

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

**GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE
ELEKTROMANYETİK ALAN ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

İBRAHİM HALİL TEKE

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

OCAK 2019

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE
ELEKTROMANYETİK ALAN ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

İBRAHİM HALİL TEKE

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

OCAK 2019

Tezin Başığı: Güç Transformatörlerinin Modellenmesi ve Elektromanyetik Alan Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

Tezi Hazırlayan: İbrahim Halil TEKE

Sınav Tarihi: 21. 12. 2018

Yukarıdaki adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik Elektronik Mühendisliğı Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Lütfü SARIBULUT
Adana Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Taner GÖKTAŞ
İnönü Üniversitesi

Prof. Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL
Enstitü Müdürü

Aileme...



ONUR SÖZÜ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “**Güç Transformatörlerinin Modellenmesi ve Elektromanyetik Alan Analizlerinin Gerçekleştirilmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

İbrahim Halil TEKE

İmza



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÜÇ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE ELEKTROMANYETİK ALAN ANALİZLERİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

İbrahim Halil TEKE

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

120 + xii sayfa

2018

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

Enerji iletim ve dağıtım sistemlerin en önemli elemanlarından biri olan transformatörler yüksek maliyet ve uzun zaman alan çalışmalar neticesinde üretilebilmektedir. Üretim sürecindeki bir transformatörün mekaniksel, elektriksel ve manyetiksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Tasarımı yapılacak transformatörlerin hedeflenen değerlerde ve verimlilikte çalışabilmesi için güvenilir bir simulasyon programı ile modellenmesi, test kriterlerinin sağlanması, sonradan ortaya çıkabilecek problemlerin en aza indirgenmesi açısından önemlidir. Gelişen bilgisayar teknikleri sayesinde bir simulasyon programı aracılığıyla tasarım hataları belirlenerek bunların düzeltilmesi mümkün olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında transformatör benzetiminde oldukça yaygın olarak kullanılan ANSYS Maxwell 2D ve 3D paket yazılımı kullanılmıştır. ANSYS Maxwell programı kullanılarak transformatörün bobin ve nüvesindeki manyetik alan yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, manyetik akı çizgileri, akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımının, transformatör kayıplarının incelenmesi amaçlanmıştır. Biri tek fazlı 90 VA, diğeri üç fazlı 15 MVA güç transformatörü olmak üzere iki farklı tip transformatör ele alınmıştır. ANSYS Maxwell programının Sonlu Elemanlar Yönteminden faydalanılarak tasarımlarda ayarlanan süre için transformatörlerin, 2D ve 3D modellerine ait akım, gerilim, manyetik alan değerleri, akım yoğunlukları, kayıplar ve B-H eğrileri simulasyonlar ile incelenmiştir.

Tek fazlı 90 VA transformatörün etiket bilgileri göz önünde bulundurularak elektriksel ve fiziksel değerleri laboratuvar ortamında deneysel çalışmalarla ölçülmüş, bu ölçümlerden yola çıkılarak gerekli parametreler ve değerler hesaplanmıştır. Teorik olarak hesaplanan değerler, deneysel çalışma sonuçları ve ANSYS Maxwell programıyla hesaplanan değerler için karşılaştırma yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçlarının ve programda oluşturulan modele ait sonuçların birbirini teyit ettiği görülmüştür. Üç fazlı 15 MVA transformatör için ise tasarım öncesi değerler kullanılarak program aracılığıyla transformatörün elektromanyetik alan dağılımı nüvede ve sargılarda incelenmiştir. Transformatör modelinde nüve malzemesi olarak, program kütüphanesinde bulunan M530-50A seçilmiştir. Nüve etrafında uygun sargı yapısının kullanılmasıyla transformatörün nüve ve bakır kayıplarının bir miktar daha düşük olabileceği yapılan çalışmalar ile görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: Güç transformatörü, sonlu elemanlar yöntemi, elektromanyetik analiz, transformatör kayıpları.

ABSTRACT

Master Thesis

MODELING OF POWER TRANSFORMERS AND REALISATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD ANALYSIS

İbrahim Halil TEKE

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Electrical-Electronics Engineering
120 + xii pages

2018

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ

Transformer, which is one of the most important elements of energy transmission and distribution systems, is manufactured as a result of high cost and long studies. The mechanical, electrical and magnetic properties of a transformer need to be known before the manufacturing process. To satisfy the test criteria and to minimize the problems that may arise after the manufacturing and in operation it is important to model transformers with a reliable simulation program. By means of developing simulation techniques, design defects can be determined through a simulation program at the beginning, which makes the necessary revisions possible.

In this thesis, to investigate the magnetic field density, magnetic field intensity, magnetic flux lines, current density, vector distribution and losses in the coil and core of the transformer ANSYS Maxwell 2D and 3D packages, which are widely used in transformer simulation were used. Two different types of transformers were considered; one of them was single-phase 90 VA low power transformer and the other was three-phase 15 MVA power transformer. Current, voltage, magnetic field values, current densities, losses and B-H curves of these transformers were investigated by using the Finite Element simulations of ANSYS Maxwell 2D and 3D models.

Electrical and physical properties of the single-phase low power 90 VA transformer were taken into consideration in the laboratory environment and the necessary parameters were calculated by carrying out the measurements. The values which were derived by simple theoretical calculations, experimental measurements results and the ANSYS Maxwell program simulation results were compared. The results of the model formed in the program were verified by the laboratory tests. For three-phase 15 MVA transformer, the electromagnetic field distribution and losses in the cores and windings of the transformer were investigated by using the pre-design values. In the transformer model, M530-50A material was selected from the simulation program library as the core material. It was shown that it was possible to decrease the core and copper losses by using the appropriate winding structure.

KEYWORDS: Power transformers, finite elements method, electromagnetic analysis, transformer losses.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bilgi, birikim ve ilminden her zaman faydalandığım, çalışmalarımın her safhasında yardım ve önerilerini benden eksik etmeyen, beni her zaman cesaretlendiren, insani ve ahlaki değerler ile de kendime örnek edindiğim, değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmam boyunca değerli bilgileriyle beni sabırla yönlendiren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Taner GÖKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam boyunca beni değerli bilgileriyle yönlendiren Dicle Üniversitesi Öğr. Gör. Yıldırım ÖZÜPAK'a teşekkür ederim.

Transformatörler ile ilgili sahada edindiği bilgi-tecrübelerini paylaştan EÜAŞ-Afşin Elbistan B Termik Santralı Elektrik Müdür Yardımcısı Seçkin KIZILTUĞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, ticari bir program olan Ansys Electronic 19.0 ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma İnönü Üniversitesi 639 nolu BAP projesi ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bugünlere gelmemde büyük pay sahibi olan, hayatımın her evresinde maddi ve manevi olarak beni hep destekleyen aileme en içten teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TRANSFORMATÖRLERİN YAPISI, TESTLERİ VE SOĞUTULMASI.....	7
2.1. Transformatörlerin Yapısı.....	7
2.2. Transformatörlerin Sınıflandırılması.....	8
2.3. Transformatörlerin Sargılarının Polaritesi.....	9
2.4. İdeal Transformatörlerin Elektriksel Modeli.....	9
2.5. Transformatörün Normal Çalışma Şartlarında Elektriksel Modeli.....	11
2.5.1 Sargı Dirençlerinin Ölçülmesi.....	12
2.5.2. Boşta Çalışma Testi.....	12
2.5.3 Kısa Devre Testi.....	13
2.5.4. Tam Yük Testi.....	15
2.6. Tek Fazlı Sistemlerde Transformatörlerin Bağlantı Şekilleri.....	16
2.7. Transformatörlerin Soğutulması.....	17
3. TRANSFORMATÖRÜN ANSYS MAXWELL İLE MODELLENMESİ VE TRANSFORMATÖRLERDE KAYIPLAR.....	23
3.1. Nüve Kayıpları.....	28
3.1.1. Girdap Akımı ve Meydana Getirdiği Kayıplar.....	29
3.1.2. Histerizis Eğrisi ve Histerizis Kayıpları.....	30
3.2. Bakır Kayıpları.....	34
3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	35
3.4. Elektrik Makineleri Analizinde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanma Adımları.....	35
3.5. Mühendislik Uygulamalarında Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanım Alanları.....	36
3.6. Maxwell Denklemlerinin Diferansiyel Noktasal Formu.....	37
3.7. ANSYS Maxwell Programının Arayüzü ve Tasarım.....	38
3.7.1. Boyutların 2D veya 3D Olarak Belirlenmesi.....	38
3.7.2. Analiz Çeşidinin Belirlenmesi.....	41
3.7.3. Kullanılacak Malzemelerin Belirlenmesi.....	42
3.8. Analiz İçin Zamanın Ayarlanması.....	47
3.9. Oluşturulan Modelde Çözüm Ağı Ayarları.....	48
3.10. Simulasyon Sonucunda Değerlerin Elde Edilmesi.....	49
4. UYGULAMA VE SİMULASYON.....	51
4.1. Tek Fazlı Transformatörün Analizi.....	51
4.2. Transformatör Parametrelerinin Ölçümü.....	54
4.2.1. Sargı Dirençleri Değerlerinin Tespiti.....	54
4.2.2. Boşta Çalışma Tespiti.....	55
4.2.3. Kısa Devre Testi.....	57
4.2.4. Tam Yük Testi.....	60
4.3. ANSYS Maxwell İle Transformatörün 2D Modeli.....	62
4.3.1. Transformatörün 2D Kısa Devre Test Analizi.....	62
4.3.2. Transformatörün 2D Açık Devre Test Analizi.....	65
4.4. ANSYS Maxwell İle Transformatörün 3D Modeli.....	68
4.4.1. Transformatörün 3D Kısa Devre Test Analizi.....	70

4.4.2.	Transformatörün 3D Açık Devre Test Analizi.....	73
4.5.	Transformatörün Kısa Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri.....	77
4.6.	Transformatörün Açık Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri.....	78
4.7.	Üç Fazlı Güç Transformatörlerinin Ansys Maxwell İle Modellenmesi.....	80
4.7.1.	Üç Fazlı Transformatörün 2D Kısa Devre Test Analizi.....	81
4.7.2.	Üç Fazlı Transformatörün 2D Açık Devre Test Analizi.....	86
4.7.3.	Üç Fazlı Transformatörün 3D Kısa Devre Test Analizi.....	91
4.7.4.	Üç Fazlı Transformatörün 3D Açık Devre Test Analizi.....	95
4.8.	Üç Fazlı Transformatörün Kısa Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri.....	100
4.9.	Üç Fazlı Transformatörün Açık Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri.....	102
4.10.	Tek Faz 90 VA Transformatörün $t=0-200$ ms Zaman Aralığında Kısa Devre Testi.....	105
4.11.	Tek Faz 90 VA Transformatörün $t=0-200$ ms Zaman Aralığında Açık Devre Testi	108
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	112
6.	KAYNAKLAR.....	115
7.	EKLER.....	118
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	119

SİMGELER VE KISALTMALAR

SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
B	Manyetik alan yoğunluğu
E	Elektrik alan yoğunluğu
H	Manyetik alan kuvveti
J	Akım yoğunluğu
I	Akım
N	Sargı sarım sayısı
P	Güç
f	Frekans
μ	Manyetik malzemelerin geçirgenliği
D	Boyut
2D	2 Boyutlu
3D	3 Boyutlu
T	Tesla
R_p	Primer sargısı direnç değeri
R_s	Sekonder sargısı direnç değeri
V	Gerilim
ρ	İletkenin öz direnci
l	İletken telin uzunluğu
A	İletken kesiti
D	İletken çapı
Z	Empedans
V_{faz}	Faz gerilimi
I_{faz}	Faz akımı
$\vec{A}$	Manyetik akı çizgileri vektörü
t	Zaman
Y	Admitans
R_C	Nüve direnci

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kuru tip transformatörün yapısı.....	7
Şekil 2.2.	Tek fazlı yüklü durumdaki a) ideal transformatör b) aynı fazlı transformatör c) zıt fazlı transformatör.....	10
Şekil 2.3.	a) İdeal transformatörün gösterimi b)normal transformatörün şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.4.	Transformatörün eşdeğer elektriksel modeli.....	13
Şekil 2.5.	a) Çekirdek tip transformatör b) mantel tip transformatör.....	16
Şekil 2.6.	Doğal hava soğutmalı (AN) transformatör yapısı.....	18
Şekil 2.7.	Doğal yağ soğutmalı (ON) transformatör yapısı.....	19
Şekil 2.8.	Yağ soğutmalı hava hava zorlamalı (ONAN) transformatör yapısı.....	19
Şekil 2.9.	Doğal yağ ve hava fanı soğutmalı (ONAF) transformatör yapısı.....	19
Şekil 2.10.	Yağ zorlamalı hava zorlamalı soğutmalı (OFAF) transformatör yapısı...	21
Şekil 2.11.	Yağ zorlamalı ve suyu zorlamalı soğutmalı (OFWF) transformatör yapısı.....	21
Şekil 2.12.	Yağ yönlendirmeli hava zorlamalı soğutmalı (ODAF) transformatör yapısı.....	21
Şekil 2.13.	Yağ yönlendirmeli su zorlamalı soğutmalı (ODWF) transformatör yapısı.....	22
Şekil 3.1.	Yüksüz durumdaki tek fazlı iki bacaklı transformatörün çalışma devresi.....	25
Şekil 3.2.	Uyartım olayı a) gerilim, akı ve uyartım akımı b) histerizis eğrisi.....	27
Şekil 3.3.	Yüksüz durumdaki transformatörün uyartım akımı bileşenleri ve endüklenen gerilim fazör diyagramı.....	27
Şekil 3.4.	a) İletkenden geçen AC akımın iletken çevresinde oluştuğu manyetik alan kuvveti b) oluşan manyetik alan kuvveti nedeniyle iletkenin içinde indüklenen girdap akımları c) girdap akımları nedeniyle hacim akımı yoğunluğunun iletken içinde merkezden yüzeye doğru değişimi.....	30
Şekil 3.5.	Manyetik malzemelerin histerizis eğrisi.....	33
Şekil 3.6.	a) ANSYS Maxwell Programın Project arayüzü b) kullanılacak olan uzunluk birimini belirleme.....	39
Şekil 3.7.	a) ANSYS Maxwell programının RMXprt kütüphanelerinden hazır sargı seçme b) program kütüphanesinden rastgele çağırılan sargıların parametreleri c) program kütüphanesinden rastgele çağırılan nüvenin parametreleri d) program kütüphanesinden rastgele çağırılan 3 fazlı transformatör nüvesinin yapısı e) program kütüphanesinden rastgele çağırılan 3 faz sargının transformatör nüvesi ile bir aradayken ki şekli...	41
Şekil 3.8.	Programın ara yüzünde analiz tipi belirleme.....	42
Şekil 3.9.	Transformatör nüvesi için malzeme tanımlama menüsü.....	43
Şekil 3.10.	Program kütüphanesinden uygun malzeme seçme menüsü.....	43
Şekil 3.11.	Nüve için kullanılacak malzemenin seçimi	44
Şekil 3.12.	Kütüphane dışından seçilen B-H eğrisini ve nüve kaybı eğrisini veren dosyalar.....	44
Şekil 3.13.	Nüve malzemesi olarak kullanılan M530-50A adlı malzemenin B-H eğrisi.....	45
Şekil 3.14.	Nüve malzemesi olarak kullanılan a) M530-50A adlı malzemenin nüve kaybı katsayıları b) M530-50A tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kayıpları.....	46
Şekil 3.15.	Modelin içinde bulunduğu a) vakum alanı b) oluşturulan vakum bölgesinin boyutları	47
Şekil 3.16.	Örnekleme zamanına bağlı simulasyon oluşturma zaman ayarları.....	48
Şekil 3.17.	Analize başlamadan önce tıklanan validate ve analyze all seçeneği.....	48

Şekil 3.18.	Simulasyon sonucunda sargılarda oluşan akım, gerilim ve akı grafiklerinin elde edilmesi için izlenen yol.....	49
Şekil 3.19.	ANSYS Maxwell programında model ile ilgili kayıpların seçildiği ekran.....	50
Şekil 4.1.	90 VA güce sahip bir girişli yedi çıkışlı olan transformatör resmi.....	51
Şekil 4.2.	a) Transformatör nüvesinin boyutları b) nüveyi oluşturan ince saçların kalınlığı.....	52
Şekil 4.3.	a) Yüksek gerilim tarafı sargıların derinliği b) yüksek gerilim tarafı sargıların genişliği.....	52
Şekil 4.4.	a) Alçak gerilim tarafı sargıların toplam derinliği b) alçak gerilim tarafı sargıların toplam genişliği.....	52
Şekil 4.5.	a) 754 sarım sayılı sargının 220 V AC besleme uçları b) 8 sarımlı üçüncü sargının uçları	53
Şekil 4.6.	a) Transformatörün giriş sargı uçları 220 V AC şebekeye bağlanmış b) transformatör 220 V AC şebekeye bağlı iken çıkış sargı uçlarından 2.34 V AC ölçülmüş.....	54
Şekil 4.7.	a) Yüksek gerilim sargı uçlarından ölçülen direnç değeri b) alçak gerilim sargı uçlarından ölçülen direnç değeri.....	56
Şekil 4.8.	Boşta çalışma testinde Wattmetre ile ölçülen nüve kaybı.....	56
Şekil 4.9.	Kısa devre testinde Wattmetre ile ölçülen bakır kaybı.....	57
Şekil 4.10.	Tam yük testinde yükün(lambaların) çektiği güç Wattmetre ile ölçülmüştür.....	60
Şekil 4.11.	a-b) Yük olarak kullanılan 1 adet 220V/10 W güce sahip ampül ve etiketi c-d) Yük olarak kullanılan 1 adet 220V/24 W güce sahip ampül ve etiketi.....	61
Şekil 4.12.	Tam yük testinde ampermetrenin ölçtüğü yük akımının değeri ve transformatörün alçak gerilim besleme voltajı.....	61
Şekil 4.13.	ANSYS Maxwell programı ile transformatörün 2D olarak modellenmesi.....	63
Şekil 4.14.	Kısa devre testinde 2D düzlemde oluşan bakır kaybının grafiği.....	63
Şekil 4.15.	Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğunun vektörel dağılımı.....	64
Şekil 4.16.	Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik alan şiddetinin vektörel dağılımı.....	64
Şekil 4.17.	Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik akı çizgilerinin dağılımı.....	65
Şekil 4.18.	Kısa devre testinde 2D düzlemde sargılarda oluşan akım yoğunluğunun vektörel dağılımı.....	65
Şekil 4.19.	Açık devre testinde 2D modelin 50 Hz frekanstaki nüve kaybı grafiği...	66
Şekil 4.20.	Açık devre testinde 2 D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik akı eğrileri dağılımı.....	66
Şekil 4.21.	Açık devre testinde 2D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik alan yoğunluğu vektörel dağılımı.....	67
Şekil 4.22.	Açık devre testinde 2D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik alan şiddetinin vektörel dağılımı.....	67
Şekil 4.23.	Açık devre testinde 2D modelin sargılarında oluşan akım yoğunluğunun vektörel dağılımı.....	68
Şekil 4.24.	Tek fazlı düşük güçlü (90 VA) transformatörün ANSYS Maxwell Programı 3D boyutlu arayüzünde ağırlıklı haldeki görüntüsü.....	69
Şekil 4.25.	Transformatör nüvesinde kullanılan M530-50A malzemesinin B-H eğrisi.....	69
Şekil 4.26.	M530-50A tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kaybı ve kayıp katsayılar.....	69
Şekil 4.27.	Kısa devre testinde 3D boyutunda oluşan bakır kaybının grafiği.....	70

