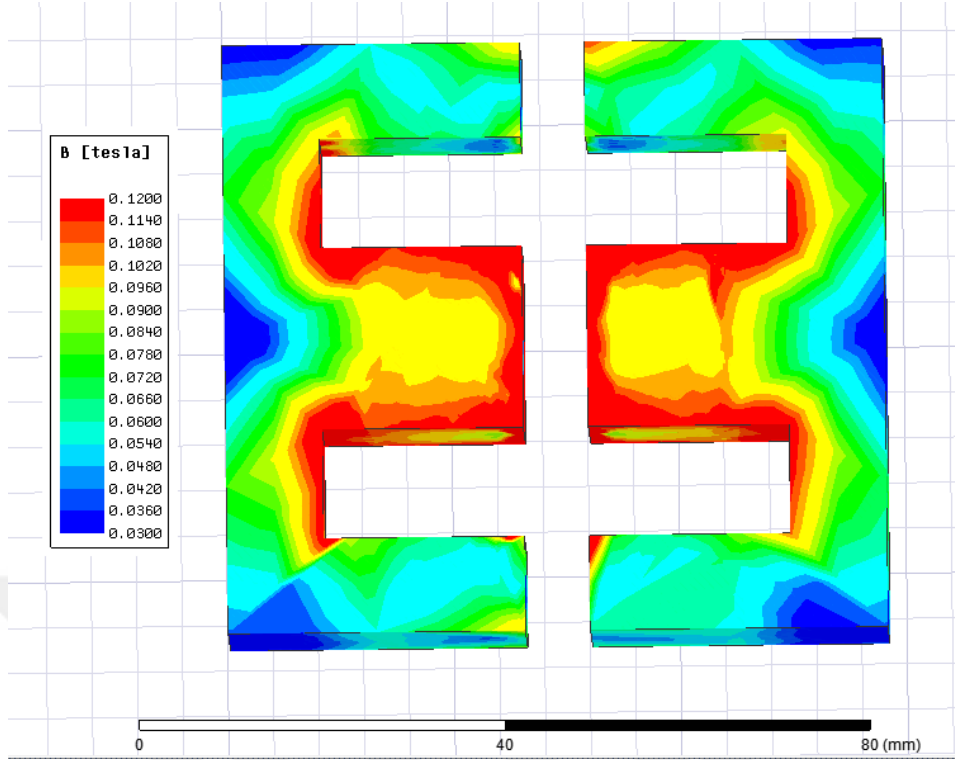
Şekil 4.42. Toroidal indüktörün manyetik alan dağılımı ($I=2.793$ A).



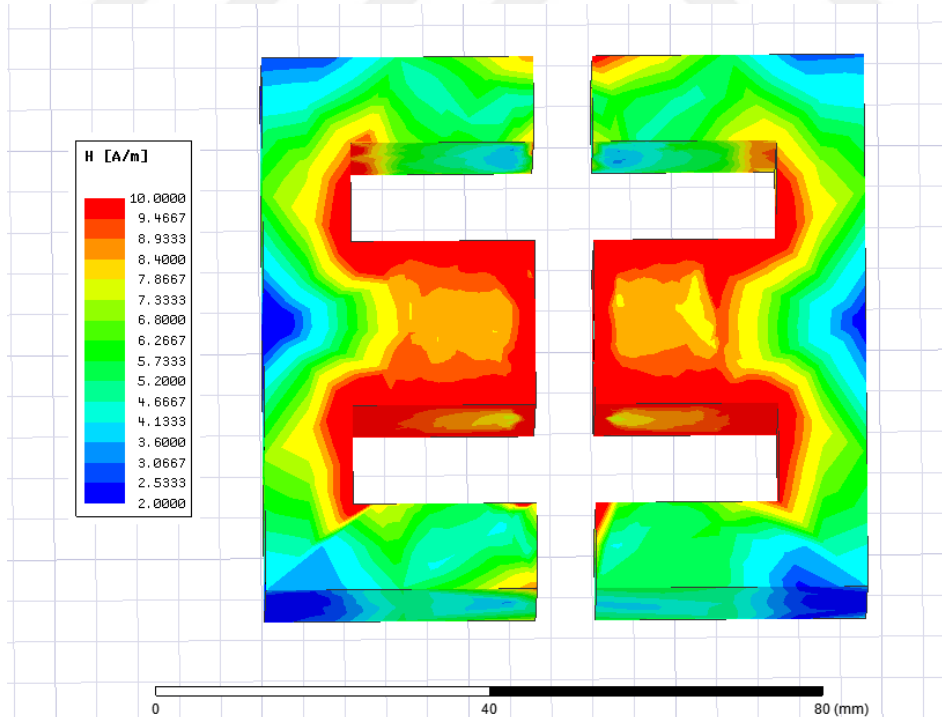
Şekil 4.43. Toroidal indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I=2.793$ A).



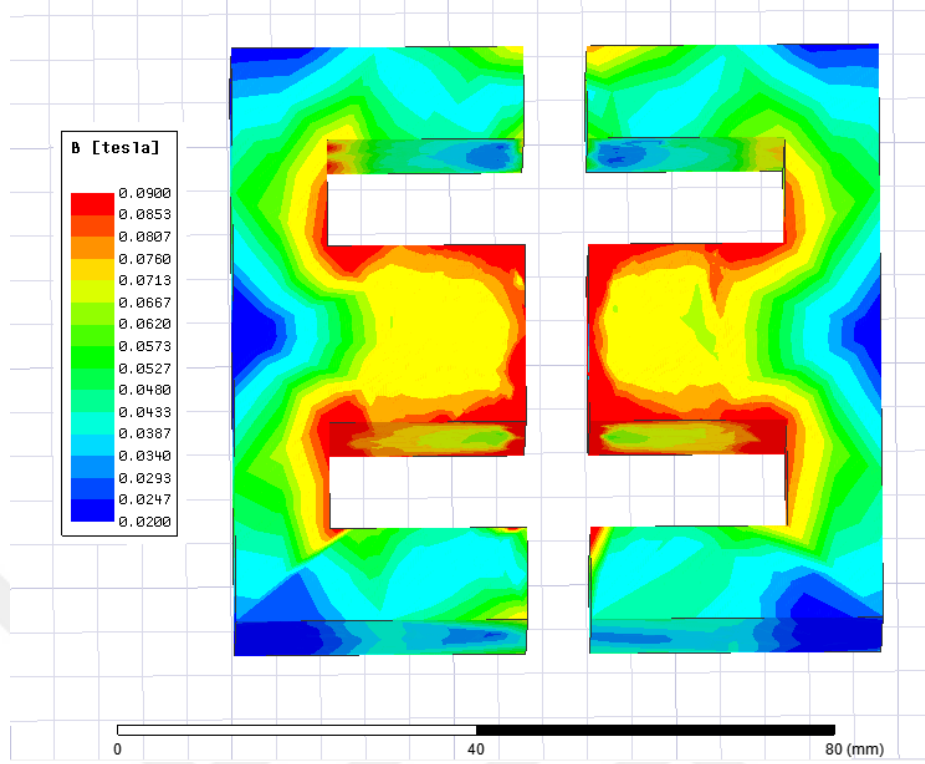
Şekil 4.44. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 3.95$ A).



