

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**



**TRANSFORMATÖR T-BAĞLANTI YAPISININ ÇEKİRDEK
KAYIPLARINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET KARADEMİR

BALIKESİR, MAYIS - 2015

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**



**TRANSFORMATÖR T-BAĞLANTI YAPISININ ÇEKİRDEK
KAYIPLARINA ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AHMET KARADEMİR

BALIKESİR, MAYIS – 2015


KABUL VE ONAY SAYFASI

AHMET KARADEMİR tarafından hazırlanan “**TRANSFORMATÖR T-BAĞLANTI YAPISININ ÇEKİRDEK KAYIPLARINA ETKİSİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 26.05.2015 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kubilay EKER



Üye
Doç.Dr. Osman KALENDER



Üye
Yrd.Doç.Dr. Murat Erhan BALCI



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

ÖZET

**TRANSFORMATÖR T-BAĞLANTI YAPISININ ÇEKİRDEK
KAYIPLARINA ETKİSİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
AHMET KARADEMİR
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. MEHMET KUBİLAY EKER)
BALIKESİR, MAYIS – 2015**

Modern imalat sürecinde, transformatör çekirdek saçları, üst ve alt boyunduruk ve 3 adet bacaktan oluşacak şekilde 5 adet kesilmiş parçadan istiflenerek oluşturulmaktadır. Yapılan literatür taramasından T-bağlantı kısmı olarak da adlandırılan orta bacak tasarımlarının, teknolojik üretim seviyesine bağlı olarak bugünlere kadar çeşitli şekillerde imal edildiği görülmektedir. Ayrıca, bir kısmı deneysel, bir kısmı bilgisayar analizi olan literatürdeki çalışmalar incelendiğinde ise boşta transformatör çekirdek kayıplarının en fazla T-bağlantı kısımlarında olduğu vurgulanmaktadır. Ancak hangi T-bağlantı formunun en az güç kaybına neden olduğunu ilişkin literatürde bir biri ile örtüşmeyen sonuçlar mevcuttur.

Bu çalışmanın temelini, literatürdeki farklı T-bağlantı formu önerileri ve yeni bağlantı formları dikkate alınarak literatürdeki belirsizliğin giderilmesi oluşturmaktadır. Bu amaçla elektrik makinaları için gelişmiş bir elektromanyetik analiz programı olan Ansoft Maxwell programı kullanılarak, 7 farklı T-bağlantı formu için analizler yapılmakta, toplam çekirdek kayıpları, akı yoğunluğu dağılımları ve çekirdek üzerinde en fazla güç kaybının olduğu kısımlar analiz edilmektedir.

Ayrıca çalışmada, farklı T-bağlantı tasarımları için oluşan atıl malzemedeki değişimler irdelenerek, atıl malzeme açısından en iyi tasarımın ortaya konulması amaçlanmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Transformatör, T-bağlantı Açısı, Çekirdek Kaybı, Sonlu Elemanlar Yöntemi

ABSTRACT

**EFFECT OF THE DIFFERENT T-JOINT DESIGN AT POWER
TRANSFORMER
MSC THESIS
AHMET KARADEMİR
BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASSIST.PROF.DR.MEHMET KUBİLAY EKER)
BALIKESİR, MAY 2015**

In the modern manufacturing processes, sheets of the transformer core composed as stacked with 5 pieces of cut parts which have top and bottom yoke and 3 legs. It is seen from literature research that T-joint section of the center leg design is manufactured in various forms depending on technological production level until now. Also it is seen literature research about a part of experimental and a part of computer analysis that is emphasized maximum core loss of no-load transformer at T-joint sections. However it is seen that one result do not overlap with one another results in literature about which form of T-joint section have minimum core loss.

The aim of this study is resolved uncertainty in literature about T-joint design with T-joint designs different suggestions in the literature and new T-joint designs. Using electromagnetic analysis program Ansoft Maxwell which developed for electric machines, analysis are performed for 7 different T-joint design for this aim. Furthermore total core losses, flux density distributions and sections of the maximum loss of power on the core is analyzed.

Also another aim of this study is to find proper design with regard to minimum discarded material for different T-joint designs at core production stage.

KEYWORDS: Transformers, T-joint, Core Loss, Finite Element Method

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
1.GİRİŞ	1
1.1 Transformatörün Çalışma Prensibi	1
1.2 Transformatör Nüve Çeşitleri.....	2
1.2.1 Çekirdek tipi transformatör.....	2
1.2.2 Mantel tipi transformatör.....	3
1.3 Transformatör Sargıları.....	4
1.4 Transformatörlerin İmalat Süreci.....	4
1.5 Transformatörlerde Kayıpların Azaltılması	5
2.MANYETİK MODELLEME	7
2.1 Manyetik Modellemenin Amacı.....	8
2.2 Manyetik Modelleme Süreci	8
2.3 Manyetik Modellemenin Avantajları.....	9
2.4 Manyetik Modellemenin Dezavantajları.....	10
2.5 Sonuç.....	10
3.TRANSFORMATÖRDE DEMİR KAYIPLARININ MODELLENMESİ	12
3.1 Histerisiz Kayıpları	13
3.2 Girdap Kayıpları	14
3.3 Anormal Kayıplar	15
3.4 Sonuç.....	16
4.TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK KAYIPLARINA ETKİ EDEN DİĞER FAKTRÖLER	17
4.1 Frekansın Kayıplara Etkisi	17
4.2 İstifleme Deliklerinin Kayıplara Etkisi	18
4.3 Sonuç.....	19
5.TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK MODELLEMELERİ	21
5.1 Sonuç.....	28
6.TRANSFORMATÖRDE ÇEKİRDEK MALZEMESİNİN ETKİSİ	29
6.1 Silisli Saç ve Amorf Malzemedden Yapılmış Çekirdeklerin Karşılaştırılması	29
6.2 Çekirdek Malzeme Kalınlığının Kayba Etkisi	33
6.3 Sonuç.....	36
7.ADIM KAYDIRMA (STEP-LAP) TEKNİĞİNİN VE İSTİFLEME (LAMİNASYON) SAYISININ ÇEKİRDEK KAYBINA ETKİSİ	37
7.1 Sonuç.....	41
8.FARKLI T-BAĞLANTI KESME AÇILARI DİKKATE ALINARAK TRANSFORMATÖR MANYETİK MODELLENMELERİNİN YAPILMASI	42

8.1	Bilgisayar Yazılımının Tanıtılması.....	42
8.2	Transformatör Konstrüksiyonu	44
8.3	Benzetim Sırasında Karşılaşılan Problemler	46
8.4	45-90-45° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	49
8.5	15-90-75° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	53
8.6	75-90-15° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	56
8.7	60-60-60° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	59
8.8	30-120-30° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	62
8.9	30-60-90° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	65
8.10	90-60-30° Derece T-Bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi	68
8.11	Sonuç.....	71
9.	ÇEKİRDEK KESİM İŞLEMİNDEKİ ATIL MALZEME DURUMU	73
9.1	Sonuç.....	75
10.	SONUÇ VE ÖNERİLER	76
11.	KAYNAKLAR	78

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Transformatörün manyetik devresi ve bobin diyagramı [3].....	1
Şekil 1.2: Çekirdek tipi transformatör	2
Şekil 1.3: Mantel tipi transformatör	3
Şekil 3.1: M4 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi [30].....	13
Şekil 3.2: Çekirdek kayıplarının histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplar cinsinden değerlendirilmesi; Ph: Histerisiz kayıpları, Ps: Girdap akımı kayıpları, Pa: Anormal kayıplar [37]	16
Şekil 4.1: Farklı frekanslarda bulunan kayıplar [29]	17
Şekil 4.2: 4 Farklı frekansta bulunan toplam çekirdek kayıpları [38]	18
Şekil 4.3: İki farklı zamandaki manyetik akı yoğunlukları [41]	19
Şekil 5.1: Çekirdek modeli (a): Tek fazlı (b): Üç fazlı [20]	21
Şekil 5.2 : Tek ve üç fazlı transformatör çekirdekleri için yapı faktörlerinin karşılaştırılması [20]	22
Şekil 5.3: 45° derece üst üste binmeli ve 90° derece üst üste bağlantılı bir faz çekirdekler için yapı faktörlerinin karşılaştırılması [20]	22
Şekil 5.4: Farklı T-bağlantı tasarımları [22]	23
Şekil 5.5: Farklı T-bağlantı tasarımları için yapı faktörleri [22]	23
Şekil 5.6: Analizi yapılan çekirdek tipleri [42]	25
Şekil 5.7: Farklı T-bağlantı modelleri [21]	26
Şekil 5.8: 4 farklı T-bağlantı kısmı tasarımı [23]	27
Şekil 5.9: Çekirdek kayıplarının maksimumu ile manyetik akı yoğunluğunun ortalaması arasındaki ilişki [23]	27
Şekil 6.1: Fe-bazlı amorf alaşım ve tanecikleri yönlendirilmiş silisli saça ait B/H eğrileri [44]	30
Şekil 6.2: Çekirdek kayıpları [45]	30
Şekil 6.3: $f = 1$ kHz, $B_{max} = 0.3$ T durumunda çekirdek kayıpları [48]	32
Şekil 6.4: $f = 1$ kHz, $B_{max} = 0.4$ T durumunda çekirdek kayıpları [48]	33
Şekil 6.5: Malzemelerin çekirdek kayıpları [49]	35
Şekil 7.1: Çekirdek bağlantılarının basit modeli (a) Klasik tasarım (b) Adım kaydırma tasarımı [51]	37
Şekil 7.2: Köşe kısmı yapısı (a) Klasik tasarım (b) Adım kaydırma tasarımı [51]	37
Şekil 7.3: Çekirdekte adım kaydırma bağlantısı [52]	38
Şekil 7.4: $g=0$ ve $N=1$ durumuna orantılı olarak, hava aralığı uzunluğuna göre (a) Güç kayıplarındaki ve (b) Uyarma kayıplarındaki artış yüzdesi (İstifleme sayısı $N=2$ için) [53]	40
Şekil 7.5: $g=2$ mm ve $a=4$ mm için istifleme sayısına (N) bağlı olarak uyarma kritik akı yoğunluğu değerleri [53]	40
Şekil 7.6: İstifleme sayısına (N) bağlı indüksiyon penceresi [54]	41
Şekil 8.1: Ansoft Maxwell programında oluşturulan 50 kVA gücündeki modelin basit yapısı ve boyutları	45
Şekil 8.2: M5-0.23 malzemesinin B-H eğrisi	45
Şekil 8.3: M5-0.23 malzemesinin B-P eğrisi	46
Şekil 8.4: 1,95-2 saniyeler arasında elde edilen üç faz gerilimine ait değerler	47

Şekil 8.5: Tüm benzetim süresince elde edilen üç faz gerilimine ait değerler..	48
Şekil 8.6: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör	49
Şekil 8.7: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	50
Şekil 8.8: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	50
Şekil 8.9: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	51
Şekil 8.10: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	52
Şekil 8.11: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	52
Şekil 8.12: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ...	53
Şekil 8.13: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	53
Şekil 8.14: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	54
Şekil 8.15: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	54
Şekil 8.16: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	55
Şekil 8.17: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	55
Şekil 8.18: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ...	56
Şekil 8.19: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	56
Şekil 8.20: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	57
Şekil 8.21: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	57
Şekil 8.22: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	58
Şekil 8.23: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	58
Şekil 8.24: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ...	59
Şekil 8.25: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	59
Şekil 8.26: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	60
Şekil 8.27: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	60
Şekil 8.28: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	61
Şekil 8.29: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	61
Şekil 8.30: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ..	62
Şekil 8.31: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	62
Şekil 8.32: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	63

Şekil 8.33: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	63
Şekil 8.34: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	64
Şekil 8.35: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	64
Şekil 8.36: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ...	65
Şekil 8.37: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	65
Şekil 8.38: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	66
Şekil 8.39: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	66
Şekil 8.40: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	67
Şekil 8.41: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	67
Şekil 8.42: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ...	68
Şekil 8.43: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü.....	68
Şekil 8.44: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi.....	69
Şekil 8.45: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m ³ 'deki çekirdek kaybı (W/m ³).....	69
Şekil 8.46: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu	70
Şekil 8.47: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri	70
Şekil 9.1: Üretim alanlarındaki silisli saçlar	73
Şekil 9.2: (a) Kesim işleminden önceki durum (b) Kesim işleminden sonraki durum.....	74

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1: 4 farklı çekirdek yapısı için toplam harmonik bozulma değerleri [42].....	25
Tablo 5.2: Farklı paketlerin boyutları [21]	26
Tablo 5.3: Farklı T-bağlantı kısmı tasarımları için 4 farklı paketin kayıp değerleri [21]	26
Tablo 6.1: Amorf metal malzeme ile CRGO malzeme karşılaştırması [46]. ...	31
Tablo 6.2: Çekirdek malzeme özellikleri [48]	32
Tablo 6.3: M2, M3, M4 malzemelerinin özellikleri [49]	34
Tablo 6.4: Farklı çekirdek malzemelerin kalınlık ve kayıpları [49]	35
Tablo 7.1: Her bir adımda farklı istifleme adedi için 15 kVA transformatörde çekirdek kayıpları [52].....	38
Tablo 7.2: Çakışma uzunluğunun değiştirildiği 9 farklı numune için çekirdek kayıpları [52]	39
Tablo 8.1: Benzetimler neticesinde elde edilen sonuçlar	71
Tablo 9.1: 7 Farklı T-bağlantı kesme açısı için atıl malzeme durumu.....	75

SEMBOL LİSTESİ

- F**: Manyeto motor kuvvet
 θ : Manyetik akı
 R_m : Manyetik relüktans
 I_R : Transformator sağ bacak akı yolu
 I_S : Transformator orta bacak akı yolu
 I_T : Transformator sol bacak akı yolu
H : Manyetik alan şiddeti
J : Enerji
B : Manyetik akı yoğunluğu
 μ : Manyetik geçirgenlik
 k_h : Histerisiz kayıp katsayısı
 k_e : Girdap kayıp katsayısı
 k_a : Anormal kayıp katsayısı
f : Transformator çalışma frekansı
 B_m : Manyetik akının maksimum değeri
 P_e : Girdap kaybı
 P_a : Anormal kayıp
 σ : Elektriksel iletkenlik
G : Manyetik malzemenin elektriksel sönümlenme faktörü
S : İstiflemenin kesit alanı
 V_0 : Üretici firma tarafından verilen malzeme kayıp katsayısı
 P_h : Histerisiz kaybı
 P_{tot} : Toplam kayıp
 P_s : Girdap kayıpları
 p_v : Toplam çekirdek kaybı
 k_c : Anormal kayıp katsayısı
w : Transformator boyunduruk ve bacak genişliği,
l : Transformator boyunduruk uzunluğu
h : Transformator bacak uzunluğu
 B_{max} : Maksimum manyetik akı yoğunluğu
 k_h : Çekirdek kaybı için kullanılan yapı faktörü
 P_{cl} : Girdap kaybı
 P_{ex} : Anormal kayıplar
t : Transformator saç kalınlığı
 ρ : Malzemenin elektriksel direnci
 B_p : Malzemenin maksimum manyetik akı yoğunluğu
L : Bölge genişliği
 B_e : Hava aralığına bağlı olacak kritik bir manyetik akı yoğunluğu
g : Transformator saçları arası mesafe
N : İstifleme sayısı
 V_{peak} : Maksimum gerilim değeri

ÖNSÖZ

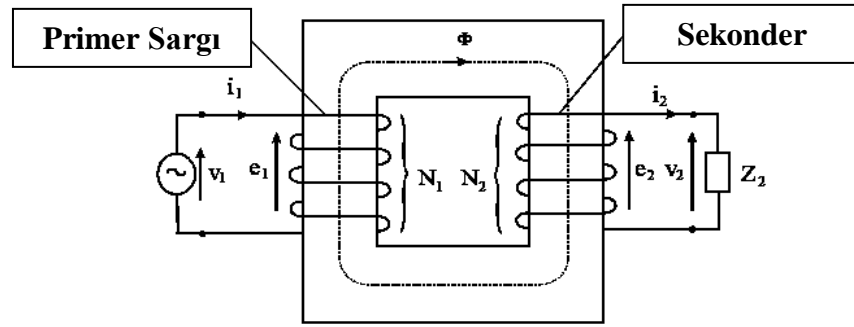
Tez çalışmamın gelişimi boyunca yardımları ve yol göstericiliğiyle yanımda olan; çalışmalarım sırasında fikir ve deneyimlerini benden esirgemeyen Sayın Yrd. Doç Dr. Mehmet Kubilay EKER'e; her zaman yanımda olan ve benden manevi desteklerini esirgemeyen babam Avni KARADEMİR'e, annem Gülten KARADEMİR'e ve eşim Ebru KARADEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

NOT: Hazırlamış olduğum yüksek lisans tezi bireysel görüşleri yansıtmakta olup, Türk Silahlı Kuvvetleri görüşlerini yansıtmamaktadır.

1. GİRİŞ

Transformatörler elektrik enerjisini bir elektrik devresinden diğerine frekansı değiştirmeden elektromanyetik induksiyon yoluyla transfer eden statik cihazlardır [1]. Elektrik makineleri arasında hareket etmeyen makine gurubunda olan transformatörlerde enerji dönüşümü olmaz [2].

Transformatörün fiziksel çalışma prensibi, Şekil 1.1'de de gösterildiği gibi, düşük manyetik direnci olan bir yolda oluşan ortak bir manyetik akı aracılığıyla bağlanmış iki devrenin karşılıklı manyetiksel bağı olarak ifade edilir [3].



Şekil 1.1: Transformatörün manyetik devresi ve bobin diyagramı [3]

1.1 Transformatörün Çalışma Prensibi

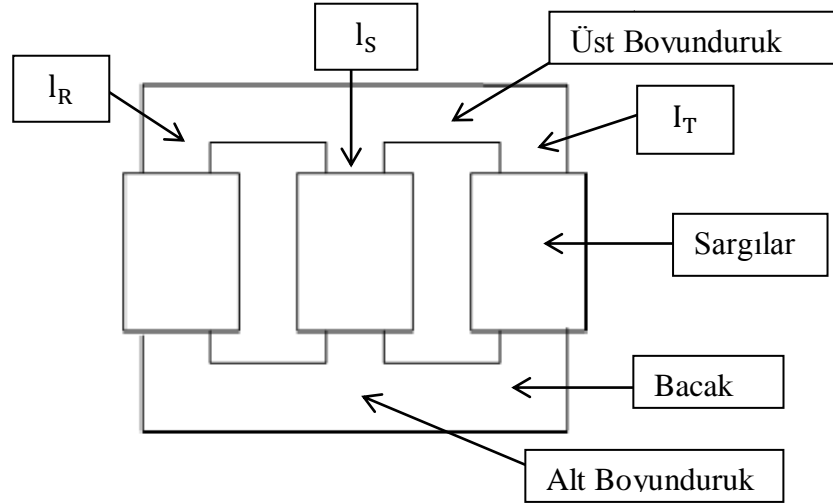
Transformatörün primer sargısına uygulanan alternatif gerilim ile sargıda manyetik alan oluşması sağlanır. Ardından sekonder sargı üzerinden devre tamamlanır. Primer sargı üzerindeki alternatif gerilimin yönü ve şiddeti değiştiğinden buna bağlı olarak manyetik alanın da yönü ve şiddeti değişir. Bu sayede salgılarda alternatif bir gerilim endüklenir [4].

1.2 Transformatör Nüve Çeşitleri

Transformatör nüve çeşitleri çekirdek tipi ve mantel tip olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

1.2.1 Çekirdek tipi transformatör

Çekirdek tipi transformatörler yaygın olarak 1 ve 3 fazlı olarak imal edilir. Üç fazlı çekirdek tipini incelersek, transformatörün demir konstrüksiyonunda her faz bir bacakla temsil edilmiş olduğundan, iki adet pencereden ve iki adet boyunduruktan oluşmaktadır [5]. Çekirdek tipi transformatörde, orta bacağa ait fazın demir boyu, diğer iki yan bacaklara göre daha kısadır (Şekil 1.2).



Şekil 1.2: Çekirdek tipi transformatör

Bu nedenle yan bacaklardan çıkan akımın geçtiği yol orta bacadan geçtiği yola göre daha uzundur. Bundan dolayı bacaklarda oluşan manyetik dirençler farklıdır. Fazlara uygulanan gerilimlerin ve endüklenen emk'ların eşit olması gerektiğine göre, bu gerilimleri üretecek manyetik akılar da eşit demektir. Ancak relüktansların farklı olması ile bacaklardaki amper sarım eşitliği bozulur (orta bacağın relüktansı küçük olduğundan amper sarım da küçük olacak ve sonuç olarak bu değeri veren bacak akımı da diğerlerine göre küçük olacaktır) [6]. Bu durum (1.1) eşitliğinden yararlanılarak kolaylıkla hesaplanabilir. Amper –sarım,

$$F = \theta.R_m \quad (1.1)$$

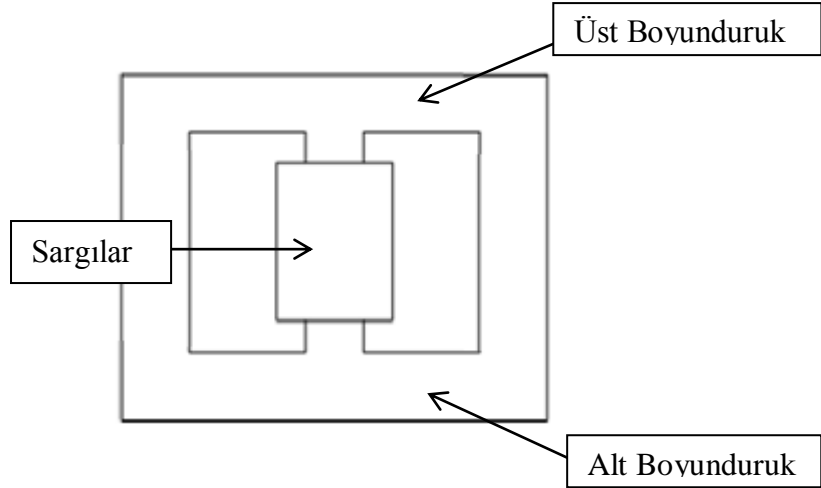
olduğundan, orta bacak daha az akım çeker. Ayrıca Şekil 1.2' de görüldüğü gibi akı yolları arasındaki ilişki (1.2) eşitliğindeki gibidir.

$$I_S < I_R = I_T \quad (1.2)$$

Bu dezavantajlı bir durumdur. Çünkü üç fazlı simetrik sistemlerde akım ve gerilimlerin eşit olması ve ayrıca eğer yıldız bağlı bir sistem varsa nötr noktasının mutlaka sıfır potansiyelinde olması arzu edilir. Çekirdek tipi demir gövdeye sahip bu transformatörlerde nötr noktasını sıfır yapmak bu açıdan mümkün değildir. Eğer yıldız noktası topraklanacak olursa, nötr hattından bu üç akımın vektörel toplamı kadar bir akım akar. Diğer bir dezavantajlı tarafı ise, fazlardan bir tanesinin işletme sırasında yapacağı arızanın diğer üç fazı da etkilemesi ve transformatörü tamamen devre dışı bırakmasıdır. Ancak bu tip transformatörlerde kullanılan demir miktarı mantel tipine göre daha az olduğundan, daha hafif ve ekonomiktir [6].

1.2.2 Mantel tipi transformatör

Mantel tipi transformatörlerde faz başına iki pencere, iki boyunduruk ve üç adet bacak bulunur (Şekil 1.3) [5].



Şekil 1.3: Mantel tipi transformatör

Orta bacak alçak ve yüksek gerilim sargılarını taşıdığından üretilen bütün akı bu baccaktan yan bacaklara eşit olarak paylaşılır. Bu nedenle yan bacakların demir kesitleri orta bacağa göre %50 kadar küçüktür. Aynı durum alt ve üst boyunduruklar için geçerlidir. Bu tip transformatörlerde çekirdek tip transformatörlerden daha fazla

demir kullandığından daha ağırdır. Bu tip transformatörlerde her faza ait demir çekirdek birbirinin aynısı olduğundan, manyetik devreleri tamamen birbirilerine eşittir. Bu bakımdan çektikleri akım da aynıdır. Diğer bir deyişle çekirdek tipi transformatörde meydana gelen sorunlar bu tiplerde ortaya çıkmaz. Bu tip demir gövdeler tasarım olarak çekirdek tipe göre daha dar ve yüksektir. Ancak transformatörün tasarımı sırasında, fazların yerleştirme düzeninin değiştirilmesi ile daha geniş ve yüksekliği daha az imal edilebilir. Çekirdek ve mantel tip transformatörler orta ve büyük güçler için imal edilir [4].