Şekil 4.28.	Kısa devre testinde a) nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	71
Şekil 4.29.	Kısa devre testinde a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı.....	72
Şekil 4.30.	Kısa devre testinde a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı, b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	73
Şekil 4.31.	90 VA gücüne sahip transformatör için açık devre testinde oluşan nüve kaybı grafiği.....	75
Şekil 4.32.	Açık devre testinde a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı.....	75
Şekil 4.33.	Açık devre testinde a) nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı.....	76
Şekil 4.34.	Açık devre testinde a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	77
Şekil 4.35.	Kısa devre testinde üzerinde çalışılan transformatörün harici devre şeması.....	77
Şekil 4.36.	a) 90VA gücüne sahip transformatör kısa devre testinde çıkış tarafı sargı gerilimi, çıkış sargısı endüklenen gerilim ve giriş sargısı endüklenen gerilim grafiği b) 90VA gücüne sahip transformatör kısa devre testinde giriş tarafı sargılarından geçen akım ve çıkış tarafı sargılarından geçen akım grafiği	78
Şekil 4.37.	Açık devre testinde üzerinde çalışılan transformatörün harici devre şeması.....	79
Şekil 4.38.	a) 90VA gücüne sahip transformatör açık devre testinde giriş tarafı sargısında endüklenen gerilimi, giriş sargısının gerilimi, çıkış tarafı sargısında endüklenen gerilim ve giriş sargısı gerilimi grafiği b) 90 VA gücüne sahip transformatör açık devre testinde alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarının akım değerleri grafiği.....	80
Şekil 4.39.	15MVA güce sahip transformatörün ANSYS Maxwell programı ile 3 boyutlu ağı görünümü.....	81
Şekil 4.40.	15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatör için kısa devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan bakır kaybının grafiği ve ortalama değeri	82
Şekil 4.41.	a)Yüksek gerilim sargıları, besleme gerilimlerinin pik değeri b)yüksek gerilim tarafı A fazına ait sargısının besleme gerilimi c) yüksek gerilim tarafı B fazına ait sargısının besleme gerilimi d) yüksek gerilim tarafı C fazına ait sargısının besleme gerilimi.....	83
Şekil 4.42.	2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı.....	84
Şekil 4.43.	2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan kuvveti ve vektörel dağılımı.....	85
Şekil 4.44.	2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğunun değeri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	86
Şekil 4.45.	15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatörün 2D modeline ait açık devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan nüve kaybı grafiği ve ortalama değeri.....	87
Şekil 4.46.	a) Açık devre testinde AG beslemesinin pik değeri b) AG A fazına ait	

	besleme gerilimi değerleri c) AG B fazına ait besleme değerleri d) AG C fazına ait besleme değerleri.....	88
Şekil 4.47.	Açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	89
Şekil 4.48.	Açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı.....	90
Şekil 4.49.	Açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	91
Şekil 4.50.	15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatörün 3D kısa devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan bakır kaybının grafiği ve ortalama değeri	92
Şekil 4.51.	3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı.....	93
Şekil 4.52.	3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan kuvveti ve vektörel dağılımı	94
Şekil 4.53.	3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğunun değeri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	95
Şekil 4.54.	15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatörün 3D modeline ait açık devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan nüve kaybı grafiği ve ortalama değeri.....	96
Şekil 4.55.	3D modelin açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	97
Şekil 4.56.	3D modelin açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı.....	98
Şekil 4.57.	3D modelin açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı.....	99
Şekil 4.58.	15 MVA güce sahip üçgen / yıldız bağlantılı transformatörün kısa devre testi için harici devre şeması.....	100
Şekil 4.59.	15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatör için kısa devre testinde oluşan a) YG sargılarında endüklenen faz gerilimleri b) AG sargılarında endüklenen faz gerilimleri c) YG sargılarında oluşan faz akımları d) AG sargılarında oluşan faz akımları.....	102
Şekil 4.60.	15MVA güce sahip üçgen / yıldız bağlantılı transformatörün açık devre testi için harici devre şeması	103
Şekil 4.61.	Açık devre testinde $t=0-0.1$ s zaman aralığında a) AG sargı uçlarında endüklenen gerilimin değişim grafiği b) YG sargı uçlarında endüklenen gerilimin değişim grafiği c) AG sargılarından geçen faz akımlarının değişim grafiği d) YG sargılarından geçen faz akımlarının değişim grafiği.....	105
Şekil 4.62.	Kısa devre testinde a)YG sargısına ait sargı direnci ve besleme gerilimi değerleri b)analiz için örnekleme zaman aralığı ve simulasyon süresi	106
Şekil 4.63.	Kısa devre testinde $t=0-200$ ms için elde edilen a) bakır kaybı b) YG ve AG sargılarından geçen akım c)sargılarda endüklenen gerilim değerleri.....	108
Şekil 4.64.	Açık devre testinde a)AG sargısına ait sargı direnci ve besleme gerilimi değerleri b)analiz için örnekleme zaman aralığı ve simulasyon süresi	109

Şekil 4.65.	Açık devre testinde $t=0-200$ ms için elde edilen a) bakır kaybı b) YG ve AG sargılarından geçen akım c)sargılarda endüklenen gerilim değerleri.....	111
--------------------	--	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1.	Transformatörlerde soğutucu ortam ve soğutma şekillerinin simgeleri...	23
Çizelge 4.1.	Transformatörün alçak gerilim tarafı sargı dirençlerinin değerleri.....	54
Çizelge 4.2.	YG ve AG sargı dirençlerinin farklı metodlar ile ölçülen/hesaplanan değerleri.....	60
Çizelge 4.3.	Kullanılan tek faz transformatör için verilen, ölçülen ve hesaplanan değerler.....	62
Çizelge 4.4.	15 MVA güce sahip transformatör bilgileri.....	81



1. GİRİŞ

Dünya nüfusu her geçen gün artmakta ve bu artan nüfus beraberinde elektrik enerjisine duyulan ihtiyacı da arttırmaktadır. Diğer enerji kaynakları ile karşılaştırıldığında elektrik enerjisinin verimi yüksek, kullanımı kolay ve temiz bir enerji çeşidi olduğu görülmektedir.

Transformatör, A.C sistemlerde sabit bir frekansta gerilimin seviyesini manyetik indüksiyon yoluyla dönüştürmek için kullanılan ve hareketli parçası bulunmayan statik cihazlardır. Transformatörler düşük gerilim değerlerinde üretilen elektriksel gücün uzun mesafeler boyunca daha yüksek gerilim seviyelerinde iletilmesini ve kullanım noktalarına daha düşük gerilim seviyelerine düşürülerek kullanılmasını sağlayan elektrik makineleridir.

Elektrik enerjisinin santrallerden son kullanım alanlarına iletimi sırasında hatlarda ısı şeklinde güç kaybı ve gerilim düşümü olur. Güç kayıplarını düşürmek için gerilim yükseltilerek akım düşürülür ve bu işlem sırasında transformatörde giriş ve çıkış gücünün eşit olmasına dikkat edilir [1]. Transformatörlerin ortak bacağına etrafında iki veya daha fazla sargı bulunabilir. Transformatörlerde ortak bacağına sarılı olan sargılar arasında doğrudan elektriksel bağlantı yoktur ancak bu sargıların birbirleri ile tek bağlantısı nüveden geçen ortak manyetik akıdır.

Transformatör üreticileri, tasarım aşamasında maliyet optimizasyon tekniklerini kullanarak maliyeti en aza indirerek asgari maliyetten yararlanmaya çalışırlar. Transformatör maliyeti ile performans arasındaki optimum dengeyi sağlamak zor olduğundan buna çözüm olarak geliştirilecek yöntemin tasarım kriterlerine uygun olması gerekir [2, 3].

Transformatörlerde genel olarak nüve kaybı ve bakır kaybı bulunmaktadır. Bu nedenle transformatörler tasarlanırken bu kayıpların göz önünde bulundurulması gerekir. Bu kayıplar içerisinde bazı transformatörler için nüve kaybı yüksek iken bazı transformatörler için bakır kayıpları daha yüksektir. Transformatör yüklü veya yüksüz durumda da olsa nüve kaybı daima vardır. Bakır kaybı transformatör yüklü durumda iken bulunur bundan dolayı güç transformatörleri için demir kaybı düşük olan nüveler kullanılmaya özen gösterilir [4].

Nüve kaybını azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden birincisi, transformatör demir nüvesinin paket şeklinde yapılmasıdır. Nüve tek bir parçadan oluşturulmak yerine üst üste ince silisli saç demetinin bir araya getirilmesi ile girdap akımı kayıplarının azaltılması sağlanır. Diğer bir uygulama ise nüve olarak sıkıştırılmış demir kullanılarak kayıpların azaltılmasıdır [2, 3].

Transformatörlerin tasarım öncesi ön analizlerinin yapılması amacıyla günümüzde bilgisayar simülasyonlarından faydalanılmaktadır. Bunlar arasında ANSYS Maxwell en yaygın kullanılan paket yazılımdır ve bu yazılımın uygulamaları ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. ANSYS Maxwell, düşük frekanslı elektromanyetik alan simülasyonu için geliştirilmiş bir yazılımdır. ANSYS Maxwell Sonlu Elemanlar Yöntemini manyetik ve elektriksel analiz için kullanır. Böylece pratik çalışmalarda yapılan uygulamalardan önce, hızlı ve güvenilir bir analiz sağlar. Bu yazılımın uygulama alanları: elektrik makinaları, transformatörler, bara, busbar, kablo, hat uygulamaları, sargılar, bobinler, orta gerilim elemanları, mıknatıslar vb. olarak sayılabilir. Isı hesapları ve diğer elektromanyetik uygulamalarda 2D ve 3D yapıların tasarımında ANSYS Maxwell kullanılarak karmaşık sistemler analiz edilebilmekte, performans karakteristikleri ve bu performansın değerlendirilmesi yapılabilmektedir.

ANSYS Maxwell programı, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak Maxwell denklemlerini çözebilmektedir. Program gerekli analizleri gerçekleştirir ve bunun için kendinden uyarlamaları ağ oluşturarak en uygun sonlu elemanlar ağını probleme göre geliştirebilmektedir. Programda kullanıcı tarafından oluşturulan ağın sayısı ve sisteme uygunluğu sonlu elemanlar analizinin doğruluğunu etkilemektedir [5].

K. N. Yugendra tarafından yapılan çalışmada [6] ANSYS Maxwell simülasyon platformunda magnetostatik analiz kullanılarak, bobin ve bağlantı noktalarını içeren üç fazlı bir çekirdek tipi transformatörün tasarımı ve modellenmesi ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

S. Vasilija tarafından yapılan çalışmada [7] ANSYS Maxwell'in sonlu elemanlar yöntemi ile 30 MVA gücüne sahip transformatörün 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumundaki nüve kayıpları 50 Hz ve 60 Hz için ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar neticesinde 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumlarda

60 Hz frekans değeri için nüve kaybının 50 Hz frekans değerindeki nüve kaybı değerinden daha yüksek olduğu gösterilmiştir.

M.B.B. Sharifian v.d. tarafından yapılan çalışmada [8] 10 MVA gücüne sahip tek faz kabuk tipi transformatörün ANSYS Maxwell programı ile 2 boyutlu hali baz alınarak ani akım ve kısa devre akımı sebebiyle sargılarında oluşan kuvvetler incelenmiştir. Yapılan bu çalışma ile transformatör sargılarında oluşabilecek ani akımın en yüksek genliğinin değerinin kısa devre akımının anma değerine eşit olduğu görülmüştür. Bununla birlikte ani akımın ve kısa devre akımının transformatör sargılarında ciddi zararlara yol açabileceği vurgulanmıştır. Ayrıca ani akım yüzünden oluşan eksenel kuvvetlerin kısa devre akımının oluşturduğu eksenel kuvvetlerden daha büyük olduğu belirlenmiştir.

T. Orosz v.d. tarafından yapılan çalışmada [9] transformatörlerde ısı artışının hesaplanmasında yaygın olarak kullanılan dört hesaplama yöntemi ile en güncel hesaplama yöntemi olan FEM yöntemi iki pratik örnekle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan transformatörün bir tanesi tek fazlı olup dikdörtgensel yapıda olan Roth'un 2 boyutlu transformatörüdür. Kullanılan diğer transformatör ise 3 fazlı 50 MVA gücüne sahip olup nüvesi M1 kalite elektrikli çelik saclardan meydana gelmiştir. 5 farklı method için bu iki transformatörün performansları irdelenmiştir. Çalışma sonucunda Sonlu Elemanlar Yönteminin en doğru çözümü sağladığı belirlenmiş ayrıca hesaplama yöntemleri içerisinde basitlik ve sadelik açısından Ryder'in yönteminin ön tasarım aşamasında daha iyi bir performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

M. L. Myint ve Y. A. Oo tarafından yapılan çalışmada [10] manyetik devre teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi ile 100 kVA gücünde 11/0.4 kV gerilim değerlerine ve üçgen/ yıldız bağlantı yapısına sahip 3 fazlı, kuru tip dağıtıcı transformatör tasarımı üzerinde çalışılmıştır. Sonlu eleman analizi (FEA) yöntemi ile transformatör tasarımında oluşan akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu gibi ilk varsayım verilerini kontrol etmek için analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda dağıtıcı tip transformatörde 1.8 ile 2.5 A/mm^2 arasında olması gereken akım yoğunluğunun alçak gerilim sargılarında maksimum 2.1 A/mm^2 ve yüksek gerilim sargılarında maksimum 1.8 A/mm^2 değerlerinde olduğu saptanmıştır. Dolayısı ile bir tasarımın daha fazla doğrulanması ve geliştirilmesi için Sonlu Elemanlar Analizi kullanılabildiği gösterilmiştir.

G. H. Chitaliya ve S. K. Joshi tarafından yapılan çalışmada [11] transformatör tasarımı yapılırken sargı empedansı, kaçak endüktans, sıcak nokta sıcaklığı vb parametreler için devre teorisi modelini kullanmanın tam olarak doğru olmayacağı görüşü savunulmuştur. Sonlu Elemanlar Yöntemi ile transformatör tasarımında parametrelerin herhangi bir fiziksel doğrulama olmadan elde edilmesinde çok önemli bir rol oynayabileceği vurgulanmıştır. Yapılmış olan çalışmada yağ soğutmalı ve kuru tip, güç ve dağıtım transformatörleri için bahsedilen devre parametrelerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebileceği ve transformatör içerisinde oluşan hataların belirlenebileceği vurgulanmıştır. Ayrıca Sonlu Elemanlar Yöntemiyle elde edilen sonuçlara göre maliyetin etkili bir şekilde kullanılabileceği ve verimli tasarımların yapılabileceği belirtilmiştir.

N. A. M. Yusoff v.d. yapmış oldukları çalışmada [12] ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak 3 girişli 5 çıkışlı gerçek bir transformatör modeli üzerinde çalışılmıştır. Yazılımın modellemesi uygulanmadan önce gerçek bir transformatör üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu nedenle Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), transformatörün geometrisini belirleme, bağlantı şeması ve çıkış dalga formunu görselleştirmek açısından basit ve net bir şekilde anlaşılabilir bir yaklaşım sağladığı belirtilmiştir. Kapsamlı simulasyon, SEY'in transformatörün elektromanyetik karakteristiğini ve modelini net bir şekilde görselleştirme yeteneğini açıklığa kavuşturmuştur.

D. Maizana yapmış olduğu makale çalışmasında [13] 100 kVA gücüne sahip orta bacağı 60° açı ile T şeklinde birleştirilmiş 3 fazlı dağıtım transformatörü ele alınmıştır. Farklı frekans değerleri için transformatörün yüksüz durumdaki testleri yapılarak kayıplar incelenmiştir. Transformatör nüvesi için Frekans değeri 50 Hz değerinden 55 Hz değerine ve manyetik alan değeri 1 Tesladan 1.5 Tesla değerine çıkarıldığında girdap akımı kaybının % 39.1 oranında yükseldiği görülmüştür. Frekansın arttırılması transformatör nüvesinde güç kaybının artmasına neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca frekansın arttırılması manyetik akının bir kısmının bağlantı noktalarında kaybolmasına buna bağlı olarak da nüvenin orta bacağı ve yan bacaklarında farklı anlarda akının tamamının geçmemesine olduğu savunulmuştur.

Y. Chen ve P. Pillay yazmış oldukları makalede [14] nüve kayıplarının hesaplamasında kullanılan genel olarak 3 alt formülden oluşan geçerli formül tartışılmış ve laminasyon çelik üreticileri tarafından sağlanan kayıp verileri ile karşılaştırılmıştır. Özellikle yüksek akı yoğunluğu ve yüksek frekansta dinamik

histerizis eğrisinin toplam kayıp hesaplamasında önmeli rol oynadığı ve kayıp katsayılarının frekans ile değişmesi gerektiği görülmüştür. Katsayı değişikliklerini temsil etmek için modifiye edilmiş yeni bir formül önerilmiştir.

K. Dawood v.d. yapmış oldukları çalışmada [15] transformatörün yüksüz durumdaki kayıplarının hesaplanması için sayısal yöntemlerin farklı modellerinin doğruluğu araştırmıştır. Yüksüz durumdaki kayıplar analitik metod ve Sonlu Elemanlar Analizi yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar analizi ile aynı transformatör için 3 boyutlu tam model, 2 boyutlu tam model ve 2 boyutlu yarım model analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar test sonuçları ile karşılaştırılmış ve 3 boyutlu modellerin 2 boyutlu modellere göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. 2 boyutlu model kullanmanın avantajı simulasyon süresinin çok daha kısa olmasıdır. Ayrıca 2 boyutlu tam modelin simulasyon süresi 2 boyutlu yarım modelin süresinin 2 katı olduğu görülmüştür.

A. Karademir ve M. K. Eker tarafından yapılan çalışmada [16] Ansoft Maxwell analiz programını kullanarak yapmış oldukları makale çalışmasında 7 farklı T-bağlantı formuna (sahip aynı nüve malzemesi kullanılan transformatör için akı yoğunluğu ve çekirdek kayıpları analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kayıpların en az 30° - 120° - 30° 'lik model ve atıl malzemenin en az olduğu 15° - 90° - 75° 'lik model olduğu görülmüştür. Bundan dolayı orta bacak boyunun boyunduruklara uzanan kısmının mümkün olduğunca kısaltılması nüve kaybının ve atıl malzemenin daha az olacağı sonucunu ortaya koymuşlardır.

Bu tez çalışmasında iki farklı tip transformatörün 2 boyutlu ve 3 boyutlu modelinin elektromanyetik alan dağılımını analiz etmek, nüve kayıplarını ve bakır kayıplarını hesaplanmak için ticari bir program olan ANSYS Maxwell kullanılmıştır. ANSYS Maxwell 2D ve 3D paket yazılımı kullanılarak elde edilen sonuçların teorik hesaplar ve deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Programının kütüphanelerinden yararlanılarak bu çalışma kapsamında:

1. Transformatör nüvesinde kullanılan lamine haldeki sacların kalınlığının ve çalışma frekansının program üzerinde belirlenmesi sonucu B-H ve B-P değerleri meydana getirilmiştir. ANSYS Maxwell modeli tanımlanarak, 2D ve 3D manyetik alan analizinden sonra elde edilen alan yoğunluk değerine

göre toplam çekirdek kayıpları, bakır kayıpları belirlenmiş ve geçici rejim analizinde zamana göre değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir.

2. ANSYS ortamında güç transformatörlerinin sargılarında ve nüvesinde oluşan elektromanyetik alan dağılımı 2D ve 3D modellenerek analiz edilmiştir. Böylece transformatörün nüve ve sargıların tasarımları gerçekleştirilerek 2D ve 3D modelleme ile transformatörün performansı tasarım öncesinde izlenebilmiştir.
3. Isıl analizler kapsamında sargılarda ve nüvede ısıdan dolayı meydana gelen kayıpların azaltılması, transformatörlerin güvenli ve verimli çalışabilmesi için transformatörlerin soğutma yöntemleri araştırılmıştır.

Literatur özeti ve yapılan çalışmaların özetlendiği giriş bölümünden sonra ikinci bölümde transformatörlerin yapısı, çalışma prensibi, çeşitleri, bağlantı şekilleri ve soğutma sınıflarından bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde transformatör kayıpları, kayıplara neden olan parametreler ve transformatör nüvelerinde kullanılan manyetik malzemelerin özellikleri ve standartları üzerinde durulmuştur. Ayrıca transformatör tasarımının ANSYS Maxwell yazılımı ile modellenmesi ve analizi üzerinde durulmuştur. Ayrıca ANSYS Maxwell programının kullandığı SEY ve avantajları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde ANSYS Maxwell kullanılarak, tek fazlı düşük güçlü, 90VA güce sahip, transformatörün 2D ve 3D modeli incelenmiştir. Laboratuvar çalışmasında elde edilen değerler ile programda hesaplama sonucu oluşan değerler karşılaştırılmıştır. Ayrıca 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı bir transformatörün etiket değerleri ve bazı elektriksel değerleri göz önünde bulundurulmuştur. ANSYS Maxwell programı ile transformatörün 2D ve 3D boyutlarında analizi gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde ise bu tez çalışması sürecinde elde edilen ölçümler ve simulasyon sonuçları baz alınarak değerlendirmelerde bulunulmuştur. Bu sayede tasarlanacak yeni bir transformatörde kullanılacak olan nüve, sargı ve güç değerleri ile ilgili bazı çıkarımların yapılabilmesi sağlanmıştır.