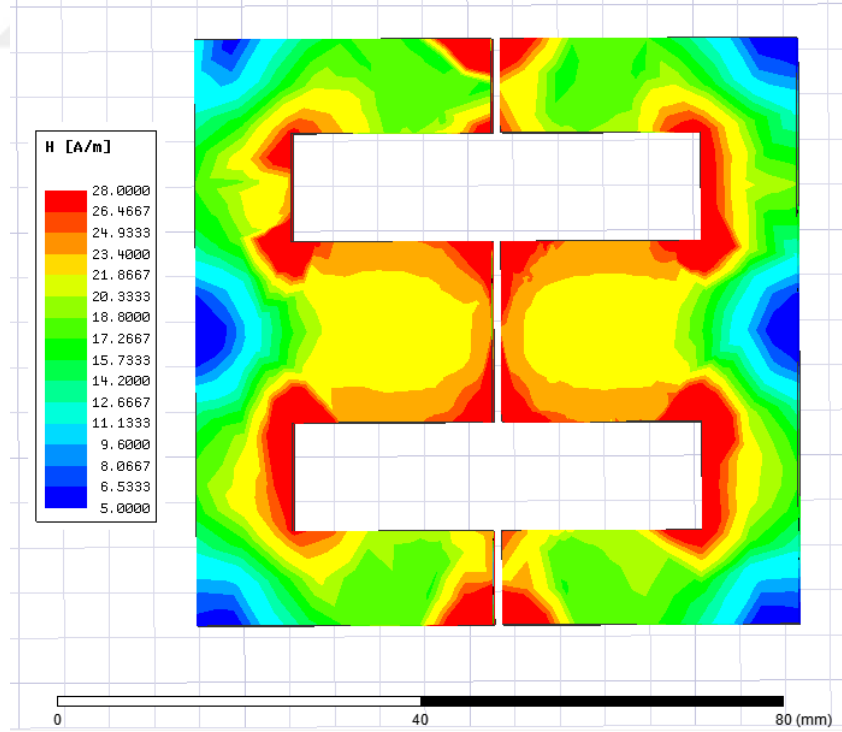
Şekil 4.45. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı (I= 3.95 A).



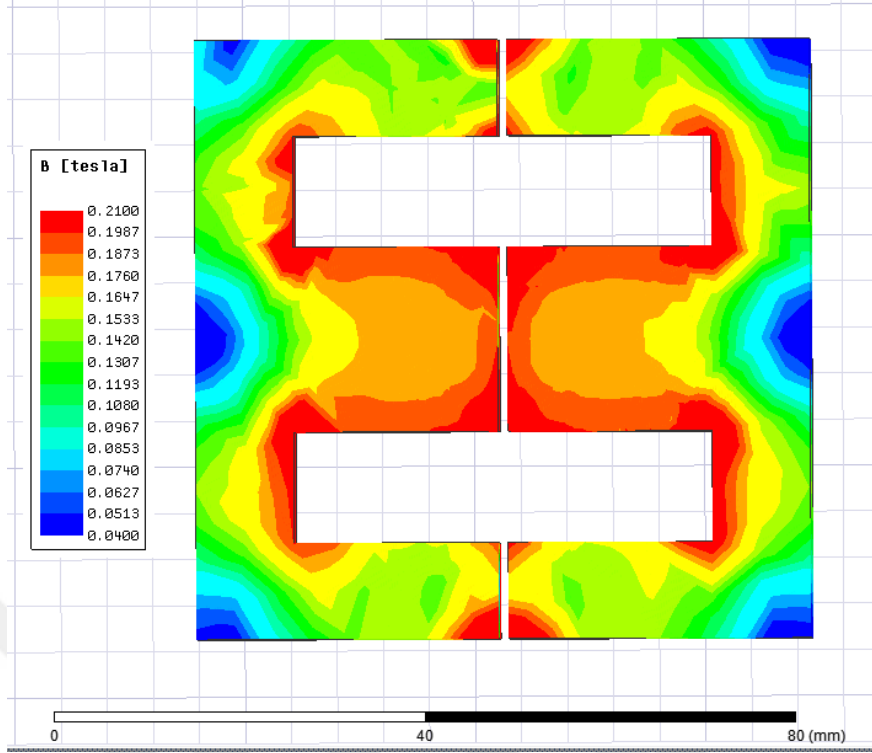
Şekil 4.46. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı (I= 2.793 A).



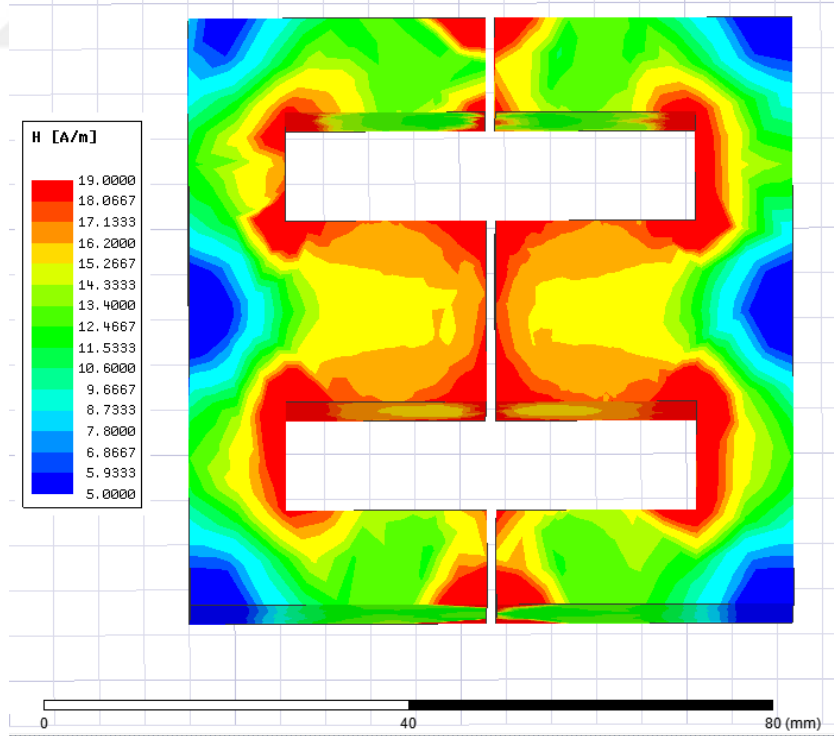
Şekil 4.47. 99 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 2.793$ A).