1.3 Transformatör Sargıları

Transformatör sargı malzemeleri bakır ve alüminyum malzemelerden imal edilmekte olup, kesitleri dikdörtgen veya yuvarlaktır. Sargı malzemelerinin transformatöre uygunluğu kullanılacak gerilim, akım şiddeti, yalıtma ve soğutma durumlarına göre değişmektedir. Uygun sargı malzemesi belirlendikten sonra, sargı ve çekirdek arasındaki yalıtım için prespan veya kraft kâğıtlar kullanılır [7]. Kullanılan yalıtım malzemeleri transformatör yağına ve ısıya dayanıklı olup, yüksek bir delinme ve alan şiddetine sahiptirler. Bu yalıtım kâğıtlarının mekanik mukavemetleri ve yağ emme kabiliyetleri normal kâğıtlara nazaran yüksektirler [8]. Yüksek Gerilim sargılarını özel sarım uygulamaları ve yalıtım arttırılmaları ile giriş bobinlerine gelen gerilim darbelerinin düzgün dağılımını sağlamakta ve giriş sarımlarının fazla zorlanmasını önlemektedirler. Ayrıca bu bobinlerin sarım ve kat arası yalıtımları da normal bobinlere nazaran arttırılmıştır. Bobinlerde tiplerine göre soğutmalarının sağlanması için aksial veya radyal kanallar bulunmakta olup, bu kanallar aksialda dikdörtgen çıtalara, radyalda bobin çevresine düzgün dağılmış ara parçalarının uygun düzenlemeleri ile meydana getirilirler [9].

1.4 Transformatörlerin İmalat Süreci

Günümüzde yaygın olarak kullanılan transformatörlerin üretim süreçleri en basit haliyle aşağıda verilen şekildedir.

Çekirdek nüve üretiminde genel olarak silisli saçlar kullanılır. Bunlar mikro işlemci kontrollü GEORG [10] makinelerinde dilimlenir ve kesilir. 4,5-5 metreye kadar kesilmiş olan bu çekirdek saçları elle dizilir. Ardından çekirdek kaldırma işlemi yapılır [11].

Bobin üretimine geldiğimizde, üretilen bobinlerin büyüklüğüne göre yatay ve dikey olarak sarım işlemi gerçekleştirilir. Sarım işleminde hata oluşmaması için özellikle CNC kontrollü makineler kullanılır [12].

Bobinlerin sarım işlemleri esnasında sarım tekniği transformatörlerin gerilim ve güçlerine göre değişmekte olup, çeşitli teknikler kullanılmaktadır [13].

Bobinler sarıldıktan kısa bir süre sonra transformatör çekirdeğine yerleştirilir. Bu işlem sırasında sargıların boylarında değişme olmaması için nemden korunması gerekmektedir [14].

Nemden korunma işlemi ise kurutma fırınlarında gerçekleştirilir. Bu kurutma fırınları yüksek sıcaklıkta dinamik basınç ile çalışmaktadır [15].

Son montaj aşamasına gelindiğinde, kurutulmuş bobin montajlı çekirdek transformatör kazanına yerleştirilir. Kapağı sabitlendikten sonra vakum işlemi gerçekleştirilir. Vakum işleminden sonra yağ doldurularak transformatör dinlendirmeye alınır ve deneme ve test aşamasına gönderilir [16].

1.5 Transformatörlerde Kayıpların Azaltılması

Enerji sistemlerinde en fazla kullanılan elektrik makinalarından olan transformatörlerin kayıplarının en aza düşürülmesi, enerji sistemlerinin verimini arttıracığında bu alandaki çalışmalar güncelliğini korumaktadır.

Transformatör imalatı sırasında kullanılacak malzeme miktarını, kayıpları arttırmadan sınırlayacak en önemli yöntem, nüvede kullanılan materyalin manyetik akı yoğunluğunu düşürmeyi gerektirmeyecek, düşük kayıplı malzemenin seçilmesidir [17].

Son yıllarda çekirdek materyali özelliklerinde önemli gelişmeler olduğundan, düşük manyetik geçirgenlik özelliğine sahip saçlar üretilmesiyle, büyük güçteki transformatörlerde dahil olmak üzere, maliyette ve daha düşük kayıplarda transformatörler üretimi mümkün hale gelmiştir [18]

Daha düşük kayıplı transformatör imalatı için çekirdek malzemesi olarak MOH, M5 saçlarının yanında Amorf malzemeler transformatör üretiminde kullanılmaktadır. Amorf malzeme kalınlığı 0.025 mm civarındadır ve folyo şeklinde üretilmektedir. Bu ince yapı sayesinde yüksek dirence sahiptir ve yine bu nedenle amorf nüvelerde Girdap kayıpları son derece düşüktür. Ancak amorf metalin doyma noktasının düşük olması, malzeme olarak çok ince olması nedeniyle imalatta kullanılmasının zorluğu ve maliyetinin yüksekliği nedeniyle sadece dağıtım transformatörlerinin üretiminde yaygınlaşabilmiştir [19].

Çekirdek kayıplarının azaltılması için sargı iletken kesitlerini daha yüksek seçmek yolu ile transformatör tasarımı yapmak en yaygın yöntemdir. Kesitin yüksek seçilmesi ile sargı direnci düşürülmekte böylece transformatörün yükte kayıpları azaltılmaktadır [18].

Boşta transformatörlerin kayıplarının en önemli bölümünün çekirdeklerinden kaynaklandığı ve çekirdek kayıplarındaki yoğunluğun ise T-bağlantı kesme açısı kısımlarında olduğu görülmektedir [20,21]. Bu kayıpların azaltılması için farklı T-bağlantı kesme açılarına sahip transformatörler tasarlanmıştır. Tasarlanan bu transformatörler üzerinde deneysel çalışmalar, matematiksel hesaplamalar ve çeşitli ve benzetim programları kullanılarak T-bağlantı kesme açılarındaki kayıplar karşılaştırılmıştır [20-23]. Önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar birbirleri ile tutarlı değildir ve çok fazla T-bağlantı formu analizi aynı anda yapılmamaktadır. Gelişen benzetim sistemi ile gerçekçi olarak analizler mümkün hale gelmiştir.

Bu çalışmada gelişmiş bir yazılım olan Ansoft Maxwell programı kullanılarak, önceki çalışmalar arasındaki tutarsızlıklar ortadan kaldırılarak daha geniş bir irdeleme yapılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, transformatörlerin kayıplarının en yoğun olduğu T-bağlantı kesme açıları için, farklı derecelere sahip 7 adet T-bağlantı kesme açısı tasarlanarak, Ansoft Maxwell manyetik modelleme programı ile elde edilen benzetimler karşılaştırılacaktır.

2. MANYETİK MODELLEME

1960'lı yıllardan itibaren bilgisayar sisteminin ve yazılım endüstrisinin gelişmesi ile CAD (Computer Aided Design: Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımı üretim dünyasında çok önemli bir yer kazanmıştır [24].

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan CAD yazılımlarının temelinde eşitlik (2.1) Laplace ve eşitlik (2.2) Poission denklemleri bulunmaktadır [25].

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (2.2)$$

Bu denklemlerde manyetik alan problemleri için

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.4)$$

Eşitlik (2.3) ve eşitlik (2.4) Maxwell denklemleri kullanılarak sınır koşulları eklenmektedir. Ardından en yoğun olarak kullanılan Rayleigh – Ritz yöntemi, Galarkin yöntemi, En Küçük Kareler yöntemi ve Ağırlık Artıkları Yöntemi gibi sonlu elemanlar yöntemlerinden biri kullanılarak çözüme gidilmektedir [25].

Sonlu elemanlar yöntemini kullanan elektromanyetik modelleme programlarının bir kısmına [26] numaralı kaynaktan ulaşılabilir. Bu kaynağı incelediğimizde özellikle Magnum 4.0, Electro Magnetic Simulation, Finite Element Method Magnetics (FEMM), MagNet v7, QuickField ve Ansoft Maxwell öne çıkan modelleme programları olduğu görülmektedir.

CAD yazılımları ile elektrik makinelerinin tasarım süreçleri kolaylaşmış ve böylece mevcut analitik hesaplamalar oldukça hızlı ve net sonuçlar elde edilmesine

katkılarda bulunmuştur. Böylece CAD yazılımlarının etkisi ile manyetik analiz yapma hem üreticiler için hem de araştırmacılar için büyük kolaylıklar sağlamıştır [24].

2.1 Manyetik Modellemenin Amacı

Manyetik modellemenin amacı gerçek bir sistemin modelini tasarlama süreci ve sistemin davranışlarını anlamak veya değişik stratejileri değerlendirmek için bu model üzerinde denemeler yapmaktır.

Manyetik modelleme ile maliyeti çok yüksek olan elektromanyetik malzemelerin üretilmeden modellemesi yapılarak hataların üretim öncesinde görülüp maliyetlerin azaltılmasına neden olmaktadır. Bu doğrultuda birçok üretici firma manyetik modelleme sonuçlarına göre üretim yapmaktadırlar.

Manyetik modellemenin en önemli kullanım amaçlarından biri de elektromanyetik malzemelerin üretiminden önce tasarımının yapılmasıdır. Yapılan bu tasarım üzerinde çeşitli değişiklikler yapılması üretim sonrasında malzeme üzerinde değişiklik yapılmasından çok daha kolaydır. Bu kapsamda üretici firmalar elektromanyetik malzemelerin üretimi öncesinde manyetik modellemeleri maliyeti azalttığı için kullanmaktadırlar.

2.2 Manyetik Modelleme Süreci

Gerçek sistemlerin davranışlarını araştırmak için kullanılan manyetik modelleme çalışmalarının aşamaları aşağıda verilmektedir:

1. Sistem Tanımı: Sistemin sınırlarını, kısıtlarını ve etkinlik ölçüsünü belirleme aşamasıdır.

2. Modeli Formüle Etme: Sistemi soyutlamak veya indirgemek için mantıksal bir akış diyagramına aktarma işlemidir.

3. Veri Derleme: Modelin gerektirdiği verileri tanımlama ve onları kullanabilecek ölçülere indirgeme aşamasıdır.

4. Modelin Dönüştürülmesi: Simülasyonun yapılacağı bilgisayarın diline modelin tercüme edilmesidir.

5. Modelin Geçerliliğini Araştırma: Modelin güven seviyesini kabul edebilir hale getirme ve gerçek sistem hakkında modelden yorum yapma aşamasıdır.

6. Stratejik Planlama: İstenilen bilgiyi sağlayacak olan bir denemenin tasarımıdır.

7. Taktik Planlama: Tasarımı yapılan denemede tanımlanan koşullara ait testlerin nasıl yapılacağıın belirlenmesidir.

8. Deneme: İstenilen veriler ile simülasyonu gerçekleştirme ve duyarlılık analizlerini yapma aşamasıdır.

9. Yorum: Simülasyon sonuçlarından çıkarımda bulunma aşamasıdır.

10. Uygulama: Modeli ve sonuçlarını kullanıma koymaktır.

11. Belgeleme: Proje faaliyetlerini raporlama ve modeli, kullanımını dökümanete etme aşamasıdır [27].

2.3 Manyetik Modellemenin Avantajları

1. Manyetik model oluşturulmasının ardından, çeşitli durum analizleri için defalarca kullanılabilir.

2. Manyetik Modelleme, eldeki bilgilerin detaylı olmaması durumunda elverişlidir.

3. Manyetik modelleme sürecinde analizi yapılacak veri her zaman gerçek hayattakinden daha ucuz elde edilebilir.

4. Manyetik modelleme çok karışık ve anlaşılması zor olan bilgilerin daha kolay anlaşılmasına olanak sağlayabilir.

5. Manyetik modelleme, simülasyonda elde edilen bilgiler ışığında üretim esnasında karşılaşılabilecek problemlere karşı daha önceden çözüm getirilmesine olanak sağlayabilmektedir.

6. Manyetik modelleme simülasyon sırasında hiç tahmin edemeyeceğimiz durumları önümüze koyarak araştırmannın farklı boyutlara gitmesini sağlayabilmektedir.

7. Manyetik modelleme deneysel sonuçların doğruluğu için bir sağlama sunabilmektedir.

8. Manyetik modelleme analistleri daha geniş bir perspektiften bakmaya zorlar [27].

2.4 Manyetik Modellemenin Dezavantajları

1. Manyetik modelleme programlarını üretmek, kurmak ve doğruluğunu ispat etmek çok uzun ve maliyeti çok yüksek olan bir süreçtir.

2. Manyetik modelleme programını bilgisayar üzerinde kurmak ve simülasyon gerçekleştirmek çok zaman alabilir.

3. Manyetik modelleme kullanıcıları simülasyon kolaylığına alışması durumunda analitik yöntemlere geçmesi zor olmaktadır [27].

2.5 Sonuç

Bu bölümde manyetik modellemenin günümüze geliş süreci, simülasyon sırasında izlenmesi gereken süreç, manyetik modellemenin avantajları ve dezavantajları aktarılmıştır. Literatürden de görüleceği gibi manyetik modelleme ve

simülasyon süreci teknolojinin gelişmesi ile hem akademik hem de ticari alanda vazgeçilmez bir unsur olmuştur.

Literatür taramasına baktığımızda, simülasyon sürecinin avantajları ve dezavantajları karşılaştırılmıştır. Özellikle günümüzde malzeme üretim aşamasında simülasyonun kullanılması maliyetin düşürülmesi için çok önemli bir husus olmuştur.

Simülasyon konusunda en dezavantajlı konunun simülasyon süresinin uzunluğu olduğu görülmekte olup, bu problemin ortadan kaldırılması için literatürde teknik kapasitesi yüksek bilgisayarlar ve paralel bilgisayarlar tekniği kullanıldığı görülmektedir [27].

3. TRANSFORMATÖRDE DEMİR KAYIPLARININ MODELLENMESİ

Transformatörün boşa çalışması, primer sargı şebekeye bağlı iken sekonder sargının uçlarının açık olma durumudur. Yani sekonder yüke bağlı değildir, bu durumda sekonder devreden bir akım akmayacaktır.

Demir kayıpları alternatif akımda meydana gelir. Alternatif akımın bir devir içinde iki defa yön değiştirmesi, aslında iletken malzeme üzerinde manyetik ve elektrik olarak iki türlü etki meydana getirir. Alternatif akım değerinin ani şekilde değişmesiyle manyetik alan yoğunluğunda değişim ortaya çıktığında “histerisiz kaybı” ortaya çıkar [28,33].

İkincisi ise, demirin elektrik akımına gösterdiği elektriksel dirençten kaynaklanır. Bu durumda malzeme bir iletken gibi davranır ve değişken akımın etkisi ile demirde gerilim endüklenir. Bu gerilim malzemenin içinde akımların akmasına neden olur ki bu akımlara girdap akımları adı verilir. Bunların demir içinde serbest olarak akması ile demirde “girdap kayıpları” ortaya çıkar [4].

Üçüncüsü ise, histerisiz ve girdap kayıpları dışında meydana gelen ve tanımlanamayan kayıplardır. Bunlara ise “anormal kayıplar” denmektedir [29] .

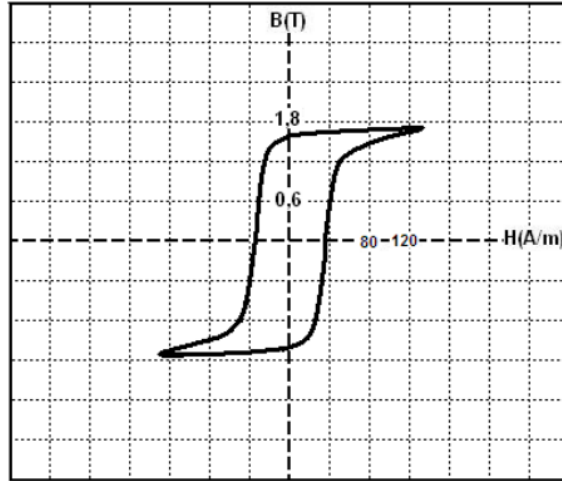
Bu kayıpların hesaplanmasında ise eşitlik (3.1) kullanılmaktadır [30].

$$P = k_h \cdot f \cdot B_m^x + k_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 + k_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte k_h , k_e , k_a , B , f sırasıyla histerisiz, girdap, anormal kayıp katsayıları, manyetik akımın maksimum değeri ve frekanstır.

3.1 Histerisiz Kayıpları

Manyetik etki, akımın ani değerinin değişmesine bağlı olarak, amper-sarımın ani değerinin ve dolayısıyla manyetik alan yoğunluğunun değişmesi olarak kendisini gösterir ki, buna “Histerisiz Kaybı” denir [34]. M4 elektrik çeliğine ait Histerisiz eğrisi Şekil 3.1’de görülmektedir [30].



Şekil 3.1: M4 kalite Si-Fe nüve çeliği için histerisiz eğrisi [30]

Histerisiz Kaybının hesaplanmasında eşitlik (3.2) kullanılır.

$$P_h = k_h \cdot f \cdot B_m^x (W / kg) \quad (3.2)$$

Burada malzemenin k_h histerisiz kayıp katsayısıdır, birimi W/kg ’dır. Bu katsayı malzemenin cinsine ve hacmine bağlı bir katsayıdır [31]. B_m ’de manyetik alan maksimum yoğunluğudur, birimi Wb/m^2 , f manyetik akı değişimi frekansını, x faktörü ise malzemedan malzemeye göre değişen faktördür ve değeri 0,5-2,3 arasındadır. Fakat genellikle elektrik makinelerinde bu değer 1,5-2,0 arasında alınır [32].

Histerisiz kayıplar elektrik çekirdek malzemelerinde değişen manyetik alan tarafından manyetize ve demanyetize edilmeye direnen moleküler manyetik bölgelerden kaynaklanmaktadır. Histerisiz nedeniyle oluşan histerisiz kaybı; manyetik çekirdek moleküllerinin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sırasında birbirleri ile sürtünmeleri sonucu ısı şeklinde ortaya çıkar. Histerisiz çekirdek

kaybının bir kısmıdır, mıknatıslanma B-H histerisiz çevrim alanına ve frekansa bağlıdır. Temel malzemelerin çeşitli farklı mıknatıslanma yetenekleri olduğundan, çekirdek malzeme seçimi nüve kayıplarını azaltmada önemli bir faktördür [31].

3.2 Girdap Kayıpları

Transformatörlerde oluşan bir diğer kayıp da girdap akımları kaybıdır. Akı yoğunluğunun zamana göre değişmesinden kaynaklanır. Çekirdek üzerinde indüklenen akı yoğunluğunun zamana göre değişmesi, akının geçtiği yola dik olan kesitte gerilim indükleyecektir. İndüklenen bu gerilim iletkenin kesitinin kapalı devre oluşturması nedeniyle girdap akımı adı verilen akımın akmasına neden olur. Bu kaybı engellemek için çekirdek tek bir parça yerine ince dilim saçlardan meydana getirilir [31,35,36].

Girdap kayıplarının hesaplanmasında eşitlik (3.3) kullanılmaktadır.

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot B_m^2 (W/kg) \quad (3.3)$$

Burada k_e malzemenin girdap kayıp katsayısıdır, birimi W/kg 'dır. Bu katsayı malzemenin cinsine ve kalınlığına bağlıdır [31]. B_m 'de manyetik alan maksimum yoğunluğudur, birimi Wb/m^2 , f manyetik akı değişimi frekansdır [32].

Girdap kayıpları çekirdek kayıplarının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır [31]. Girdap kayıpların azaltılması için;

1. İletkenliği düşük manyetik malzeme kullanımı ile kayıplar azaltılabilir. Çekirdek malzeme kullanımında ekonomik olduğu için demir-çelik türevleri tercih edilir. İletken olan bu malzemelerin girdap kayıpları fazladır. Demirin içine %3 silisyum katıldığında iletkenlikle birlikte girdap kayıpları azalır. Elektrik makinelerinde, manyetik malzeme olarak en çok Si-Fe saçlar kullanılır [11].

2. Lamine edilmiş ince saç kullanarak girdap kayıpları azaltılabilir. Çünkü kayıplar kullanılan manyetik malzemenin kalınlığının karesi ile ters orantılı değişir.

Elektrik makinelerinde, ince ve birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış Si-Fe saçlar kullanılır [31].

3.3 Anormal Kayıplar

Bu kayıplar adından da anlaşılacağı üzere histerisiz ve girdap akım kayıpları sınıfına sokamadığımız ve çekirdek kayıpları testlerinde ilave ek kayıp olarak gözüken kayıplardır. Bu kayıplar bilinmeyen kayıplar olarak da adlandırılmakla beraber bazı araştırmacılar tarafından fazladan kayıplar olarak da adlandırılır [29-31].

Anormal kayıpların hesaplanmasında eşitlik (3.4) kullanılmaktadır [31].

$$P_a = k_a \cdot f^{1.5} \cdot B_m^{1.5} (W / kg) \quad (3.4)$$

Burada, f mıknatıslanma frekansı, B_m manyetik akı yoğunluğunun tepe değeri ve k_a ise çeliğinin şekil ve elektriksel özelliklerine bağlı katsayıdır. Anormal kayıp katsayısı k_a eşitlik (3.5) ile ifade edilir.

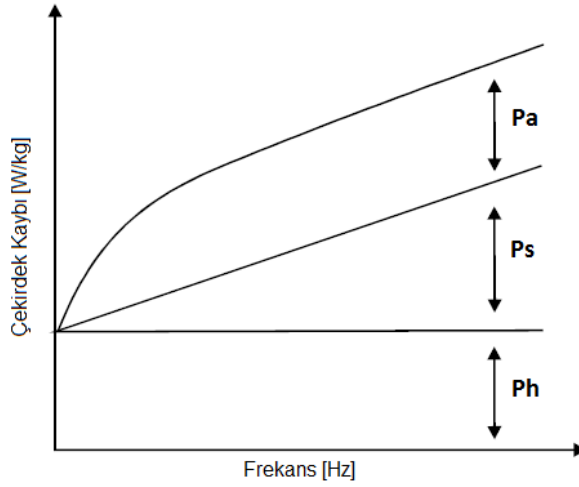
$$k_a = \sqrt{\sigma G S V_0} \quad (3.5)$$

Burada σ, G, S, V_0 sırasıyla elektriksel iletkenlik, manyetik malzemenin elektriksel sönümlenme faktörü, istiflemenin kesit alanıdır. V_0 üreticiler tarafından verilmeyen çok özel bir parametre olduğundan yukarıdaki denklem kullanılarak doğrudan bir güç kaybı hesaplaması yapılamaz [31].

Maizana, 100 kVA gücünde, 3 fazlı ve 60°'lik T bağlantı kesme açısına sahip güç transformatörünün kayıpları üzerine çalışmıştır. Maizana, yapmış olduğu çalışmada güç transformatörlerinin kayıplarını histerisiz, girdap akımları ve anormal kayıplar olarak üzere üçe ayırmıştır. Toplam kayıpların hesaplanmasında eşitlik (3.6) kullanmıştır [29].

$$P_{tot} = P_h + P_s + P_a (W.kg^{-1}) \quad (3.6)$$

Bu çalışmada, histerisiz kayıplarının, girdap akımı kayıpları gibi basitlikle kestirilemeyeceği, fakat çok düşük mıknatıslanma frekansında, girdap akımlarının ihmal edilebileceği, bu frekanslarda ölçülen kayıp değerinin sadece histerisiz bileşenini barındıracağı belirtilmiştir. Bununla birlikte düşük frekans değerlerinde ölçülen histerisiz değerinin hesaplanan girdap akımı değerine eklenmesi durumunda, sonucun ölçülen toplam güç kayıplarını vermediğini vurgulamaktadır. Bu farklılığı anormal kayıplar veya artan kayıplar olarak tanımlamaktadır. Frekansa bağımlı olarak kayıplarının değişimi için ise Şekil 3.2'deki grafik verilmiştir.



Şekil 3.2: Çekirdek kayıplarının histerisiz, girdap akımı ve anormal kayıplar cinsinden değerlendirilmesi; Ph: Histerisiz kayıpları, Ps: Girdap akımı kayıpları, Pa: Anormal kayıplar [37]

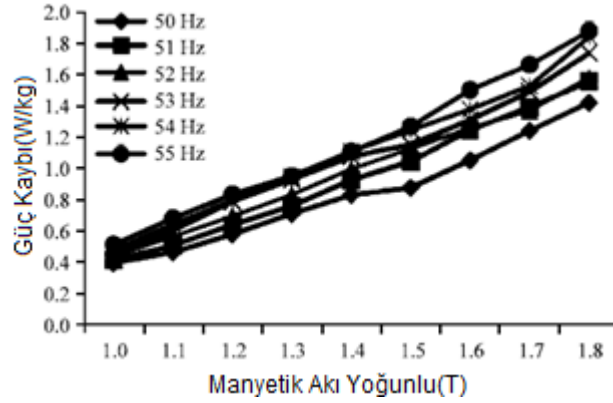
3.4 Sonuç

Bu bölümde transformatörlerin boşa çalışması sırasında demir kayıplarının literatürde nasıl işlendiği görülmektedir. Literatürden de görüleceği üzere kayıplar girdap, histerisiz ve anormal olmak üzere üçe ayrılmıştır. Literatürde bu kayıplarla ilgili formüller gösterilmiş olup, bu kayıpların minimuma düşürülmesi için çeşitli tedbirler alındığı görülmektedir.

4. TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK KAYIPLARINA ETKİ EDEN DİĞER FAKTRÖLER

4.1 Frekansın Kayıplara Etkisi

Maizana tarafında yapılan çalışmada, 100 kVA gücünde 3 fazlı transformatörde kullanılan farklı frekansların Girdap Kaybına olan etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada 50-51-52-53-54-55 Hz frekanslarla çalışma yapılmış ve sonuçlar Şekil 4.1’de gösterilmiştir [29].



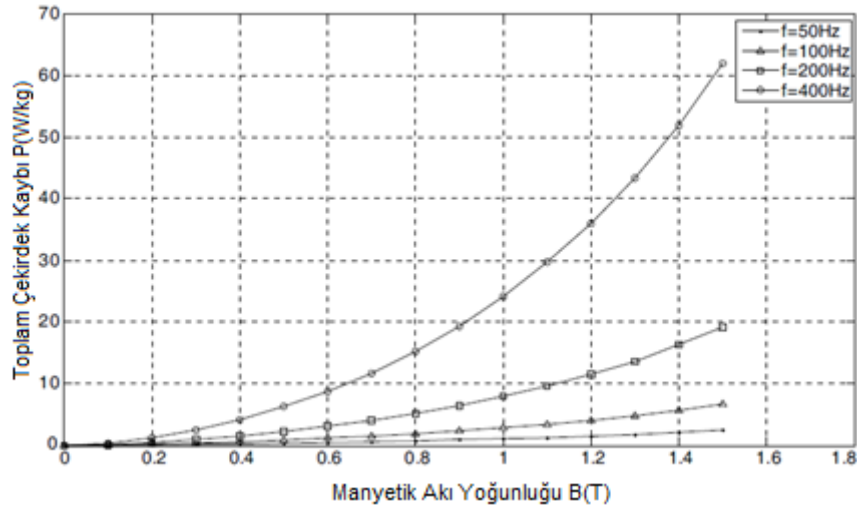
Şekil 4.1: Farklı frekanslarda bulunan kayıplar [29]

Sonuçlar incelendiğinde, farklı manyetik akı yoğunluklarda ve farklı frekanslarda çalışılmış, minimum kaybın 50 Hz frekansta olduğu görülmüştür.

Öztürk ve Çelik’in yapmış oldukları çalışmada, M19 metaline sahip bir transformatörde 50-100-200-400 Hz’lik frekanslar kullanılarak toplam çekirdek kayıpları incelenmiştir [38]. Bu çalışmada ilk olarak toplam çekirdek kayıpları bulunması için eşitlik (4.1) kullanılmıştır.

$$p_v = k_h \cdot f \cdot B_m^2 + k_c \cdot (f \cdot B_m)^2 + k_e \cdot (f \cdot B_m^{1.5}) \quad (4.1)$$

Bu eşitliğe göre bulunan toplam çekirdek kaybı ve manyetik akı yoğunluğu eğrisi Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2: 4 Farklı frekansta bulunan toplam çekirdek kayırları [38]

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemini kullanan Ansoft Maxwell paket programı kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış, simülasyon ve eşitlik (4.1) ile bulunan sonuçların birbirleriyle örtüştüğü görülmüştür.

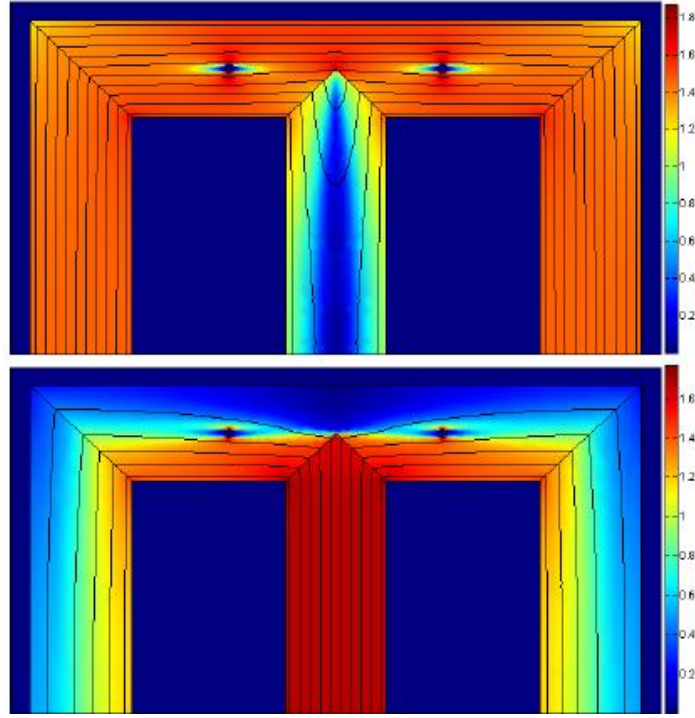
Bu çalışma incelendiğinde toplam çekirdek kayıplarının en düşük olduğu frekansın 50Hz olduğu görülmüştür [38,39].

Salas ve Pleite yapmış oldukları çalışmada, 2D FEA sonlu elemanlar paket programını kullanarak 40 kHz ve 100 kHz frekans değerleri için toroidal formdaki indüktör modelini simüle etmişler ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır [40]. Bu çalışmanın sonuçları incelendiğinde, 100 kHz frekansında çalışan indüktör kayıp değerlerinin 40 kHz frekansta çalışan indüktöre göre 6-7 kat daha fazla olduğu görülmektedir.

4.2 İstifleme Deliklerinin Kayıplara Etkisi

Transformatör üretimi sırasında, silisli saçların istiflenmesi işleminde silisli saçlar transformatörlere göre kalıplar halinde kesilmekte ve üst üste istiflenmektedir. Bu istifleme işlemi sırasında istif delikleri kullanılmaktadır.

Hajipour ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarda, istif deliklerinin kayıplara olan etkisi incelemiştir [41].



Şekil 4.3: İki farklı zamandaki manyetik akı yoğunlukları [41]

Yapılan bu çalışmada FEA manyetik modelleme programı kullanılmış ve manyetik akı yoğunlukları Şekil 4.3'deki gibi bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, istifleme deliklerinin bulunduğu alanlarda manyetik akı yoğunluklarının ve toplam kayıpların arttığı görülmüştür.

4.3 Sonuç

Bu bölümde transformatör kayıplarına etki eden diğer faktörler üzerine literatür incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme sırasında literatürde transformatörün frekansı ve üretim sırasında kullanılan istif deliklerinin çekirdek kayıplarına negatif yönde etki ettiği görülmüştür.

İlk olarak literatürde farklı frekanslara sahip transformatörlerin, farklı yöntemlerle ölçülen kayıp değerleri gösterilmiştir. Bu sonuçlar incelendiğinde ise çekirdek kaybının minimum olduğu frekans değerinin 50Hz olduğu gözlemlenmiştir.

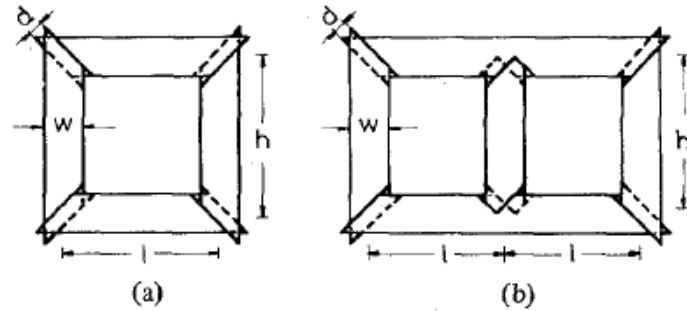
Bir diğer husus olan istif delikleri ise üretim sırasında silisli saçların istiflenmesi sırasında zaruri bir ihtiyaç olduğu ve kayıpları yaklaşık %3 değerinde arttırdığı literatürde görölmektedir.

5. TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK MODELLEMELERİ

Transformatörlerin çekirdek kayıplarını etkileyen çeşitli faktörler olduğu ve bu faktörlerin başında da T-bağlantı kesme açıları geldiği çeşitli kaynaklarda vurgulanmıştır [20,21].

Valkovic tarafından yapılan bir çalışmada, transformatör çekirdeklerinin manyetik özelliklerini temel olarak şu üç faktörün belirlediği vurgulanmaktadır: malzeme kalitesi, çekirdek imalatı sırasında çelik levhanın işlenmesi ve çekirdek tasarımı [20].

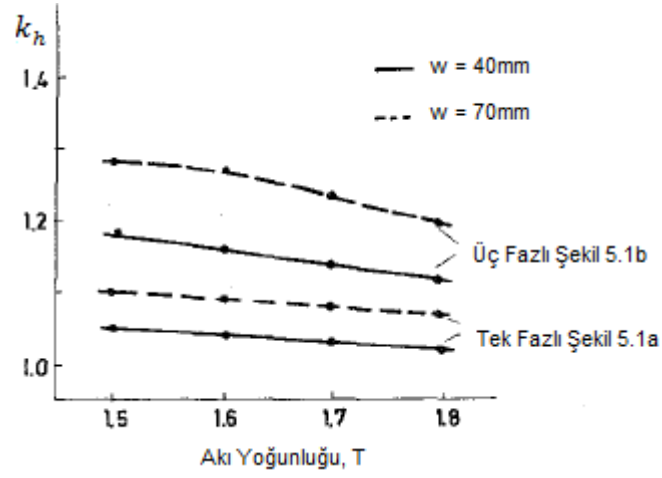
Valkovic yapmış olduğu çalışmasında kayıpları hesaplamak amacıyla yapı faktöründen (k_h) bahsetmektedir. Yapı faktörü, çeşitli kesim teknikleri kullanılarak tasarımı yapılan transformatörde ölçülen toplam çekirdek kaybının, imalat öncesi çekirdeğin karakteristik olarak verilen kilogram başına kaybına oranlanarak bulunan bir değerdir. Yaptığı çalışmada, her bir tasarım için 0,3 mm kalınlığında, 1,7 T ve 50 Hz de $1,33 W/kg$ kayba sahip grade M5 çeliğinin kullanıldığı vurgulanmaktadır.



Şekil 5.1: Çekirdek modeli (a): Tek fazlı (b): Üç fazlı [20]

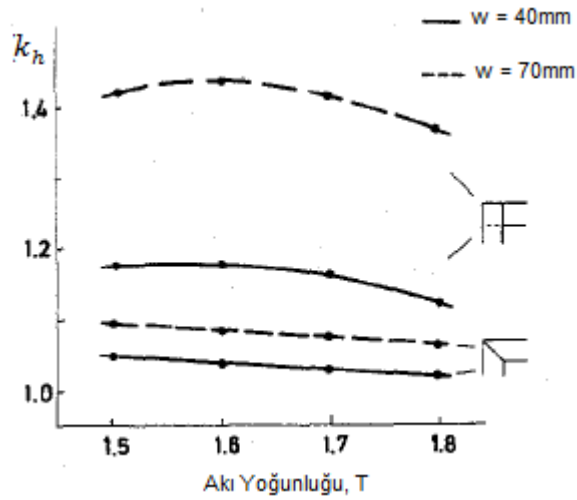
Kayıpları ölçülen tek ve üç fazlı transformatörler için Şekil 5.1'de verilen modeller kullanılmıştır. İlk çalışmada; tek fazlı transformatör için $w=40$ mm, $l=h=290$ mm ve üç fazlı transformatör için ise $w=40$ mm, $l=140$ mm, $h=230$ mm alınmıştır. İkinci çalışmada ise; tek fazlı transformatör için $w=70$ mm, $l=h=250$ mm ve üç fazlı transformatör için $w=70$ mm, $l=140$ mm, $h=230$ mm değerler alınmıştır.

Çekirdek kısmının boyutlarının değiştirilmesi durumunda oluşan bu farklı tasarımlara ilişkin yapı faktörleri ise Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2: Tek ve üç fazlı transformatör çekirdekleri için yapı faktörlerinin karşılaştırılması [20]

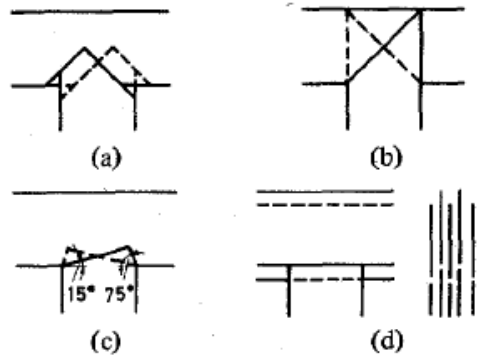
Yapılan bu çalışma sonucu, üç fazlı ve tek fazlı çekirdekler arasında kayıpların farklılık gösterdiğinin açık olduğu ve yapı faktörünün aynı çekirdek tipi için sabit olmadığı, fakat çekirdek kesim boyutlarına bağlı olarak değişim gösterdiği vurgulanmıştır. Aynı çalışmada transformatör çekirdeklerinin köşe kısmı tasarımlarının yapı faktörlerinin incelemesi de yapılmıştır.



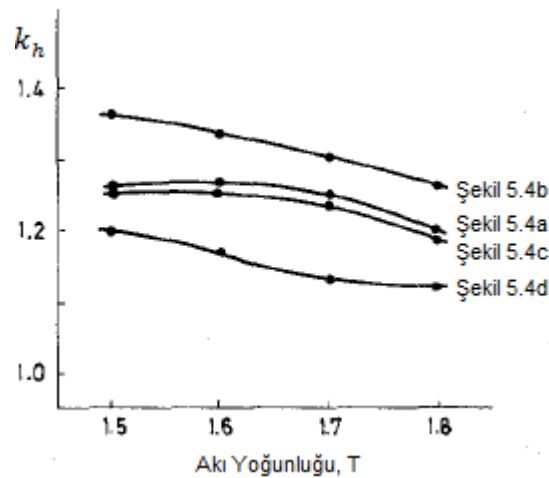
Şekil 5.3: 45° derece üst üste binmeli ve 90° derece üst üste bağlantılı bir faz çekirdekler için yapı faktörlerinin karşılaştırılması [20]

Şekil 5.3’de bir fazlı transformatörlerin köşe noktalarının 45° açıyla kesilmesi ve 90° üst üste bağlantı ile kesilmesi durumlarına ilişkin yapı faktörlerinin, farklı çekirdek kesim boyutları için karşılaştırılması görülmektedir. 45° açılı köşe bağlantı noktaları adım kaydırma teknikleri kullanılarak yapılan imalatta, yapı faktörünün daha düşük olduğu tespit edilmiştir ve halen imalat aşamasında firmaların köşe noktaları için bu tür biçimlendirmeyi tercih ettiği bilinmektedir.

Valkovic yapmış olduğu aynı çalışmada, boyunduruk kısımlarındaki T-bağlantı kısımlarının farklı açılarla kesilmesi durumları (Şekil 5.4) için de yapı faktörünün değişimlerini incelemiştir. Günümüzde çok yoğun olarak kullanılan Şekil 5.4 a ve Şekil 5.4 b’deki tasarımların yanında iki yeni tasarım olan Şekil 5.4 c ve Şekil 5.4 d’de verilen T-bağlantı kısmı kesim açılarının kayıplar üzerine etkisi de çalışmasında incelenmiştir.



Şekil 5.4: Farklı T-bağlantı tasarımları [22]

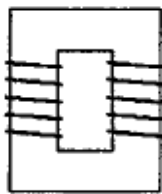


Şekil 5.5: Farklı T-bağlantı tasarımları için yapı faktörleri [22]

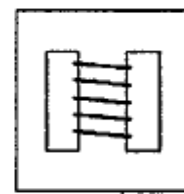
Bu iki farklı T-bağlantı kesme açıları ile yoğun olarak kullanılan T-bağlantı kesme açılarının kayıpları hesaplanmış ve yapı faktörleri açısından değişim için Şekil 5.5'deki grafikler elde edilmiştir. Valkovic, yapmış olduğu çalışması sonucunda transformatör kayıplarında yapı faktörünü ele alarak kayıpların en az olduğu T-bağlantı kesme açısı tasarımının Şekil 5.4 d'deki biçimlendirme için olduğunu belirtmesine rağmen, bu sonucun, 45°'lik T-bağlantı kesme açısının en iyi bağlantı açısı olduğuna ilişkin bilinenin aksine bir durum oluşturduğunu vurgulamıştır [20].

Ayrıca Valkovic yapmış olduğu başka bir çalışmasında, güç transformatörlerindeki kayıpları bölgelere göre incelemiş ve çalışması sonucunda kayıpların en fazla olduğu bölgenin T-bağlantı kesme açıları olduğunu belirtmiştir. Aynı zamanda bu çalışmasında bir önceki çalışmasına atıfta bulunarak, kayıpların en az olduğu T-bağlantı kesme açısının Şekil 5.4 d'de verilen biçimlendirme yapısında olduğunu yinelemiştir [22].

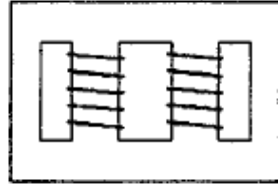
teNyenhuis ve arkadaşları da, güç transformatörlerindeki çekirdek bacak sayıları ve harmonikleri dikkate alarak kayıpların etkileri üzerine çalışmışlardır [42]. Şekil 5.6'da verilen çekirdek tipleri bu çalışmada kullanılmıştır. Bir fazlı, 2 sarım bacaklı çekirdek Şekil 5.6 a, bir fazlı, 3 bacaklı, bir bacakta sargı bulunan çekirdek Şekil 5.6 b, bir fazlı, dört bacaklı, iki bacakta sarım bulunan çekirdek Şekil 5.6 c ve 3 fazlı, 5 bacaklı, 3 bacağına sarım bulunan çekirdek Şekil 5.6 d biçimlendirme tipleri üzerine analiz yapılmıştır. Bir fazlı tasarım için 2 ve 4 bacaklı çekirdek yapısındaki akı dağılımının tamamen düzgün olduğu, bağlantı kısımlarında akının önemli miktarlarda artmadığı, gerçekte, her iki çekirdek için bağlantının dış kısımlarında akı yoğunluğunun düştüğü belirtilmiştir. Bununla birlikte, 3 faz akı dağılımının 5 bacaklı çekirdekte çok fazla düzensiz olduğu vurgulanmıştır. 4 ve 5 bacaklı çekirdekler için, düzgün dağılımlı olmayan akı yoğunluğunun daha yüksek çekirdek kayıplarına sebep olduğu da belirtilmektedir.



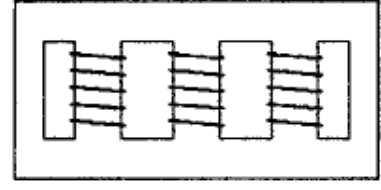
(a)



(b)



(c)



(d)

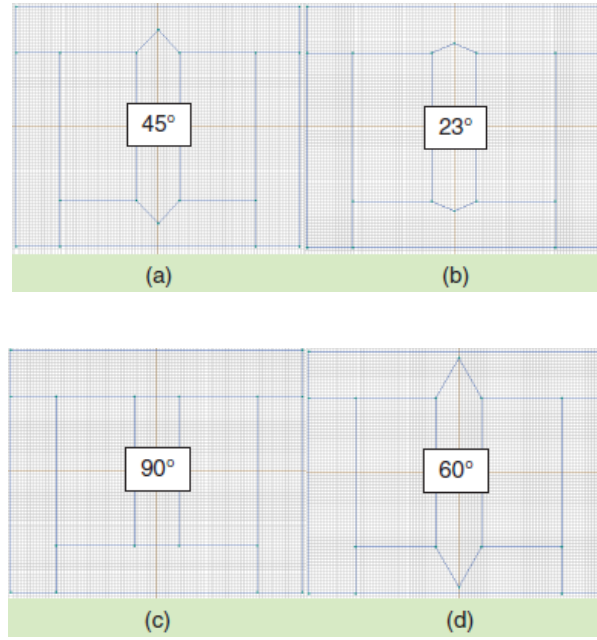
Şekil 5.6: Analizi yapılan çekirdek tipleri [42]

Bu çalışmada, 1,3 T ile 1,8 T arasındaki akı yoğunluğu değerleri için, Şekil 5.6'da bulunan 4 farklı çekirdek yapısına sahip transformatörler için toplam harmonik bozulma (THD) değerleri dikkate alınarak Tablo 5.1 oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre teNyenhuis ve arkadaşları harmonik bozuluma göre kayıpların en az olduğu güç transformatörünün 3 bacaklı güç transformatörü olduğunu belirtmişlerdir.

Tablo 5.1: 4 farklı çekirdek yapısı için toplam harmonik bozulma değerleri [42]

		THD Değeri			
		2 Bacak İçin	3 Bacak İçin	4 Bacak İçin	5 Bacak İçin
Akı Yoğunluğu [T]	1.3	%1.9	%1.5	%5.2	%10.5
	1.5	%2.2	%1.8	%6.3	%8.8
	1.7	%2.5	%2.0	%6.5	%9.3
	1.8	%2.6	%2.0	%6.3	%10.2

Haidar ve Al-Dabbagh yapmış oldukları çalışmada, QuickField sonlu elemanlar manyetik modelleme programını kullanarak, 23, 45, 60, 90°'lik T-bağlantı açılımlarına sahip olan güç transformatörlerini modellediklerini belirtmektedirler [21]. 4 farklı modele ilişkin tasarımlar Şekil 5.7'de görüldüğü gibidir ve her birinin gücü 1 MVA değerindedir.



Şekil 5.7: Farklı T-bağlantı modelleri [21]

4 farklı T-bağlantı kesme açısı için Tablo 5.2’de verilen farklı paket boyutları için imalat yapılarak, bacak, boyunduruk veya derinlik değerlerindeki değişimlerin çok fazla etkili olmadığı, fakat Tablo 5.3’de görüldüğü gibi T-bağlantı kesme açılarının, kayıplar üzerine daha fazla etkili olduğu gösterilmeye çalışılmıştır. Bu sonuçlara göre kayıpların en az olduğu güç transformatorünün 60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip olan transformator tasarımı olduğu belirtilmektedir.

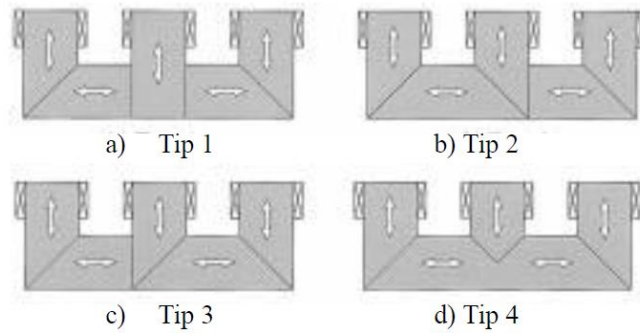
Tablo 5.2: Farklı paketlerin boyutları [21]

Uygulama	Boyuduruk(mm)	Bacak(mm)	Genişlik(mm)
1	970	780	150
2	950	760	130
3	930	740	110
4	910	720	90

Tablo 5.3: Farklı T-bağlantı kısmı tasarımları için 4 farklı paketin kayıp değerleri [21]

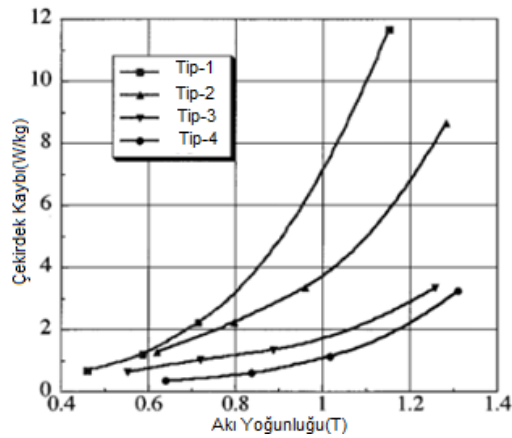
T Bağlantı Açısı	Uygulama 1	Uygulama 2	Uygulama 3	Uygulama 4	Toplam Kayıp
23	95.445	83.604	52.322	56.700	288.0708
45	90.720	81.965	53.015	40.257	265.9565
60	84.105	54.507	50.589	43.659	232.8597
90	99.225	68.851	71.033	42.242	281.3496

Soda ve Enokizono, kendilerinin geliştirdikleri ve malzemenin histerisiz davranışını da içeren, E&S adını verdikleri matematiksel model üzerinden sonlu elemanlar yöntemini kullanarak T-bağlantı kısımlarındaki tasarımların çekirdek kayıpları üzerine etkisini incelemiştirler [23]. 3 fazlı transformatör çekirdeklerinin T-bağlantı kısmında dönel güç kaybının üretildiğini, genellikle dönel güç kaybının, alternatif güç kaybından daha büyük olduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle T-bağlantı kısmının optimum olarak tasarlanmasının önemi vurgulamaktadırlar. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi 4 farklı tip T-bağlantı kısmına ilişkin model üzerinde inceleme yapıldığı belirtilmektedir.