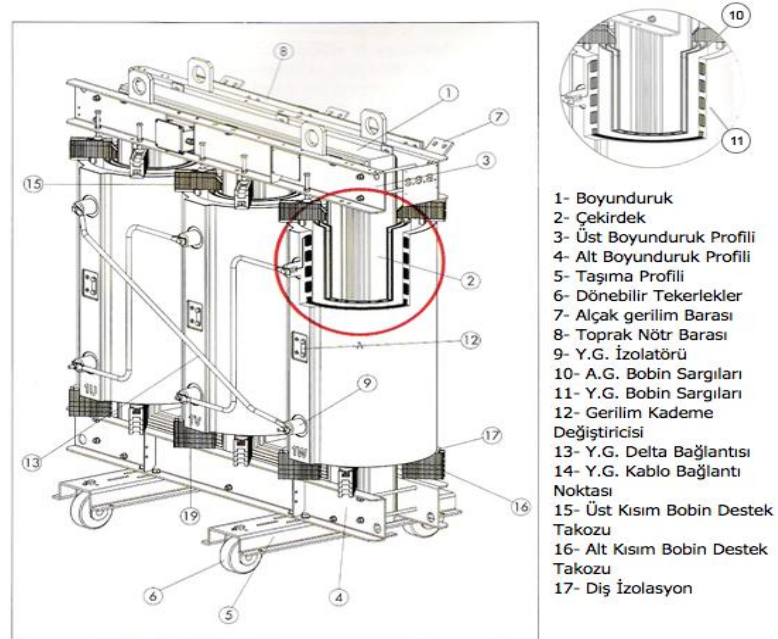
2. TRANSFORMATÖRLERİN YAPISI, TESTLERİ VE SOĞUTULMASI

Bu bölümde transformatör tasarımı için nüve ve sargılarda kullanılan malzemeler için dikkat edilmesi gereken parametreler, transformatörlerin açık devre-kısa devre testi, tam yük testi ve transformatörlerin soğutulması için geliştirilen yöntemler üzerinde durulmuştur. Bu tez çalışmasında laboratuarda kullanılan; düşük maliyetli, kullanımı kolay ve tek fazlı 90 VA güce sahip devre transformatörü ile ilgili testler yapılmıştır. Bu testler; açık devre, kısa devre ve tam yük testi olarak sıralanabilir.

Güç elektriği sistemlerini oluşturan devre bileşenleri göz önünde bulundurulduğunda genellikle içlerinde boyut, ağırlık ve maliyet olarak en yüksek değerlere sahip olan cihazlar transformatörlerdir. Bu durum transformatörlerin tasarımında devre parametrelerinin ve fiziksel değerlerin optimum değerlerde tutulmasını zorunlu kılmaktadır.

2.1. Transformatörlerin Yapısı

Transformatörler genel olarak nüve, sargılar, izolasyonu sağlayan malzemeler ve bunları kaplayan bir tanktan oluşur. Transformatörde izolasyon malzemesi olarak bazı plastik maddeler, pres bant, kâğıt, pamuk reçine, ağaç takozlar, mika, çeşitli yağlar ve pertinaks gibi yalıtkan malzemeler kullanılır [17].



Şekil 2.1. Kuru tip transformatörün yapısı [18]

Transformatör nüvesi üzerinde oluşan girdap akımını azaltmak için nüve tek parça seçilmez bunun yerine özgül direnci yüksek olan silisyum yapılı sac levhalardan meydana getirilir. Güç transformatörlerin sargıları ince yapılı saclardan meydana getirilmiştir. Sargılar demir gövde adı verilen kapaklı manyetik bir devre ile yalıtılmış iletkenlerden sarılıp demir gövde üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelmiştir. Primer ve sekonder sargılarının elektriksel olarak bir bağlantısı yoktur. Transformatörlerde sargılar birbirlerinden ve nüveden yalıtılmış şekilde üretilir.

Hem tek fazlı transformatörde hem de üç fazlı transformatörde eğer yüksek gerilim ve alçak gerilim sargıları ortak nüve bacağına kullanıyorsa ve nüvenin yeterli uzunluğu yoksa alçak gerilim sargısı çekirdek üzerine, yüksek gerilim sargısı ise alçak gerilim sargısının üstüne yerleştirilirler. Her iki sargı arasında soğutma amacı ile hava boşluğu bırakılır. Eğer nüve yeterli uzunluğa sahipse yine ortak bacak kullanılarak sargılar nüvenin etrafına yerleştirilir.

Üç Fazlı transformatörler, aralarında faz farkı olan giriş tarafında üç adet sargı ve çıkış tarafında üç adet sargıdan oluşur. Nadir de olsa üç fazlı transformatör yerine üç adet tek fazlı transformatör de kullanılır. Üç adet tek fazlı transformatör kullanımının en büyük avantajı faz sargılarından birinde bir arıza olduğu zaman sadece o faza ait transformatörün onarılmak için devre dışı bırakılması ve diğer iki transformatörün çalışmasına devam etmesidir. Ancak bu yöntemin dezavantajı fazla materyal gerektirmesi ve maliyeti arttırmasıdır. Nüve yapısının seçiminde ve sargı şeklinin belirlenmesinde dikkat edilen en önemli nokta transformatördeki demir ve bakır kayıplarının azaltılmasıdır.

2.2. Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatör boyutları ile ilgili, çok fazla çeşide sahip olan elektrik devre elemanıdır. Genel anlamda transformatörler şu şekilde sınıflandırılabilir.

- **Faz sayısı:** Tek fazlı transformatör, üç fazlı transformatör veya çok fazlı transformatör.
- **Kullanım amacı:** Yükseltici transformatör, düşürücü transformatör.
- **Ölçüm amacı:** Akım transformatörü, gerilim transformatörü, izolasyon traformatörü vb.
- **Gerilim değeri:** Alçak gerilim transformatörü, orta gerilim transformatörü,

yüksek gerilim transformatörü

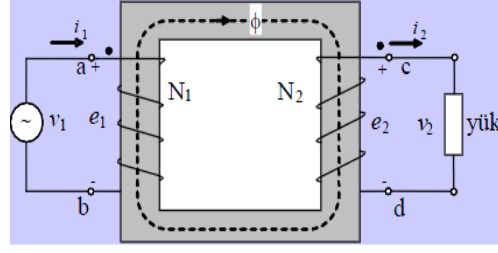
- **Soğutma malzemelerine göre:** Su soğutmalı, yağ soğutmalı, hava (kuru tip) soğutmalı ve ya bunlardan herhangi iki soğutma çeşidinin kullanılmasına göre [17].
- **Sargı tipine göre:** Silindirik sargı ve dilimli sargılı transformatörler.
- **Çalışma Ortamına:** Platform tipi, iç mekan tipi ve su altı tipi olarak sınıflandırılmaktadır.
- **Nüve tipine:** Nüve tip transformatörler üç grupta toplanır; dağıtıcı tip, çekirdek tip ve mantel tipidir. Çekirdek tipi transformatörlerde sargılar manyetik devreyi saracak şekilde, birincil ve ikincil sargıların yarıları iki farklı bacak üzerine sarılır. Mantel tipi transformatörlerde ise birincil ve ikincil sargılarının tamamı orta bacağa sarılmakta bu durumda sağ sol bacaklar boş bırakılmaktadır. Dağıtılmış tip nüveli transformatörlerde kaçak akılar çok küçük değerdedir ve bundan dolayı boşta çalışma akımı çok azdır ayrıca iç gerilim düşümleri az olup çoğunlukla çok küçük güçlü özel tip transformatörlerde kullanılır. Bu tez çalışmasında tek faz düşük güçlü mantel tip transformatör üzerinde laboratuvar ortamında ölçümler gerçekleştirilmiştir.

2.3. Transformatör Sargılarının Polaritesi

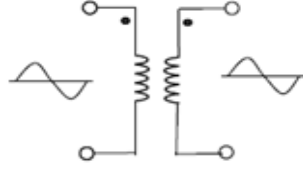
Birincil sargılara (primer) uygulanan AC gerilimin meydana getirdiği manyetik alanın yönü ve şiddeti her an değişir. Bu manyetik alan, üzerinde sekonder sargısının da bulunduğu manyetik demir nüvesinin üzerinde devresini tamamlar ve böylece sekonder sargılarda alternatif bir gerilim endüklenir. Noktalı terminalin bir başka ifade ile ucun potansiyeli noktasız terminalden daha yüksektir. İdeal transformatörde primer sargı gerilimi ile endüklenen gerilimin polariteleri dikkate alındığında, Nokta ile işaretlenmiş uçların gerilimleri aynı fazdadırlar.

2.4. İdeal Transformatörlerin Elektriksel Modeli

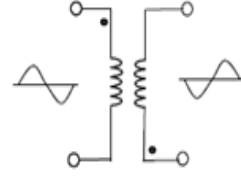
İdeal transformatör giriş ve çıkış sargılarına sahip kayıpsız transformatördür. İdeal bir transformatörde giriş akımı ile çıkış akımı ve giriş gerilimi ile çıkış gerilimi arasındaki ilişki Şekil 2.3.a ve Şekil 2.3.b' de gösterildiği gibidir.



a)

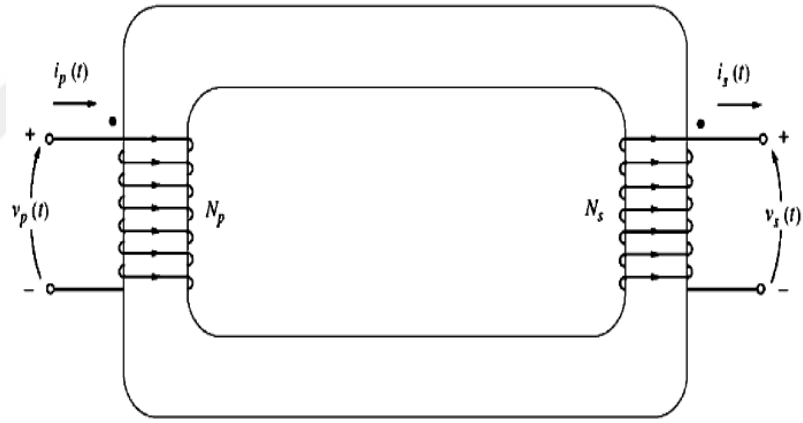


b)

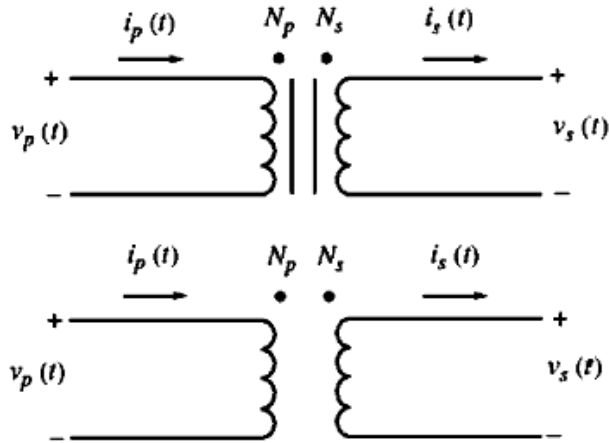


c)

Şekil 2. 2. Tek fazlı yüklü durumdaki **a)** ideal transformatör **b)** aynı fazlı transformatör **c)** zıt fazlı transformatör [19].



a)



Şekil 2.3.a) İdeal transformatörün gösterimi **b)** normal transformatörün şematik gösterimi[1]

Transformatör primer tarafına giren akım $i_{p(t)}$ ile transformatörün sekonder tarafından çıkan akım $i_{s(t)}$ arasındaki ilişki, güç korunumu denkleminde

$$P(t) = v_p(t)i_p(t) = v_s(t)i_s(t) \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir, fazör gösterimde akım gerilim büyüklüklerinin ilişkisi ise

$$\frac{\mathbf{V}_p}{\mathbf{V}_s} = \frac{\mathbf{I}_s}{\mathbf{I}_p} = \frac{N_H}{N_L} = a \quad (2.2)$$

olarak ifade edilebilir. Tek fazlı bir ideal transformatörde giriş gerilimi $\mathbf{V}_p$ ile çıkış gerilimi $\mathbf{V}_s$ arasında faz farkı yoktur. Benzer şekilde giriş akımı $\mathbf{I}_p$ ile çıkış akımı $\mathbf{I}_s$ arasında bir faz farkı yoktur. Dolayısıyla ideal bir transformatörde sargılar arasındaki oran akım ve gerilim değerlerini doğrudan etkiler [1].

2.5. Transformatörün Normal Çalışma Şartlarında Elektriksel Modeli

Transformatörde meydana gelen kayıplar, transformatörlerin gerçek modellerinde hesaba katılmak zorundadır. Böyle bir modelin oluşturulmasında nüve kayıpları (histerizis kayıpları ve girdap akım kayıpları), bakır kayıpları ve kaçak akılar dikkate alınmalıdır. Bu kriterlere dikkat edildiğinde transformatörün eşdeğer elektriksel modeli parametrelerinin bulunması için çeşitli ölçümler ve testler yapılmaktadır. Transformatörde eşdeğer elektriksel modeli Şekil 2.4'te verildiği gibi olup bu devrenin parametreleri;

R_p : Primer sargı direnci

X_p : Primer sargı reaktansı

R_c : Nüve Direnci

X_c : Nüve reaktansı

R_s : Sekonder sargı direnci

X_s : Sekonder sargı reaktansı olarak ifade edilmektedir.

Transformatörde elektriksel devrenin parametrelerin hesaplanması için aşağıda belirtilen yöntemler ile ölçüm ve hesaplamalar yapılmaktadır.

2.5.1. Sargı Dirençlerinin Ölçülmesi

Endüstride sargı dirençlerinin ölçümü için Wheatstone ve Kelvin köprü devreleri kullanılır. Labaratuvar ortamında ise sargı dirençleri iki yol ile ölçülebilir; doğrudan

Ohmmetre kullanarak veya nominal değerlerin altında DC akım uygulanarak.

1- Ohmmetre kullanılması durumunda transformatörün sekonder uçları açık iken primer sargı uçlarından ölçülen primer sargı direnci R_p ve primer sargı uçları açık iken sekonder sargı uçlarından ölçülen direnç sekonder sargı direnci R_s dir.

2- Çok küçük mertebelerdeki sargı dirençlerinin değeri laboratuvar imkanlarında Ohmmetre ile hassas olarak ölçülemez bunu yerine primer ve sekonder sargı uçlarına sırasıyla değişken DC güç kaynağı kullanılarak nominal akım değerlerinin yarısı kadar DC akım transformatör sargı uçlarına uygulanır. Ölçülen DC gerilim ve akım kullanılarak sargı dirençleri bulunur.

2.5.2. Boşta Çalışma Testi

Bu test ile amaç transformatör kayıplarının ve mıknatıslanma endüktansının ölçülmesidir. Bu test yapılırken transformatörün yüksek gerilim sargı uçları açık devre edilir ve alçak gerilim sargı uçlarına nominal gerilim uygulanır. Transformatör boşta olduğu için, giriş akımının tamamı transformatörün uyartım kolu üzerinden akar. Sargı direnci ve endüktansı R_c ve L_M ile kıyas edildiğinde çok çok küçüktür. Kirchof Gerilim Kanunu göz önünde bulundurulduğunda uygulanan gerilimin neredeyse tamamı uyartım kolu üzerine düşer. Transformatör yüksüzken (boşta iken) açığa çıkan ısı gücü sadece nüve kayıplarından oluşur. Testte nominal gerilim değerinde gerilim uygulandığından dolayı transformatör nüvesinde (çekirdeğinde) nominal manyetik akı mevcut olup nüve kayıpları nominal yükteki nüve kayıplarına eşittir. Bu test esnasında transformatörün giriş akımı, giriş gerilimi ve giriş gücü ölçülür. Uyartım kolunda bulunan direnç ve empedansın (R_c ve X_M) değerlerini bulmanın en kolay yolu uyartım kolunun admittansına bakmaktır. Toplam uyartım admittansı vektörel olarak:

$$\mathbf{Y}_{eL} = \frac{1}{R_{CL}} + \frac{1}{jX_{ML}} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir toplam uyartım admittansı alçak gerilim tarafına göre büyüklük olarak, boşta çalışma akım ve gerilim değerlerinde aşağıdaki eşitlikler ile hesaplanabilmektedir.

$$|\mathbf{Y}_{eL}| = \frac{|i_{OC}|}{|v_{OC}|} \quad (2.4)$$

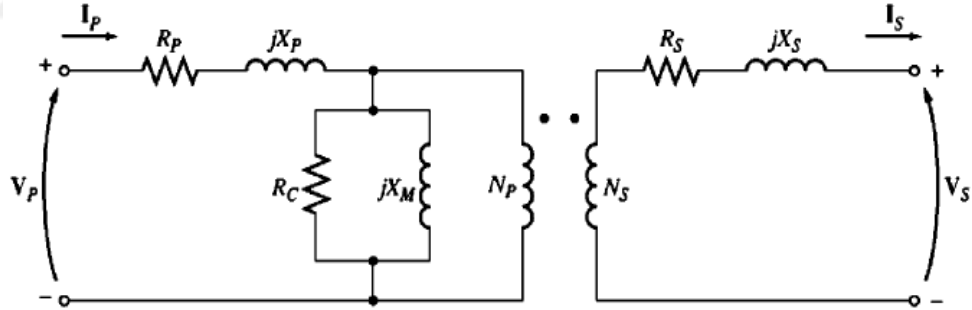
$$\text{Güç faktörü} = \cos \theta = \frac{P_{OC}}{|v_{OC}| |i_{OC}|} \quad (2.5)$$

$$\text{Güç faktörü açısı} = \theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{OC}}{|v_{OC}| |i_{OC}|} \right) \quad (2.6)$$

admittansın vektörel olarak değeri bulunurken; akım gerilimden vektörel olarak geride olduğu için admittansın açısı negatiftir, bu durum

$$\mathbf{Y}_{eL} = \frac{i_{OC}}{v_{OC}} \angle (-\theta) \quad (2.7)$$

eşitliği ile ifade edilir, bu tez çalışmasında, boşa çalışma testi için, laboratuvarda kullanılan tek fazlı düşük güçlü (90 VA) transformatör kullanılmıştır. Yukarıdaki formüllerde belirtilen L indeksi ölçülen değerlerin düşük gerilim tarafına göre olduğunu belirtmektedir.



Şekil 2. 4. Transformatör eşdeğer elektriksel modeli [1]

2.5.3. Kısa Devre Testi

Bu testin yapılmasındaki amaç transformatördeki bakır kayıplarının ve küçük endüktansların ölçülmesidir. Kısa devre testinde transformatörün alçak gerilim sargı uçları kısa devre edilir ve yüksek gerilim uçlarına değişken bir gerilim kaynağı yardımı ile nominal hat akımı uygulanır. Bir başka ifade ile yüksek gerilim sargı uçlarından nominal hat akımı geçene kadar gerilim yükseltilir. Güç

transformatörlerinde bu gerilim U_K ile ifade edilir ve genellikle nominal gerilimin %8'i ile %15'i arasında değişir. Giriş gerilimi kısa devre esnasında çok küçük olacağı için transformatörün uyarım kolundan ihmal edilecek büyüklükte bir akım akar, böylece uygulanan gerilimin neredeyse tümü Kirchof Voltaj Kanunu uygulandığında sargı dirençleri ve endüktansları üzerine düşer. Uyarım kolu üzerinden geçen akım çok küçük miktarda olduğu için nüvede dolaşan akı da düşüktür; dolayısıyla nüve kayıpları normal gerilim seviyesindeki kayıplara göre ihmal edilebilir düzeydedir. Bu testte oluşan güç kaybı sadece bakır kayıplarından oluşur. Test esnasında nominal akım değerinde akım uygulandığından bakır kayıpları nominal yükteki bakır kayıplarına eşittir. Bu tez çalışmasında üzerinde çalışılan tek fazlı transformatörünün giriş akımı, giriş gerilimi ve giriş gücü ölçülmüştür. Transformatörün yüksek gerilim tarafına göre seri empedansların büyüklüğü:

$$|Z_{SEH}| = \frac{|v_{SC}|}{|i_{SC}|} \quad (2.8)$$

eşitliği ile bulunabilir, bu durumda güç faktörü ve güç faktörü açısı

$$\text{Güç faktörü} = \cos \theta = \frac{P_{SC}}{|v_{SC}| |i_{SC}|} \quad (2.9)$$

$$\text{Güç faktörü açısı} = \theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{SC}}{|v_{SC}| |i_{SC}|} \right) \quad (2.10)$$

eşitlikleri ile bulunur. Seri empedansın vektörel olarak değeri bulunurken; akım gerilimden vektörel olarak geride olduğu için empedansın açısı pozitiftir. Transformatörün elektriksel modelinin toplam seri empedansı vektörel olarak Z_{SEH} , (2.12) ve (2.13) numaralı eşitlikler ile bulunabilir.

$$Z_{SEH} = \frac{v_{SC}}{i_{SC}} \angle (\theta) \quad (2.11)$$

$$Z_{SEH} = R_{ES} + jX_{ESH} \quad (2.12)$$

$$Z_{SEH} = (R_H + a^2 R_L) + j(X_H + a^2 X_L) \quad (2.13)$$

N_H :Yüksek gerilim sargı sayısı

N_L :Alçak gerilim sargı sayısı

R_H : Yüksek gerilim sargı direnci

R_L : Alçak gerilim sargı direnci

X_H : Yüksek gerilim kaçak reaktansı

X_L : Alçak gerilim kaçak reaktansı

genel olarak eşdeğer devre reaktans (2.14) eşitliği ile hesaplanabilmektedir.

$$X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{ESH} \quad (2.14)$$

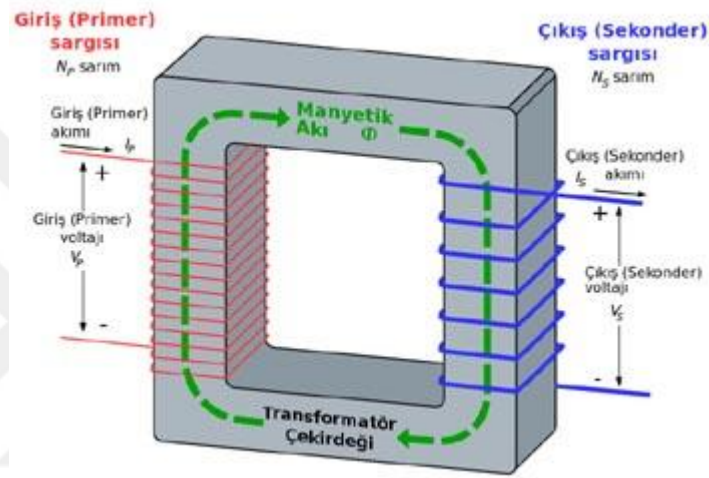
2.5.4. Tam Yük Testi

Labaratuvar ortamında transformatörün nominal değerde yüklenmesi halinde gerilim, akım ve güç ölçümleri yapılarak transformatörün gerçek özellikleri ve özellikle verimi hesaplanabilir. Bu işlemleri gerçekleştirebilmek için, transformatörün primer tarafına nominal giriş gerilimi uygulanarak sekondere bağlanan değişken yükün direnç değeri nominal çıkış akımı elde edilene kadar değiştirilir. Primer akımı, gerilimi ve güç değerleri ile sekonder akım ve gerilim değerleri ölçülür. Ölçülen değerlerin yardımı ile transformatörün verimi ve gerilim regülasyonu hesaplanabilir.