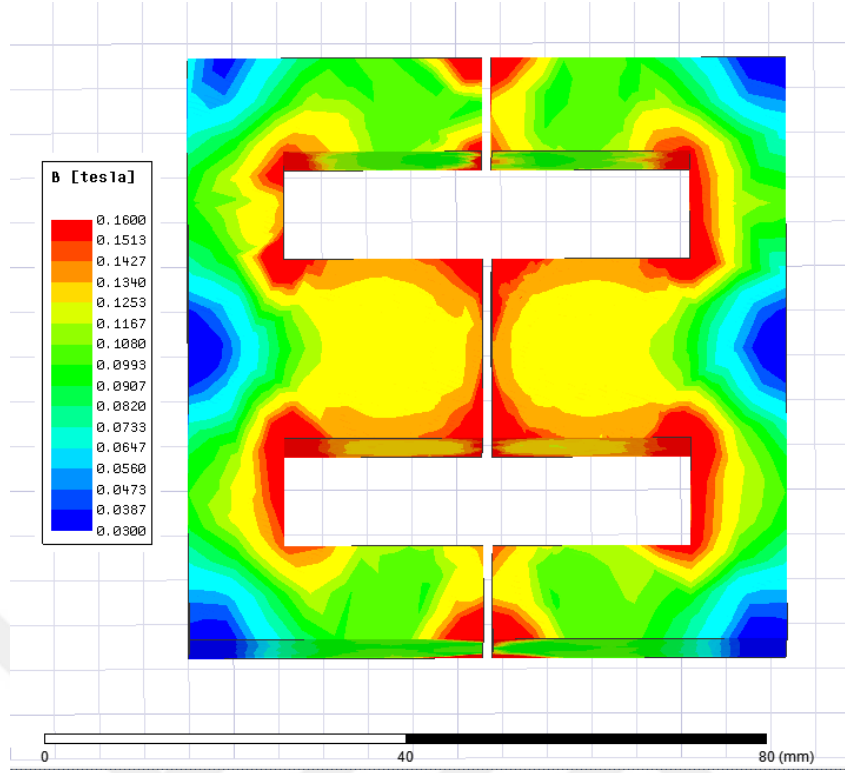
Şekil 4.48. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 3.95$ A).



Şekil 4.49. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 3.95$ A).



Şekil 4.50. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik alan dağılımı ($I= 2.793$ A).



Şekil 4.51. 52 sarımlı EE indüktörün manyetik akı yoğunluğu dağılımı ($I= 2.793$ A).

Manyetik analiz sonuçları incelendiğinde ise 2.793 A ve 3.95 A akım değerleri için yapılan benzetim çalışmasında manyetik akının lineer değiştiği gözlemlenmektedir. Bu durumda indüktörlerin lineer bölgede çalıştığı yani doyuma gitmediği söylenebilir. Nüvelerin akı yoğunluğu dağılımı incelendiğinde toroidal nüvede akı yoğunluğunun nüve merkezine doğru arttığı görülmektedir. Bu durum aşırı akım kayıplarının oluşmasında önemli bir rol oynar. EE nüvede ise manyetik akı yoğunluğu toroidal nüveye göre daha homojen bir dağılım göstermiştir. EE nüvenin orta bacağındaki manyetik akı yoğunluğunun diğer iki bacaktaki manyetik akı yoğunluğundan daha fazla olduğu görülmektedir. Nüve kaybı sonuçları incelendiğinde toroidal nüvede 0.9 – 1 W arasında bir aşırı akım kaybı oluşurken EE nüvede aşırı akım kaybı oluşmamıştır. Her iki nüvede de nüvenin hava aralığına bakan yüzeylerindeki köşelerde manyetik akı yoğunluğunun arttığı gözlemlenmektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Çizelge 5.1’ de yapılan benzetim çalışması sonucunda elde edilen indüktör kayıpları değerleri verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde dikkat çeken en önemli nokta indüktör kaybının en küçük olduğu anahtarlama frekansı değerinin 50 kHz’de görülmesidir.

Çizelge 5.1. Toplam indüktör kayıpları

İndüktör \ Anh. frekansı	50 kHz	40 kHz	25 kHz
Toroidal	2.450 W	2.705 W	2.526 W
EE 99 sarım	0.809 W	0.811 W	0.812 W
EE 52 sarım	0.431 W	0.444 W	0.446 W

Normal şartlar altında aynı genliğe sahip iki uyarımdan frekansı büyük olan uyarım daha büyük bir kayıp oluşturur. Ancak anahtarlama frekansının artırılması durumunda dalgacıkların genliğinin azalması oluşan indüktör kaybının düşmesine neden olmuştur. Toroidal indüktörün kayıp değerleri incelendiğinde ise en yüksek kayıp değerinin 40 kHz anahtarlama frekansında olduğu görülmektedir. Bu sonuçlara göre yükselten tip aktif GKD devresinin anahtarlama frekansı ile indüktör kayıpları arasında direkt olarak pozitif veya negatif bir ilişki kurulamamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde toroidal indüktörün kayıplarının diğer tasarımlara göre büyük olduğu görülmektedir. Bu durumun en önemli nedenleri aşırı akım kayıpları ve nüve materyallerinin elektriksel dirençleri arasındaki farktır.

Steinmetz denklemi sinüzoidal bir uyarıma maruz kalmış nüvenin kayıplarını hesaplamak için türetilmiş bir denklemdir. Bu denkleme göre nüve kaybı f^α ve B_m^β ifadeleri ile doğru orantılıdır. Genliği frekans ile ters orantılı olarak değişen bir sinüs uyarıtısı düşünelim. Akım ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir. Bu durumda Eş. 5.1 ve Eş. 5.2 ifadelerinden görüldüğü üzere nüvenin doyuma gitmediği durumlarda B_m değeri de frekans ile ters orantılı olarak değişim gösterir.

$$H = \frac{2\pi kl}{d} \quad (5.1)$$

$$B = H \cdot \mu \quad (5.2)$$

Bu durumda frekansın artırılması ile f^α ifadesi artarken B_m^β ifadesi azalır. Nüve materyalinin β değerinin α değerinden büyük olması durumunda belli bir frekans değerinden sonra B_m^β ifadesindeki düşüş baskın olur ve birim hacimdeki kayıp değerinde de düşüş gözlemlenir. Yapılan kayıp analizi çalışmasının sonuçları incelendiğinde bu duruma benzer bir sonucun ortaya çıktığı görülmektedir. Nüve tasarımında kullanılan 2605-SA1 ve 3C90 materyallerine ait bilgiler incelendiğinde β değerlerinin α değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Nüve tasarımlarına ait geometrik ölçüler ve materyal özellikleri EKLER bölümünde verilmiştir.

Her üç anahtarlama frekansında da en büyük kayıp değeri toroidal indüktörde oluşurken en küçük kayıp değeri 52 sarımlı EE indüktörde oluşmuştur. 25 kHz anahtarlama frekansı için 99 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 32.1'i kadar kayıp oluşurken 52 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 17.7'si kadar kayıp oluşmuştur. 40 kHz anahtarlama frekansı için ise 99 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 30'u kadar kayıp oluşurken 52 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 16.4'ü kadar kayıp oluşmuştur. 50 kHz anahtarlama frekansı için ise 99 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 33'ü kadar kayıp oluşurken 52 sarımlı EE indüktörde toroidal indüktörün % 17.6'sı kadar kayıp oluşmuştur. 52 sarımlı EE indüktörün bakır kaybının 99 sarımlı EE indüktöre göre % 54.7 daha düşük olması bu tasarımın daha düşük kayıp oluşturmasında önemli bir rol oynamıştır. Toroidal indüktör diğer iki indüktöre göre verimsiz çalışmasına rağmen küçük boyutlu olması, sargı için karkasa ihtiyaç duymaması ve tek parça olması nedenleriyle oldukça avantaj sağlar.

Bu tez çalışması sonucunda yükselten tip aktif GKD devresinin indüktör kayıplarının anahtarlama frekansı ile ilişkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre anahtarlama frekansının daha büyük değerlere çıkarılması ile indüktör kayıplarının azaltılması mümkündür. Anahtarlama frekansının artırılması giriş akımının harmonik bozunmasının düşmesine de neden olmaktadır. Bu durumda yarı iletken teknolojisinin gelişmesi ile birlikte yükselten tip aktif GKD devresinin hem veriminin artırılması hem de boyutu küçültülerek maliyetinin azaltılması mümkün olacaktır.