Şekil 5.8: 4 farklı T-bağlantı kısmı tasarımı [23]

Bu 4 farklı model için, ortalama akı yoğunluğuna bağlı olarak çekirdek kayıpları için ise Şekil 5.9’deki değişimler verilmektedir. Grafikten görüleceği gibi bu modeller içinde çekirdek kaybının en az olduğu tasarımın Tip-4’de verilen T-bağlantı kısmının 45°’lik açıyla tasarlandığı model olduğu belirtilmektedir.



Şekil 5.9: Çekirdek kayıplarının maksimumu ile manyetik akı yoğunluğunun ortalaması arasındaki ilişki [23]

5.1 Sonuç

Bu bölümde transformatörlerin çekirdek yapılarının kayıplara olan etkisi literatür kaynakları ile irdelenmiştir.

Literatür taramasından görüleceği gibi, çekirdek tasarımında herkesin kabul ettiği net durumlar ortada yoktur. Çekirdek boyunduruk, bacak ve genişlik ölçülerinin değişiminin kayıplar üzerine etkili olduğu vurgulanmaktadır.

Belirtilen çalışmalardan da görüleceği üzere, transformatörlerin çekirdek kayıplarının düzgün olarak belirlenmesi için çeşitli modellemeler ve yaklaşımlar kullanılmaktadır. Her çalışmanın benimsediği metot, kendi özgün durumunu yansıtmakta ve bu konu üzerindeki çalışmalar güncelliğini korumaktadır.

Yapılan çalışmaların sonuçlarının birebir örtüştüğü de söylenemez. Bir çalışmada en iyi tasarımın 90° 'lik T-bağlantı kesme açısı ile elde edildiği vurgulanırken [20] diğerinde ise 60° 'lik T-bağlantı kesme açısı tasarımında kayıplarının en az olduğu belirtilmektedir [21]. Profesyonel olarak imalat yapan firmalar ise T-bağlantı kısmını 45° 'lik açı ile kesmeyi tercih etmektedirler.

Bir çalışmada çekirdek boyutlarının kayıplar üzerine etkili olduğu vurgulanırken [20], diğer bir çalışmada ise çekirdek boyutlarının kayıplar üzerine çok fazla etkili olmadığı vurgulanmaktadır [21]. Aynı zamanda başka bir çalışmada çekirdek T-bağlantı kesme açılarının iki farklı modelde simetrik göstermesine rağmen aralarındaki çekirdek kayıplarının yakın olması beklenirken çok farklı olduğu görülmektedir. Yine aynı çalışmada, üç farklı çekirdeğin 7 parçadan oluşması ve diğer çekirdeğin 5 parçadan oluşmasından dolayı 7 parçadan oluşan çekirdek kayıplarının çok yüksek çıkması beklenirken kayıpların yakın değerlerde çıktığı görülmektedir [23].

Bu kapsamda çekirdek kayıplarının doğru olarak belirlenmesi ve tasarımın da bu model üzerinden yapılması, elektrik enerjisi kayıplarını azaltılması açısından önemlidir. Bu kapsamda konuyla ilgili detaylı bir çalışma yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

6. TRANSFORMATÖRDE ÇEKİRDEK MALZEMESİNİN ETKİSİ

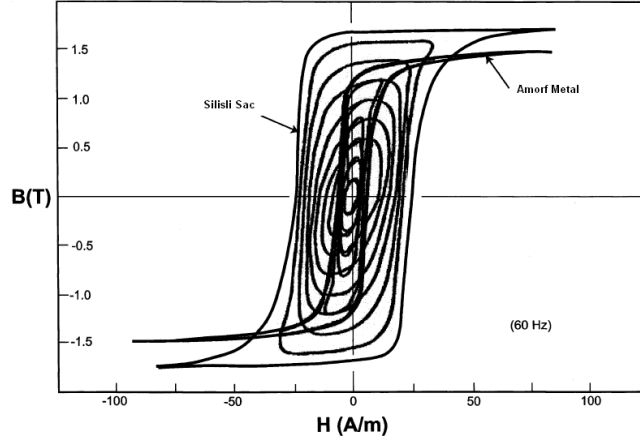
Transformatör çekirdek yapısını oluşturmak için günümüzde en yoğun olarak silisli saçlar kullanılmaktadır. Ancak silisli saçlara alternatif olarak çeşitli malzemeler de üretilmiştir. Bu bölümde transformatör çekirdeğini oluşturan malzemelerin transformatör çekirdek kayıplarına etkisi irdelenecektir.

6.1 Silisli Saç ve Amorf Malzemedan Yapılmış Çekirdeklerin Karşılaştırılması

Haidar ve Al-Dabbagh yapmış oldukları çalışmada, transformatörün performansını ve çekirdek kayıplarını en fazla etki eden faktörün çekirdek malemesinin cinsi olduğunu belirtmişlerdir [21].

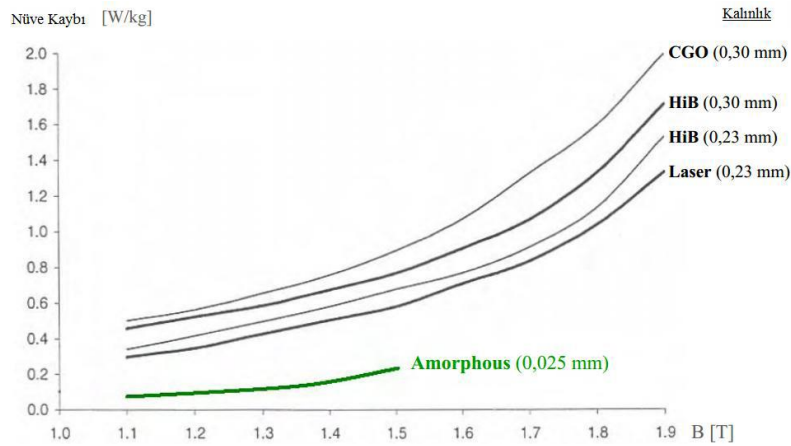
Dağıtım transformatörleri çekirdeklerinde kullanılan amorf malzemeler Demir (Fe), Silisyum (Si) ve Bor (B) içeren alaşımlardır. Amorf metal saçlar yaklaşık 25 µm kalınlığındadır. Bu değer kristal yapıdaki silisli saçın yaklaşık %10' u kadardır.

Çekirdek kaybını oluşturan iki temel öge vardır; histeresiz kayıpları ve girdap akımı kayıpları. (anormal kayıplar dikkate alınmamıştır) Histeresiz kayıpları nüvenin manyetik geçirgenliğiyle ters orantılıdır [43]. Çekirdeğe enerji verildiğinde mıknatıslanma ne kadar kolay oluyorsa, manyetik koersivite (H_c) ne kadar düşükse histeresiz kayıp da o kadar azdır. Amorf metal çekirdeklerde kristalleşme olmadığı için mıknatıslanma kolay gerçekleşir (Şekil 6.1) [44].



Şekil 6.1: Fe-bazlı amorf alaşım ve tanecikleri yönlendirilmiş silisli saça ait B/H eğrileri [44]

Girdap kayıplarını, çekirdek saçlarında oluşan girdap akımları meydana getirir. Amorf nüve saçının silisli saça göre çok ince ve elektriksel direncinin yüksek olmasından dolayı amorf metal çekirdeğinin girdap kayıpları daha azdır. Sonuç olarak amorf çekirdeklerin toplam boşta kayıpları en iyi kalitedeki silisli saçtan bile çok daha düşüktür (Şekil 6.2) [45].



Şekil 6.2: Çekirdek kayıpları [45]

Amorf çekirdeğin kullanımını zorlaştıran dezavantajları düşük manyetik doyma noktası ile düşük doldurma faktörüdür. Tanecikli yapıdaki silisli çekirdeklere 2 Tesla civarında olan manyetik doyma noktası amorf çekirdeklere 1,6 Tesla civarındadır. Ayrıca yine silisli saça 0,97 olan doldurma faktörü amorf çekirdekte 0,86' dır.

Amorf metal malzeme ile silisli sa (CRGO) malzeme arasındaki karşılaştırma için Tablo 6.1 incelenmelidir [46]:

Tablo 6.1: Amorf metal malzeme ile CRGO malzeme karşılaştırması [46].

	Birim	Amorf Metal Malzeme	CRGO Malzeme
Özgöl ağırlık	gr/cm ³	7,15	7,65
Özgöl direnç		130	45,00
Doyma Endüksiyonu	Tesla	1,59-1,64	2.03
Tipik nüve kaybı		0,20	0,90
(50Hz, 1,4T) watt/kg			
Kalınlık	Mm	0,022-0,030	0,27
Doldurma faktörü		0,86	0,97
Tedarik şekli		Band/rulo halinde	Rulo
Tavlama sıcaklığı	°C	360	810
Tavlama atmosferi		inert gas	inert gas
Tavlama özelliği		magnetik alan	-

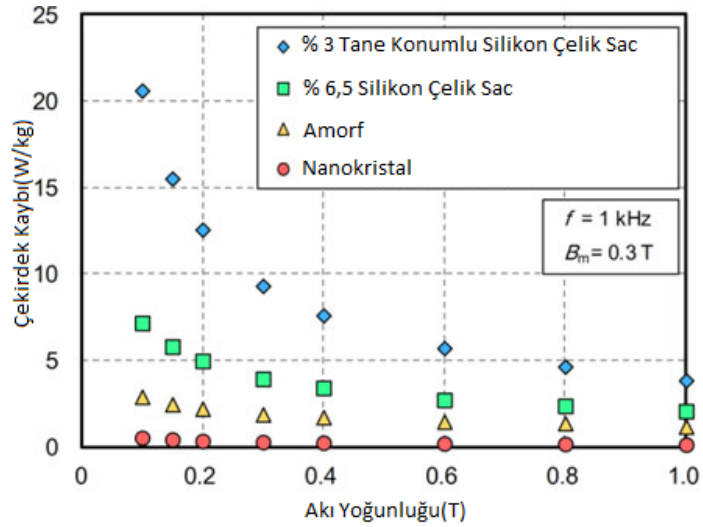
Doldurma faktörü ve manyetik doyma noktasının düşük olması amorf çekirdeklerin konvansiyonel silisli sa çekirdeklere göre daha büyük kesitli yapılmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla amorf çekirdekli transformatörlerde sargılar ve transformatör boyutları silisli saa göre daha büyüktür [47].

Hatakeyama ve Onda'nun Transformatör çekirdeklerinde kullanılan farklı malzemeler üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bu alışmada Tablo 6.2'de özellikleri verilen 4 malzeme kullanılmıştır [48].

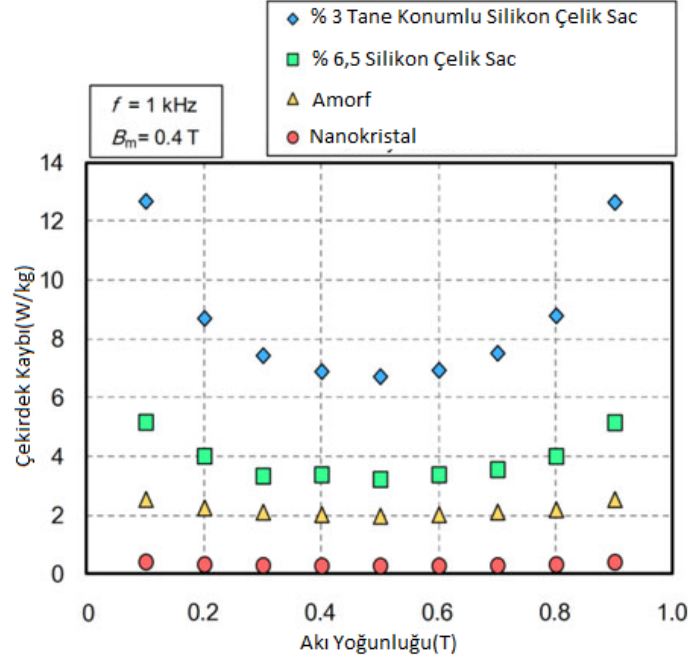
Tablo 6.2: Çekirdek malzeme özellikleri [48]

Malzeme	Kalınlık (μm)	Doyma Akısı (T)	Kütle (kg)	Manyetik Geçiş Uzunluğu (m)	Etkili Kesit Alanı (m^2)
% 3 Tane Konumlu Silikon Çelik Saç	230	2,03	0,69	0,227	0,000399
% 6,5 Silikon Çelik Saç	100	1,80	0,65	0,227	0,000389
Amorf	23	1,56	0,56	0,244	0,000343
Nanokristal	18	1,23	0,57	0,244	0,000327

Bu çalışmada Tablo 6.2'deki 4 farklı malzeme frekans (f) değerinin 1 kHz olduğu ve maksimum Manyetik Akı Yoğunluğunun (B_{max}) 0.3 ve 0.4 Tesla olan iki farklı transformatörler üzerinde kullanılmış ve sonuçlar Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3: $f = 1$ kHz, $B_{\text{max}} = 0.3$ T durumunda çekirdek kayıpları [48]



Şekil 6.4: $f = 1$ kHz, $B_{max} = 0.4$ T durumunda çekirdek kayıpları [48]

Bu çalışmadan da görüldüğü üzere amorf çekirdeklerin toplam boşta kayıpları en iyi kalitedeki silisli sac'tan bile çok daha düşüktür [48].

6.2 Çekirdek Malzeme Kalınlığının Kayba Etkisi

Olivares-Galvan ve arkadaşları, yapmış oldukları çalışmada tek fazlı, 5 ile 50 kVA güçlerinde, farklı özelliklerdeki çekirdek malzemelerine sahip transformatörler üzerinde hesaplamalar yapmışlardır. Yapılan bu çalışmada, dağıtım transformatörünün üretimi sırasında en uygun maliyete sahip ve en uygun kalınlıktaki çekirdek malzemesinin hesaplanması amaçlanmıştır [49].

Bu çalışmada, toplam 6 farklı dağıtım transformatöründe 3 farklı kalınlıkta malzeme kullanılmıştır. Bu çalışmada M2, M3 ve M4 malzemeleri kullanılmış olup özellikleri Tablo 6.3'de verilmiştir.

Tablo 6.3: M2, M3, M4 malzemelerinin özellikleri [49]

Malzeme	Kalınlık inç (mm)
M2	0.007 (0.18)
M3	0.009 (0.23)
M4	0.011 (0.27)

Yapılan çalışmada kayıpların hesaplanması için eşitlik (6.1) kullanılmıştır.

$$P = P_{cl} + P_h + P_{ex} \quad (6.1)$$

Burada P_{cl} girdap kaybı, P_h histerisis kaybı, P_{ex} anormal kayıplar olup, P değeri ise toplam kaybı göstermektedir.

P_{cl} , P_h , P_{ex} değerinin hesaplanmasında sırasıyla (6.2), (6.3), (6.4) eşitlikleri kullanılmıştır.

$$P_{cl} = \frac{(t \cdot \pi \cdot B_p \cdot f)^2}{6 \cdot \rho} \quad (6.2)$$

Burada t : saç kalınlığı; ρ : malzemenin elektriksel direnci; B_p : malzemenin maksimum manyetik akı yoğunluğu; f : frekans, yapılan bu çalışmada frekans 60 Hz alınmıştır.

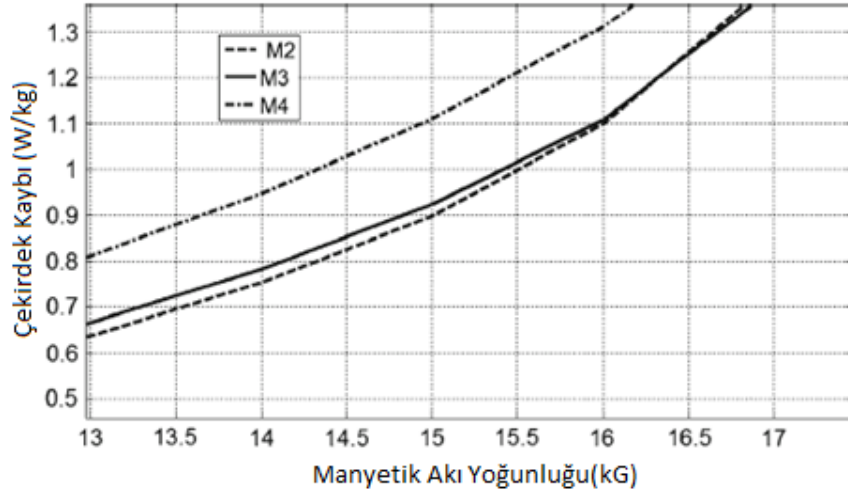
$$P_h = \frac{2 \cdot f \cdot S \cdot B_p^2}{\mu} \quad (6.3)$$

Burada farklı olarak μ : malzemenin geçirgenliği (H/m); S: birim çarpanı olarak alınmıştır.

$$P_{ex} = (1,628 \cdot \frac{2L}{t} - 1) \quad P_{ex}, \frac{2L}{t} \gg 1 \quad \text{ise}$$
$$P_{ex} \ll P_{cl}, \quad \frac{2L}{t} \ll 1 \quad \text{ise} \quad (6.4)$$

Burada L: Bölge genişliği olarak alınmıştır.

Eşitliklerdeki hesaplamalara göre yapılan kayıp sonuçları Şekil 6.5’de gösterilmiştir.



Şekil 6.5: Malzemelerin çekirdek kayıpları [49]

Şekil 6.5’de görüldüğü üzere M2 ve M3’ün kayıpları arasında çok fazla fark olmamakla beraber çekirdek malzemesinin kalınlığının kayba olan etkisinin önemli olduğu yapılan bu çalışmada belirtilmiştir. Bunun sebebi ise malzemenin kalınlığı ile girdap kayıpları arasında önemli bir ilişki olmasıdır. Malzemenin kalınlığı ne kadar azalır ise girdap akımları o kadar azalmakta ve girdap kayıpları da o oranda düşmektedir [31,49].

Aynı zamanda yapılan bu çalışmada, 4 farklı malzeme ve saç kalınlıklarının kayıplara olan etkisini gösteren hesaplamalar yapılmış olup Tablo 6.4’de gösterilmiştir.

Tablo 6.4: Farklı çekirdek malzemelerin kalınlık ve kayıpları [49]

Malzeme	Kalınlık (10^{-4} m)	P_h	P_{cl}	P_{ex}
Tane Konumlu %3 SiFe (boyuna kesim)	2,9	0,34	0,29	0,53
Tane Konumlu %3 SiFe (enine kesim)	3,4	1,7	0,31	1,8
Yönlendirilmiş %3 SiFe	3,5	1,8	0,29	0,33
Amorf METGLAS 2605 CO	0,3	0,29	$8,5 \times 10^{-4}$	0,094

Tablo 6.4 incelendiğinde sa kalınlığı inceldikçe başta girdap kaybı olmak üzere kayıpların azaldığı görölmektedir [49]. Elbette ki malzemelerin farklı olması da kayıplar konusunda farklılıklar yaratmakta olsa da sa kalınlığının kayıplar üzerine etkisinin azımsanmayacak kadar çok olduğu görölmektedir.

6.3 Sonuç

Bu bölümde çekirdek malzemesi ve malzemenin yapısının çekirdek kaybına etkisi literatürde incelenmiştir.

Günümüzde yoğun olarak kullanılan silisli saçlarla diğer malzemeler karşılaştırılmış ve genel olarak silisli saçların amorf ve nano-kristal metallere göre kayıplarının daha fazla olduğu görölmüştür. Ancak günümüzde silisli saçların kullanılmaya devam edilmesinin sebebinin de maliyet etkinliği olduğu gösterilmiştir.

Transformatör çekirdek üretimi sırasında kullanılan metal malzemelerin kalınlığının çekirdek kaybına olan etkisi literatür yardımıyla incelendiğinde, özellikle malzemenin kalınlığı azaldıkça girdap kaybının azaldığı ve buna paralel olarak da çekirdek kaybının azaldığı görölmektedir.

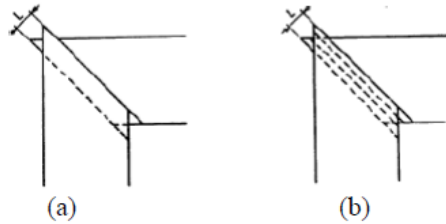
7. ADIM KAYDIRMA (STEP-LAP) TEKNİĞİNİN VE İSTİFLEME (LAMİNASYON) SAYISININ ÇEKİRDEK KAYBINA ETKİSİ

Adım kaydırma tekniği, transformatör çekirdek malzemesi olan ince saç malzemelerinin adım kaydırarak belli bir sıra dahilinde dizilmesi işlemidir [50]. Valkovic, adım kaydırma yönteminin çekirdek köşe noktalarında kayıplar üzerine etkisini de incelemiştir [51]. Çekirdek saçlarının bağlantı kısımlarında birbirine geçme uzunluğundaki (L) çakışma sayısı klasik tasarımda sadece 1 adım olmasına rağmen adım kaydırma tekniğinde birkaç adıma bölünmesi olarak belirtilmektedir (Şekil 7.1).



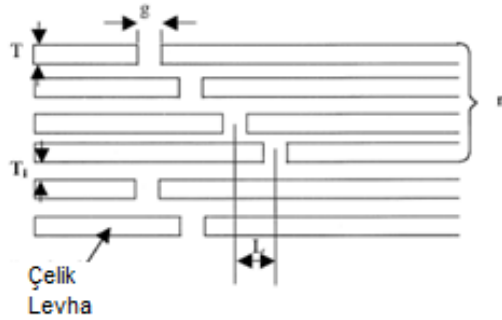
Şekil 7.1: Çekirdek bağlantılarının basit modeli (a) Klasik tasarım (b) Adım kaydırma tasarımı [51]

Şekil 7.1’de görüldüğü gibi 14 mm’lik L uzunluğunda, klasik tasarımda bir parçanın çakıştığı, analizi yapılan adım kaydırma tasarımında ise 5 parçanın çakışmasına ilişkin sonuçların deneysel olarak irdelendiği belirtilmektedir. Bu çalışmada, adım kaydırma bağlantı tasarımı kullanılarak, toplam çekirdek kaybındaki azalmanın, manyetik akı yoğunluğu değerine bağlı olarak %2 ile %4 arasında değiştiği belirtilmektedir.



Şekil 7.2: Köşe kısmı yapısı (a) Klasik tasarım (b) Adım kaydırma tasarımı [51]

Oliveras ve Perez tarafından yapılan çalışmada, dağıtım transformatörlerinde kayıpları azaltmak için 3 farklı konu üzerinde çalışma yapıldığı belirtilmektedir. Elektromanyetik bir kalkanın kayıplar üzerindeki etkisi, kurutma işleminin dielektrik kayıplar üzerindeki etkisi ve son olarak bağlantı kısımlarının çekirdek kayıpları üzerine etkisi incelenmiştir [52]. Şekil 7.3’de görüldüğü gibi oluşturulan adım kaydırma tasarımında istifleme sayısının 4 ile 25 arasında değişebileceği vurgulanmıştır



Şekil 7.3: Çekirdekte adım kaydırma bağlantısı [52]

Bu çalışmada, 15 kVA gücündeki transformatörde istifleme sayısının çekirdek kaybına olan etkisi Tablo 7.1 verilmiştir.

Tablo 7.1: Her bir adımda farklı istifleme adedi için 15 kVA transformatörde çekirdek kayıpları [52]

Sıcaklık (°C)	Adımdaki istifleme sayısı (n)	Çekirdek kaybı (w)
45	6	21
44	6	21
46	24	21,5
47	25	21,5

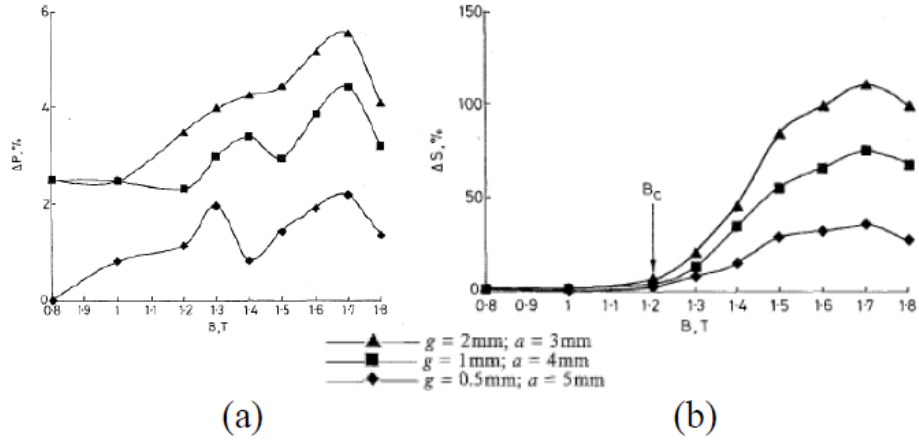
Aynı çalışmada, her biri 34.5 kVA gücünde olan 9 adet transformatör tasarımı üzerinde yapılan deneyde Tablo 7.2’de verilen kayıp değerleri elde edilmiştir. Bu çalışmada, çakışma uzunluğu 6 tanesinde 1 cm, 3 tanesinde ise 2cm olarak alınmıştır.