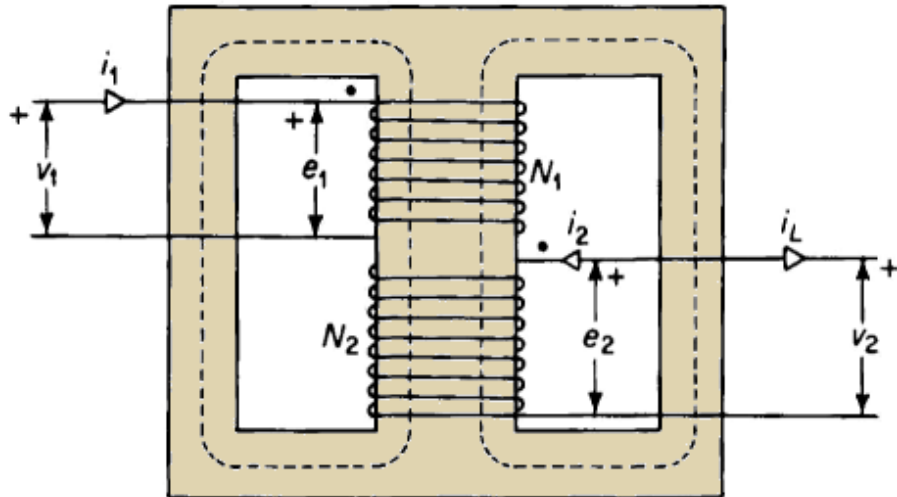
2.6. Tek Fazlı Sistemlerde Transformatörlerin Bağlantı Şekilleri

Çekirdek Tip Transformatörler: Çekirdek tipi transformatörlerde, sargı iki bacağına yerleştirilir, giriş tarafında bulunan sargı uçlarının alternatif bir gerilim ile beslenmesi sonucu değişken manyetik alan ve dolayısıyla manyetik akı oluşur. Nüvenin içerisinde dolaşan manyetik akı sayesinde çıkış tarafında bir gerilim indüklenmiş olur. Bu transformatör tipinde manyetik nüvenin kesiti her yerde aynı olup nüve tek gözlüdür. Çekirdek tipi nüvelerin etrafındaki sargıların yalıtımı kolay olduğu için bu nüve çoğunlukla büyük güçlü ve yüksek gerilimli transformatörlerde tercih edilir. Çekirdek tipi transformatörlerin sadece bir manyetik akı yolu vardır.

Mantel Tip Transformatörler: Mantel tipi transformatörlerde, sarımlar, nüvenin orta bacağına konumlandırılırken, diğer bacaklar, mekanik destek olarak kullanılır. Bu tip nüvenin yan bacaklarının kesiti birbirlerine eşit ve orta bacağın kesitinin yarısı kadardır. Mantel tipi nüve alçak gerilimli ve düşük güçlü transformatörlerde kullanılır. Mantel tipi transformatörlerin iki manyetik akı yolu vardır. Her iki transformatör çeşidinde giriş ve çıkış sargılarında oluşan akım ve gerilim değerleri kendi aralarında aynı fazdadır. Çekirdek tip ve mantel tip transformatörlerin gösterimi Şekil 2.5.a ve Şekil 2.5.b’de gösterildiği gibidir.



a)



b)

Şekil 2.5. a) Çekirdek tip transformatör b) kabuk (mantel) tip transformatör[20]

2.7. Transformatörlerin Soğutulması

Transformatörler devrede çalışırken sargılarda oluşan bakır kayıpları, nüvede oluşan histerizis ve girdap akımı kayıpları ısı şeklinde ortaya çıkar ve bu durum belli bir zaman sonra transformatörlerin sargı ve nüvesinde sıcaklık değerlerinin yükselmesine neden olur.

Elektrik makinalarında soğutma işlemi doğrudan ve dolaylı yollarla gerçekleştirilmektedir. Doğrudan soğutmada, ortamdaki hava, ısı kaynakları (nüve ve üzerindeki sargı) ile doğrudan temastadır. Dolaylı soğutmada ısı kaybı ya tamamen kapalı bir çerçeveden iletim (ve çerçeve yüzeyinden ortam havasına konveksiyon ile) veya bir ısı eşanjörü ile beraber çalışan dahili soğutma devresi ile [17]. Transformatörlerde yükselen ısıyı düşürmek için çeşitli soğutma yöntemleri mevcuttur, bu yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

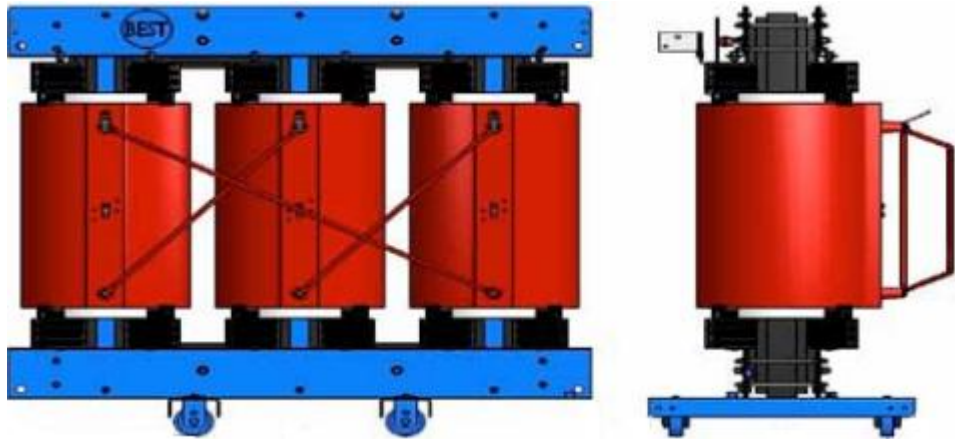
Doğal Hava Soğutmalı: Özel bir vantilasyon sistemi yoktur ve bu tür transformatörler çoğu kez açık muhafaza tipindedir. Bu tür transformatörlerin etiketlerinde yer alan AN ifadesi İngilizce ‘Air Natural’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Isınma problemleri çok şiddetli olmadığından düşük güçlü transformatörler bu yöntem ile kendiliğinden soğutulmaktadır [21]. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.6’da verilmiştir.

Doğal Yağ Soğutmalı: Bu tip soğutma yöntemi yağın sirkulasyonu ile gerçekleştirilir. Bu tür transformatörlerin etiketlerinde yer alan ON ifadesi İngilizce ‘Oil Natural’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Yağın sirkulasyonu harici pompa vb. sistemlerle gerçekleştirilir. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.7’de verilmiştir.

Doğal Hava ve Doğal Yağ Soğutmalı: Bu en basit, kolay ve yaygın olan trafo soğutma sisteminde yağ dolaşımı ve hava teması doğal olarak gerçekleşir. Bu tür transformatörlerin etiketlerinde yer alan ONAN ifadesi İngilizce ‘Oil Natural Air Natural’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Transformatörün nüve ve sargılarının ürettiği ısı ile yağ molekülleri ısınarak konveksiyonel olarak kazanda yükselir ve bu esnada ısınmış olan yağ molekülleri; dalga duvarları veya radyatörlerin içerisinden geçerek ısılarını doğal iletim, yayılım ve ışıma metodu ile atmosfere ileterek soğurlar [21]. Burada sıcak yağın doğal konveksiyonel akışı

soğutma için kullanılmaktadır [21]. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.8’de verilmiştir.

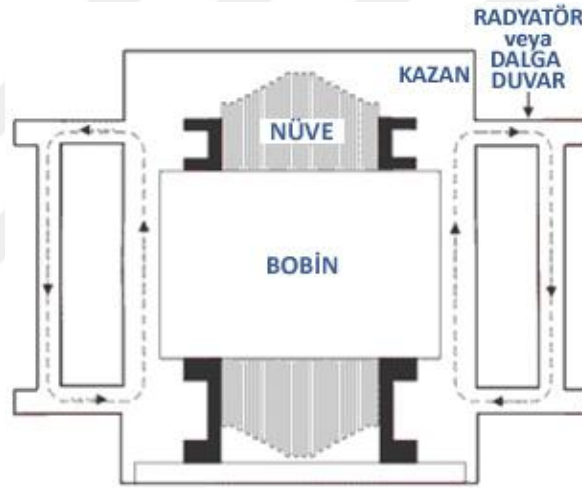
Doğal Yağ Hava Fanı Soğutmalı: Bu soğutma tekniği çoğunlukla güç transformatörlerinde kullanılır. Bu tür transformatörlerin etiketlerinde yer alan ONAF ifadesi İngilizce ‘Oil Natural Air Forced’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Soğutma yüzeyinde hava üfleyen fanlar kullanılır. Transformatör sargılarının ürettiği ısı ve nüvenin ısısı transformatör kazanı içerisinde bulunan yağ moleküllerinin konvansiyonel olarak yukarı yönlü hareketlenmesine neden olur, ısınmış halde yukarı çıkmış olan bu yağ molekülleri daha sonra radyatörün içerisinden geçerken, fanlar tarafından radyatöre doğru uygulanan hava akımı sayesinde ısılarını atmosfere salarak soğurlar. Kapalı döngülü devri daim sisteminde soğuyan yağ molekülleri kazanın dibine çökerken ısınmış olan yağ molekülleri (nüve ve sargıların ısınıp almış) yükselerek devresini tamamlar ve bu şekilde transformatörün soğutulması sağlanmış olur. Isı yayılımı, yayılan yüzey arttığında belirgin bir şekilde artar bununla birlikte dağılma yüzeyinde zorlamalı hava akışı uygulandığında ısı yayılımı daha hızlı yapılabilir. Zorlanmış hava, radyatörün yüzeyinden ısıyı alır ve doğal havadan daha iyi soğutma sağlar. Isı yayılım hızı, ONAF trafo soğutma yönteminde ONAN soğutma sistemine göre daha hızlıdır. Bu soğutma sisteminde dalga duvarları, radyatör ve tüp borular trafonun kazanına monte edilir ve bu şekilde kazanın yüzey alanı arttırılır. Bununla birlikte transformatörün kazanını üzerine yerleştirilen fanlar ile soğutma işlemi gerçekleşir [22]. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.9’da verilmiştir.



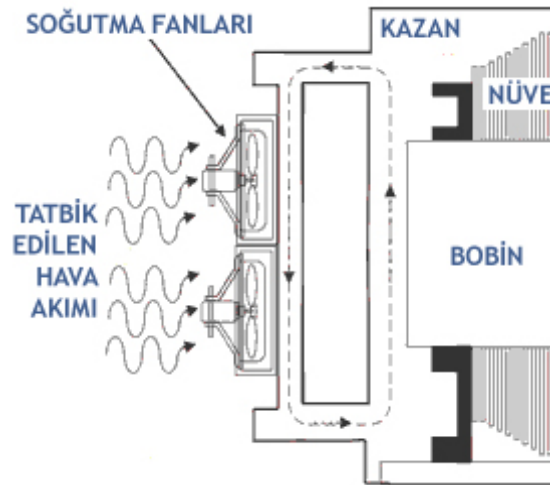
Şekil 2.6. Doğal hava soğutmalı (AN) transformatör yapısı [21]



Şekil 2.7. Doğal yağ soğutmalı (ON) transformatörün yapısı [23]



Şekil 2.8. Yağ soğutmalı hava zorlamalı (ONAN) transformatör yapısı [22]

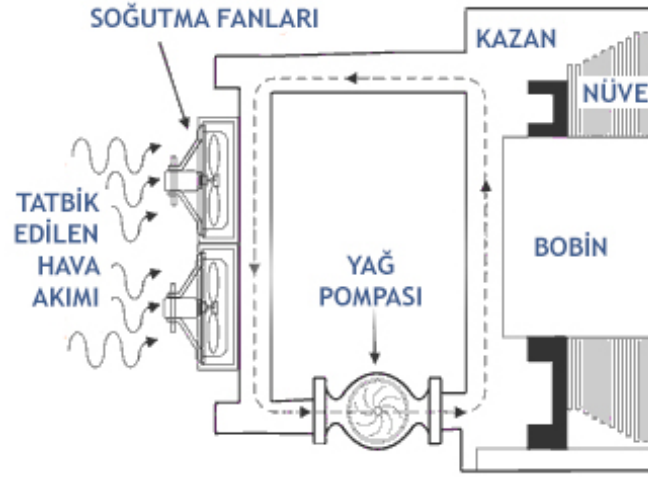


Şekil 2.9. Doğal yağ hava fanı soğutmalı (ONAF) transformatör yapısı [22]

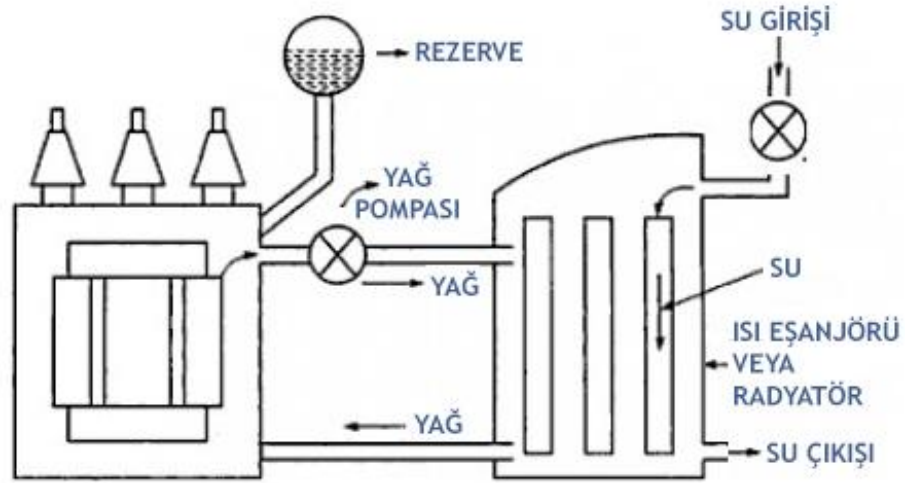
Yağ Zorlamalı Hava Zorlamalı Soğutmalı: Bu soğutma sisteminde yağ, yağ pompaları vasıtasıyla kapalı olan trafo deposu devresi içinde dolaşmaya zorlanır bununla birlikte soğutma sistemine hava fanları vasıtası ile hava uygulanır. Genellikle transformatörlerin etiketlerinde yer alan OFAF ifadesi İngilizce ‘Oil Forced Air Forced’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Bundan dolayı bu soğutma sisteminde yağın sirkulasyonu (yağ pompası) ve yağın soğutulması takviye sistemler ile yapılmaktadır. Bu sistemin ana avantajı, kompakt bir sistem olmasıdır ve aynı soğutma kapasitesi olan OFAF, ONAN ve ONAF transformatör soğutma sisteminden daha az yer kaplar [22]. Ayrıca transformatör kazanı içerisinde bulunan yağ pompası sayesinde, ONAN ve ONAF transformatör soğutma sistemlerine göre çok daha hızlıdır. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.10’da verilmiştir.

Yağ Zorlamalı Suyu Zorlamalı Soğutmalı: Bu soğutma sisteminde, sıcak yağ, yağ pompası aracılığıyla bir yağ-su ısı eşanjörüne gönderilir ve burada ısı eşanjörünün yağ borularına soğuk su ekleyerek yağ soğutulur [22]. Bu tür transformatörlerin etiketlerinde yer alan OFWF ifadesi İngilizce ‘Oil Forced Water Forced’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Isı eşanjörünün içerisindeki borularda dolaşan sıcak yağ burada su ile ısı değişimi yapar. Eşanjörde ısını kaybeden yağ soğuyarak tekrar kazan içerisine gider. Bu işlem sürekli olarak devam eder. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.11’de verilmiştir.

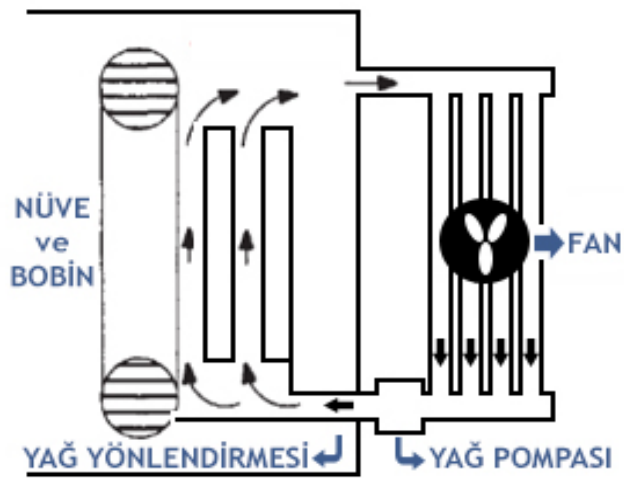
Yağ Yönlendirmeli Hava Zorlamalı Soğutmalı: Bu soğutma sistemi, OFAF soğutma sistemine oldukça benzemesine rağmen, OFAF’ın geliştirilmiş versiyonu olarak düşünülebilir. Transformatörlerin etiketlerinde yer alan ODAF ifadesi İngilizce ‘Oil Directed Air Forced’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Tasarım aşamasında transformatör sarımında önceden belirlenmiş yollardan(nüve ve sargılara ulaşacak şekilde) yağın dolaşımını sağlayan bir pompa yerleştirilmiştir. Bu soğutma işlemi sayesinde nüve ve sargılara soğuk yağın direk temas etmesi sağlanarak soğutma işlemi gerçekleşir. ODAF genellikle çok yüksek güce sahip transformatörde kullanılır [22]. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.10. Yağ zorlamalı hava zorlamalı soğutmalı (OFAF) transformatörün yapısı [22]

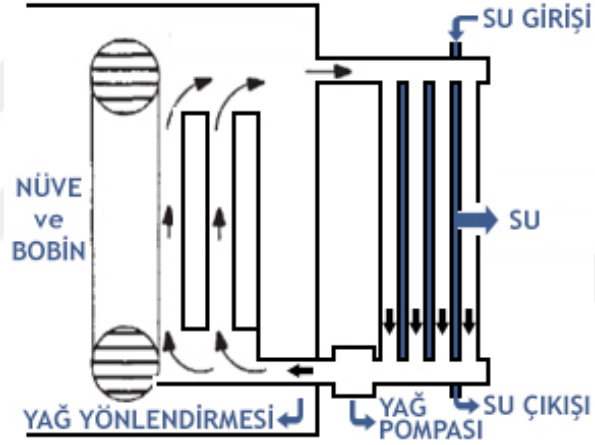


Şekil 2.11. Yağ zorlamalı suyu zorlamalı soğutmalı (OFWF) transformatörün yapısı [22]



Şekil 2.12. Yağ yönlendirmeli hava zorlamalı soğutmalı (ODAF) transformatörün yapısı[22]

Yağ Yönlendirmeli Su Zorlamalı Soğutmalı: ODAF gibidir tek farkı, burada sıcak yağ, hava yerine zorla su ile soğutulur. Transformatörlerin etiketlerinde yer alan ODWF ifadesi İngilizce ‘Oil Directed Water Forced’ kelimelerinin kısaltmasından gelmektedir. Bu trafo soğutma yöntemlerinin her ikisi de transformatörün zorlanmış yöneltmiş yağ soğutması olarak adlandırılır [22]. Bu tip soğutmalı transformatörlere örnek Şekil 2.13’de verilmiştir. Bu soğutma yönteminde sirkulasyonu sağlayan yağ önceden belirlenmiş bir güzergah doğrultusunda nüve ve sargılara ulaşacak şekilde yönlendirilir. Soğumuş olan yağ molekülleri transformatörün tankına soğutucu veya radyatör kısmında girerek bobinin içerisinde bulunan ve yağın geçiş yapabileceği boşluklardan ya da daha önceden yağın geçişi için belirlenen yolu takip ederek nüve ve sargılara soğumuş olan yağın direk nüfuz ederek soğutma işleminin çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi sağlanır.