KAYNAKLAR

- Albach, M., Durbaum, T., Brockmeyer, A., 1996. Calculating core losses in transformers for arbitrary magnetizing currents a comparison of different approaches. *PESC Record. 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 2, 1463-1468.
- Al-Saffar M.A., İsmail E.H. ve Sabzali A.J., 2019. Integrated Buck-Boost-Quadratic Buck PFC Rectifier for Universal Input Applications. *IEEE Trans. on Power Electronics*, **24** (12): 2886-2896.
- Bakhtiarzadeh, H., 2017. Design of permanent magnet synchronous motor elevator application (yüksek lisans tezi, basılmamış). İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chen, D. Y., 1978. Comparisons of high frequency magnetic core losses under two different driving conditions: A sinusoidal voltage and a square-wave voltage. *In 1978 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 237-241.
- Çapanoğlu Savaş, N. E., 2006. Ferrit Çekirdekli Trafo Tasarımı ve Uygulaması (yüksek lisans tezi, basılmamış). GÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çeçen, M., 2018. Güç Transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanılarak 2 ve 3 Boyutlu Tasarımı ve Kayıp Analizi (yüksek lisans tezi, basılmamış). DÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.
- Çelik, M. A., 2015. Tek-Fazlı Köprüsüz Yükselten Güç Katsayısı Düzeltten (GKD) AA/DA Devre Tasarımı ve Uygulaması (yüksek lisans tezi, basılmamış). YYÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Genç, N., 2010. Birim Güç Katsayılı ve Sıfır-Gerilim-Geçişli Yeni Bir Sarmaşık Yükselten Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçeklenmesi (Doktora Tezi, basılmamış). GÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hurley W. G, Wölfle W. H., 2013. *Transformers and Inductors for Power Electronics Theory, Design and Applications*, A. John Wiley & Sons, Noida, İndia. 100-200.
- Karakaş, E., Öner, Y., Kesler, S., Ersöz, M., 2018. Yükseltici Tip Güç Katsayısı Düzeltme Bobininin Kayıp Optimizasyonu. *International Conference on Science and Technology*.
- Li, J., Abdallah, T., Sullivan, C. R., 2001. Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms. *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting*, Vol. 4, 2203-2210.
- Li, Q., Andersen, M. A., Thomsen, O. C. 2011. Research on power factor correction boost inductor design optimization-efficiency vs. power density. *In 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia*. IEEE. 728-735.
- Mu, M., 2013. High frequency magnetic core loss study (doktora tezi, basılmamış). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- Noğay, H. S. 2002. Transformatör Kaçak Akı Dağılımının Bilgisayar Destekli Analizi (yüksek lisans tezi, basılmamış). MÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- Özüpak, Y., 2020. Transformatörlerin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Sonlu Elemanlar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi (doktora tezi, basılmamış). İÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- Shilyashki, G., Pfützner, H., Hamberger, P., Aigner, M., Hofbauer, F., Matkovic, I., Kenov, A., 2014. The impact of off-plane flux on losses and magnetostriction of transformer core steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(11), 1-4.
- Şahin, E., Büyükkatırcı, O., Akın, B., 2014. AC-DC Dönüştürücü Tabanlı Güç Faktörü Düzeltme Devresi Tasarımı ve Uygulaması. *Eleco 2014 Elektrik – Elektronik – Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 27 – 29 Kasım 2014, Bursa. 243-249.
- Vasilija, S., 2017. FEM 2D and 3D design of transformer for core losses computation. In *Scientific Proceedings XIV International Congress "Machines. Technologies. Materials*, 345-348.
- Yıldız, A., 2007. Eddy Akımı Kayıplarının Sonlu Elemanlar Metodu ile Modellenmesi (yüksek lisans tezi, basılmamış). AÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Zhang, Y., Cheng, M. C., Pillay, P., 2009. Magnetic characteristics and excess eddy current losses. In *2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE*. 1-5.
- Zheng, J., Wang, C., Xia, D., 2018. Design and analysis of the ferrite air-gapped cores for a resonant inductor. *Archives of Electrical Engineering*, 67(3), 579-589.

EKLER

EK-1. Toroidal nüvenin katalog bilgileri

TYPICAL B-H LOOP

Coated Core Specifications			Bare Core Specifications		
PART NO.	OD mm	ID mm	HT mm	ID mm	HT mm
MP7089MPFC	46.55	28.95	15.72	44.68	29.49
Tolerance	max.	min.	max.		

Core Designation	Material DuPont	Manufacturer UL File #	Insulation System
M	EF8034S0	E206123	ClassB/ClassF

Performance Specifications								
I_m cm	A_c cm ²	Mass g	Volume cm ³	Effective Perm	A_i nh	W_b cm ²	W_{Ac} cm ⁴	Core Loss W
11.65	0.938	79.96	10.93	100	101	6.58	6.174	15.69

NOTE:

- PART IDENTIFICATION CODE AND MANUFACTURING DATE CODE ARE PRINTED ON CURVED SURFACE.
- MINIMUM COATING THICKNESS OF 0.078 mm (3 MILS) ON ANY POINT OF CORE IS MAINTAINED.
- ALL MEASUREMENTS ARE DONE AT ROOM TEMPERATURE.
- OVALITY OF 95% ON OUTER AND INNER DIAMETER IS PERMISSIBLE.
- MAXIMUM CONTINUOUS OPERATING TEMPERATURE IS 150°C.

MAGNETIC TOLERANCES:
 PERMEABILITY $\pm 15\%$
 $A_i \pm 15\%$
 Mass $\pm 3\%$

CORE MATERIAL:
 METGLAS® ALLOY 2605SA1.

REVISIONS:

NO.	REVISION	BY	APPR.	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE
1.	REVISION TO ADD PRODUCT ID LABEL TO THE CORE AS A STANDARD FEATURE.	VS	RK	02/12/04	MATERIAL PRODUCTION THIRD ANGLE	AS NOTED

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

REVISIONS:

NO.	REVISION	DATE	DESCRIPTION	POWER FACTOR CORRECTION CORE

EK-2. 2605-SA1 materyalinin katalog bilgileri

Metglas[®]

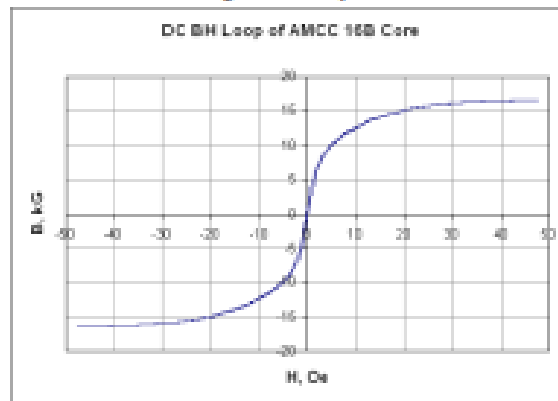
www.metglas.com

POWERLITE[®]
High Frequency Distributed Gap
Inductor Cores

Technical Bulletin

POWERLITE[®] C-Cores are manufactured with iron based Metglas[®] amorphous Alloy 2605SA1. Their unique combination of low loss and high saturation flux density provide for size reduction and improvements in energy efficiency making them an ideal solution for automotive inductor applications