Tablo 7.2: Çakışma uzunluğunun değiştirildiği 9 farklı numune için çekirdek kayıpları [52]

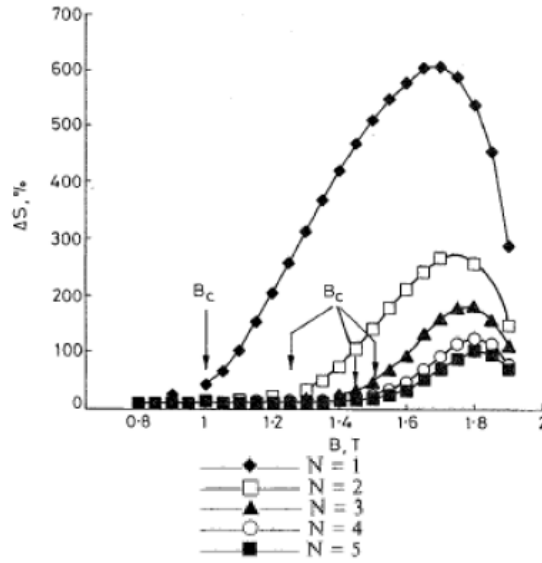
Örnek	Çakışma uzunluğu (L) (cm)	Çekirdek kaybı (w)
1	2	49,01
2	1	47,49
3	1	44,24
4	1	46,61
5	2	55,38
6	1	51,42
7	2	53,58
8	1	50,18
9	1	48,98

Bu tablolardan görüleceği gibi, adımlardaki istifleme sayısının pek önemli olmadığı ve daha büyük kayıpların çakışma uzunluğunun 2 cm olması durumunda kayıplarda bir artış olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Löffler ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, hava aralığı (g) uzunluğu, her bir adım arası uzaklık (a) ve her bir adımdaki istifleme sayısının kayıplar üzerine incelemesi yapılmıştır [53]. Yapılan birçok deneysel karşılaştırma ile hava aralığı uzunluğunun güç kaybına açık etkisi olmasına rağmen, adımlar arası uzaklığın belirleyici bir parametre olmadığı vurgulanmıştır (Şekil 7.4 a). Çalışmada ortaya çıkan önemli bir sonuç ise, hava aralığına bağlı olacak kritik bir manyetik akı yoğunluğu (B_c) değerinin grafiklerde ortaya çıkmasıdır (Şekil 7.4 b). İstifleme sayısı artıkça B_c değerinde de bir artış olduğu çalışma sonucunda elde edilmiştir (Şekil 27).

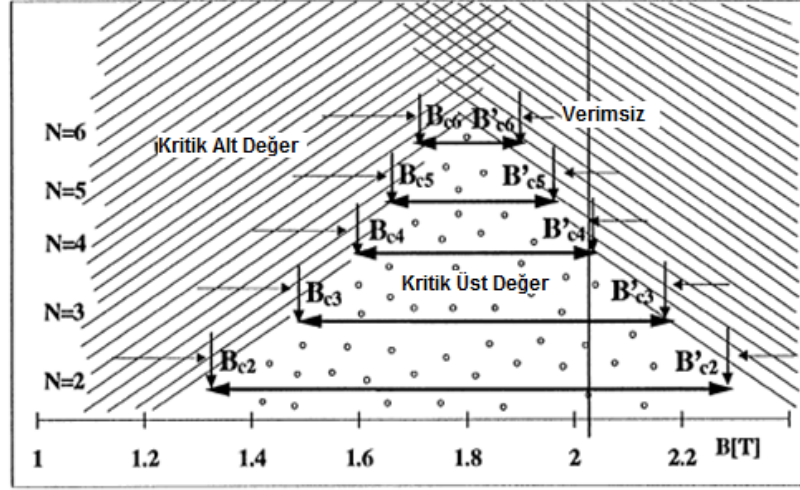


Şekil 7.4: $g=0$ ve $N=1$ durumuna orantılı olarak, hava aralığı uzunluğuna göre (a) Güç kayıplarındaki ve (b) Uyarma kayıplarındaki artış yüzdesi (İstifleme sayısı $N=2$ için) [53]



Şekil 7.5: $g=2 \text{ mm}$ ve $a=4 \text{ mm}$ için istifleme sayısına (N) bağlı olarak uyarma kritik akı yoğunluğu değerleri [53]

Ilo ve arkadaşları tarafından çalışmada, Löffler'in çalışmasına atıfta bulunarak, istifleme sayısı ile kritik akı yoğunluğuna bağlı bir indüksiyon penceresi oluşturulmuştur (Şekil 7.6) [54].



Şekil 7.6: İstifleme sayısına (N) bağlı indüksiyon penceresi [54]

Bu şekilde $B > B_c$ kısmında (Valkovic tarafından tanımlanan) yapı faktörünün artacağı kritik üst değer kısmının bir adım kaydırma (single step lap) için geçerli bölge olduğu, $B < B_c$ olan kritik alt değer bölgesinin çoklu istifleme için geçerli olduğu belirtilmektedir. Adımdaki istifleme sayısının 8'den büyük olması durumunda kritik alt değer bölgesi ile verimsiz bölgenin kesişeceği ve bu durumun çok büyük hava aralığı durumu ile açıklanabileceği belirtilmektedir.

7.1 Sonuç

Bu bölümde transformatör çekirdek kaybına adım kaydırma ve istifleme sayısının etkisinin literatürde nasıl irdelendiğine değinilmiştir.

Literatür taramasına bakıldığında, adım kaydırma tekniğinin ve istifleme sayısının çekirdek kaybında etkili olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca literatürde, adım kaydırma tekniğinin kullanılması noktasında ortak bir görüş vardır, ancak kaç adet parçanın adım içinde olması gerektiği, çakışma uzunluğu ve adım uzunluğu noktasında farklı bakış açıları söz konusudur.

8. FARKLI T-BAĞLANTI KESME AÇILARI DİKKATE ALINARAK TRANSFORMATÖR MANYETİK MODELLENMELERİNİN YAPILMASI

Bu bölümde farklı T-bağlantı kesme açlarına sahip 50 kVA gücündeki transformatörlerin modellemesinin yapıldığı bilgisayar yazılımı hakkında bilgi verilerek, transformatör modellerinin bilgisayar yazılımıyla gerçekleştirilmesi ve gerçekleştirilen modellerin çekirdek kayıplarının karşılaştırılması yapılacaktır.

8.1 Bilgisayar Yazılımının Tanıtılması

Farklı T-bağlantı kesme açlarına sahip 50 kVA gücündeki transformatörlerin analizi için Ansoft firmasına ait Maxwell yazılımının 16.0 versiyonu kullanılmıştır. Maxwell yazılımı, yüksek performanslı modelleme için elektromanyetik alan simülasyon yazılımıdır. Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2D/3D (iki boyutlu/üç boyutlu) modellemeler için düşük frekanslı elektromanyetik alan simülasyonu yapmakta ve üç modülden oluşmaktadır.

- 1) Elektrik makinalarının parametrelerinin hesaplanabildiği RMXprt modülü
- 2) Sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanarak iki boyutlu analiz yapılabilen 2D modülü
- 3) Sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanarak üç boyutlu analiz yapılabilen 3D modülü

RMXprt modülü ile analizi yapılabilen elektrik makinaları;

- 1) Asenkron makineler
- 2) Tek fazlı motorlar
- 3) Üç fazlı motorlar

- 4) Rotoru sargılı motorlar ve generatörler
- 5) Senkron makineler
- 6) Çıkık kutuplu motorlar ve generatörler
- 7) DC motorlar ve generatörler
- 8) Daimi mıknatıslı DC motorlar
- 9) Üniversal motorlar
- 10) Komütatörlü elektrik makineleri
- 11) Fırçasız DC motorlar
- 12) Hızı ayarlanabilir PM motorlar ve generatörler
- 13) Anahtarlama relüktans motorlar

şeklinde sıralanmaktadır.

RMxpert modülü, elektrik makinelerin parametrelerini kolaylıkla hesaplayabilmekte, modelleme verilerini değiştirerek analiz yapmaya elverişli, sonuçları grafiksel olarak gösterebilen, iki ve üç boyutlu modellemeye geçiş imkanı sağlayan, Ansoft firmasının Simplorer yazılımıyla bağlantı kurulabilmesi özelliğini barındıran kullanışlı bir modüldür.

2D/3D (iki boyutlu/üç boyutlu) modülü, iki ve üç boyutlu elektrik makinaları için elektromanyetik alan simülasyonu yapabilen bir üründür. Maxwell denklemlerini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile statik, zamanla değişen ve frekans domeninde hassas çözümler sunmaktadır. Elektromanyetik ve elektrostatik problemlere bağlı parametrelere ulaşmak, grafik oluşturmak, manyetik ya da elektrik alan değişimini ve yönelimini gözlemlemek gibi birçok elektromanyetik problem çözümünde kullanılmaktadır. Bu modül statik elektrik alanları, kuvvet, tork ve gerilim dağılımları ile yüklerin sebep olduğu kapasitelerin; statik manyetik alanların, statik harici manyetik alanların ve sabit mıknatısların oluşturduğu kuvvet, tork ve endüktansların hesaplanmasında; doğrusal ve doğrusal olmayan malzemelerin

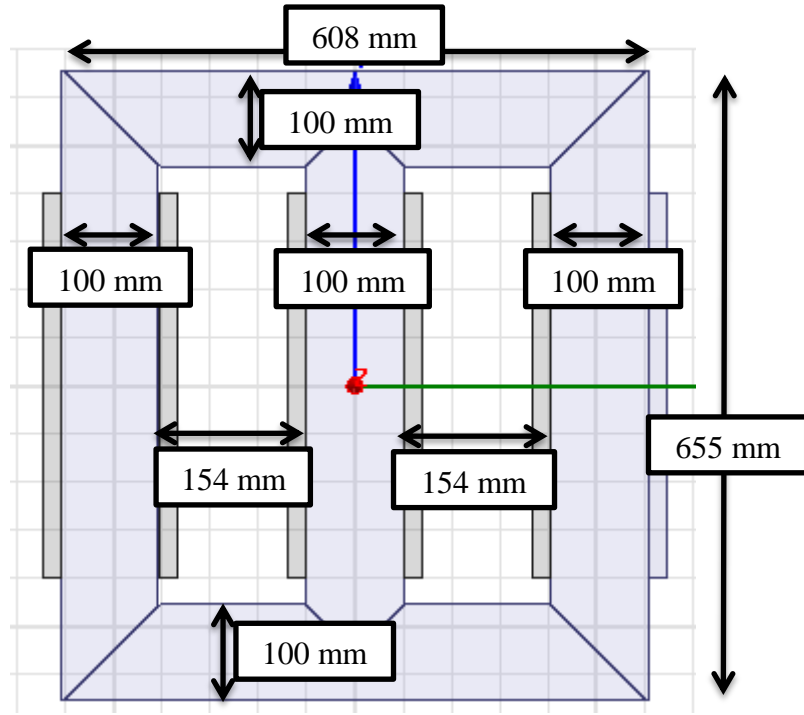
kullanıldığı yapılardaki alanların simülasyonlarının yapılmasında ve ayrıca sıcaklık ile ısı akışı gibi termal büyüklüklerin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

8.2 Transformator Konstrüksiyonu

Analizler sırasında primer ve sekonder sargıların profil (yassı) iletken olan ve günümüzde en yoğun kullanılan M5-0.23 malzemedan yapılmış çekirdeğe sahip 7 adet farklı T-bağlantı kesme açısına sahip transformatorlerin tasarımı dikkate alınacaktır. Transformator tasarımları Yıldız/Üçgen bağlı olup anma değeri 33 kV/0.4 kV ve 50 kVA'dır.

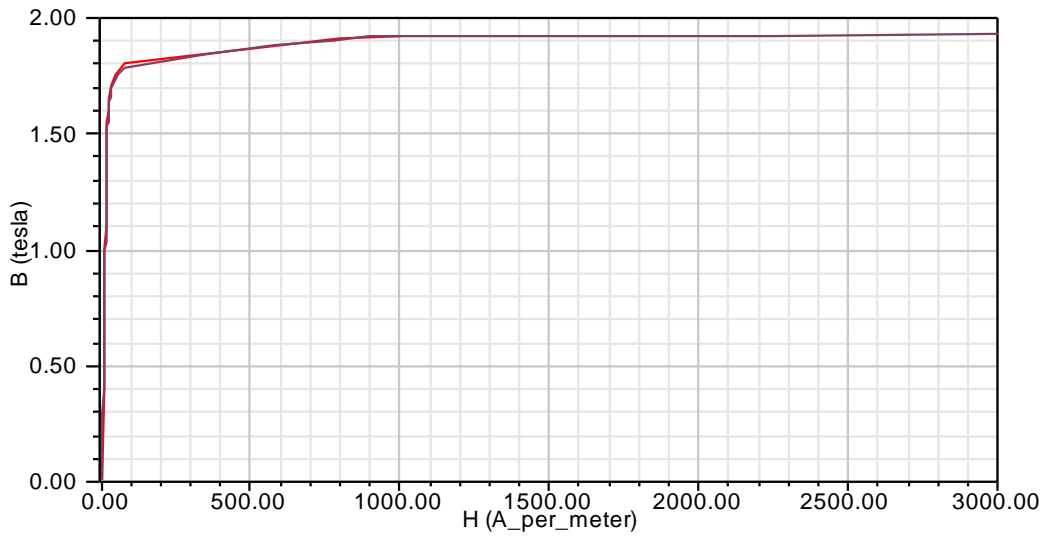
Analizler için tanıtımı yapılan ve sonlu elemanlar yöntemini (FEM) kullanan Ansoft Maxwell programı kullanılmıştır. Literatürde karşılaşılan FEM temelli çalışmaları, analiz hızının yüksek olmasını sağlamak dolayısıyla analiz süresini kısaltmak için üç boyutlu FEM yerine iki boyutlu FEM analizi tercih edilmiştir [55]. Ayrıca yine aynı çalışmada iki boyutlu ve üç boyutlu FEM analizleri arasında sonuç hassasiyeti bakımından önemli bir fark olmadığı belirtilmiştir. Buna göre; proje kapsamında yapılan FEM temelli analiz çalışmalarında transformator tasarımları Ansoft Maxwell programında iki boyutlu olarak modellenmiştir.

Gerçekleştirilen FEM temelli analizlerde transformator tasarımlarının çekirdek kayıpları ve manyetizasyon akımları inceleneceği için Ansoft Maxwell programında oluşturulan transformator modelinde çekirdek haricinde primer veya sekonder taraftan birinin faz sargılarının yer alması yeterlidir. Ansoft Maxwell programında oluşturulan 50 kVA gücündeki modelin basit yapısı ve boyutları Şekil 8.1'de verilmiştir.

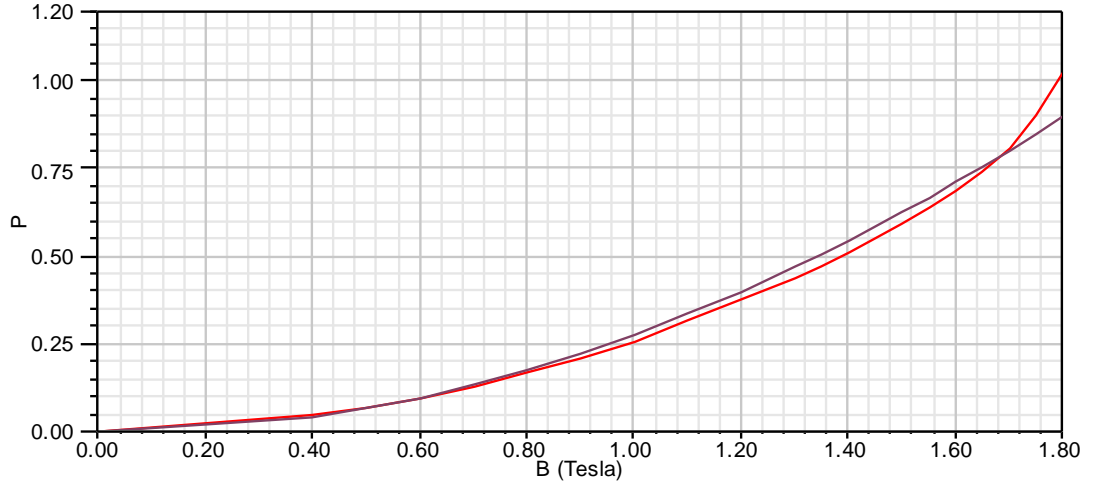


Şekil 8.1: Ansoft Maxwell programında oluşturulan 50 kVA gücündeki modelin basit yapısı ve boyutları

Transformatörün modellemesi ve çekirdek kayıplarının bulunması için Ansoft Maxwell programına B-H ve B-P eğrisi girilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda kullanılan M5-0.23 malzemesinin B-H eğrisi Şekil 8.2’de ve B-P eğrisi Şekil 8.3’de olduğu gibi kullanılmıştır [8].



Şekil 8.2: M5-0.23 malzemesinin B-H eğrisi



Şekil 8.3: M5-0.23 malzemesinin B-P eğrisi

Temin edilen B-H, B-P eğrileri ve malzemenin kütle yoğunluğu (Mass Density) 7650 kg/m^3 , frekans 50 Hz, kalınlık (Thickness) 0,23 mm, iletkenlik (Conductivity) 5000000 S/m olarak değerlerinin programa girilmesi ile çekirdek kayıpların otomatik olarak program hesaplamaktadır.

Farklı T-bağlantı açılara sahip modeller elde edildikten sonra analize hazır hale getirebilmek için ağ örüntüsü (mesh) ile örülmesi gerekmektedir. Bu işlem programın sonlu eleman analizi yapabilmesi için gereklidir. Bu işlem her farklı T-bağlantı kesme açısına sahip Transformatör modellendiğinde yapılacak ve ağ örtüsünün sıklığı incelenecektir.

İki boyutlu analizde, benzetim sonuçlarını elde etmek için analiz 0-2 saniye arasında 0,0001 saniye hassasiyette yapılmıştır. Benzetimde farklı T-bağlantı kesme açılara sahip transformatörlerin anlık çekirdek kayıpları, ağ örüntüsü (mesh) ve çekirdek manyetik akı yoğunluğu izlenmiştir.

8.3 Benzetim Sırasında Karşılaşılan Problemler

Ansoft Maxwell manyetik modelleme programı ile yapılan benzetimler sırasında çeşitli problemler ile karşılaşılmıştır. Bunlardan bahsetmek gerekirse;

Genliği şebeke gerilimine eşit olan 3 faz gerilimler transformatöre eşitlikler (8.1), (8.2), (8.3)'deki gibi uygulanmıştır.

$$V_{peak}*(1-\exp(-10*time))*\cos(2*pi*50*time) \quad (8.1)$$

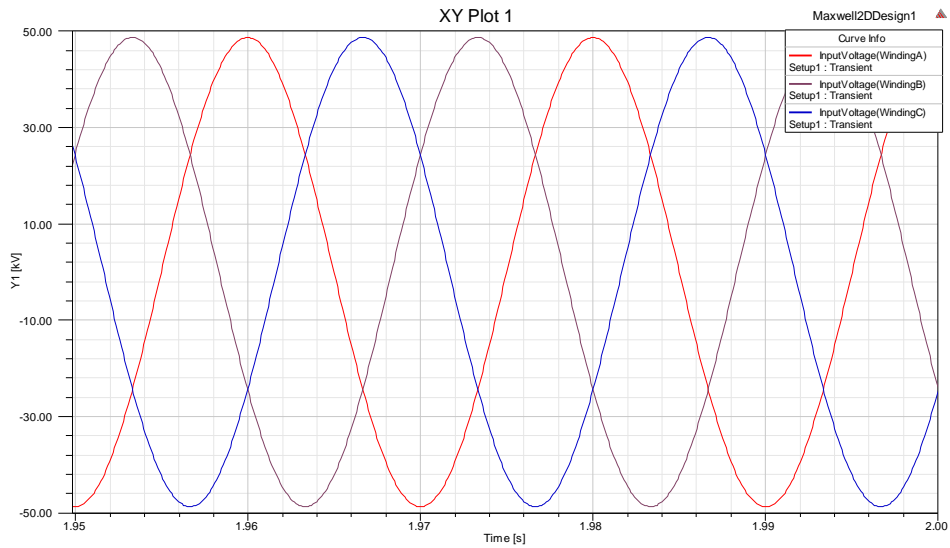
$$V_{peak}*(1-\exp(-10*time))*\cos(2*pi*50*time+(2/3*pi)) \quad (8.2)$$

$$V_{peak}*(1-\exp(-10*time))*\cos(2*pi*50*time+(4/3*pi)) \quad (8.3)$$

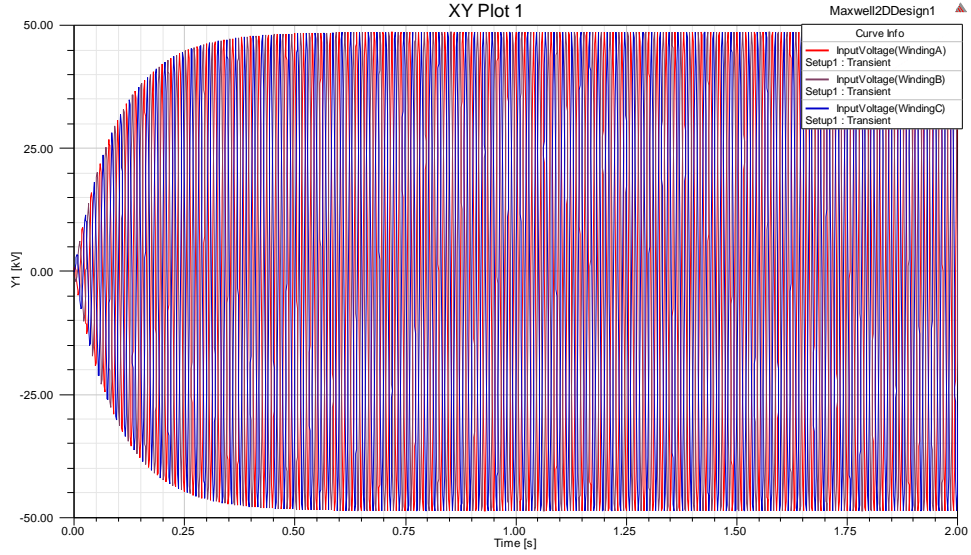
Transformatörün endüktif yapısından dolayı akımların başlangıç değerlerinin 120° derece faz farkına sahip belirli bir genlikte olması gerekirken, benzetim esnasında akımın sıfırdan farklı başlangıç büyüklükleri için hatalı sonuçlar verildiği gözlemlenmiştir. Başlangıç koşullarına bağlı bu benzetim probleminin ortadan kaldırmak için, gerilimleri belirli bir exponansiyel gecikme sonrasında şebeke genliğine ulaşacağı bir gerilim beslemesi dikkate alınmıştır.

Bu güçteki bir transformatör için gecikmenin 0,5 saniyeden daha az olmaması gerektiği çalışma sonrasında ortaya çıkmıştır.

Benzetim esnasında 1,95-2 saniyeler arasında elde edilen üç faz gerilime ait değerler Şekil 8.4'de, tüm benzetim süresince elde edilen üç faz gerilimine ait değerler Şekil 8.5'de görülmektedir.



Şekil 8.4: 1,95-2 saniyeler arasında elde edilen üç faz gerilimine ait değerler



Şekil 8.5: Tüm benzetim süresince elde edilen üç faz gerilimine ait değerler

Yaşanan başka bir problem ise bölge genişliği ve uzunluğu konusunda olmuştur. Benzetim programı %'li ifadeler ile transformatörün uzunluğu ve genişliğinin yüzdesine göre bölge seçilmesine ve benzetimin sadece bu bölge içerisinde gerçekleşmesine olanak sağlayarak sonsuz bir çevre olmamasında imkân sağlamaktadır.

Benzetim sırasında başlangıçta %100 olarak alınan bölge genişlik ve uzunluğunda akım değerlerinde yanlış değerlere rastlanmıştır. Bu problemi aşmak amacıyla farklı bölge değerleri seçilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak değerlendirmeler ile en uygun bölge seçiminin %50 olduğu kanaatine varılmıştır.