Şekil 2.13. Yağ yönlendirmeli su zorlamalı soğutmalı (ODWF) transformatörün yapısı [22]

Çizelge 2.1. Transformatörlerde soğutucu ortam ve soğutma şekillerinin simgeleri [24]

1.HARF	2.HARF	3.HARF	4.HARF
Sargılara değen soğutma ortamı ile ilgilidir.		Dış soğutma sistemine değen soğutma ortamı ile ilgilidir.	
Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü	Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü
O ↓ Yağ N ↓ Tabii A ↓ Hava N ↓ Tabii	O ↓ Yağ N ↓ Tabii A ↓ Hava F ↓ Cebri (vantilatörler fanlar)	O ↓ Yağ F ↓ Cebri W ↓ Su F ↓ Cebri	

3. TRANSFORMATÖRÜN ANSYS MAXWELL İLE MODELLENMESİ VE TRANSFORMATÖRLERDE KAYIPLAR

Elektromanyetik ürünlerin tasarımında manyetik malzemeler kullanılmaktadır. Manyetik malzemeler, kullanım amaçlarına, kullanılacakları yerlere ve çalışma koşullarına göre farklılık gösterirler. Elektrik makinelerinin nüve laminasyonlarında kullanılan manyetik malzemenin kalitesi, tasarlanacak makinenin çalışma özelliklerini ve verimini doğrudan etkilemektedir. Aynı şekilde sabit bir elektrik makinesi olan transformatörlerde giriş ve çıkış sargıları arasındaki manyetik akının özelliği ile nüvenin geometrik yapısı ve manyetik malzemenin özellikleri transformatörün çalışma şeklinde çok önemlidir [5]. Transformatörlerde meydana gelecek girdap (eddy) akım kayıplarının azaltılması amacıyla manyetik nüvelerde kullanılan saclar, lamine edilmiş levha haline getirilmektedir. Laminasyon levhaların paketlenmesinde üst üste gelecek laminasyon yapraklarında oluşacak girdap akımların etkisini azaltmak ve nüve kayıpları ile aşırı derecede ısınmasını engellemek için laminasyon levhaların yüzeyleri yüksek dirençli ince bir malzeme ile kaplanarak elektriksel olarak yalıtılmalıdır [5]. Buna dikkat edilmezse tasarlanacak olan transformatörün verimi düşer ve kullanımı zorlaşır [25]. Manyetik malzemelerin davranışı beş ana grupta sınıflandırılabilir bunlar; diyamanyetik, paramanyetik, ferromanyetik, ferrimanyetik, antiferromanyetik:

Diyamanyetizma: Bütün maddelerin temel bir özelliği olan diyamanyetizma özelliği genellikle çok zayıftır. Bu durum malzemenin uygulanan manyetik alana maruz kaldığında yörüngedeki elektronlarının ortak bir davranış göstermemesinden kaynaklanmaktadır. Diyamanyetik maddeleri oluşturan atomların net manyetik momentleri yoktur.

Paramanyetizma: Malzemedeki iyonlar veya atomların bazılarının kısmen dolu yörüngelerinde çiftlenmemiş elektronlarından dolayı paramanyetik malzemeler net bir manyetik momente sahiptirler. Çiftlenmemiş elektronlara sahip atomlardan biri demir atomlarıdır. Ancak, manyetik momentleri birbirleriyle manyetik olarak etkileşirler ve uygulanan alan kaldırıldığında manyetizasyonu diyamanyetik malzemelerinki gibi sıfır olur.

Ferromanyetizma: Ferromanyetik malzemeler, demir, nikel, kobalt, tungsten ve alüminyum gibi metallerin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilen alaşımlardır. Bun durumdan dolayı ferromanyetik malzemeler, yapısı ve özellikleri yönünden büyük farklılıklar gösterir [25]. Ferromanyetik bir malzemeye dışardan manyetik alan uygulandığında, malzeme içerisindeki alan vektörleri bu alan yönünde yönlenmeye çalışırlar. Böylece manyetik malzeme içerisinde tek yönde yönlendirilmiş bir manyetik alan meydana gelir. Ferromanyetik malzemelerin en önemli özelliği, manyetik geçirgenlik oranlarının yüksek olmasıdır.

Ferrimanyetizma: Ferrimanyetik malzemeler bir veya birkaç metal oksit (nikel ve manganez gibi) içeren demir oksit karışımlarıdır. En önemli avantajı, yüksek frekanslarda kullanıldıklarında girdap akımlarını minimize eden yüksek elektriksel direnç sahip olmalarıdır ve bu tür malzemeler çoğunlukla “ferrit” veya “garnet” olarak bilinirler.

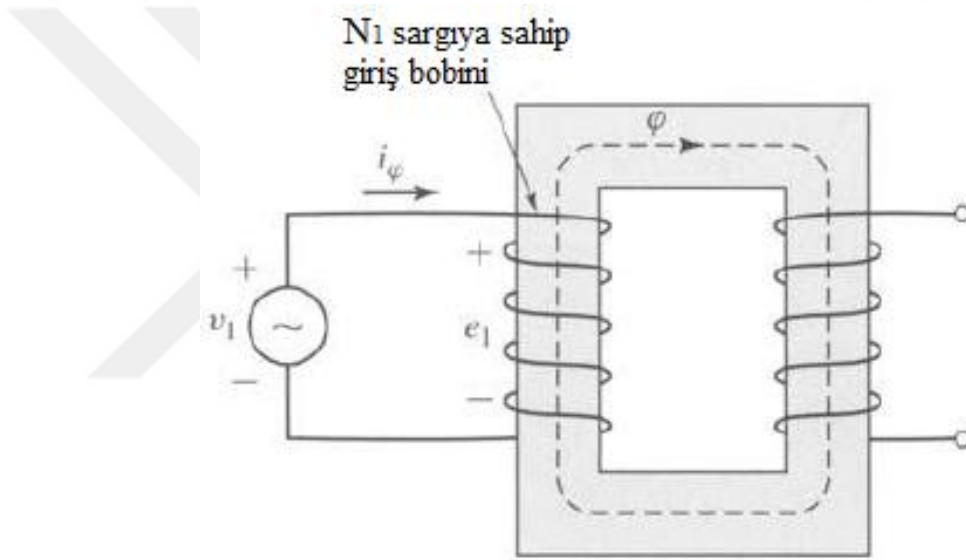
Antiferromanyetizma: Malzemeyi oluşturan atomlar bir türde (aynı büyüklükte) moment meydana getirmiş ve bunlar karşılıklı etkileşme ile zıt yönlerde düzenlenmişse birbirlerini yok ederler. Bu durumda madde diamanyetizma benzeri bir davranışa sahip olacaktır ki bu özelliğe Antiferromanyetizma denir. Antiferromanyetik maddeler tüm sıcaklıklarda düşük doygunluk değerleri verirler. Antiferromanyetik maddelerde sıcaklıkla doygunluğun değişimi Neel sıcaklığı denilen bir kritik sıcaklıkta maksimum değeri verir. Neel sıcaklığının üstünde paramanyetik davranış gösterirken, altında antiferromanyetik davranış gösterirler.

Özet olarak ifade edilecek olursa diyamanyetik ve paramanyetik malzemeler manyetik olarak düzensizdir ve toplamda manyetik etkileşim göstermezler. Elektrik makinelerinin nüve kısımları için genellikle ferromanyetik ile ferrimanyetik malzemeler kullanılır.

Transformatör Kayıpları

Transformatörlerde giriş sargısı gerilim kaynağı (şebeke, bara, jeneratör vb.) tarafından besli iken çıkış sargı uçlarının açık olması boşa çalışma durumu olarak ifade edilir. Transformatörün çıkış sargı uçlarına herhangi bir yük bağlı olmadığı için çıkış sargılarında teorik olarak hiçbir akım akmayacaktır, normal çalışma

şartlarında ise böyle bir durumda çıkış sargılarında mikron mertebelerinde bir akım akar. Çıkış sargılarına yük bağlı olmayan transformatörlerin giriş sargılarına gerilim uygulandığında bu sargılardan akım değerine göre çok küçük bir akım (nominal yük akımının %1-2'si civarındadır) akar, bu akım boşa çalışma akımı olarak ifade edilir. Boşa çalışma akımı büyük güç transformatörlerinde nominal akımın % 0,2 değerine kadar düşmektedir [26]. Boşa çalışma akımı çok küçük olduğu için giriş sargılarındaki bakır kaybı da önemsenmeyecek miktarda küçüktür. Bu kayıp ihmal edildiğinde çıkış sargı uçlarına herhangi bir yük bağlı değilken giriş sargıları beslenirse oluşan kayıplar sadece nüve kaybını meydana getirecektir. Tek fazlı iki bacaklı yüksüz durumdaki transformatörün çalışma devresi Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Yüksüz durumdaki tek fazlı iki bacaklı transformatörün çalışma devresi[26]

Boşa çalışma akımı diğer bir adıyla kararlı durum akımı i_ϕ giriş bobinindeki sargılarda akar ve küçük dahi olsa bu sargılara bir manyetik akının etki etmesini sağladığı için uyartım akımı olarak da ifade edilebilir. Giriş bobininin sargı uçlarında endüklenen gerilim e_1 (3.1) numaralı eşitlik ile ifade edilir, bu eşitlikte

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\Psi}{dt} \quad (3.1)$$

λ_1 = Birincil sargının akı bağlantısı

Ψ = Transformatörün iki bacağındada dolaşan manyetik akı

N_1 = Giriş bobinindeki sargı sayısı

Aşağıdaki eşitlikte görüldüğü üzere, sargı direncinde oluşan gerilim kaybından dolayı, sargı uçlarında endüklenen gerilim uygulanan gerilimden bir miktar daha düşüktür.

$$v_1 = R_1 i_\phi + e_1 \quad (3.2)$$

Manyetik akının anlık değeri, giriş sargı uçlarında endüklenen gerilimin anlık değeri, açılal frekans, endüklenen gerilimin ortalama değeri ve manyetik akının maksimum değeri sırasıyla 3.3--3.7 eşitlikleri ile

$$\Psi = \Phi_{\max} \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

$$e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\Psi}{dt} = \omega N_1 \Phi_{\max} \cos(\omega t) \quad (3.4)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3.5)$$

$$E_1 = \frac{2\pi f}{\sqrt{2}} N_1 \Phi_{\max} = \sqrt{2}\pi f N_1 \Phi_{\max} \quad (3.6)$$

$$\Phi_{\max} = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi f N_1} \quad (3.7)$$

olarak hesaplanabilir. Manyetik akının değeri yoğunluk ve yüzey alanı cinsinden ifade etmek için

$$\Psi = \int_0^S B \cdot d_A = B \cdot S = B_{\max} \cdot S \cdot \sin(\omega t)$$

$$R_H = \rho \frac{l_H}{A_H} = 0.0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \frac{752(0.2m)}{\pi (0.2mm)^2} \cong 20.95 \Omega \quad (3.8)$$

$$R_L = \rho \frac{l_L}{A_L} = 0.0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{m} \frac{164(0.2m)}{\pi (0.4mm)^2} \cong 1.14 \Omega$$

$$B_{\max} = \frac{E_1}{\sqrt{2}\pi f S N_1} = \frac{E_1}{4.44 S f N_1} \quad (3.9)$$

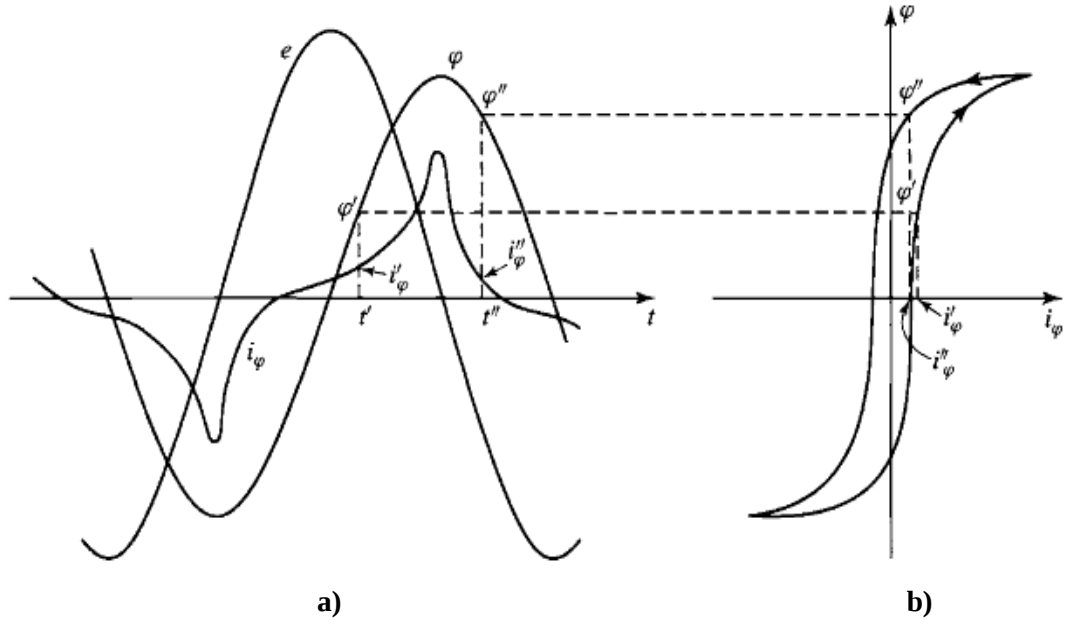
eşitlikleri kullanılabilir bu denklemlerde S yüzey alanı, B manyetik akı yoğunluğudur. Uyarım akımının zamana bağlı fonksiyonunun grafiği Şekil 3.2'de görüldüğü gibi endüklenen gerilim ile hysterezis eğrisini meydana getirir. Uyarım

akımı Fourier Serileri Metodu ile analiz edilirse temel bir bileşen ve tekli harmoniklerin serisi bulunabilir. Uyarım akımının temel bileşeni aslında iki bileşenden oluşur; bu bileşenlerden bir tanesi endüklenen gerilim ile aynı fazda diğeri endüklenen gerilimi 90° geriden takip eder. Endüklenen gerilim ile aynı fazdaki akım nüve kaybı (histerizis kaybı ve girdap akımı kayıplarını) meydana getirir. Nüve kaybına meydana getiren uyarım akımının bileşeni toplam uyarım akımından vektörel olarak çıkarıldığında kalan akım, mıknatıslama akımı olarak adlandırılır. Şekil 3.3'te endüklenen gerilimin etkin değeri, akımın etkin değeri ve akımın etkin değerinin fazör diyagramda vektörel olarak gösterilmiştir. Nüve kaybını (W/kg) cinsinden hesaplamak için (3.10) numaralı eşitlik kullanılabilir. Güç ifadesi ayrıca zamana bağlı bir fonksiyon olarak (3.10.1) numaralı eşitlik ile ifade edilebilir:

$$P_C = E_1 I_\phi \cos(\theta_C) \quad (3.10)$$

$$P_C(t) = \omega N_1 \Phi_{\max} \cos(\omega t) i_{\max} \cos(\omega t) \quad (3.10.1)$$

Bu durumda nüve kaybını ifade eden güç fonksiyonunun frekans değeri akım ve gerilim frekansının 2 katına eşit olacaktır.



Şekil 3.2. Uyarım olayı a) gerilim, akı ve uyarım akımı b) histerizis eğrisi [26]

3.1. Nüve Kayıpları

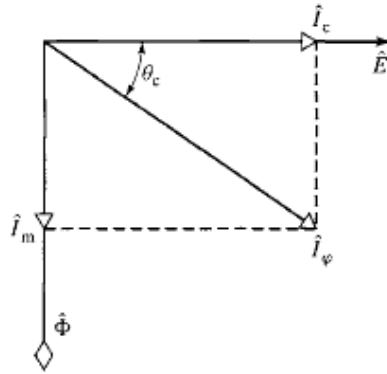
Transformatörün nüvesi zamana bağlı değişken bir manyetik akıya maruz kalırsa manyetik bir malzemede nüve kaybı oluşur. Bu kaybın fiziksel doğası hala tam

olarak anlaşılamamış olmasına rağmen bu karmaşık mekanizmanın basit bir açıklaması aşağıdaki gibidir. Genel olarak nüvedeki kayıp P_c , histerezis kaybı P_h ve girdap akımı kaybı P_e olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. Steinmetz denkleminde göre, çekirdek kayıplarının ölçümü ve hesaplanması normal olarak değişen büyüklük ve frekansta sinüzoidal akı yoğunluğu ile yapılır. Bu ölçümler ve hesaplamalar standart bobine dayanır ve sıklıkla iki terimden oluşur [27].

$$P_C = P_h + P_e \quad (3.11)$$

$$P_C = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (3.12)$$

Yukarıdaki eşitliklerde ifade edilen f manyetik devrenin frekansı, B manyetik akı yoğunluğu, k_h ve k_e ; hysterezis ve girdap akım(eddy current) katsayıları, n Steinmetz katsayısıdır. Bu katsayılar laminasyon malzemesine, kalınlığına, iletkenliğe, frekansa ve diğer faktörlere bağlı katsayılardır. Bununla birlikte, bu formül sadece, 1 Tesla'nın maksimum manyetik akı yoğunluğunun aşılmadığı ve histerezis döngüsünün statik makinenin altında olduğu, elektrik makinelerinde pratik olmadığı varsayımı altında uygulanabilir. Manyetik akı yoğunluğu 1 Tesla'nın üzerindeyken veya alan frekansı yüksek olduğunda, (3.12) numaralı denklemde hesaplanan değer (nüve kaybı) ile test sonuçlarına dayalı hesaplama(nüve kaybı) değeri arasında büyük bir tutarsızlık olduğu gözlenmiştir [7].



Şekil 3.3 Yüksüz durumdaki transformatörün uyartım akımı bileşenleri ve endüklenen gerilim fazör diyagramı[26]

Normal çalışma şartlarında elektrik makineleri 1 T'nin üzerinde akı yoğunluğuna sahip olduğu için (3.12) numaralı denklem makinelerde kayıp hesapları için yetersiz olduğu görülmüş ve bu denklem aşağıdaki gibi revize edilmiştir. Ayrıca pratikte

birçok makine 1 T'nin üzerindeki akı yoğunluklarında çalıştığı için, bu model kayıp tahmini için yetersizdir. Genel anlamda nüve kayıplarının hesaplanması aşırı kayıplar(excess losses) faktörü göz önünde bulundurularak aşağıda denklem ile belirtilen şekilde hesaplanabilmektedir.

$$P_C = P_h + P_e + P_{ex} = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (3.13)$$

Burada aşırı kayıp katsayısı (k_a) malzemenin kalınlığına, malzemenin yüzey alanına, iletkenliğine ve malzemenin mikroyapıdaki parametrelerine bağlıdır [19]. Ayrıca eşitlikte yer alan δ ifadesi nüveyi oluşturan laminasyonların kalınlığıdır. Eşitlik 3.13'te ifade edilen kayıplar hesaplanırken manyetik akı yoğunluğunun (B) maksimum değeri dikkate alınır. Nüve kaybı her an olduğu için 24 saatlik bir yük olarak da ifade edilebilir bundan dolayı nüve kaybının olabildiğince düşük tutulması sağlanmalıdır.