Typical DC Hysteresis Loop
Metglas[®] Alloy 2605SA1



Benefits

Manufactured in a variety of ultra-efficient core configurations, POWERLITE C-Cores provide significant cost, design and performance benefits over ordinary Si-Fe, ferrite and MPP cores such as:

- High Saturation Flux Density (1.56 T)
- Low Profile – enables weight and volume reductions of up to 50%
- Low Temperature Rise – enabling smaller compact designs
- Low Loss – resulting from micro-thin Metglas ribbon (25 μm)

Physical Properties METGLAS Alloy 2605SA1

Ribbon Thickness (μm)	.25
Density (g/cm^3)	7.18
Thermal Expansion ($\text{ppm}/^\circ\text{C}$)	7.6
Crystallization Temperature ($^\circ\text{C}$)	505
Curie Temperature ($^\circ\text{C}$)	392
Continuous Service Temperature ($^\circ\text{C}$)	150
Tensile Strength (MN/m^2)	1k-1.7k
Elastic Modulus (GN/m^2)	100-110
Vicker's Hardness (50g load)	860

Magnetic Properties METGLAS Powerlite Cores

Saturation Flux Density (Tesla)	1.56
Permeability (depending on gap size)	VARIABLE
Saturation Magnetostriction (ppm)	27
Electrical Resistivity ($\mu\Omega/\text{cm}$)	137

EK-2 (Devam). 2605-SA1 materyalinin katalog bilgileri

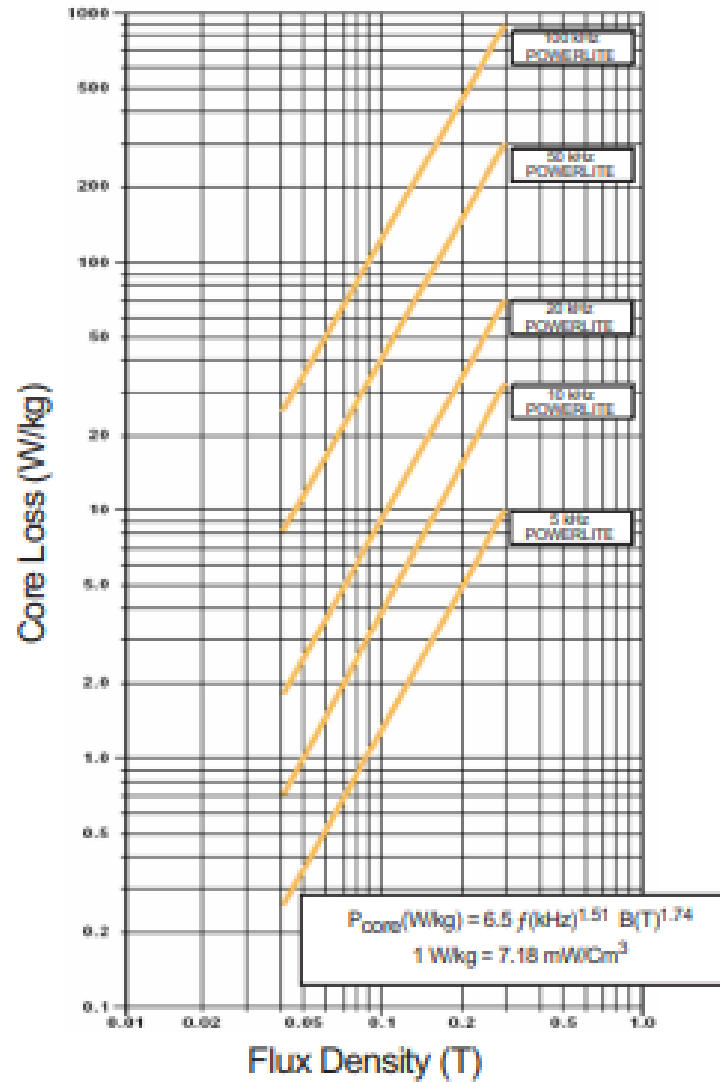
Metglas[®]

www.metglas.com

POWERLITE[®]
High Frequency Distributed Gap
Inductor Cores

Technical Bulletin

Core Loss vs. Flux Density* @ 25°C



* These curves were determined from ac data; use 1/2 the actual *B* to determine core loss for unidirectional applications.

EK-2 (Devam). 2605-SA1 materyalinin katalog bilgileri

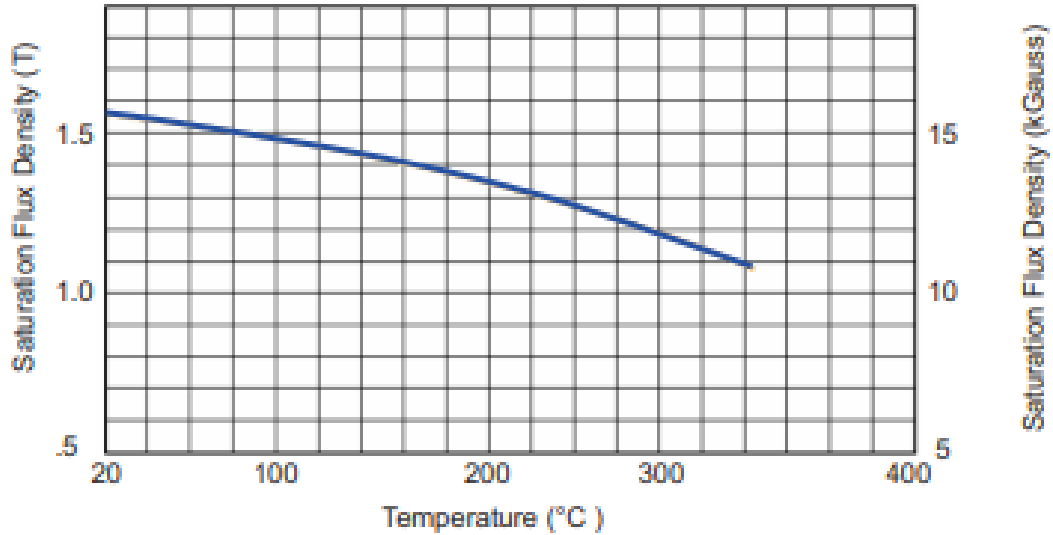
Metglas[®]