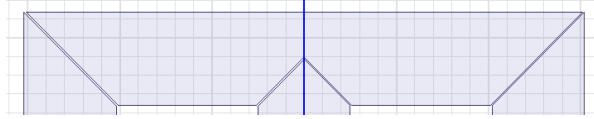
Benzetim sürecinde yaşanan en önemli problem ise Time Step yani Analiz Hassasiyeti olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucunda analiz hassasiyetinin sonuçları doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Çünkü elde edilen grafiklerde tam bir sinüs formu oluşmadığından aralarda bulunan değerlerin ortalamaya katılmadığı görülmüştür.

Bu yüzden çalışmaların başlangıcında hassasiyet 1×10^{-2} olarak alınırken sonuçlarda yanlışlıklar ve aynı özelliklere ait transformatör benzetim sonuçları arasında büyük farklılıklar gözlemlenmiştir. Bu problemi ortadan kaldırmak için benzetim hassasiyeti 1×10^{-4} alınmıştır.

Tabi hassasiyet değeri 1×10^{-2} olduğunda benzetim süresi 1 saat sürerken, hassasiyet değeri 1×10^{-4} olduğunda benzetim süresinin 12 saate kadar uzadığı görülmüştür.

8.4 45-90-45° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

Günümüz transformatör çekirdek üretiminde en yoğun olarak kullanılan T-bağlantı kesme açısı 45-90-45° derecedir. Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan ilk transformatör T-bağlantı kesme açısı 45-90-45° derece olan ve Şekil 8.6'da çizimi görülen transformatördür.

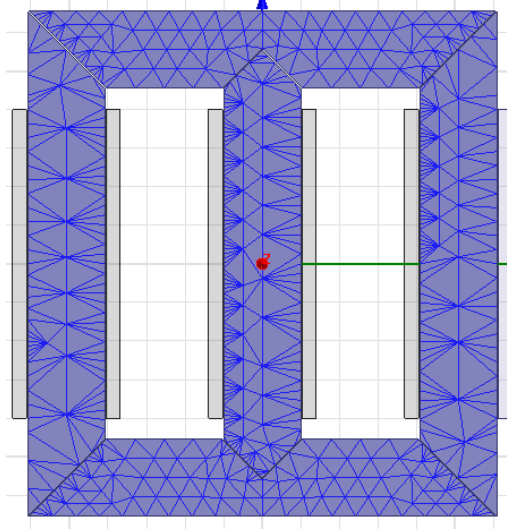


Şekil 8.6: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

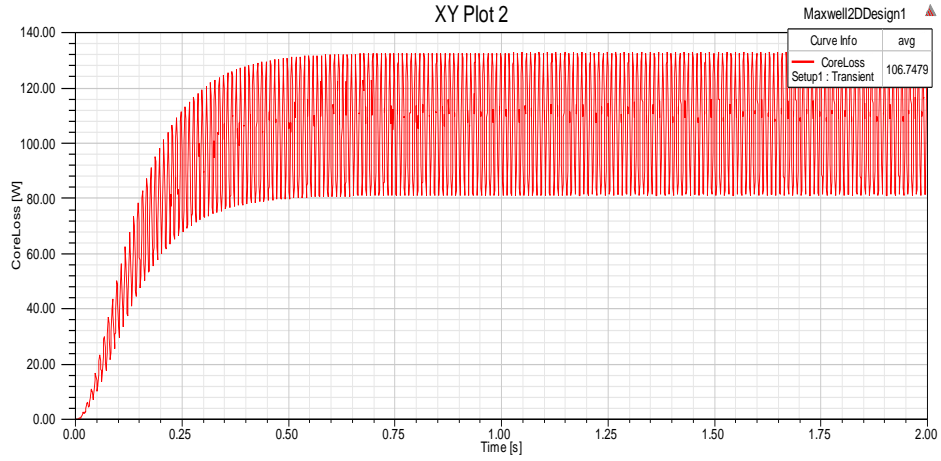
Benzetim programı için model elde edildikten sonra analize hazır hale getirebilmek için ağ örüntüsü (mesh) ile örülmesi gerekmektedir. Bu işlem programın sonlu eleman analizi yapabilmesi için gerekli olup transformatörün ağ örüntüsü (mesh) Şekil 8.7'de görülmektedir.

Şekil 8.7 incelendiğinde, ağ örüntüsünün sık olduğu bölgelerin çekirdek bacak, boyunduruk ve T-bağlantı kesme açılarının bağlantısının yapıldığı bölgeler olduğu görülmektedir. Bu durumun benzetim programı için önemi ise ağ örüntüsünün sık olduğu kısımlarda analizin daha hassas bir şekilde gerçekleşmesidir.



Şekil 8.7: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü

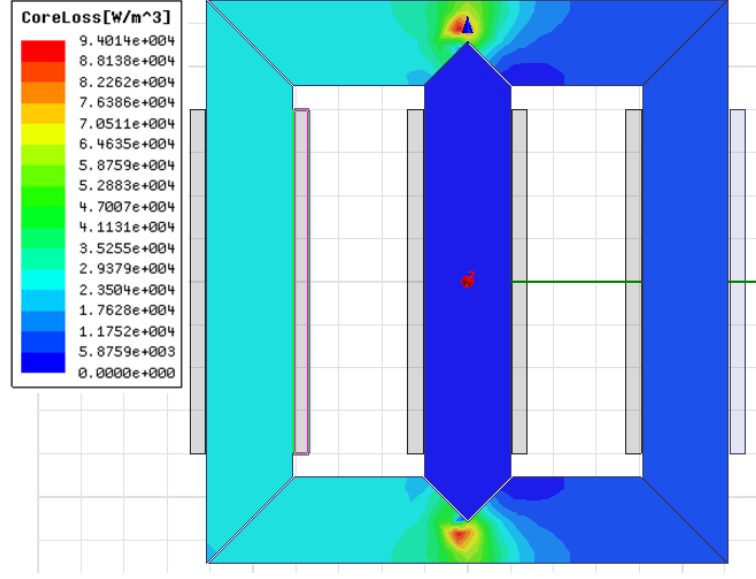
Benzetim programı sonuçlarını elde etmek için analiz 0-2 saniye arasında 1×10^{-4} saniye hassasiyette yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Şekil 8.8’de zamana göre ortalama çekirdek kaybına ilişkin değişim görülmektedir.



Şekil 8.8: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.8 incelendiğinde 0.5 saniyeden sonra çekirdek kaybının aynı seviyede devam ettiği ve 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama toplam çekirdek kaybının 106.7479 W olduğu görülmektedir.

Aynı zamanda Şekil 8.9’da benzetim süresince transformatörün anlık m³’deki çekirdek kaybı (güç-W) verilmiştir.

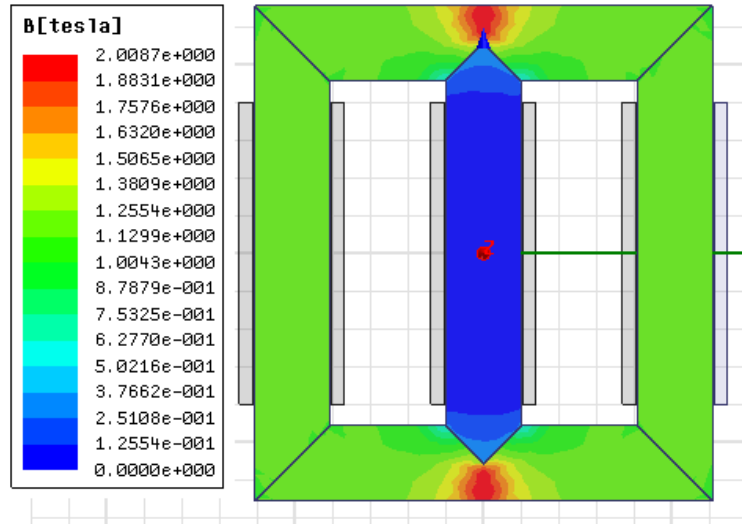


Şekil 8.9: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m³’deki çekirdek kaybı (W/m³)

Şekil 8.9 incelendiğinde, en fazla çekirdek kaybının 94014 W/m³ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.

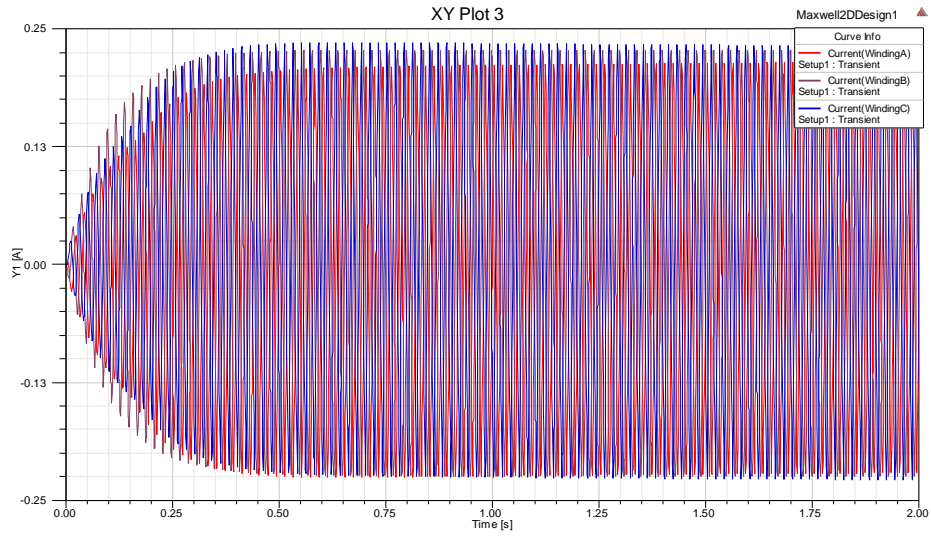
Yapılan benzetim sonucunda; transformatör çekirdeğinin manyetik akı yoğunluğunun maksimum değerini aldığı durum için Şekil 8.10’da bulunan görüntü elde edilmiştir.

Şekil 8.10 incelendiğinde, transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğunun en fazla 2.0087 T olduğu görülmektedir. Ayrıca manyetik akı yoğunluğu incelendiğinde ise yoğunluğun çekirdek kaybı ile paralel olarak T-bağlantı kesme açısında olduğu görülmektedir.



Şekil 8.10: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

Aynı zamanda Şekil 8.11’de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.11: 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.5 15-90-75° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

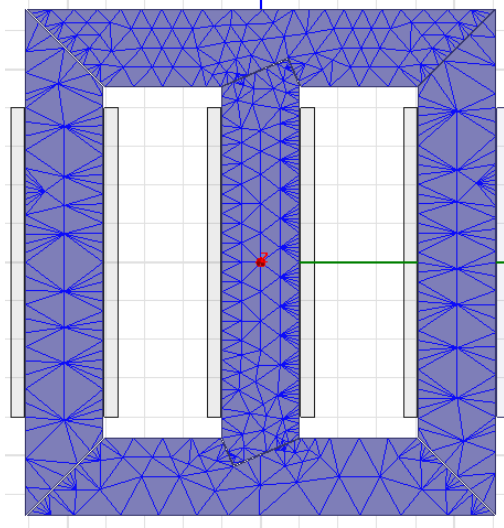
Günümüz transformatör çekirdek üretiminde en yoğun olarak kullanılan T-bağlantı kesme açısı 45-90-45° dereceye çekirdek kaybının daha az olduğu düşünülen ilk alternatif T-bağlantı kesme açısı 15-90-75° derecedir. Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 15-90-75° T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.12’de görülmektedir.



Şekil 8.12: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

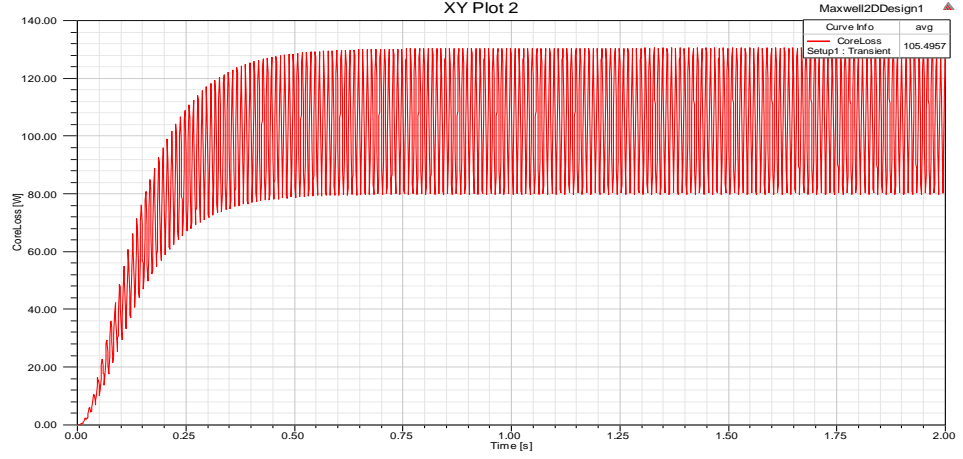
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örüntüsü Şekil 8.13’de verilmiştir.



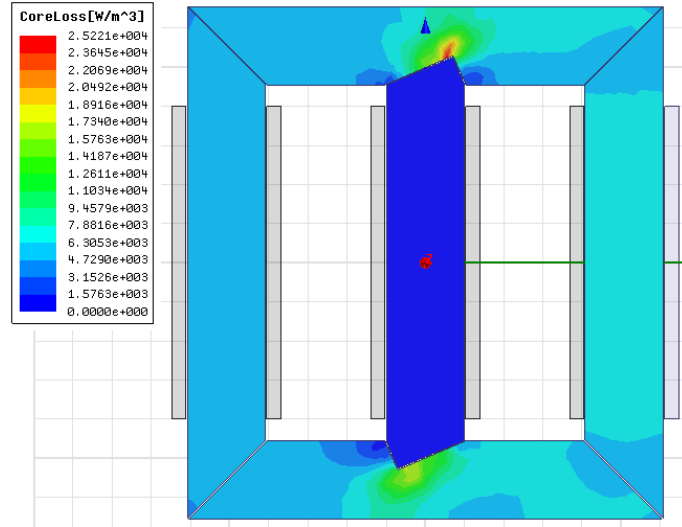
Şekil 8.13: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örüntüsü

Şekil 8.14’de zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 105.4957 W olduğu görülmektedir.



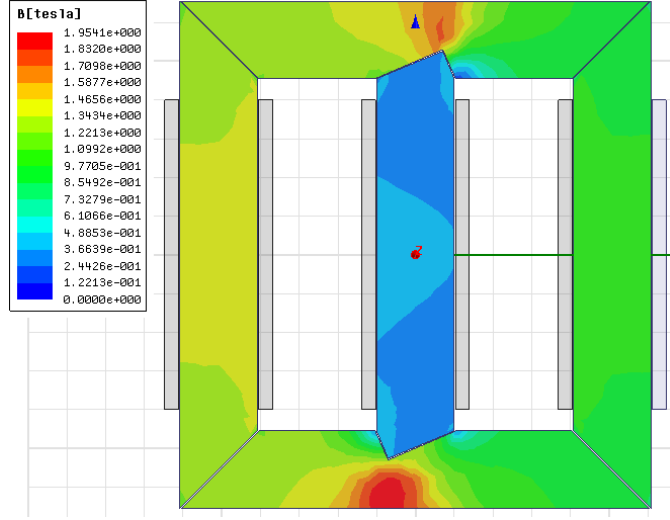
Şekil 8.14: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.15’de benzetim süresince transformatörün anlık m^3 ’deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının 25221 W/m^3 olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



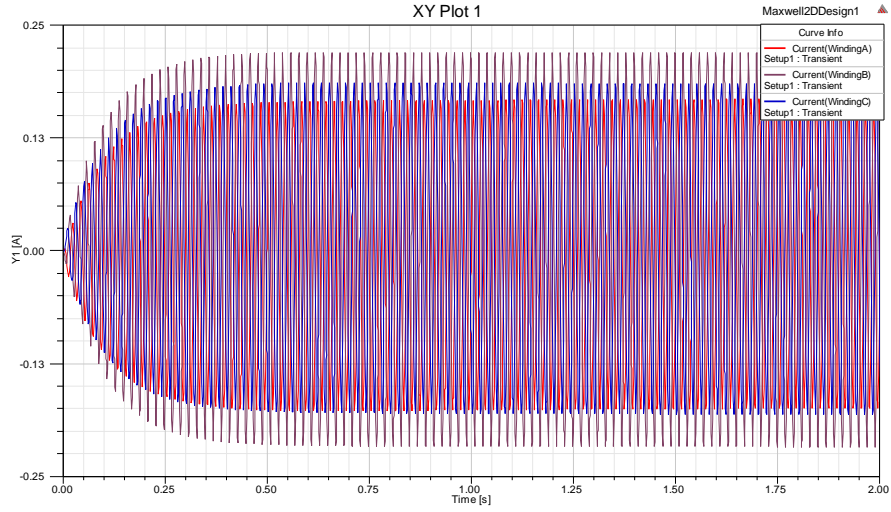
Şekil 8.15: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m^3 ’deki çekirdek kaybı (W/m^3).

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.16’da verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 1.9541 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.16: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

Aynı zamanda Şekil 8.17’de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.17: 15-90-75° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.6 75-90-15° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

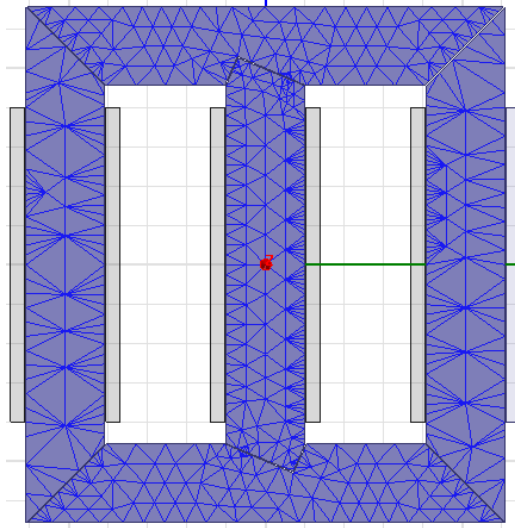
Günümüz transformatör çekirdek üretiminde en yoğun olarak kullanılan T-bağlantı kesme açısı 45-90-45° dereceye çekirdek kaybının daha az olduğu düşünülen ilk alternatif olan T-bağlantı kesme açısı 15-90-75° derece bir önceki bölümde incelenmiştir. Bu bölümde ise T-bağlantı kesme açısı 15-90-75° derecenin simetrisi olan 75-90-15° derece olan transformatör modeli incelenecektir. Bu kapsamda Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 75-90-15° T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.18’de görülmektedir.



Şekil 8.18: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

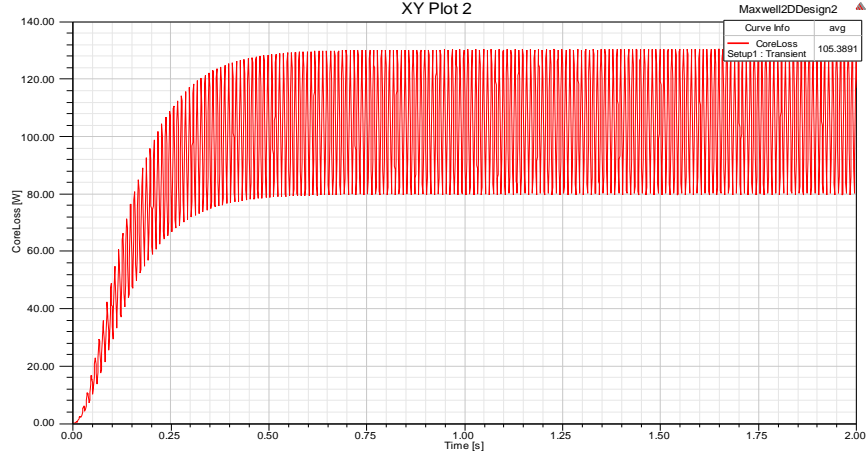
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örüntüsü Şekil 8.19’da verilmiştir.



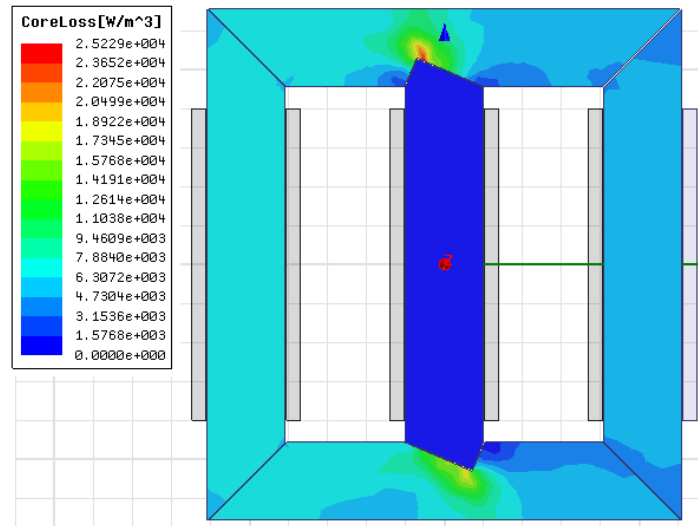
Şekil 8.19: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örüntüsü

Şekil 8.20’de zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 105.3891 W olduğu görülmektedir.



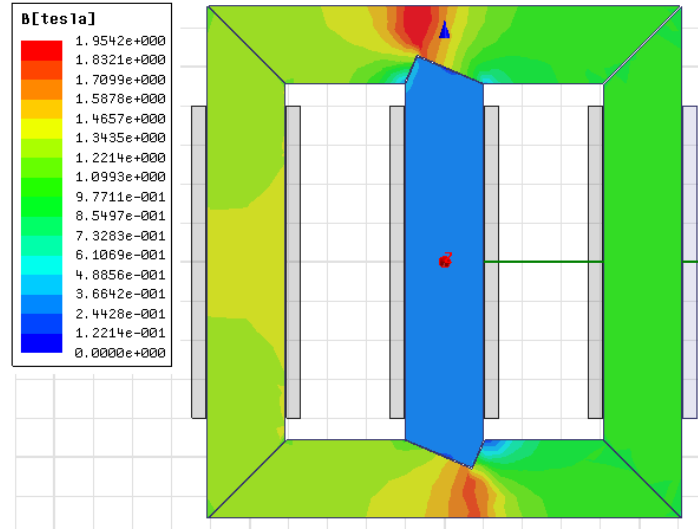
Şekil 8.20: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.21’de benzetim süresince transformatörün anlık m^3 ’deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının $25229 W/m^3$ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



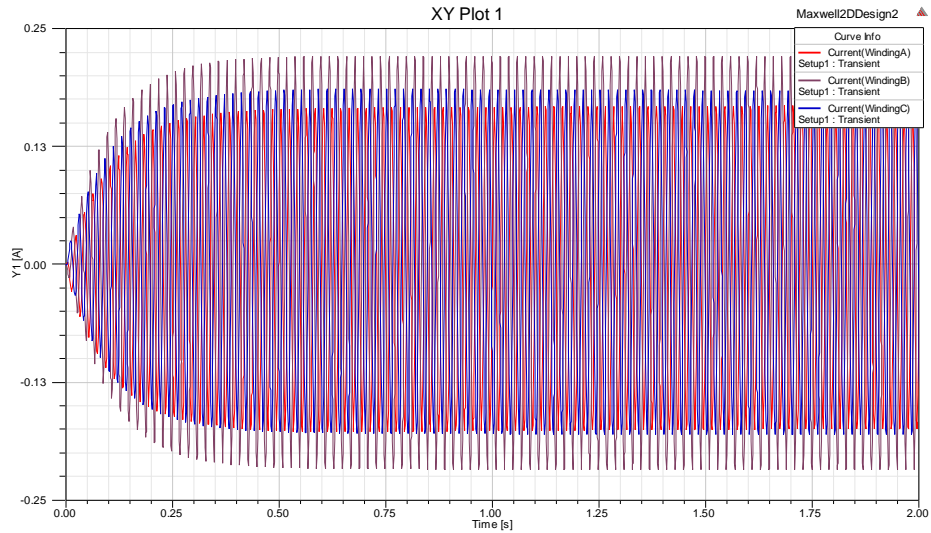
Şekil 8.21: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m^3 ’deki çekirdek kaybı (W/m^3)

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.22’de verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 1.9542 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.22: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

Aynı zamanda Şekil 8.23’de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.23: 75-90-15° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.7 60-60-60° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

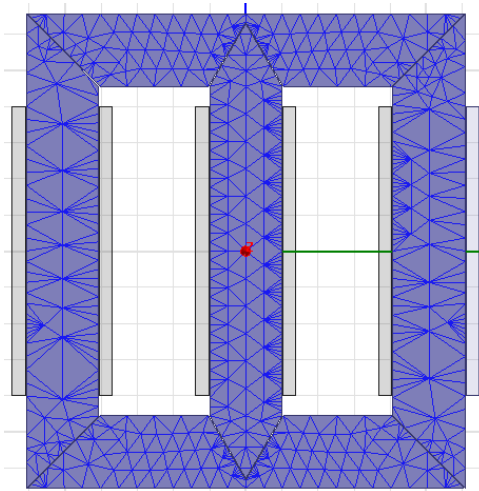
Önceki bölümlerde günümüz transformatör çekirdek üretiminde en yoğun olarak kullanılan T-bağlantı kesme açısı 45-90-45° derece ve buna alternatif olarak tasarlanan 15-90-75° ve 75-90-15° derece kesme açılı olan transformatörlerin benzetimleri yapılmıştır. Bu bölümde ise transformatör üretiminin ilk yıllarında kullanılan 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısının benzetimi yapılacaktır. Bu kapsamda Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.24'de görülmektedir.