3.1.1. Girdap Akımı ve Meydana Getirdiği Kayıplar

Ferromanyetik malzemelerin kendileri iletkenlerdir. Bu malzemelerin nüvesindeki akı değişimi nüvede eddy akımları olarak adlandırılan küçük akım çevrimleri meydana getirir. Bu akımlar yük akımından ve primer sargısından geçen akımdan bağımsız, bir güç kaybını temsil eder. Bu kayıp W/kg cinsinden:

$$P_e = k_e f^2 B_{\max}^2 \delta^2 \quad (3.14)$$

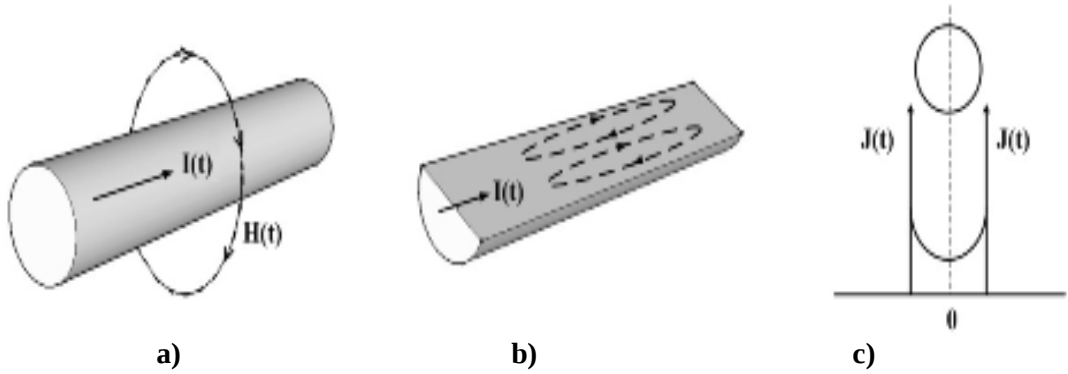
eşitliği ile ifade edilir. Manyetik malzemelerde girdap akımları bir başka ifade ile 'eddy current' olarak da bilinmektedir. Manyetik alanlardaki sapmalardan kaynaklanır. Girdap akımları kayıplarını azaltmak için manyetik nüve tek parça yerine ince yapılı manyetik malzemelerden oluşturulur. Bu ince yapılı saclar 'laminasyon' haldedir. Manyetik alan çizgilerinin yönünde hizalanmış olan bu laminasyonlar, yüzeylerinden bir oksit tabakası veya ince bir vernik ile birbirlerinden yalıtılmıştır. Bu, yalıtım katmanlarının mevcut yolları kesmesi nedeniyle, girdap akımlarının büyüklüğünü büyük ölçüde azaltır; laminasyon kalınlığı azaldıkça girdap akımları kayıpları da azalacaktır. Bu durumdan dolayı bir transformatör 60 Hz frekansta kullanılırsa 50 Hz frekansta kullanılmasına göre daha fazla girdap akım kayıplı olur.

Transformatör sargılarında deri etkisi: İletkenden geçen ve zamana bağlı olarak değişen AC akım $i(t)$, çekirdekte olduğu gibi iletken (bakır vb.) üzerinde deri etkisi

adı verilen bir olaya neden olur. Şekil 3.4.a'daki gibi iletkenin geçen bir AC $i(t)$ akımı iletkenin etrafında bir manyetik alan kuvveti oluşturur ve bu kuvvet nedeniyle iletkenin Şekil 3.4.b'de ki gibi girdap akımları indüklenir. Girdap akımları iletkenin yüzeyinde ana akımla aynı yönlü, iletkenin merkezinde ise ana akımla zıt yönlüdür. Şekil 3.4.c'de görüldüğü gibi hacim akımı yoğunluğu iletkenin merkezinde minimum, iletkenin yüzeyinde ise maksimum değerde olup iletkenin genelinde homojen değildir. İletkenin yüzeyinde maksimum olan hacim akımı yoğunluğu merkeze doğru deri kalınlığı adı verilen mesafeye üssel olarak azalır. Deri kalınlığı sinüzoidal akımlar için aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir [27].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (3.15)$$

Sargıda kullanılan iletken kesitinin boyutları deri kalınlığından belirgin olarak büyükse, iletken tarafından taşınan akımın büyük bir kısmı yüzeyde, yaklaşık olarak Şekil 3.4'te verildiği gibi bir deri kalınlığında, ince bir tabakaya bağlı olarak sınırlanacaktır. Bunun sonucunda akım için etkin kesit alanı, iletkenin geometrik kesitiyle kıyaslandığında küçük olduğu için iletkenin etkin direnci, DC direncinden çok daha büyük olacaktır. Bu durum, sargılara DC uygulanması durumuna göre daha büyük bir sargı kaybı olacağını göstermektedir [27].



Şekil 3. 4. a) İletkenden geçen AC akımın iletken çevresinde olduğu manyetik alan kuvveti b) oluşan manyetik alan kuvveti nedeniyle iletkenin içinde indüklenen girdap akımları c) girdap akımları nedeniyle hacim akımı yoğunluğunun iletken içinde merkezden yüzeye doğru değişimi [27]

3.1.2. Histerizis Eğrisi ve Histerizis Kayıpları

Ferromanyetik malzemelerde manyetik akı yoğunluğu ile manyetik alan şiddeti arasında manyetik geçirgenliğe bağlı bir ilişki söz konusudur. Eşitlik 3.16' da μ_0 boş uzayın geçirgenliği ve birimi H/m (Henry/metre) ya da N/A² (Newton/Amper²)

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (3.16)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1.257 \cdot 10^{-6} (H/m, N/A^2) \quad (3.17)$$

μ_r boş uzaya göre ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenlik oranıdır.

Transformatörlerde giriş bobininin sargı uçları AC kaynak tarafından beslenirse bu kaynak aynı zamanda Manyeto Motif Kuvvet (mmf, manyeto motif force) yaratarak manyetik devrenin oluşması sağlar. Manyetik alan şiddeti (H) sarım sayısı ve akım ile doğru orantılı, akı yolunun uzunluğu ile ters orantılıdır. MMF' nin gösterimi F şeklindedir.

$$F = \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = Ni \quad (3.18)$$

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (3.19)$$

Ferromanyetik bir malzemenin etrafına bobin sarıldığında ve bobin uçlarına AC gerilim uygulandığında, bobinin sargılarında AC özellikte akım akar. Bu akımın sinusoidal yapısı sayesinde pozitif yönde doymaya kadar sürekli arttırılıp, negatif yönde sürekli azaltılarak eğrinin tamamlanmasını sağlamaktır. Histerezis eğrisindeki bu iki eğrinin farklı yollardan apsis ve ordinat eksenlerini kesmesi ile ortaya çıkan fark alanı, demire verilen ve demirden alınan enerji farkını, yani kayıp enerjiyi ortaya koyar [28]. Bir periyot süre sonunda ferromanyetik malzemede histerezis eğrisini oluşturur. Şekil 3.5'te sunulan Histerizis eğrisi birkaç adımda şu şekilde analiz edilebilir.

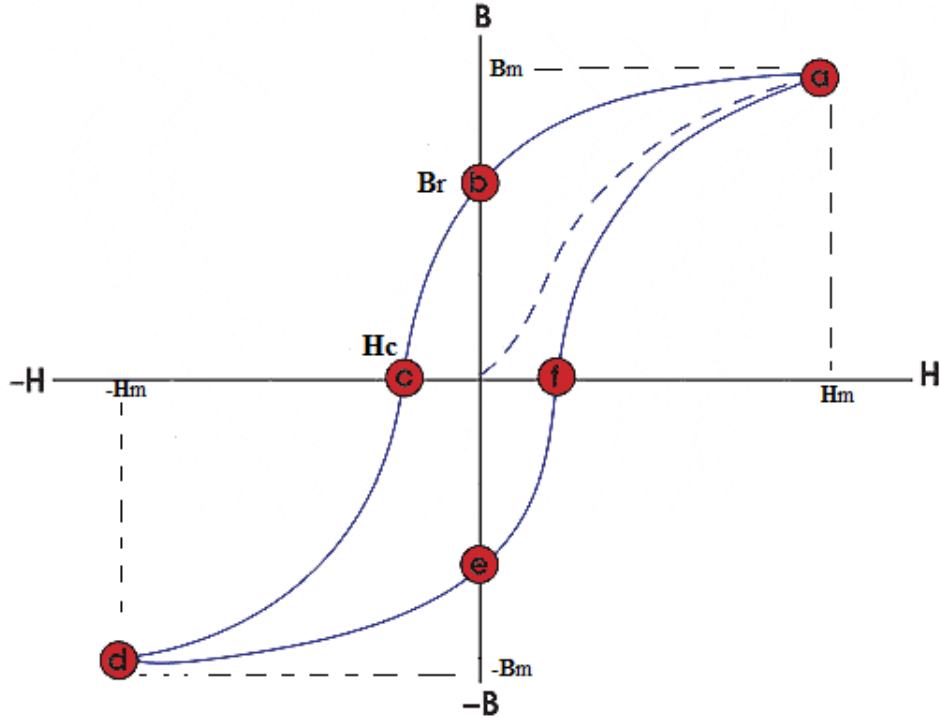
- 1) Besleme akımı $i=0$ iken H değeri 0 ve dolayısıyla B değeri de 0 olur. Bu durum grafikte '0' noktasına karşılık gelir.
- 2) Akımın değeri 0 dan belli bir değere sinusoidal olarak yükseltirse H ve B değeri dolaylı olarak artar. Bu durum grafikte '0-a' arasındaki eğrinin H ve B değerlerine karşılık gelir.
- 3) Maksimum değerdeki akım (i_{max}) değeri için H ve dolaylı olarak B maksimum değerlerine ulaşır. Bu durum B değerinin saturasyona (manyetik saturasyon) uğraması veya nüvede maksimum akı yoğunluğunun oluşmasına sebep olur, bu değerden sonra H değeri artsa dahi B'nin değeri değişmez. Bu durum grafiğin 'a' noktasındaki H ve B değerlerine karşılık gelir.

- 4) Akımın değeri (i) saturasyon (doyum değerinden) sinusoidal olarak düşürülürse H'nin değeri azalır buna karşılık B'nin de değeri azalacaktır. Bu durum grafikte 'a-b' arasındaki eğrinin H ve B değerlerine karşılık gelir.
- 5) Akım (i) değeri sinusoidal olarak azalmaya devam edip '0' değerine ulaşınca H değeri 0 olur fakat bu değer için B'nin değeri 0 dan bir miktar büyük olur. B'nin, H'nin gerisinde kalması (H değeri 0 olmuşken B nin hala sıfırdan büyük bir değer olarak devam etmesi) Histerizis olarak ifade edilir. Grafikteki 'b' noktası H değeri 0 iken bile manyetik malzemede bir miktar manyetik özelliğin kaldığını ifade eder. Arta kalan manyetizma (residual magnetism) ya da mıknatıslık anlamına gelen bu miktar B_r olarak ifade edilir.
- 6) Akım değeri sinusoidal olarak azalmaya devam ederse vektörel olarak yönü değişecektir bu durumda H'nin yönü vektörel olarak tersine dönecektir. Negatif yönde akım değeri büyüklük olarak arttıkça H'nin de değeri artacak ve grafikte 'c' noktasına karşılık olarak B'nin değeri 0 olacaktır. B'nin değeri 0 iken H negatif olarak H_c (zorlayıcı kuvvet ya da kuvarzif kuvvet) değerinde olacaktır.
- 7) H negatif yönde büyüklük olarak arttırılmaya devam ederse B değeride zıt yönde artarak c-d eğrisini takip eder. 'd' noktasında manyetik malzeme zıt yönde saturasyona uğrar, B ve H zıt yönde maksimum değerine ulaşır (bu nokta akımın minimum eksi yönde minimum tepe noktasına ulaştığı noktadır).
- 8) Akımın değerinin büyüklüğü eksi yönde sinusoidal olarak azalırsa H'nin ve B'nin değeri de d-e eğrisi boyunca azalır. Eğrinin 'e' noktasında B'nin değeri küçük bir miktar iken H'nin değeri 0 olur. Arta kalan manyetizma (residual magnetism) ya da mıknatıslık anlamına gelen bu miktar- B_r olarak ifade edilir.
- 9) Akımın yönü sinusoidal olarak değişirse H'nin yönü değişir ve $-B_r$ olan manyetik alan yoğunluğu eğride 'f' noktasına ulaşarak sıfır değerine ulaşır. Bu noktadan sonra H değeri arttırılmaya devam ederse B'nin değeri 0 dan itibaren maksimum noktasına (saturasyon değerine) f-a eğrisi boyunca ulaşır.

Histerizis alanı kayıplara neden olur ve bu çevrim verimi düşürür. Nüveye manyetik özelliklerini kazandıran içerideki partiküllerdir. Bu partiküllerinin sürekli aynı doğrultuya gelmesi ve bunun tersine dönüşümü transformator nüvesinde diğer güç kaybına neden olur. Histerizis kaybı olarak bilinen bu güç kaybı formüsel olarak W/kg cinsinden ifade edilecek olursa:

$$P_h = K_h f B_{max}^n \quad (3.19)$$

şeklinde belirtilebilir. Burada K_h , demirin karakteristiğine ve hacmine göre sabit bir değerdir, n değeri 1.5 ile 2.5 arasında değişebilen ve genellikle 2 olarak kabul edilen bir değişkendir [28]. Akımın bir periyot boyunca değişimi sırasında bazen kaynaktan enerji çekilirken bazen de manyetik alanda depolanan enerji kaynağa geri verilir. Genellikle çekilen enerji verilen enerjiden daha büyüktür. Akımın ve buna bağlı olarak H 'nin bir periyodu boyunca kaynaktan sarım-nüve sistemine net bir enerji akışı vardır. Bu enerji kaybı nüveyi ısıtır. Nüvedeki bu enerji kaybına histerizis kaybı denir. Histerizis eğrisinin alanı büyüdükçe histerizis kaybı da artar.



Şekil 3.5. Manyetik malzemelerin histerizis eğrisi[29]

Çekirdek demir kayıplarının azaltılması

Özel demir alaşımlarının kullanılmasıyla ve demirin haddelenmesiyle histerizis kayıpları azaltılabilir. Demirde Si kullanımı malzemenin manyetik geçirgenliğinde ve dolayısıyla histerezis kaybında büyük rol oynar. Bilindiği gibi histerezis kaybı histerezis çevriminin (bukle) alanıyla orantılıdır. Soğukta haddelenmiş ve kristalleri manyetik yönlendirilmiş transformatör saçlarında demir kayıpları, sıcakta haddelenenlere göre daha küçüktür (yaklaşık yarısı). Bu nedenle soğukta haddelenmiş saçlar tercih edilir [27].

3.2. Bakır Kayıpları

Transformatörün sargılarında oluşan bakır kayıpları

$$P_{Cu} = I^2 R \quad (3.20)$$

eşitliği ile hesaplanır, burada bakır kayıplarını hesaplamak için transformatörün giriş sargılarının olduğu bobin, gerilim kaynağı tarafından beslenir buna karşılık aynı anda çıkış sargılarının bobini kısa devre edilir. Kolaylık olması adına genellikle yüksek voltaj tarafı bu testte kaynak tarafından beslenir, bir başka deyişle yüksek voltaj tarafı transformatörün giriş tarafı olarak seçilir. Bir transformatörün eşdeğer devresi göz önüne alındığında eşdeğer seri empedansı nispeten küçük olduğu için, tipik olarak yüksek voltaj değerinin %10-%15'u kadar bir gerilim uygulandığında giriş tarafından anma akımı değerine eşit miktarda akım akacaktır [28]. Transformatörlerde kayıplar minimize olabildiği ölçüde verim yüksek olur. Transformatör sargılarında geçen akım bakır kayıplarını meydana getirir. Transformatörde giriş/çıkış gerilimleri ve bunlara bağlı olarak giriş/çıkış akımları transformatörün gücüne bağlıdır ve transformatör sargıları değişmediği takdirde bu değerlerde sabittir. Bu durumdan dolayı bakır kaybını azaltmak için transformatör tasarım aşamasındayken sargı direncinin değeri azaltılarak bakır kaybı azaltılabilir. Sargılarda kullanılan iletkenin direnci aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.21)$$

Transformatörlerde sargı kesitlerinin artışı veya iletken boyunun kısaltılması direncin küçülmesini ve dolayısıyla bakır kaybının azalmasını sağlayacaktır. İletken uzunluğunun artması manyetik devredeki kayıpların artmasına sebep olacaktır. Bu nedenle sargıların toplam uzunluğunun boyutlara uygun oranlanarak indirilmesi gerekmektedir. Normal çalışma şartlarında, belirli bir frekans, gerilim çevirme oranı ve ısınma değeri belirtilen bir transformatör için verilen belirli güçteki toplam kayıplar neredeyse sabittir [28]. Bir transformatörde giriş gücü yaklaşık olarak çıkış gücüne eşit olarak kabul edilirse 3.22 eşitliğinde görüldüğü üzere transformatörün giriş ve çıkış sargılarından geçen akım değerleri yüke bağlı olarak değişir, yük sabit ise akım değerleri de sabit olur.

$$P = V_P I_P \cong V_S I_S \quad (3.22)$$

Ayrıca bakır kaybını ifade eden güç fonksiyonu akım ve gerilim cinsinden zamana bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$P_{Cu}(t) = i_{\max} \cos(\omega t) v_{\max} \cos(\omega t) \quad (3.23)$$

Bu durumda bakır kaybını ifade eden güç fonksiyonunun frekansı akım ve gerilim frekansının iki katına eşit olur.

3.3. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kısmi diferansiyel denklemlerin yanı sıra integral denklemlerin yaklaşık çözümlerini bulmak için kullanılan sayısal bir tekniktir. Karmaşık mühendislik problemlerinin hassas olarak çözülmesinde günümüzde sayısal metod olarak Sonlu Elemanlar Yöntemi etkin olarak kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin temel mantığı, yapıyı sonlu sayıda elemanlara bölmektir, bu elemanlar genellikle düğümler (mesh) vasıtası ile birbirlerine bağlanır ve yaklaşık çözüm elde ederler. Karmaşık mühendislik problemlerinin basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla çözümünü sağlayan sonlu elemanlar yöntemi pek çok mühendislik uygulamasında kullanılan yaygın ve kullanışlı bir çözüm metodudur. İlk defa 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilen bu metod daha sonraki on-onbeş yıl içerisinde mühendislik problemlerinin çözümünde ve uygulamalı bilimlerde kullanılmaya başlanmıştır [30]. Sonlu elemanlar yöntemindeki esas metot, karmaşık bir problemi basite indirgeyerek çözüme ulaştırmaktır. Bu yöntemde analiz edilecek bölge, birden fazla basit, küçük ve birbirine ağ şeklinde bağlı halde, sonlu eleman adı verilen alt bölgelere ayrılmaktadır.

3.4. Elektrik Makineleri Analizinde Sonlu Elemanlar Yönteminin Uygulanma Adımları

Sonlu elemanlar yöntemi, elektrik alan ve manyetik alan hesaplarının yanı sıra, akışkanlar mekaniği, ısı iletimi, yapısal mekanik problemler vb. birçok mühendislik problemlerinin çözümü için de kullanılmaktadır [30]. Sonlu elemanlar yöntemi

elektrik makinelerinin analizinde uygulanırken, aşağıda belirtilen sıraya göre işlemler gerçekleştirilir.

1. Analiz edilecek makine, düğüm noktaları (mesh) içeren elemanlarla parçalara ayrılır.
2. Yapının içerisinde bulunan her eleman için fiziksel büyüklüklerin davranışları tanımlanır.
3. Elemanlar birbirleri ile düğüm noktalarından bağlanır ve yapının tamamı için yaklaşık bir denklem sistemi oluşturulur.
4. Oluşturulan denklemler düğüm noktalarındaki bilinmeyen değerler için çözülür.
5. Seçilen elemanların istenilen değerleri hesaplanır.
6. Bu yöntem ile karşılaşılan esas problemin daha basit bir probleme indirgenmiş olması nedeni ile kesin sonuç yerine yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir, elde edilen sonuçlara iyileştirmeler yapılarak optimum değere ulaşılabilir.

3.5. Mühendislik Uygulamalarında Sonlu Elemanlar Yönteminin Kullanım Alanları

Bilgisayar programının (ANSYS Maxwell) sadece giriş verileri değiştirilerek herhangi bir özel problem için çözümü sunabilmektedir bu özellik sayesinde bu yöntem değişik birçok mühendislik alanları için kullanılabilir. Bu yöntem özellikle yapısal mekanik problemlerin yanı sıra, ısı iletimi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve manyetik alanların ile ilgili mühendislik problemlerinin çözümü için de kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulama alanlarından bazıları şu şekilde sıralanabilir:

- Uçak, makine, inşaat, otomotiv mühendislikleri uygulamaları,
- Yapısal analizler (statik, dinamik, lineer, nonlineer),
- Elektromanyetik hesaplamalar, Nükleer Mühendislik,
- Termal, akış hesapları, Hidrolik ve Su kaynakları Mühendisliği,
- Metal biçimlendirme ve tezgah takımları,
- Biyomekanik hesaplamalar, Medikal uygulamalar vb.

3. 6. Maxwell Denklemlerinin Diferansiyel Noktasal Formu

Zamana bağılı olarak değişen elektrik ve manyetik alanlar için genel Maxwell denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\text{Faraday İndüksiyon Kanunu} \quad : \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.24)$$

$$\text{Gauss Manyetik Alan Kanunu} \quad : \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.25)$$

$$\text{Amper Akım Kanunu} \quad : \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.26)$$

$$\text{Gauss Elektrik Alan Kanunu} \quad : \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.27)$$

Burada kullanılan vektörel semoller:

$\mathbf{E}$ elektrik alan şiddeti (Volt/metre),

$\mathbf{D}$ elektrik akı yoğunluğu (Coulomb/m²),

$\mathbf{H}$ Manyetik alan şiddeti (Amper /metre),

$\mathbf{B}$ manyetik akı yoğunluğu (Weber/m²),

$\mathbf{J}$ elektrik akım yoğunluğu (Amper/m²) ve

ρ hacimsel elektrik yük yoğunluğu olup birimi Coulomb/m³ dir..