POWERLITE[®]
High Frequency Distributed Gap
Inductor Cores

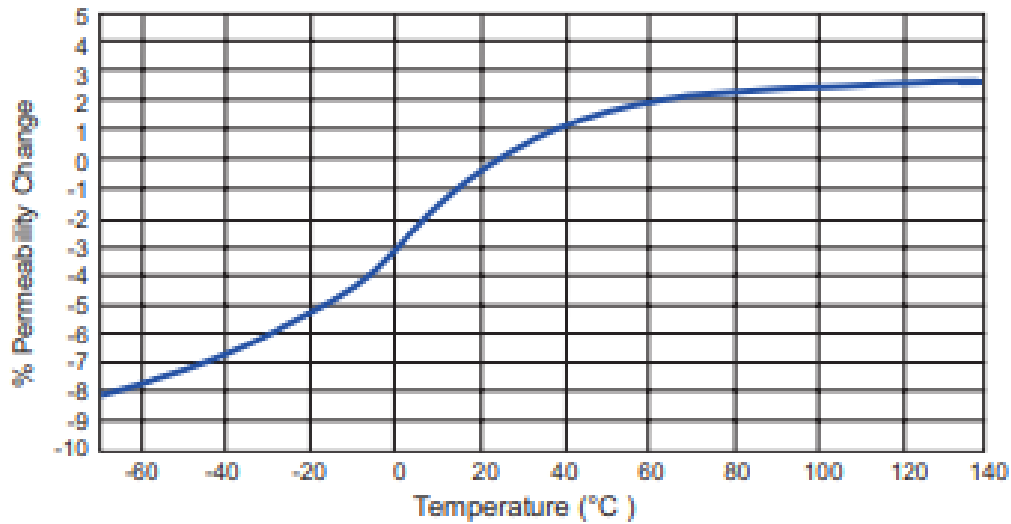
www.metglas.com

Technical Bulletin

Saturation Induction vs. Temperature



Permeability vs. Temperature



EK-3. E65 nüvenin katalog bilgileri

Ferroxcube

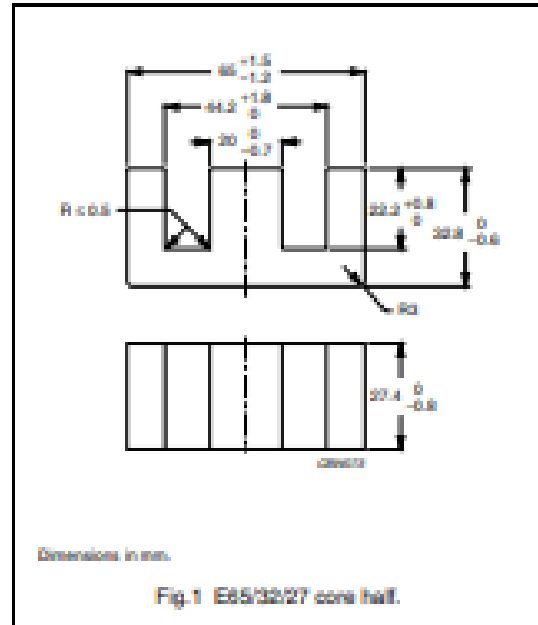
E cores and accessories

E65/32/27

CORE SETS

Effective core parameters

SYMBOL	PARAMETER	VALUE	UNIT
$S(l/A)$	core factor (C1)	0.274	mm ⁻¹
V_e	effective volume	79 000	mm ³
l_e	effective length	147	mm
A_e	effective area	540	mm ²
A_{min}	minimum area	530	mm ²
m	mass of core half	~205	g



Core halves

A_e measured in combination with a non-gapped core half, clamping force for A_e measurements 60 ± 20 N, unless stated otherwise.

GRADE	A_e (nH)	μ_e	TOTAL AIR GAP (μm)	TYPE NUMBER
3C90	100 ± 5% ⁽¹⁾	~ 22	~ 14380	E65/32/27-3C90-E100
	160 ± 5% ⁽¹⁾	~ 35	~ 7560	E65/32/27-3C90-E160
	250 ± 5% ⁽¹⁾	~ 54	~ 4100	E65/32/27-3C90-E250
	315 ± 5% ⁽¹⁾	~ 68	~ 3020	E65/32/27-3C90-E315
	400 ± 8% ⁽¹⁾	~ 87	~ 2200	E65/32/27-3C90-E400
	630 ± 10% ⁽¹⁾	~ 136	~ 1240	E65/32/27-3C90-E630
	8800 ± 25%	~ 1880	~ 0	E65/32/27-3C90
3C92 max	8000 ± 25%	~ 1310	~ 0	E65/32/27-3C92
3C94	8800 ± 25%	~ 1880	~ 0	E65/32/27-3C94
3C95 max	10800 ± 25%	~ 2300	~ 0	E65/32/27-3C95
3F3	100 ± 5% ⁽¹⁾	~ 22	~ 14380	E65/32/27-3F3-E100
	160 ± 5% ⁽¹⁾	~ 35	~ 7560	E65/32/27-3F3-E160
	250 ± 5% ⁽¹⁾	~ 54	~ 4100	E65/32/27-3F3-E250
	315 ± 5% ⁽¹⁾	~ 68	~ 3020	E65/32/27-3F3-E315
	400 ± 8% ⁽¹⁾	~ 87	~ 2200	E65/32/27-3F3-E400
	630 ± 10% ⁽¹⁾	~ 136	~ 1240	E65/32/27-3F3-E630
	7300 ± 25%	~ 1580	~ 0	E65/32/27-3F3

Note

1. Measured in combination with an equal gapped core half.

EK-3 (Devam). E65 nüvenin katalog bilgileri

Ferrocube

E cores and accessories

E65/32/27

Core halves of high permeability grades

Clamping force for A_L measurements, 60 \pm 20 N.

GRADE	A_L (nH)	H_c	AIR GAP (μ m)	TYPE NUMBER
3C11	16700 \pm 25%	= 3620	= 0	E65/32/27-3C11

Properties of core sets under power conditions

GRADE	B (mT) at	CORE LOSS (W) at				
	H = 250 A/m; f = 25 kHz; T = 100 °C	f = 25 kHz; \dot{B} = 200 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; \dot{B} = 100 mT; T = 100 °C	f = 100 kHz; \dot{B} = 200 mT; T = 25 °C	f = 100 kHz; \dot{B} = 200 mT; T = 100 °C	f = 400 kHz; \dot{B} = 50 mT; T = 100 °C
3C00	\geq 320	\leq 0.1	\leq 12	–	–	–
3C02	\geq 370	–	\leq 8.5	–	\leq 47	–
3C04	\geq 320	–	\leq 8.5	–	\leq 47	–
3C05	\geq 320	–	–	\leq 49.8	\leq 47.4	–
3F3	\geq 320	–	\leq 10.5	–	–	\leq 21

EK-3 (Devam). E65 nüvenin katalog bilgileri

Ferroxcube

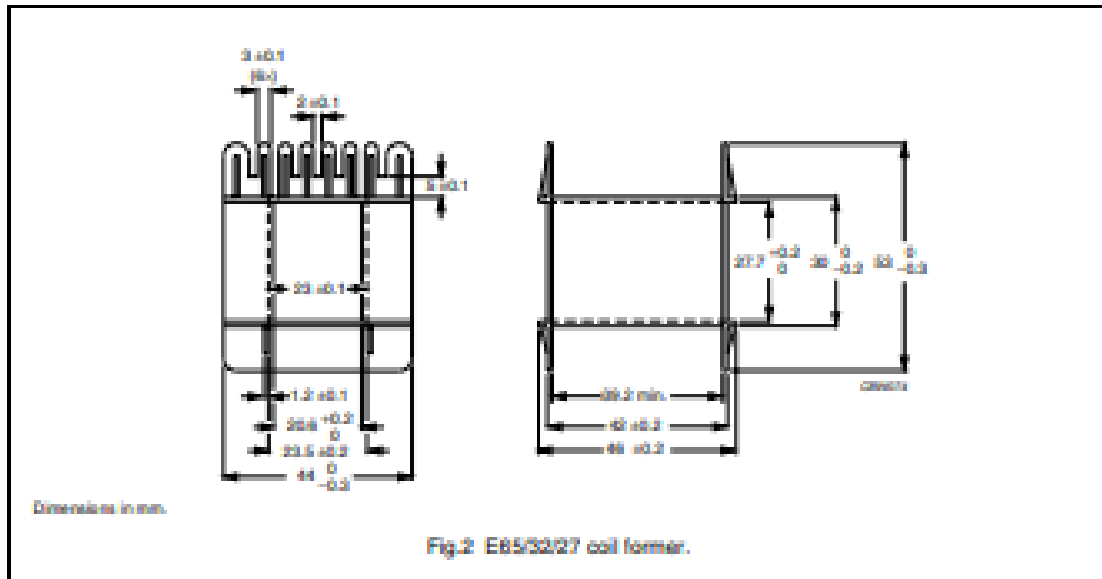
E cores and accessories

E65/32/27

COIL FORMER

General data for E65/32/27 coil former without pins

PARAMETER	SPECIFICATION
Coil former material	polyethylene terephthalate (PET), glass reinforced, flame retardant in accordance with "UL 94V-0"; UL file number E107538
Maximum operating temperature	130 °C, "IEC 60085", class B