Şekil 8.24: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

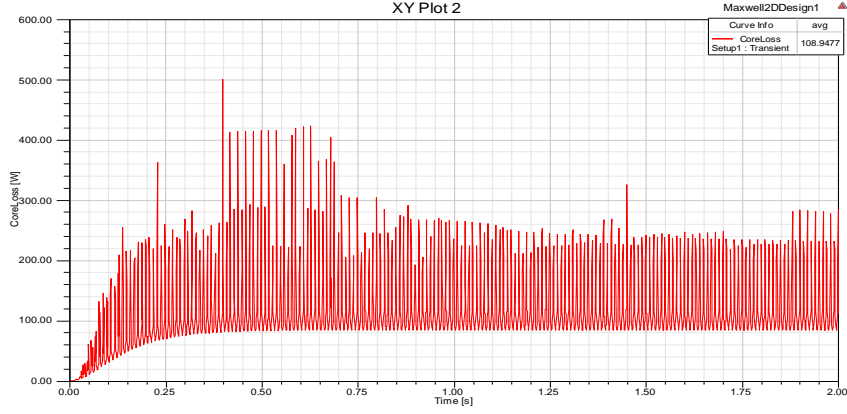
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örüntüsü Şekil 8.25'de verilmiştir.



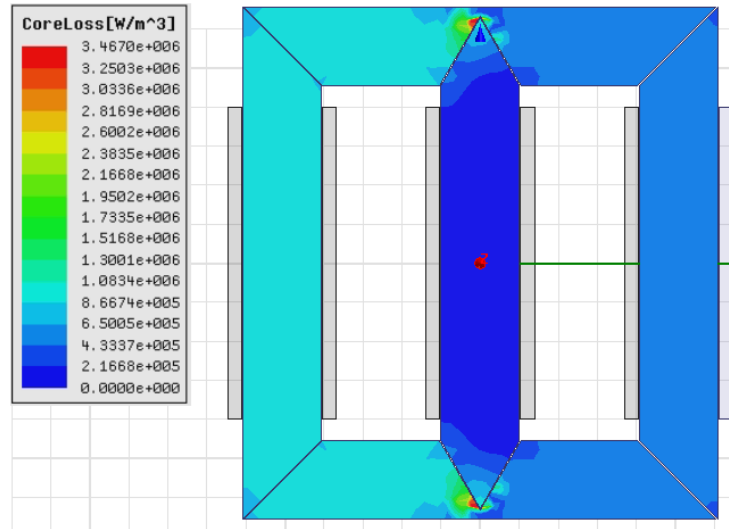
Şekil 8.25: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örüntüsü

Şekil 8.26'da zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 108.9477 W olduğu görülmektedir.



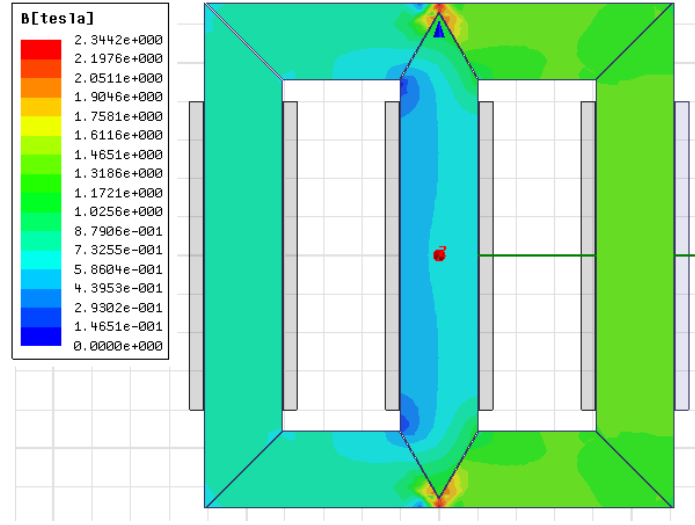
Şekil 8.26: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.27'de benzetim süresince transformatörün anlık m³'deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının 34670 W/m³ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



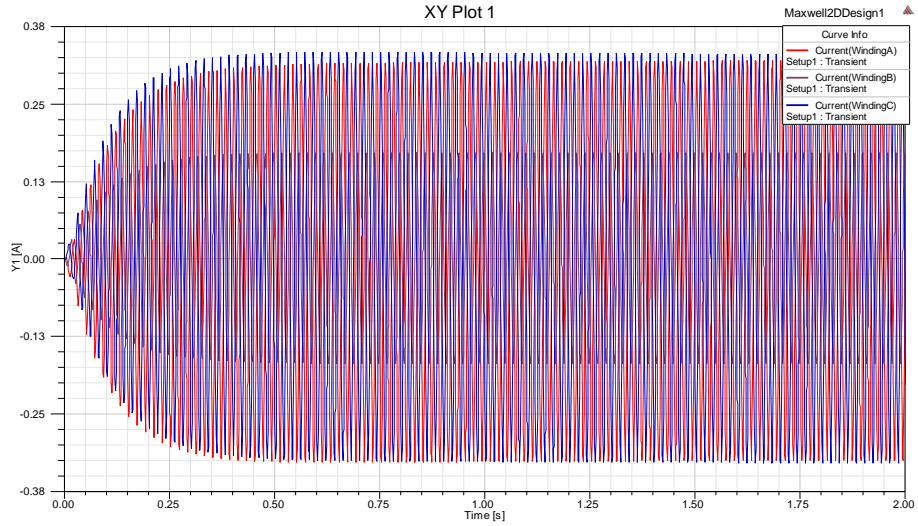
Şekil 8.27: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m³'deki çekirdek kaybı (W/m³)

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.28’de verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 2.3442 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.28: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

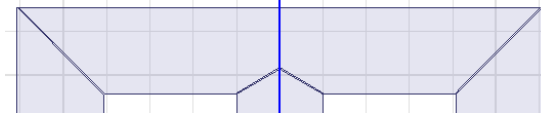
Aynı zamanda Şekil 8.29’da tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.29: 60-60-60° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.8 30-120-30° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

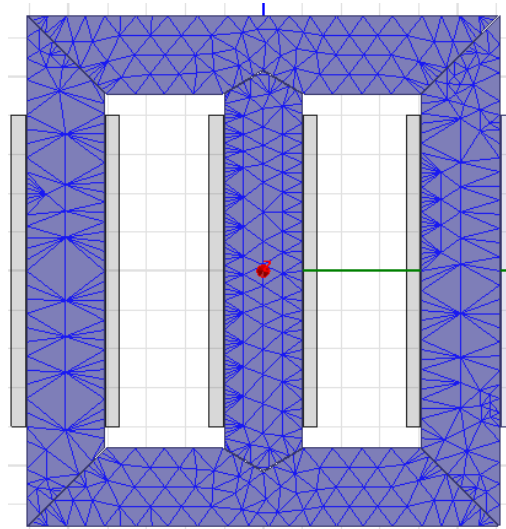
Bu bölümde günümüzde literatürde ve üretimde pek rastlanmayan 30-120-30°derece T-bağlantı kesme açısının benzetimi yapılacaktır. Bu T-bağlantı kesme açısının önemli bir özelliği üretim sırasında ortaya çıkacak olan atıl malzemenin günümüzde yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatöre göre daha az olmasıdır. Bu kapsamda Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.30'da görülmektedir.



Şekil 8.30: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

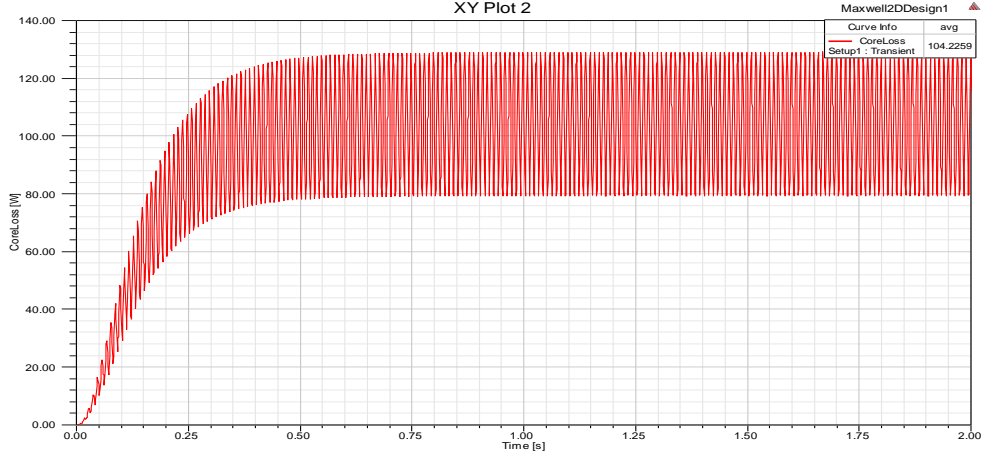
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örüntüsü Şekil 8.31'de verilmiştir.



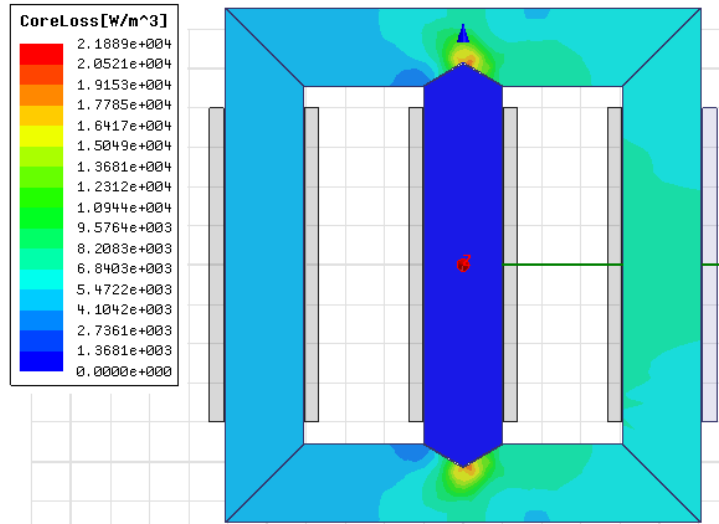
Şekil 8.31: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örüntüsü

Şekil 8.32’de zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 104.2259 W olduğu görülmektedir.



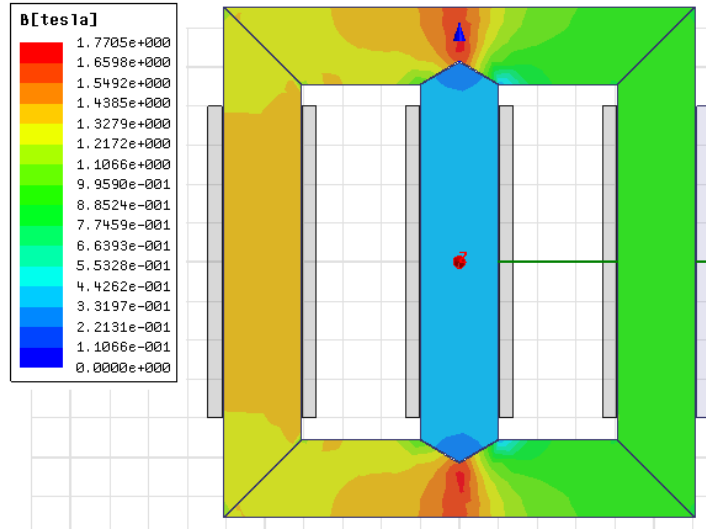
Şekil 8.32: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.33’de benzetim süresince transformatörün anlık m^3 ’deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının $21889 W/m^3$ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



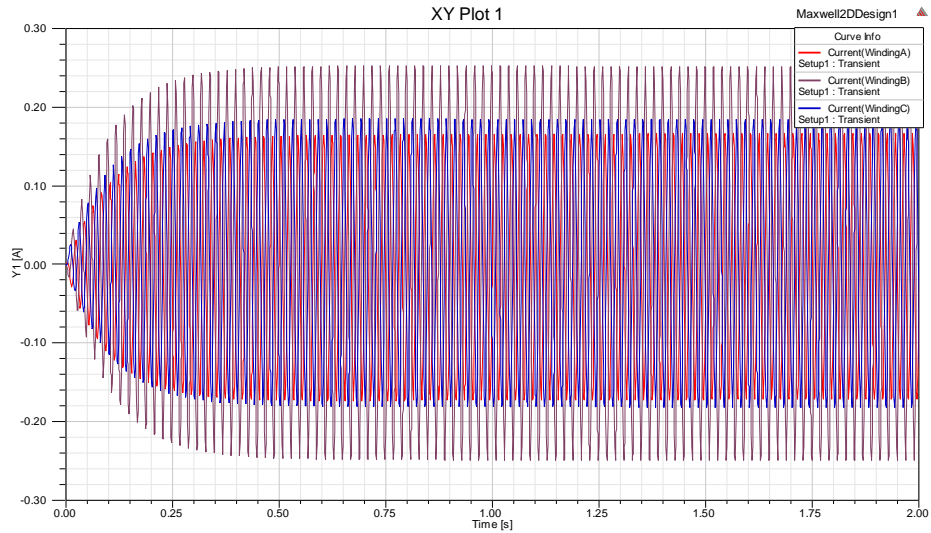
Şekil 8.33: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m^3 ’deki çekirdek kaybı (W/m^3)

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.34'de verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 1.7705 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.34: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

Aynı zamanda Şekil 8.35'de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.35: 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.9 30-60-90° Derece T-bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

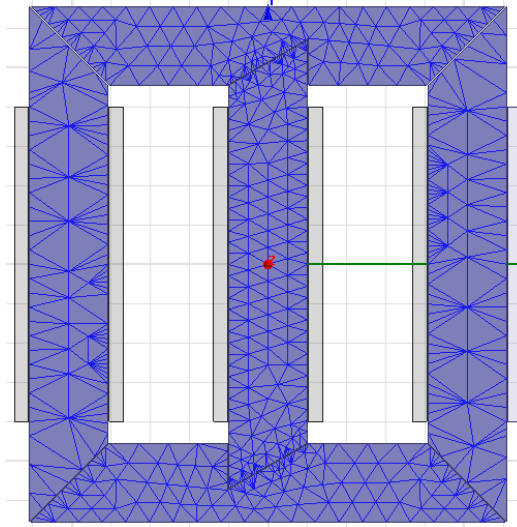
Bu bölümde de literatürde ve üretimde pek rastlanmayan 30-60-90°derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün benzetimi yapılacaktır. Bu kapsamda Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.36'da görülmektedir.



Şekil 8.36: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

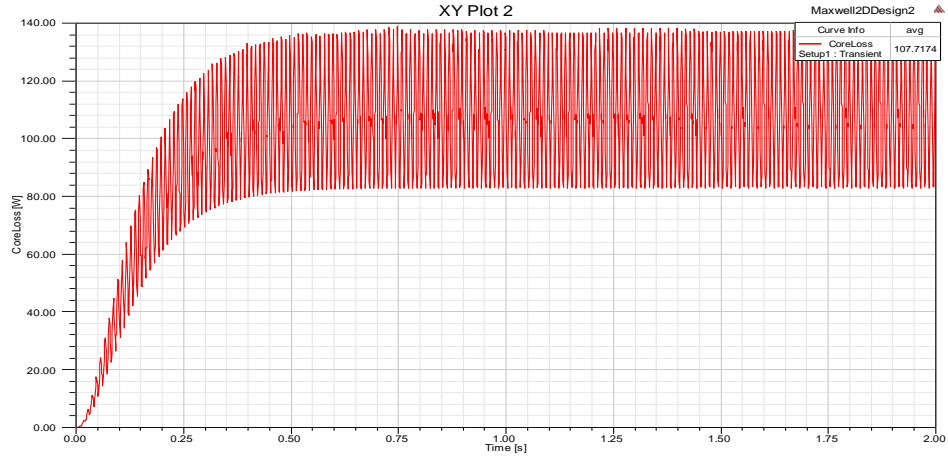
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örtüsü Şekil 8.37'de verilmiştir.



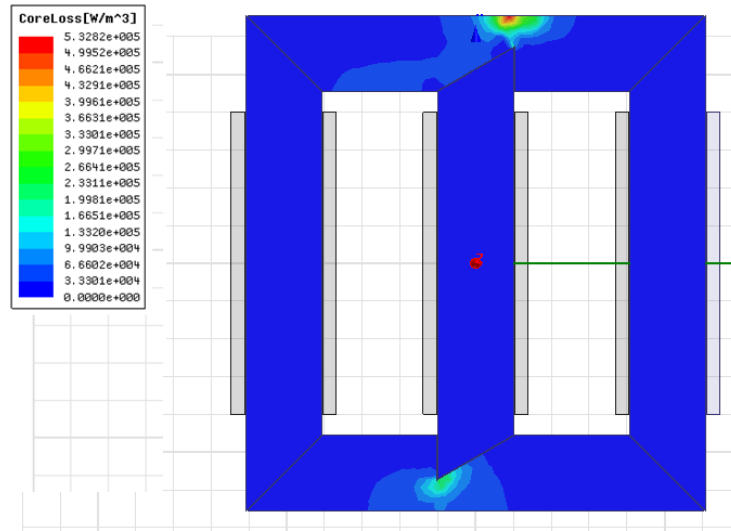
Şekil 8.37: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örtüsü

Şekil 8.38'de zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 107.7174 W olduğu görülmektedir.



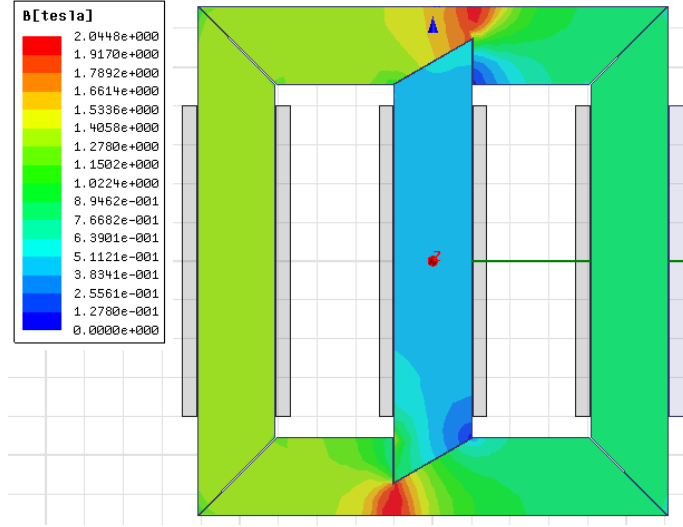
Şekil 8.38: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.39’da benzetim süresince transformatörün anlık m³’deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının 53282 W/m³ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



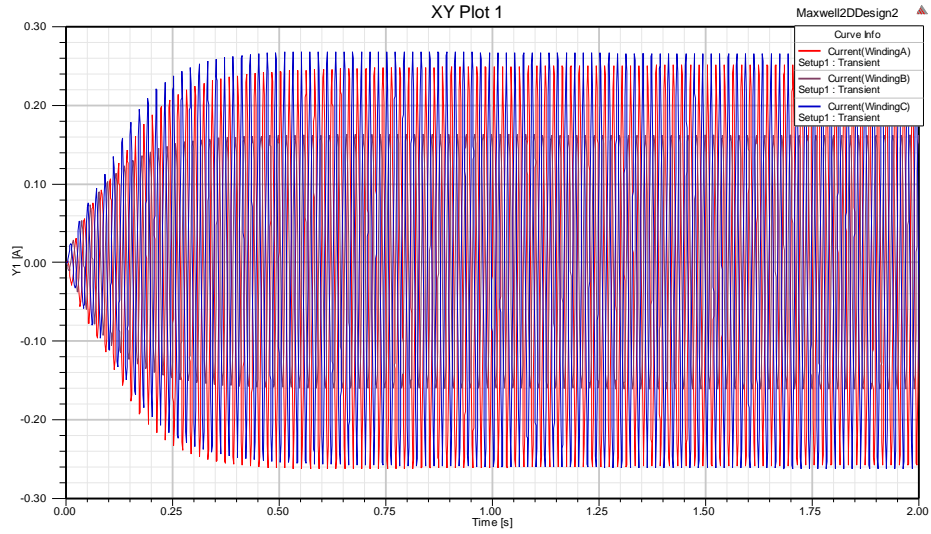
Şekil 8.39: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m³’deki çekirdek kaybı (W/m³)

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.40’da verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 2.0448 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.40: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

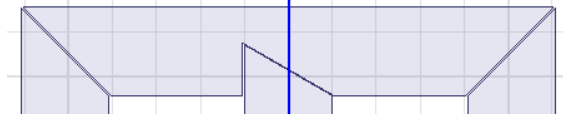
Aynı zamanda Şekil 8.41’de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.41: 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.10 90-60-30° Derece T-Bağlantı Kesme Açısına Sahip Transformatörün Benzetiminin İncelenmesi

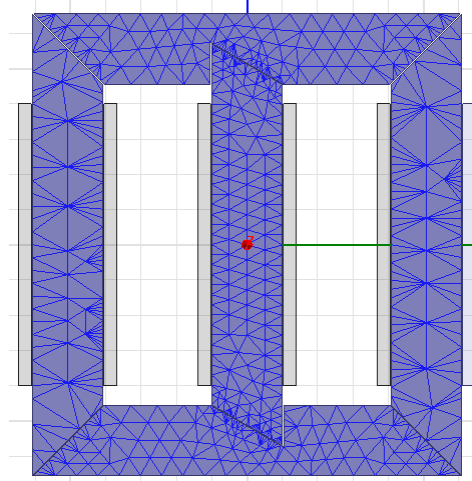
Bu bölümde bir önceki bölümde benzetimi yapılan 30-60-90° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün simetrisi olan 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün benzetimi yapılacaktır. Bu kapsamda Ansoft Maxwell programı ile benzetimi yapılan 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çizimi Şekil 8.42’de görülmektedir.



Şekil 8.42: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör

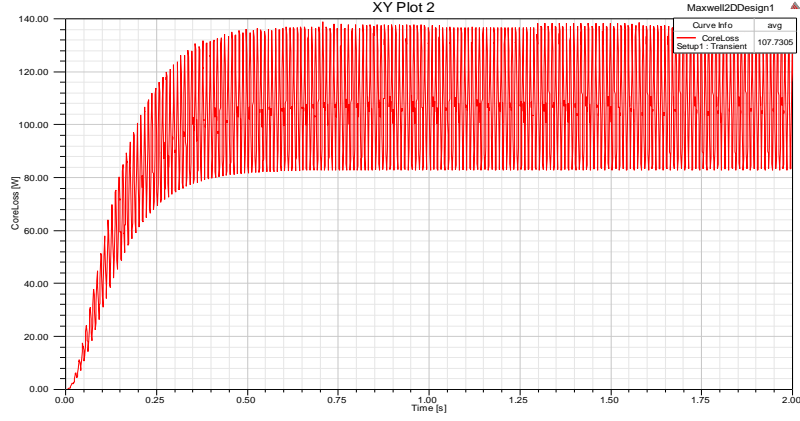
Benzetim sırasında transformatör 5 parçadan oluşmuş ve hava aralığı 2 mm olarak ayarlanmıştır.

Elde edilen ağ örüntüsü Şekil 8.43’de verilmiştir.



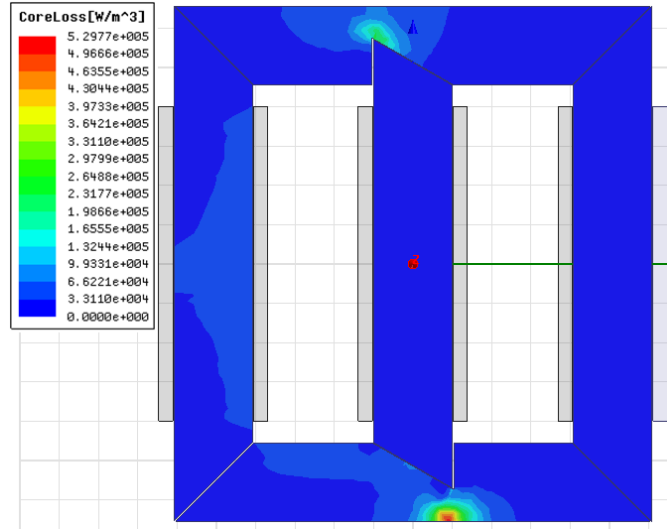
Şekil 8.43: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün ağ örüntüsü

Şekil 8.14’de zamana göre ortalama çekirdek kaybının değişimi verilmiş olup, 0.5-2 saniyeler arasındaki ortalama çekirdek kaybının 107.7305 W olduğu görülmektedir.