Yukarıda koyu renk ile belirtilen harfler vektörel büyüklüklerdir. Yazılmış olan denklemlerin özet olarak ifade ettikleri şey; zamanla değişen elektrik alan manyetik alanı meydana getirir, benzer şekilde zamanla değişen manyetik alan elektrik alan doğurur. Maxwell denklemleri baz alınarak ANSYS Maxwell programı geliştirilmiştir. Bu programda sonlu elemanlar yöntemiyle Maxwell denklemleri çözülerek analizi gerçekleştirilir ve kendinden uyarlamalı ağ oluşturarak en uygun sonlu elemanlar ağını probleme göre geliştirir. ANSYS Maxwell'in ağ iyileştirme algoritmasında yakınsama yapılırken en uygun sonlu elemanlar ağını meydana getirir, çözüm işlemini kolaylaştırır ve yazılımın kullanımını kolaylaştırır.

ANSYS Maxwell, motorlar, aktüatörler, transformatörler, sabit mıknatıs, alan kaçak akı, ısı hesapları, sensörler ve bobinler dahil 2D ve 3D elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarımı ve analizi için önde gelen elektromanyetik alan

simulasyon yazılımıdır. Maxwell, statik, frekans alanı ve zamanla değişen elektromanyetik ve elektrik alanlarını çözmek için doğru sonlu elemanlar yöntemini kullanır. ANSYS Maxwell programının esas faydası, analiz edilecek yapının geometrisi, kullanılacak malzemenin özellikleri ve hedeflenen çıkışın elde edilmesi için otomatik çözüm sürecidir. Yani ANSYS Maxwell programı, problemi çözmek için otomatik olarak uygun, verimli ve doğru bir ağ oluşturur. ANSYS Maxwell'in otomatik uyarlanabilir ağ oluşturma(meshing) işlemi, karmaşıklığı analiz sürecinden kaldırır ve yüksek verimli, kullanımı kolay bir tasarım akışından faydalanmayı sağlar. Ayrıca ANSYS PExprt ve ANSYS RMaxprt, Maxwell'de tasarım arayüzleri içerir. ANSYS Maxwell'in önemli bir özelliği, ANSYS'in çok bölgeli sistem simulasyon yazılımı olan ANSYS Simplorer'da kullanılmak üzere sonlu elemanlar çözümlerinden yüksek kaliteli, düşük siparişli modeller üretme kabiliyetidir. Bu özellik, yüksek performanslı elektromekanik, mekatronik ve güç elektroniği sistemlerini tasarlamak için, karmaşık devreleri, Maxwell'in doğru bileşen modelleri ile birleştirmeyi sağlayan güçlü bir elektromanyetik tabanlı tasarım akışı yaratır [30].

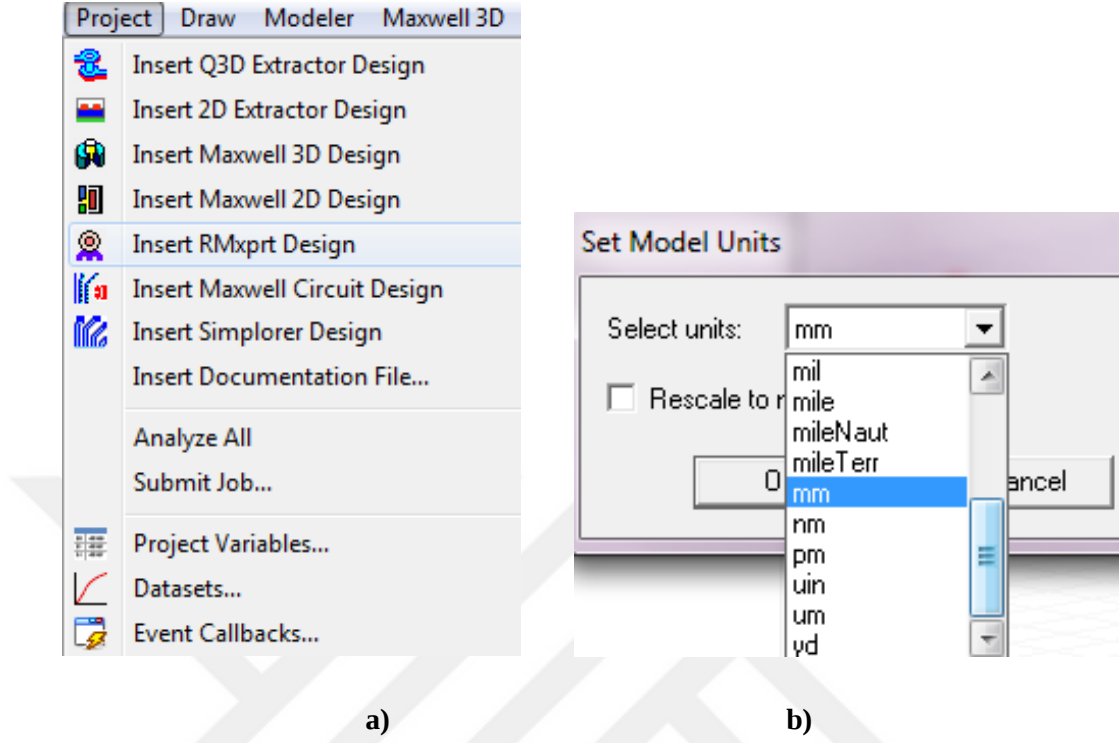
3.7. ANSYS Maxwell Programının Arayüzü ve Tasarım

Her platformda olduğu gibi ANSYS Maxwell programının da kendine özgü bir arayüzü mevcuttur, bu programın arayüzünün en belirgin farkı 2 boyutlu ya da 3 boyutlu modellerin belirlenmesi, oluşturulabilmesi ve bu modellerin gerçek zamanlı simulasyonlarının gerçekleştirilebilmesidir.

3.7.1. Boyutların 2D veya 3D Olarak Belirlenmesi

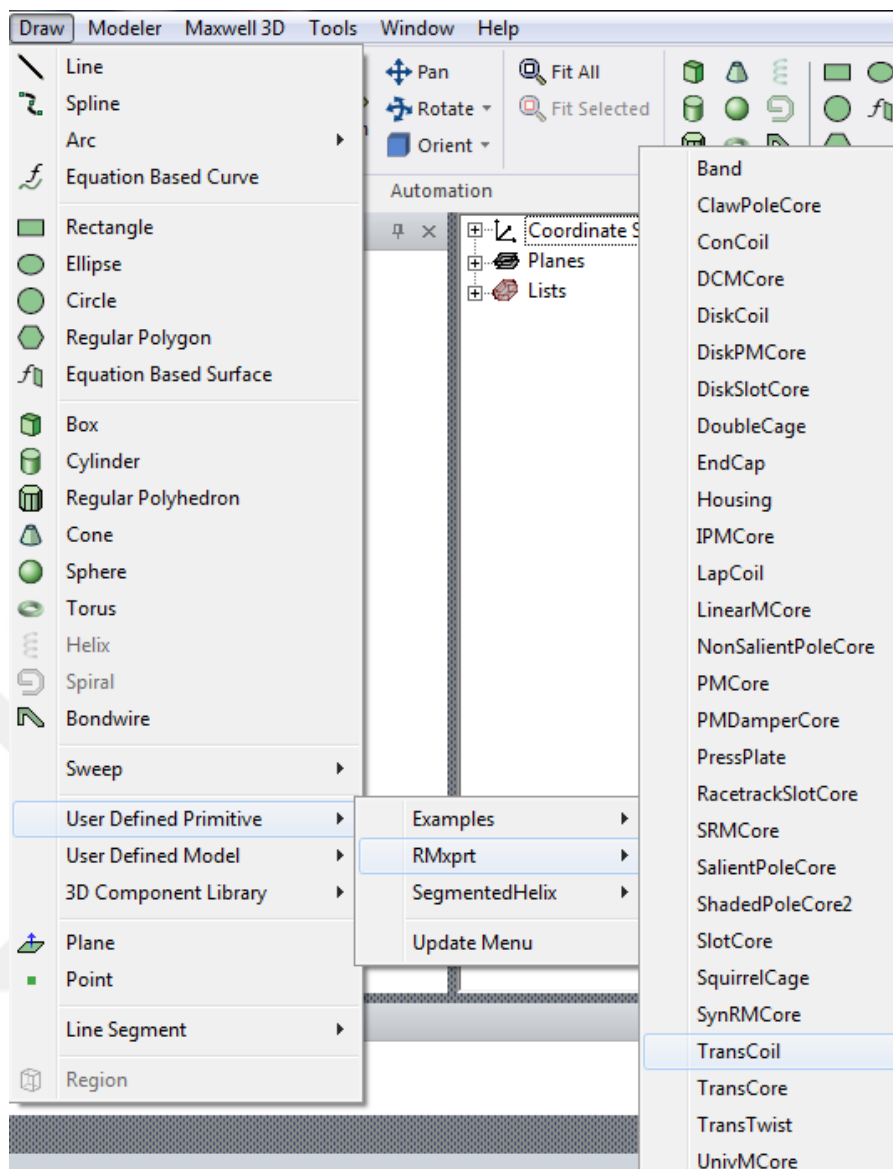
ANSYS Maxwell de modelleme yapılırken kartezyen koordinatlar ya da asimetric modelleme kullanılabilir. Programda XY, XZ ve YZ olmak üzere 3 farklı Kartezyen koordinat seçeneği bulunmaktadır. Bununla birlikte oluşturulacak modelin 2 boyutlu veya 3 boyutlu olması RMaxprt bölümü ile programın Project arayüzünde kullanıcı tarafından Şekil 3.6.a'da verildiği gibi seçilebilmektedir. Bununla birlikte

programda tasarıma başlamadan önce Şekil 3.6.b’de görüldüğü gibi uzunluk birimi seçilebilmektedir.



Şekil 3.6.a) ANSYS Maxwell Programın Project arayüzü **b)** Kullanılacak olan uzunluk birimini belirleme

ANSYS Maxwell programının 19.2 versiyonu ana menüsünde Draw (çizim) bölümünde Şekil 3.7.a, b, c, d, e izlenen yol takip edilerek tasarlanacak olan makinenin elemanları (sargı, nüve, rotor, stator vb.) Rmxprt bölümünden seçilebilmektedir. Programda kullanılan çizimler ilgili kütüphanede varsayılan olarak daha önceden çizilmiş şablonlardır. Ayrıca programda transformatör tasarımı için kullanılacak olan sargı veya nüvenin geometrik ve elektriksel değerleri arayüz üzerinde ayarlanabilmektedir.



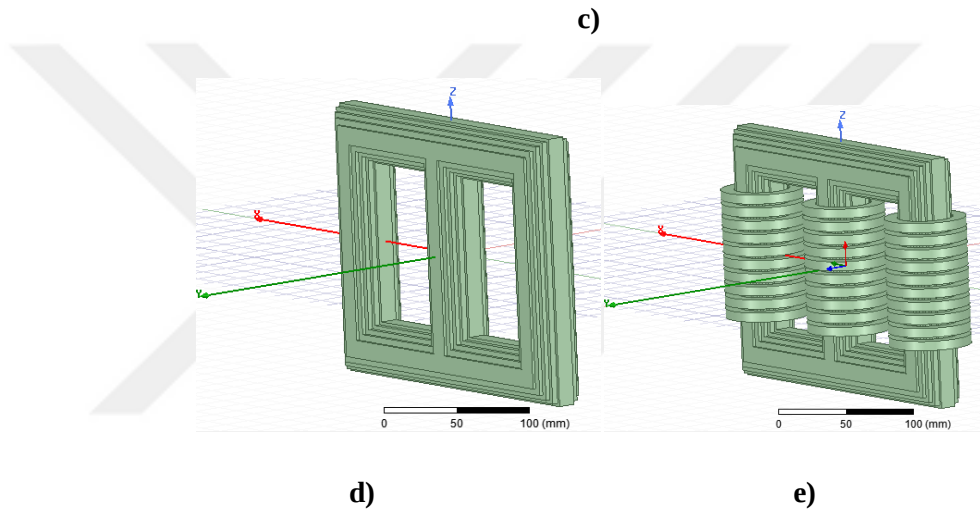
a)

Command					
	Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateUserDefinedPart				
Coordinate Sys...	Global				
Name	RMxpert/TransCoil.dll				
Location	syslib				
Version	6.0				
DistLeg	100	mm	100mm		Leg center to center distance
CoilType	2		2		Coil type: 1 for solenoid coil; 2 for pancake coil
WidthIn	42	mm	42mm		Coil width between two inner sides
DepthIn	42	mm	42mm		Coil depth between two inner ends
RadiusIn	21	mm	21mm		Coil inner fillet radius
ThickCoil	10	mm	10mm		Coil thickness of one side
HighCoil	96	mm	96mm		Coil height
Layers	10		10		Number of layers
GapLayer	3	mm	3mm		Gap between two layers
InfoCore	0		0		0: all coils; 1: one coil only.

b)

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate Sys...	Global			
Name	RMxpirt/TransCore.dll			
Location	syslib			
Version	6.0			
DiaLeg	40	mm	40mm	Outer diameter of leg cross-section
DistLeg	100	mm	100mm	Leg center to center distance
DistYoke	150	mm	150mm	Yoke center to center distance
Stages	9		9	Number of stages of leg cross-section
ThickCore	20	mm	20mm	Core thickness, only used for Stages = 1
WidthYoke	0	mm	0mm	Yoke width, =0 for same cross-section as leg's
InfoCore	0		0	0: whole core; 1: legs only; 2: yokes only.

☐ Show Hidden



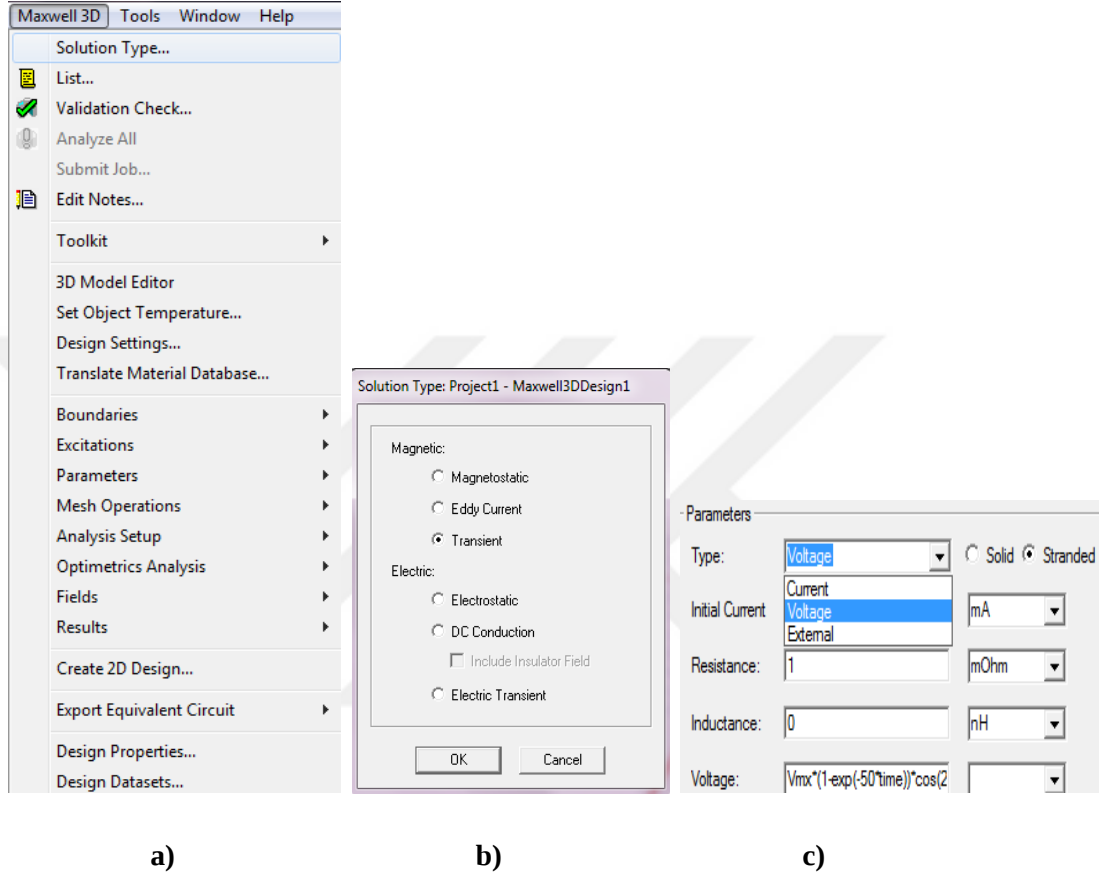
Şekil 3.7. a) ANSYS Maxwell programının RMxpirt kütüphanelerinden hazır sargı seçme **b)** program kütüphanesinden rastgele çağırılan sargıların parametreleri **c)** program kütüphanesinden rastgele çağırılan nüvenin parametreleri **d)** program kütüphanesinden rastgele çağırılan 3 fazlı transformör nüvesinin yapısı **e)** program kütüphanesinden rastgele çağırılan 3 faz sargının transformör nüvesi ile bir aradayken ki şekli

3.7.2. Analiz Çeşidinin Belirlenmesi

ANSYS Maxwell programında üç tanesi manyetik, üç tanesi elektrik olmak üzere toplamda 6 farklı analiz tipi mevcuttur. Bu tez çalışmasında manyetik alanın geçici rejim, analiz tipi seçilmiştir. Programın arayüzünde bulunan Maxwell 3D bölümünde analiz tipi Şekil 3.8.a ve Şekil 3.8.b de gösterildiği gibi seçilebilir.

Bu tez çalışmasında transformörlerin geçici durum analizi yapılmıştır. Geçici durum analiz tipinde uyartım iletkenin yüzeyi ve kesitinden yapılmaktadır. Böyle bir

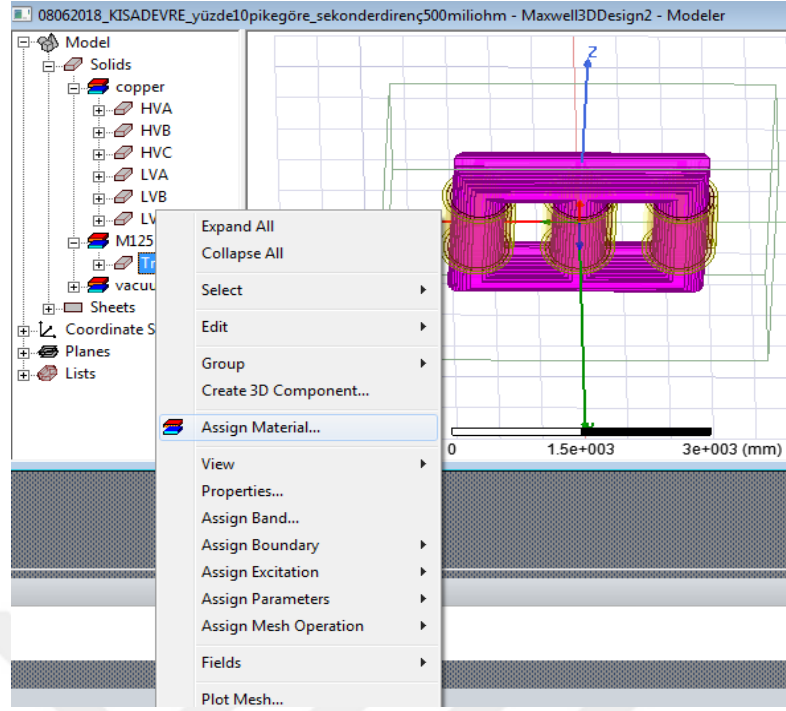
durumda sabit akım ve ya gerilim devreye içeriden ve ya dışarıdan bir kaynak ile verilebilmektedir. Bu tez çalışmasında transformatörlerin model tasarımında kullanılan uyartım tipi Şekil 3.8.c. de gösterildiği gibi Voltage ve External (harici) olarak ayrı ayrı ayarlanmıştır.