Winding data and area product for E65/32/27 coil former without pins (E)

NUMBER OF SECTIONS	MINIMUM WINDING AREA (mm ²)	NOMINAL WINDING WIDTH (mm)	AVERAGE LENGTH OF TURN (mm)	AREA PRODUCT $A_a \times A_w$ (mm ²)	TYPE NUMBER
1	334	39.2	150	213000	CP-E65-1S-T

EK-3 (Devam). E65 nüvenin katalog bilgileri

Ferrocube

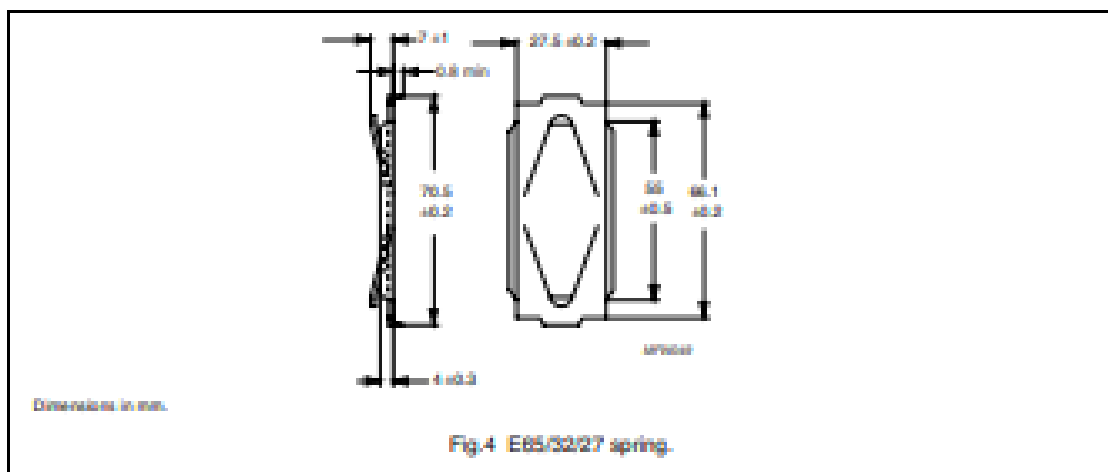
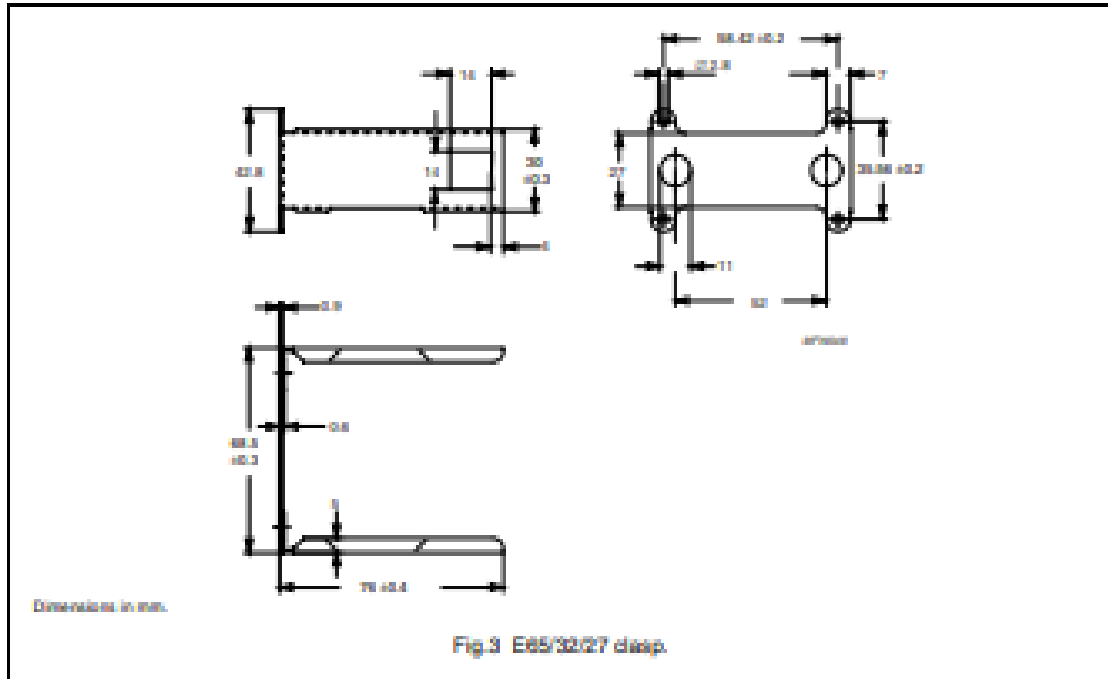
E cores and accessories

E65/32/27

MOUNTING PARTS

General data for mounting parts

ITEM	REMARKS	FIGURE	TYPE NUMBER
Clasp	steel, zinc (Zn) plated	3	CLA-E65/32/27
Spring	steel, zinc (Zn) plated	4	SPR-E65/32/27



EK-4, 3C90 materyalinin katalog bilgileri

Ferroxcube

Material specification

3C90

3C90 SPECIFICATIONS

A low frequency power material for use in power and general purpose transformers at frequencies up to 0.2 MHz.

	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤ 10 kHz; 0.25 mT	2300 $\pm 20\%$	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	5500 $\pm 25\%$	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 470	mT
	100 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 380	mT
P_V	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≤ 80	kW/m ²
	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤ 80	
	100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈ 450	
ρ	DC, 25 °C	≈ 5	Ωm
T_C		≥ 220	°C
density		≈ 4800	kg/m ³

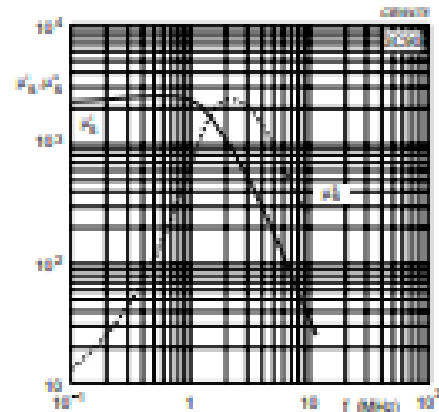


Fig.1 Complex permeability as a function of frequency.