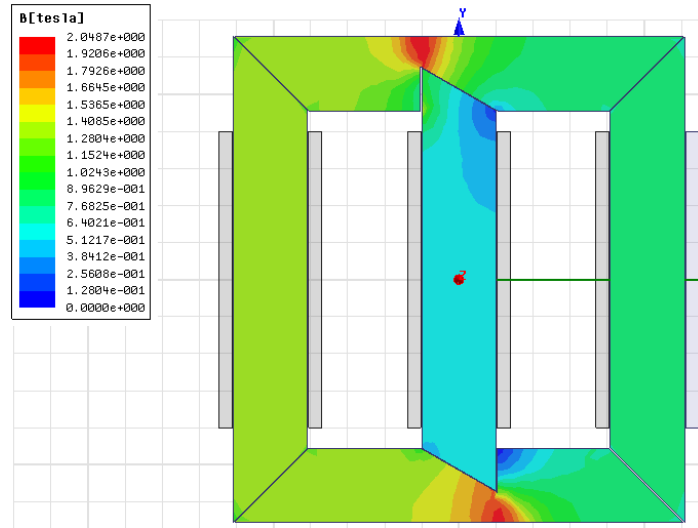
Şekil 8.44: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün zamana göre çekirdek kaybı değişimi

Şekil 8.45’de benzetim süresince transformatörün anlık m³’deki çekirdek kaybı (güç-W) görülmekte olup, en fazla çekirdek kaybının 52977 W/m³ olduğu ve kaybın en yoğun olarak görüldüğü yer ise T-bağlantı kesme açısı kısımları olduğu görülmektedir.



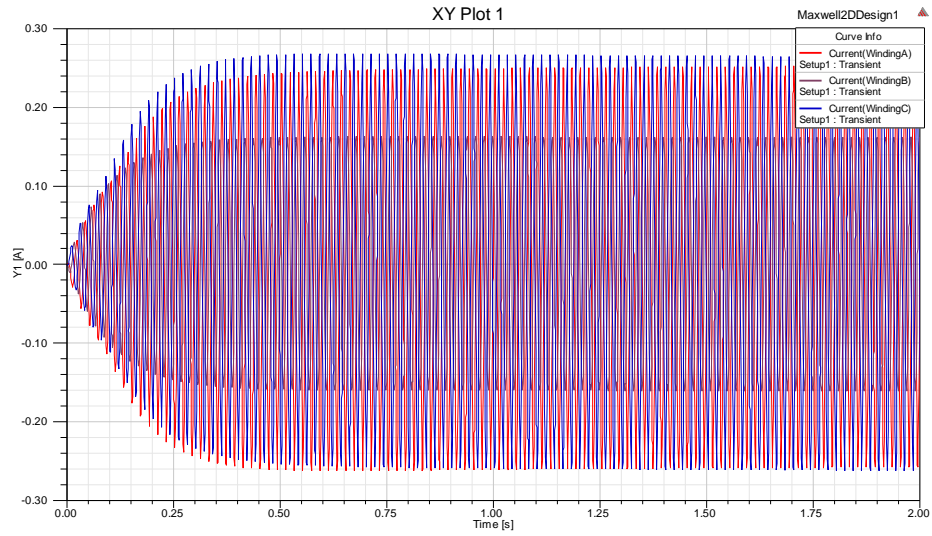
Şekil 8.45: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün m³’deki çekirdek kaybı (W/m³)

Manyetik akı yoğunluğuna ilişkin elde edilen sonuçlar Şekil 8.46’da verilmiş olup, manyetik akı yoğunluğunun en fazla 2.0487 T olduğu görülmektedir.



Şekil 8.46: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün çekirdek manyetik akı yoğunluğu

Aynı zamanda Şekil 8.47’de tüm benzetim süresince transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri görülmektedir.



Şekil 8.47: 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün bacaklarından geçen akım değerleri

8.11 Sonuç

Bu bölümde günümüzde en yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün yanında alternatif olarak düşünülen toplam 6 adet farklı T-bağlantı kesme açısına sahip güç transformatörlerinin Ansoft Maxwell yardımı ile benzetimi yapılmıştır.

Transformatörlerdeki çekirdek kayıplarının irdelenmesi için elde edilen ortalama çekirdek kaybı, m³'deki ortalama çekirdek kaybı ve en fazla manyetik akı yoğunlukları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 8.1'de verilmektedir.

Tablo 8.1: Benzetimler neticesinde elde edilen sonuçlar

T-Bağlantı Kesme Açısı	Ortalama Çekirdek Kaybı (W)	m ³ 'deki ortalama Çekirdek Kaybı (W/m ³)	En Fazla Manyetik Akı Yoğunluğu (B)
30-120-30°	104.2259	21889	1.7705
75-90-15°	105.3891	25229	1.9542
15-90-75°	105.4957	25221	1.9541
45-90-45°	106.7479	94014	2.0087
30-60-90°	107.7174	53282	2.0448
90-60-30°	107.7305	52977	2.0487
60-60-60°	108.9477	34670	2.3442

Tablo 8.1 incelendiğinde anlık çekirdek kaybının ortalamasının en düşük olduğu T-bağlantı kesme açısının 30-120-30° derece olduğu görülmektedir. Aynı zamanda günümüzde en yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatör ile diğer alternatif olarak düşünülen transformatörler karşılaştırıldığında çekirdek kaybının 15-90-75°, 75-90-15° ve 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörlerde daha düşük olduğu görülmektedir.

Aynı zamanda incelenen çekirdek kayıp yoğunluğu ve manyetik akı yoğunlukları incelendiğinde çekirdek kayıp ortalamasına paralel sonuçlar gözlenmektedir. Ayrıca simetrik olarak düşünülen 15-90-75° ve 75-90-15°;

30-60-90° ve 90-60-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörlerin sonuçlarının birbirlerine çok yakın olduğu görölmektedir.

Bu bağlamda günümüzde en yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatöre alternatif olarak düşünölen transformatörlerin kullanılması durumunda kayıpta %2-3 arasından azalmalar olacağı görölmektedir.

9. ÇEKİRDEK KESİM İŞLEMİNDEKİ ATIL MALZEME DURUMU

Transformatör üretiminde T-bağlantı kesme açılarının oluşturulabilmesi için bu kısımlara denk gelen silisli saçların belirli bir sıra dahilinde kesim işlemi yapılması gerekmektedir.

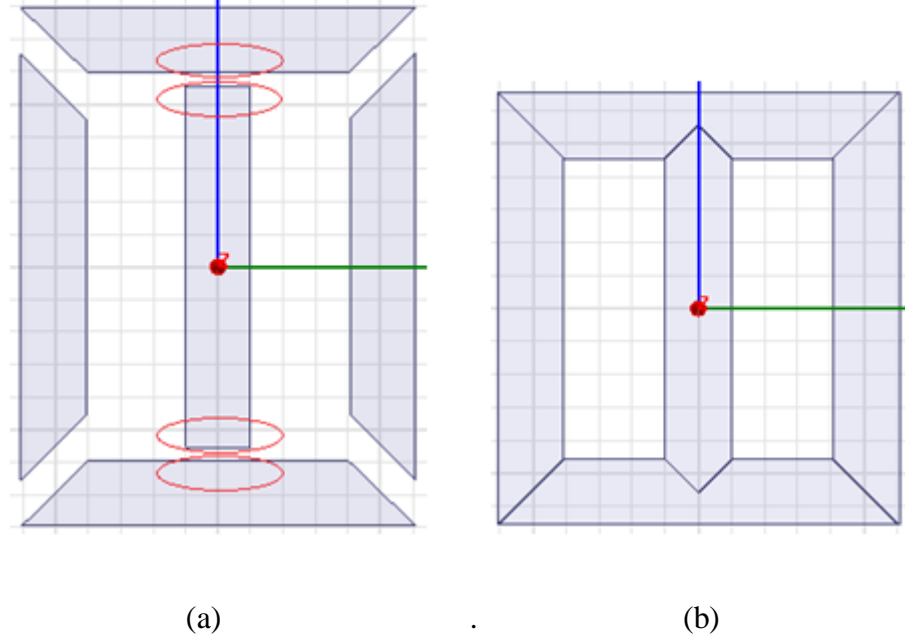
Bu işlem esnasında çekirdek malzemesini oluşturan silisli saçlarda istenmeyen atıl malzemeler oluşmaktadır.

Transformatör üretimi için temin edilen silisli saçlar Şekil 9.1'deki gibi üretim alanlarına gelmektedir. Temin edilen bu silisli saçlar ilk olarak transformatörün büyüklüğüne göre belirlenen genişliklere göre kesilmektedir.



Şekil 9.1: Üretim alanlarındaki silisli saçlar

Genişliklerine göre kesilen bu silisli saçlar transformatörün bağlantı kısımlarının oluşturulabilmesi için çekirdek kesim makinelerinde kesim işlemine tabi tutulurlar.



Şekil 9.2: (a) Kesim işleminden önceki durum (b) Kesim işleminden sonraki durum

Şekil 9.2’de kesim işlemi yapılmamış ve kesim işlemi yapılmış olan transformatör şekilleri görülmektedir.

Şekil 9.2 incelendiğinde, kesim işleminden önceki durumda yuvarlak içine alınan bölgelerde kesim işlemi gerçekleştirilmekte ve kesim sonrasındaki durum elde edilmektedir. Bu işlem sırasında buradan çıkan malzemeler atıl durumda kalmaktadır.

Atıl malzeme durumu incelendiğinde, kesim işlemi rulo halindeki silisli saçlardan yapıldığından orta bacak boyunun atıl malzeme durumunu etkileyen en önemli faktör olduğu görülmektedir.

Bu kapsamda, benzetimi yapılan 7 farklı T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörlerin üst ve alt boyunduruk, orta bacak üst ve alt kısımda kesim işlemi sonrasında oluşan atıl malzeme durumları Tablo 9.1’de verilmiştir.

Tablo 9.1: 7 Farklı T-bağlantı kesme açısı için atıl malzeme durumu

Numune	T-Bağlantı Kesme Açısı	Orta Bacak Uzunluğu (mm)	Toplam Atıl Malzeme Miktarı (mm ²)	1 Numaralı Numuneye Göre % Artış
1	30-120-30°	512,72	5772	0
2	75-90-15°	525,82	2082,108	-63,92
3	15-90-75°	525,82	2082,108	-63,92
4	45-90-45°	555	10000	73,25
5	30-60-90°	570,46	11546	100,03
6	90-60-30°	570,46	11546	100,03
7	60-60-60°	628,2	17320	200,06

Tablo 9.1 incelendiğinde, orta bacak boyunun en az kısa olduğu T-bağlantı kesme açısının 30-120-30° derece olduğu görülmektedir. Ayrıca T-bağlantı kesme açılarında dolaylı oluşan atıl malzeme durumu incelendiğinde ise, en az atıl malzeme oluşan T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün 15-90-75° ve simetrisi olan 75-90-15° derece ardından ise 30-120-30° derece olduğu görülmektedir.

9.1 Sonuç

Bu bölümde transformatör çekirdek malzemesi olan silisli saçları kesim işlemi sırasında ortaya çıkan atıl malzeme durumu incelenmiştir.

Benzetimi yapılan 7 farklı T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörlerin atıl malzeme durumu ve orta bacak uzunlukları incelendiğinde, günümüzde yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına göre alternatif T-bağlantı kesme açılarının kullanılması ile atıl malzeme durumunda %80'e yakın tasarruf elde edileceği görülmektedir.

10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ilk olarak transformatörün çalışma prensibi ve bu bağlamda günümüzde çekirdek tasarım açısından modern transformatör üretim süreci incelenmiştir. Ardından çekirdek kayıpların azaltılabilmesi için yapılan çeşitli çalışmalardan bahsedilmiştir. Tez çalışmasında kullanılacak olan manyetik modellemenin çalışma süreci, avantajları ve dezavantajları da irdelenmiştir. Ardından transformatör kayıpları hakkında literatürde ne gibi çalışmaların yapıldığı ve kayıpların nelerden kaynaklandığı incelenmiştir. Yapılan literatür çalışmaları sonucunda, transformatör çekirdek kayıplarına etki eden önemli faktörlerden birinin T-bağlantı kesme açıları olduğu görülmüş ve bu kayıpların hangi tasarımlarda daha az olduğu irdelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, yukarıda özetle literatür çalışmalarına ek olarak; Maxwell Ansys programında M5-0.23 malzemeden yapılmış çekirdeğe sahip 7 adet farklı T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörlerin benzetimi yapılmıştır. Yapılan benzetimlerde her transformatörün ortalama çekirdek kaybı, anlık çekirdek kaybı ve manyetik akı yoğunlukları incelenmiştir.

Günümüzde en yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün benzetimi ve bu transformatöre karşın literatürde çalışmaları olan ve olmayan çeşitli T-bağlantı kesme açılarına sahip transformatörlerin benzetimi yapılmıştır.

Benzetimi yapılan 7 farklı T-bağlantı kesme açısında sahip transformatörlerin sonuçları karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçlarda günümüzde yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün en az çekirdek kaybına sahip transformatör olmadığı görülmüştür.

Yapılan benzetimler sonucunda, 30-120-30° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatörün en düşük çekirdek kaybına sahip olduğu ve günümüzde en yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatöre alternatif olarak düşünülen transformatörlerin kullanılması durumunda kayıpta %2-3 arasından azalmalar olacağı görülmüştür.

Son olarak, benzetimi yapılan farklı T-bağlantı kesme açılarının kullanımı ile transformatör üretim sürecinde ortaya çıkan silisli saçlardaki atıl malzeme durumları da incelenmiştir. Yine günümüzde, yoğun olarak kullanılan 45-90-45° derece T-bağlantı kesme açısına sahip transformatöre alternatif olarak düşünülen transformatörlerin kullanılması durumunda atıl malzeme durumunda %80'e kadar azalmalar olacağı görülmüştür.

Bu tezde ulaşılan sonuçlar ışığında, günümüzde yoğun olarak kullanılan transformatörlerin üretiminde yapılacak T-bağlantı kesme açısının değiştirilmesi ile kayıpların azaltılacağı, atıl malzeme durumunda azalmalar olacağı ve bu sayede üretici ve tüketicilerin kayıpları en aza indirileceği görülmüştür. Ancak sonuçların doğruluğu tam olarak ispat edilebilmesi için benzetimle elde edilen sonuçlar ile imalat ile elde edilen sonuçların karşılaştırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu tez doğrultusunda ileriki çalışmalarda imal edilecek bu farklı T-bağlantı kesme açılarına sahip transformatörlerin deneysel sonuçları üretim için kesin sonuçlar verecektir.

11. KAYNAKLAR

- [1] Çapanoğlu, N. E., “Ferit Çekirdekli Trafo Tasarımı ve Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).
- [2] Kulkarni, S. V. and Khaparde, S. A., “Transformer Engineering Design & Practice”, *Marcel Dekker Inc.*, New York, 42-44, (2004).
- [3] Hamayer, K. and Belmans, R., “Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices”, *WIT-Press*, Boston (1999).
- [4] Mergen, A. ve Zorlu, S., *Elektrik Makineleri 1 Transformatörler*, Ankara, Birsen Yayınevi, (2003).
- [5] Çanakoğlu, A., Ünsal, A. ve Tunaboylu N., *Elektrik Makinaları*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2012).
- [6] Bharat Heavy Electricals Limited, *Transformers*, Mc Graw Hill, New York, 12-16, (2005).
- [7] Gürdal, O., *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Atlas Yayınevi, İstanbul, (2001).
- [8] Beckley, P., “Electrical Steels for rotating machines”, *Michael Faraday House Six Hills Way*, Stevenage, 37, (2002).
- [9] Bal, G., *Transformatörler*, Seçkin Yayıncılık, Ankara, (2012).
- [10] GEORG Co., “GEORG (Convincing with outstanding solutions) Brochure”, http://www.georg.com/cms/files/pdf/trafoanlagen/trafoanlagen_Imagebroschuere-EN.pdf, 02.04.2015
- [11] Küçük F., “Manyetik Malzemelerde Kayıpların Ölçülmesi ve Modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).

- [12] Loffler, F., Booth, T., PfUtzner, H., Bengtsson, C. and Gramm, K., “Relevance of step-lap joints for magnetic characteristics of transformer cores”, *IEE Proc.-Elects. Power Appl.*, 142, 6, 371-378, (1995).
- [13] Georgilakis, P., *Spotlight on Modern Transformer Design*, Springer-Verlag, London, (2009).
- [14] Özdemir, M., “Kollektörlü Elektrik Makineleri, Transformatörler, Asenkron Elektrik Makineleri ve Uygulamaları”, *Elmakin Tekyay Mühendislik Müşavirlik ve Yayıncılık*, Ankara, (2009).
- [15] Sağ, E., “Transformatörlerin Kurutulması ve İzolasyon Dirençlerinin Ölçülmesi”, *EMO Bilimsel Dergi*, 1, 3, 17-22, (2007).
- [16] Kul, M., Uyaroğlu, Y., Ayasun, S., Vatansever, F., Eminoğlu, U. ve İmal, N., *Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2013)
- [17] Zağlı, M., “Transformatörlerde Enerji Verimliliği ve Çevresel Etkisi, İyileştirme Boyutları”, *EMO Bilimsel Dergi*, 1, 4, 25-29, (2012).
- [18] Gençoğlu, M., “Elektrik Enerjisi İletiminde Kayıpların Azaltılması”, *Kaynak Elektrik*, 128-132, (2004).
- [19] Bilici, M. S., “Transformatörlerde Enerji Verimliliği, Amorf Nüve Kullanımı”, *EMO Bilimsel Dergi*, 2, 4, 75-80, (2012).
- [20] Valkovic, Z., “Influence of Transformer Core Design on Power Losses”, *IEEE Transactions on Magnetics*, 18, 2, 801-804, (1982).
- [21] Haidar, M.A. and Al-Dabbagh, “The influences of T-Joint core design on the no load losses in transformers”, *IEEE Potentials*, 40-46, (2013).
- [22] Valkovic, Z., “Recent Problems of Transformer Core Design”, *Physica Scripta*, 24, 71-74, (1988).

- [23] Soda, N. and Enokizono, M., “Improvement of T-Joint Part Constructions in three phase transformer by using direct loss analysis with E&S model”, *IEEE Trans. Magn.*, 36, 4, 1285-1288, (2000).
- [24] Fenercioğlu, A. ve Tarımer, İ., “Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3D Alan Simülatorü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri”, *Selçuk Üniversitesi Teknik-Online Dergi*, 6, 3, 221-240. (2007)
- [25] Polat, M. ve Kürüm, H., “Sonlu Elemanlar Yönteminin Nesnel Tabanlı Bir Programlama Dili ile Çözümlemesi ve Transformatörün Manyetik Büyüklüklerinin Hesaplanması”, *e-Journal of New World Sciences Academy*, (2011).
- [26] Wikipedia, “Computer-aided design”, http://en.wikipedia.org/wiki/Computer-aided_design, 16 Nisan 2015.
- [27] Başlıgil, H., *Simülasyon Dili (SIMAN 3.5)*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul. (1996).
- [28] Chandrasena, W., McLaren, P.G., Annakkage, U.D., Jayasinghe, R.P., Muthumuni, D. and Dirks, E., “Simulation of hysteresis and eddy current effects in a power transformer”, *Electric Power Systems Research*, 76, 634-641, (2006).
- [29] Maizana, D., “Analyze eddy current loss in the three phase 100kVA transformer core with the mix 60 T joint core”, *Asian J. of Sci. Res.*, 6, 122-128, (2013).
- [30] Demir, A. ve Saraç, Z., “Tek Saç Testi (SST) Yöntemi ile Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi”, *EMO Bilimsel Dergi*, 3, 5, 99-105, (2013).
- [31] Demir, A., “Tek Saç Testi (Single Sheet Tester-SST) Yöntemi İle Nüve Malzemelerin Manyetik Kayıplarının Ölçülmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bülent Ecevit Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2012).
- [32] Mahmoud, S. K., “Yağlı Dağıtım Transformatörlerde Kayıpların Hesaplanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2008).

- [33] Leon, F. de. and Semlyen, A., “A simple representation of dynamic hysteresis losses in power transformers”, *IEEE Trans. Power Deliv*, 10, 315–321, (1995).
- [34] Jiles, D.C. and Atherton, D.L., “Theory of ferromagnetic hysteresis”, *Magnetics IEEE Transactions*, 25, 5, 48–60, (1986).
- [35] Jiles, D.C., “Modelling the effects of eddy current losses on frequency dependent hysteresis in electrically conducting media”, *IEEE Trans. Magnet.*, 30, 4326–4328, (1994).
- [36] Bertotti, G., “Physical interpretation of eddy current losses in ferromagnetic materials I. Theoretical considerations”, *J. Appl. Phys.*, 57, 2110–2117, (1985).
- [37] Zurek, S., “Two-dimensional magnetization problems in electrical steels”, Ph.D. Thesis, *University of Wales*, (2005).
- [38] Öztürk, N. and Çelik, E., “Application Of Genetic Algorithms To Core Loss Coefficient Extraction”, *Progress In Electromagnetics Research M*, 19, 133-146, (2011).
- [39] Ionel, M. D., Popescu, M., Dellinger, S. J., Heideman, R. J., and McGilp, M. I., “On the variation with flux and frequency of the core loss coefficients in electrical machines”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42, 3, 658-667, (2006).
- [40] Salas, R. A. and Pleite, J., “2D nonlinear electrical model of a ferrite inductor which reproduces saturation and power losses in its core”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 44, 401–407, (2014).
- [41] Hajipour, E., Rezaei, P., Vakilian, M. and Ghafouri, M., “Power Transformer No-Load Loss Prediction with FEM Modeling and Building Factor Optimization”, *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 2, 430-438, (2011).
- [42] teNyenhuys, E.G., Mechler, G.F. and Girgis, R.S., “Flux Distribution and Core Loss Calculation for single phase and five limb three phase core designs”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15, 1, 204-209, (2000).

- [43] Suechoey, B., Tadsuan, S., Thammarat, C. and Leelajindakraierk, M., “Estimation of core loss of transformer under non-sinusoidal voltage supply”, *IEEE Int. Conf. On Power Syst. Tech.*, 511-516, (2004).
- [44] Hasegawa, R., “Applications of Amorphous Magnetic Alloys”, *Material Science and Engineering Elsevier*, 92, (2004).
- [45] Frau, J., “Energy Efficiency and Security”, *Endesa distribution*, (2008).
- [46] Yürekten, S., “Trafo Üretiminde İnovasyon Çevreci-Yeşil Trafolar için (Fe Bazlı) Amorf Metal Nüveler”, *3E Electrotech*, 30, (2010).
- [47] Bilici, M. S., “Transformatörlerde Enerji Verimliliği, Amorf Nüve Kullanımı”, *EMO Bilimsel Dergi*, 2, 4, 75-80, (2012).
- [48] Hatakeyama, T. and Onda, K., “Core Loss Estimation of Various Materials Magnetized With the Symmetrical/Asymmetrical Rectangular Voltage” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12, 6628-6635, (2014).
- [49] Olivares-Galvan, J.C., Georgilakis, P.S., Campero-Littlewood, E. and Escarela-Perez, P., “Core lamination selection for distribution transformers based on sensitivity analysis”, *Electrical Engineering*, 95, 33–42, (2013).
- [50] Çınar, M. A., Alboyacı, B. ve Şengül, M., “Dağıtılmış Hava Aralıklarının Transformator Nüve Performansına Etkileri”, *EMO Bilimsel Dergi*, 1, 3, (2010).
- [51] Valkovic, Z. and Rezic, A., “Improvement of transformer core magnetic properties using the step-lap design”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112, 3, 413-415, (1992).
- [52] Olivares, J. C., Liu, Y., Cañedo, J. B., Escarela-Pérez, R., Driesen, J. and Moreno, P., “Reducing Losses in Distribution Transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18, 3, 821-826, (2003).
- [53] Loffler, F., Booth, T., Pfutzner, H., Bengtsson, C. and Gramm, K., “Relevance of step-lap joints for magnetic characteristics of transformer cores”, *IEE Proc.-Elects. Power Appl.*, 142, 6, 371-378, (1995).

- [54] Ilo, A., Pfützner, H. And Nakata, T., “Critical induction - a key quantity for the optimisation of transformer core operation”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 637-640, (2000).
- [56] KARAKAYA, O., “Asenkron Motorlarda Rotor Arıza Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, (2011).
- [57] ANSYS Co. “Maxwell Electromagnetic Field Simulation Software Brochure”, <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-maxwell-brochure-14.0.pdf>, 09 Şubat 2014.