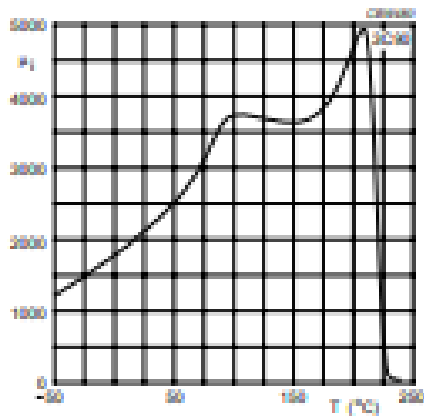


Fig.2 Initial permeability as a function of temperature.

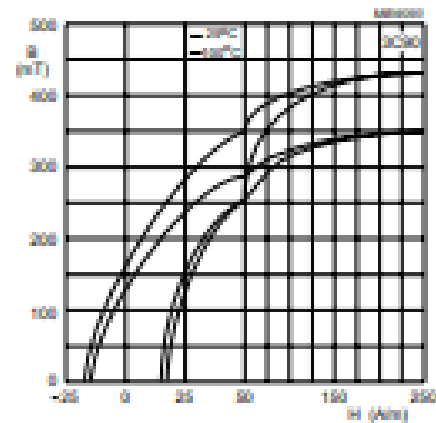


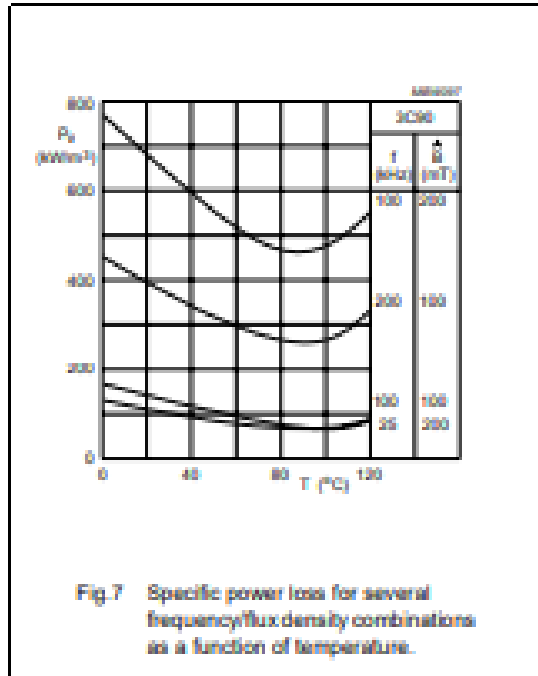
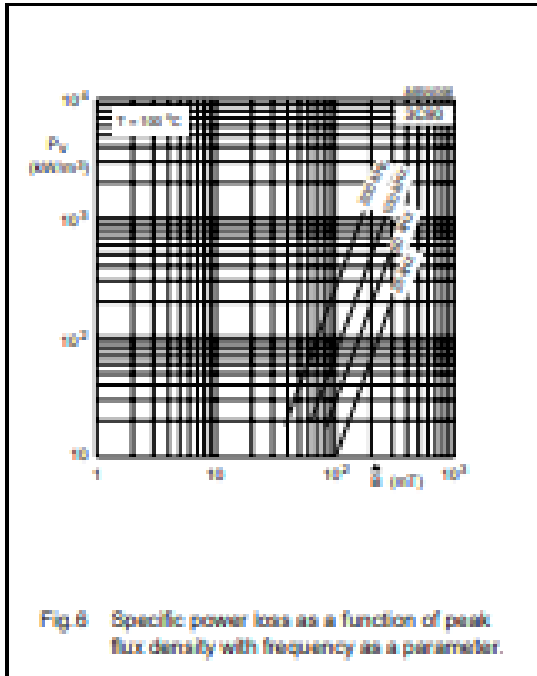
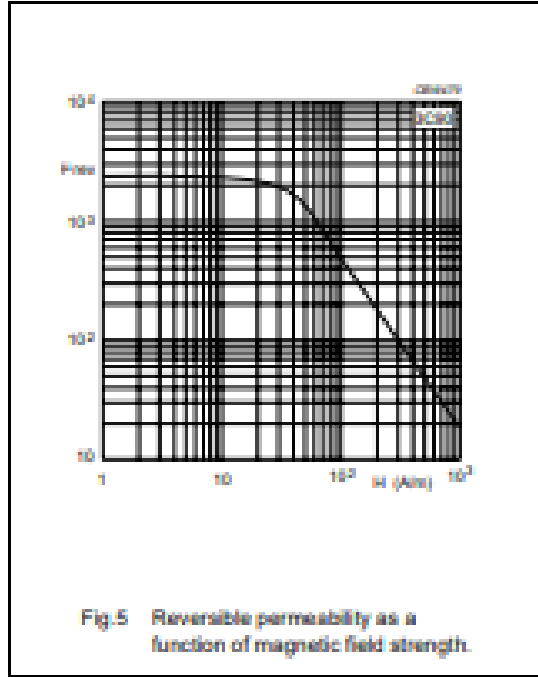
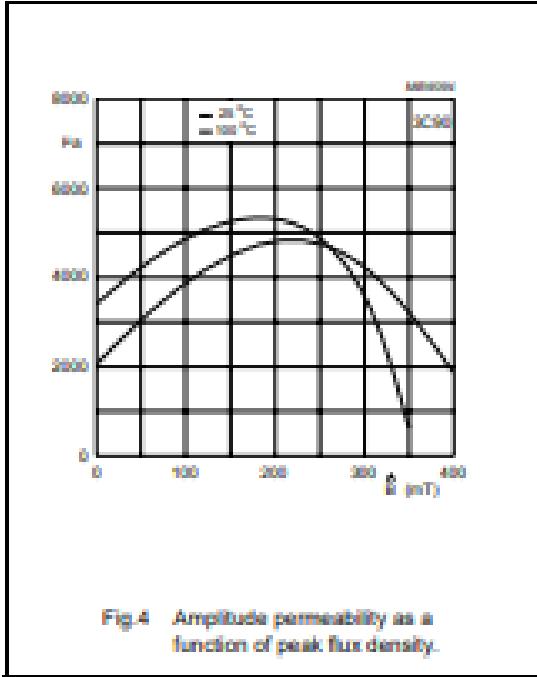
Fig.3 Typical B-H loops.

EK-4 (Devam), 3C90 materyalinin katalog bilgileri

Ferrocube

Material specification

3C90



ÖZGEÇMİŞ

Ömer ALDEMİR İlköğretim, ortaöğretim ve lise eğitimini Van'da tamamladıktan sonra 2014 yılında Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandı. 2018 yılında lisans eğitimini tamamlamasının ardından Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi'nde Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünün Tezli Yüksek Lisans öğrencisi olarak kabul edildi.



T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 06/12/2021

Tez Başlığı / Konusu: YÜKSEK FREKANSLI GÜÇ KATSAYISI DÜZELTİCİ DEVRESİ İÇİN İNDÜKTÖR TASARIMI VE MANYETİK ANALİZİ

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 39 sayfalık kısmına ilişkin, 03/12/2021 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 1 (bir) dir.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

06/12/2021

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Ömer ALDEMİR

Öğrenci No: 18910001089

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Program: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Statüsü: Y. Lisans

Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR

Prof. Dr. Naci GENÇ

(Unvan, Ad Soyad, İmza)

(Unvan, Ad Soyad, İmza)