Şekil 3.8. Programın ara yüzünde analiz tipi belirleme

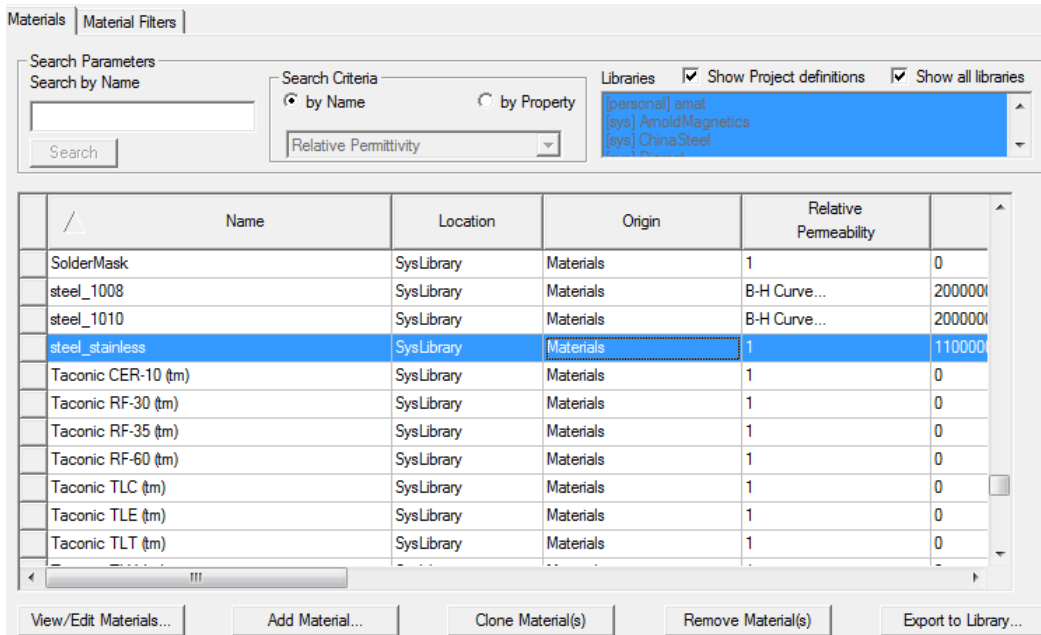
3.7.3. Kullanılacak Malzemelerin Belirlenmesi

Oluşturulan modele uygun geometri çizildikten sonra kullanılan nüve ve sargıyı oluşturan malzemeler ile vakum bölgesinin türünü tanımlamak gerekir. Tasarımda kullanılacak malzeme türünü belirlemek için sırasıyla; malzeme modelin üzerinden seçilir, mouse ile sağ tıklanır (Assign Material), kullanılacak olan malzeme (sargılar, nüve) programın kütüphanesinde varsa 'View/Edit Material' veya 'Add Material' seçeneklerine tıklanarak eklenir. Bu tez çalışmasında Şekil 3.9.a'da gösterildiği gibi malzeme tanımlaması yapılmıştır.



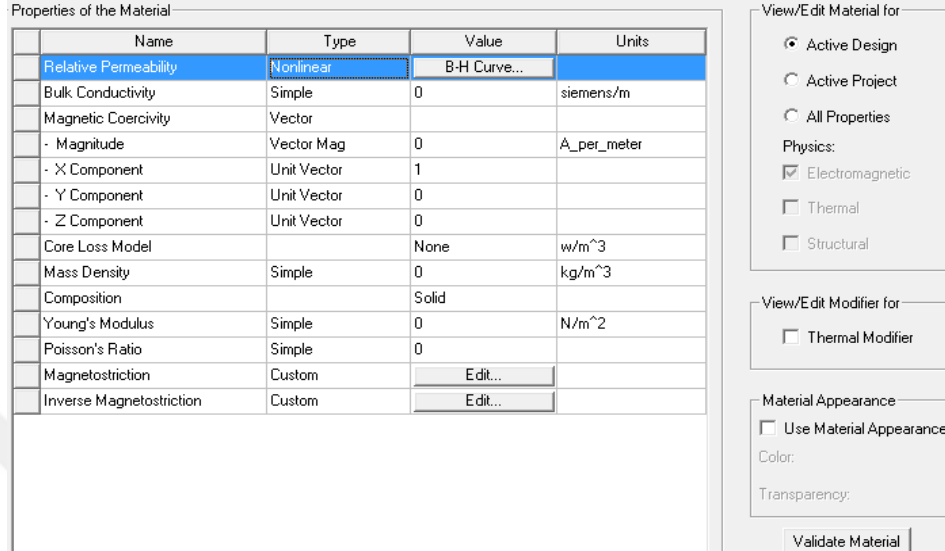
Şekil 3.9. Transformör nüvesi için malzeme tanımlama menüsü

Tasarım yapılırken halihazırda kullanılan program kütüphanesinde versiyon veya başka bir nedenden dolayı kütüphanede olmayan bir malzemenin kullanılması gerektiği durumda Şekil 3.10.'da gösterildiği gibi 'View/Edit Material' veya 'Add Material' kısmına mouse ile çift tıklanır.



Şekil 3.10 Program kütüphanesinden uygun malzeme seçme menüsü

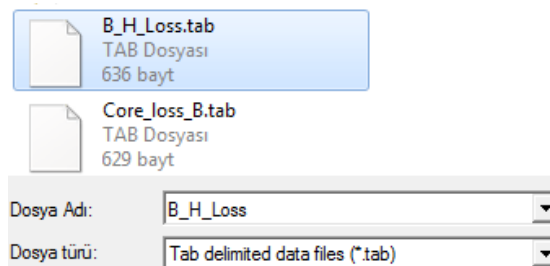
Malzeme özelliğini belirten sayfada Şekil 3.11’de gösterildiği gibi, malzeme tipi ‘Nonlinear’ olacak şekilde seçilir, bu durumda listede değer olarak çıkan B-H eğrisi tıklanırsa açılacak olan pencerede ‘Import Dataset’ seçeneği çıkacaktır.



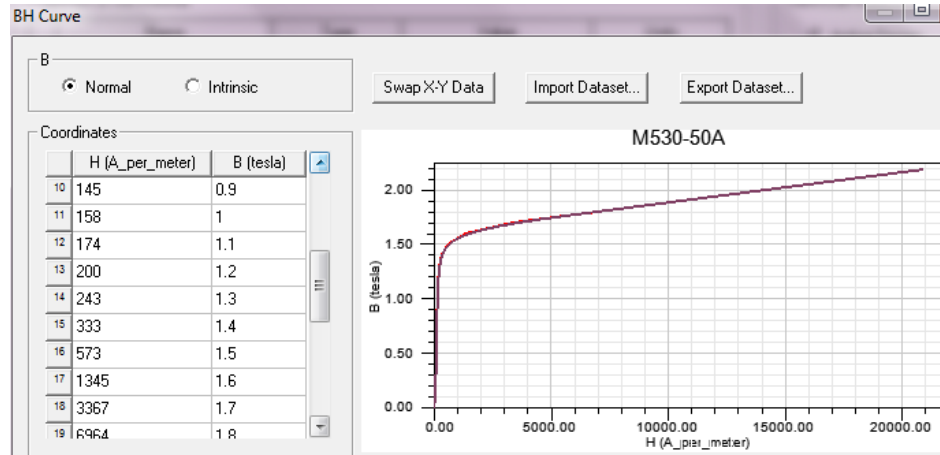
Şekil 3.11. Nüve için kullanılacak malzemenin seçimi

Bu aşamadan sonra ‘Import Dataset’ seçeneği tıklanınca Şekil 3.12’de program kütüphanesinde bulunmayan bir nüve veya sargı malzemesi ‘*.tab’ uzantılı ‘B-H_Loss’ adlı dosya çağırılarak programda kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasında transformatörlerde nüve malzemesi olarak M530-50A ismine sahip lamine halde çelikten yapılmış olan saclar kullanılmış ve kütüphanede bulunmadığı için dışarıdan yüklenmiştir. Benzer şekilde nüvenin güç kaybı değerinin elde edilmesi için ‘*.tab’ uzantılı ‘Core_Loss’ adlı dosya çağırılarak programda kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışmada transformatör tasarımı için kullanılan M530-50A adlı, lamine çelikten oluşturulmuş nüvenin B-H eğrisi Şekil 3.13’de gösterilmiştir.

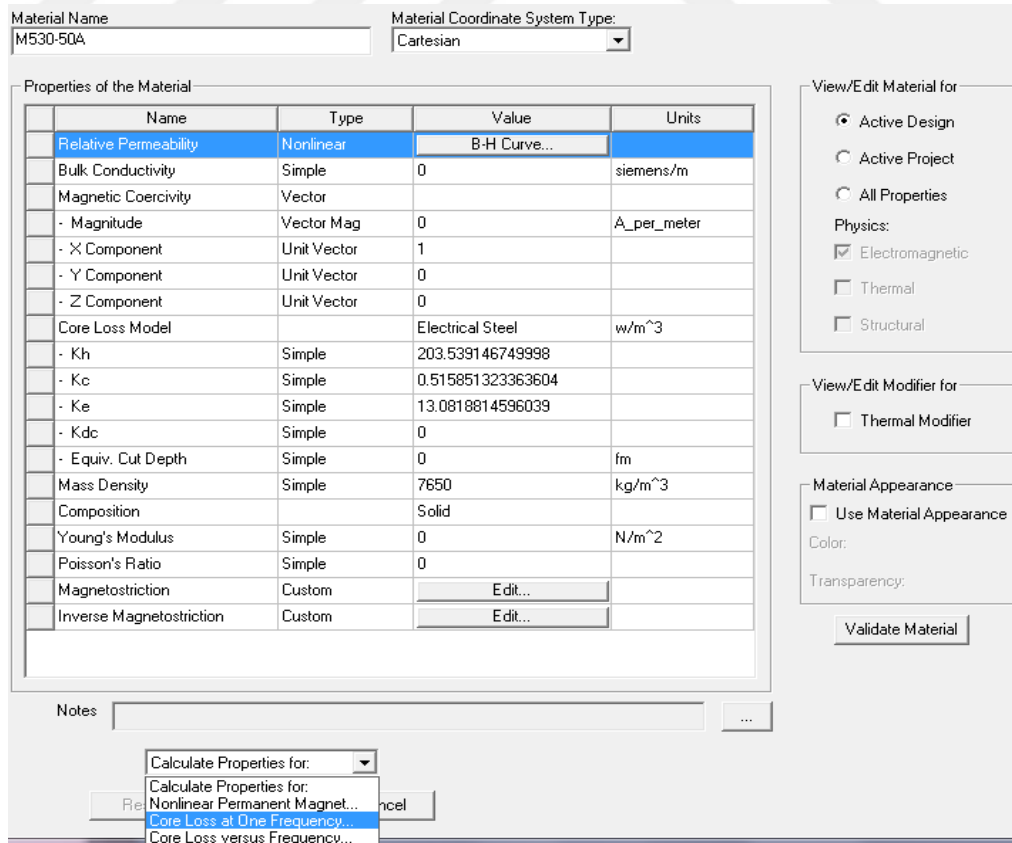


Şekil 3.12. Kütüphane dışından seçilen B-H eğrisini ve nüve kaybı eğrisini veren dosyalar

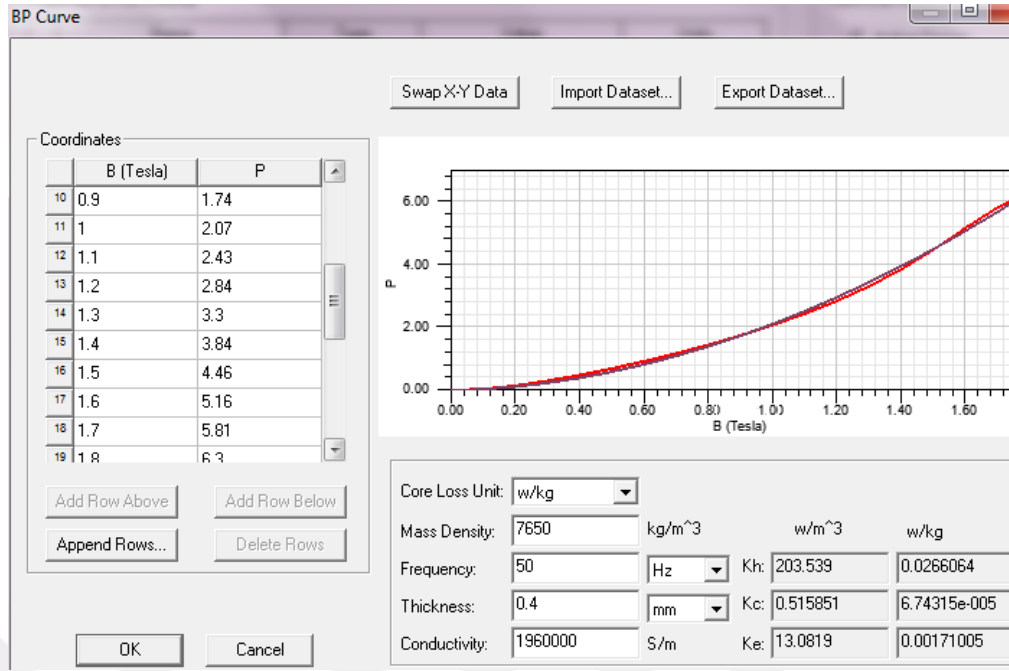


Şekil 3.13. Nüve malzemesi olarak kullanılan M530-50A adlı malzemenin B-H eğrisi

ANSYS Maxwell programı ile tasarım gerçekleştirilirken, nüve malzemesi olarak kullanılan materyalin nüve kaybı katsayıları K_h , K_c ve K_e değerleri frekansa ve laminasyon kalınlığına bağlı olarak değişir. 50 Hz frekans değerindeki nüve kaybı katsayıları ve M530-50A tipi laminasyon malzemesinin özgül nüve kayıpları Şekil 3.14.a ve b' de gösterilmiştir.



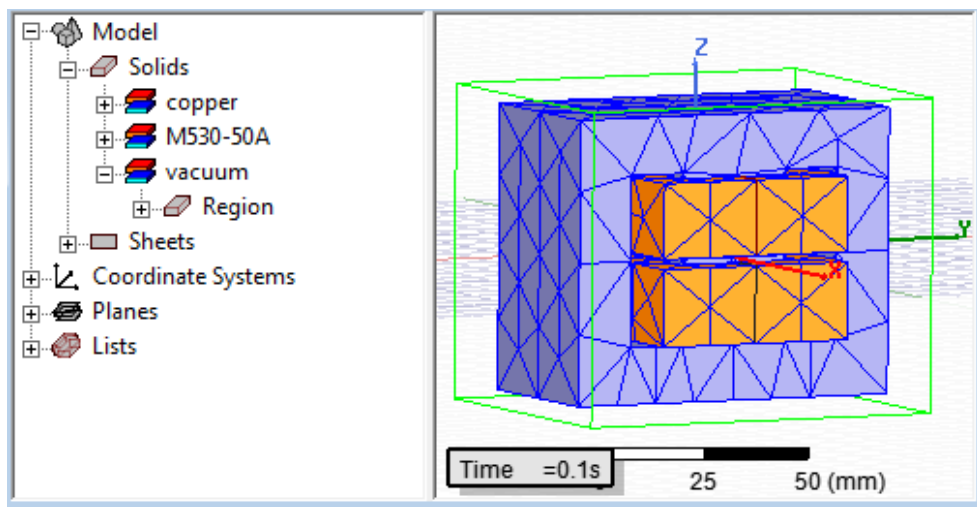
a)



b)

Şekil 3.14. a) Nüve malzemesi olarak kullanılan M530-50A adlı malzemenin nüve kaybı katsayıları **b)** M530-50A tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kayıpları

ANSYS Maxwell ile transformatör tasarımı gerçekleştirmeye devam edildiği durumda yukarıda anlatılan aşamalardan sonra meydana gelen modelin içinde analiz edilebileceği bir alanın boyutları Şekil 15.a ve Şekil 15.b'de gösterildiği gibi oluşturulur ve bu alan genellikle vakum olarak seçilir.



a)

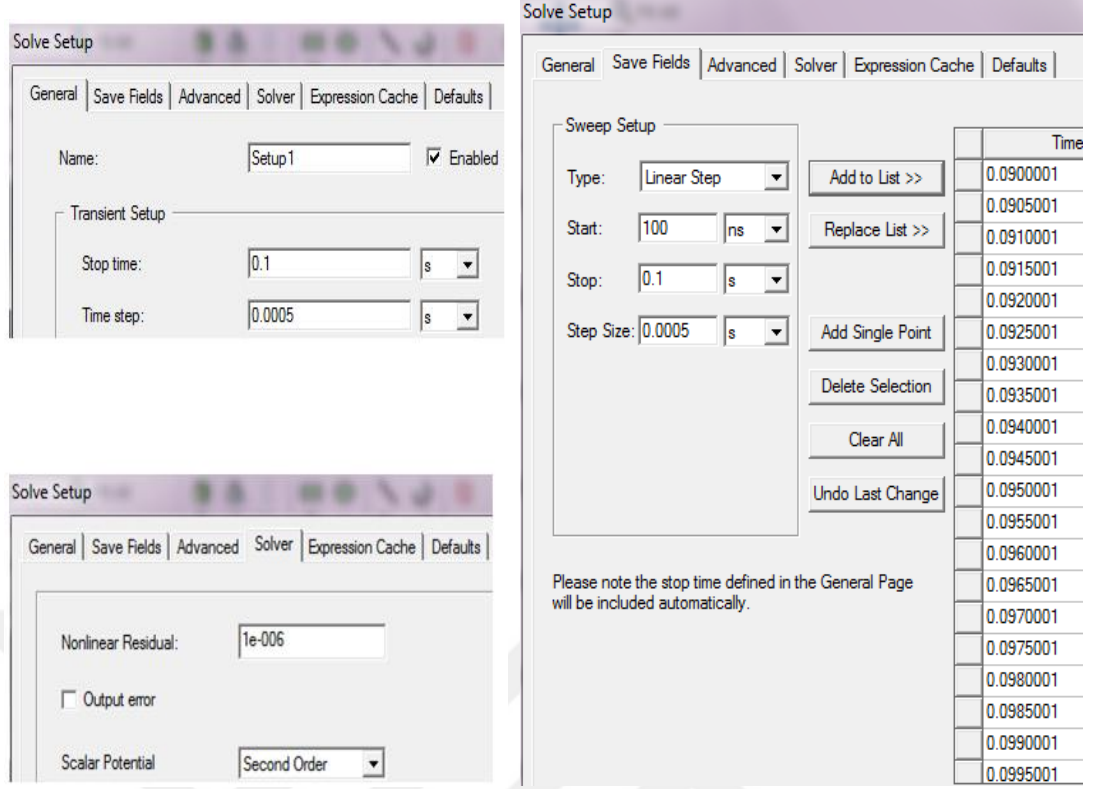
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateRegion		
Coordinate Sys...	Global		
+X Padding Ty...	Percentage Offset		
+X Padding D...	5		5
-X Padding Type	Percentage Offset		
-X Padding Data	5		5
+Y Padding Ty...	Percentage Offset		
+Y Padding D...	5		5
-Y Padding Type	Percentage Offset		
-Y Padding Data	5		5
+Z Padding Ty...	Percentage Offset		
+Z Padding D...	5		5
-Z Padding Type	Percentage Offset		
-Z Padding Data	5		5

b)

Şekil 3.15. a) Modelin içinde bulunduğu vakum alanı **b)** oluşturulan vakum bölgesinin boyutları

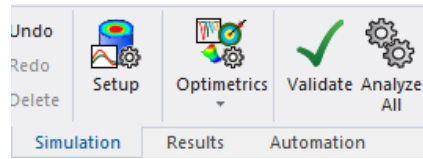
3.8. Analiz İçin Zamanın Ayarlanması

ANSYS Maxwell programında üzerinde çalışılan model için analiz işlemi başlamadan önce analiz türüne göre çözüm ayarları yapılmalıdır. Analiz işlemi yapılırken akım, gerilim değerlerinin sinyal dalga formlarının düzgün çıkması için Time step (örnekleme zaman adımı) mümkün olduğunca küçük değerlerde seçilmelidir. Ayrıca analiz süresinin makul değerlerde seçilmesi analizin doğruluğu açısından önemlidir sürenin uzun seçilmesi analizin zamanının uzatırken, 4-5 periyotluk süreden daha az bir sürenin seçilmesi durumunda, sinyaller kararlı bir hale gelemediği için tasarım ile ilgili elde edilecek sonuçlar yetersiz ve gerçekten uzak değerlerde olacaktır. Bu tez çalışmasında yapılan tasarımlarda Şekil 3.16'da görüldüğü gibi örnekleme zaman aralığı 0.0005 s ve simulasyon bitiş süresi 0.1 s olarak ayarlanmıştır. Belirlenen zamanlardaki (bu tür analizlerde ns mertebesindeki zamanlar) görüntüler kaydedilerek simulasyonlar elde edilebilir ve bu simulasyonlar istenirse animasyon olarak farklı formatlarda video olarak da kaydedilebilir.



Şekil 3.16. Örneklemeye zamanına bağlı Simulasyon oluşturma zaman ayarları

Simulasyonu yapılacak olan ekipman için önce tanımlama (Validate) işlemi yapılır, eğer tasarımda analize engel bir hata yoksa Şekil 3.17’de gösterilen Analyze All seçeneği tıklanarak, analiz işlemine başlanır.



Şekil 3.17. Analize başlamadan önce tıklanan validate ve analyze all seçeneği

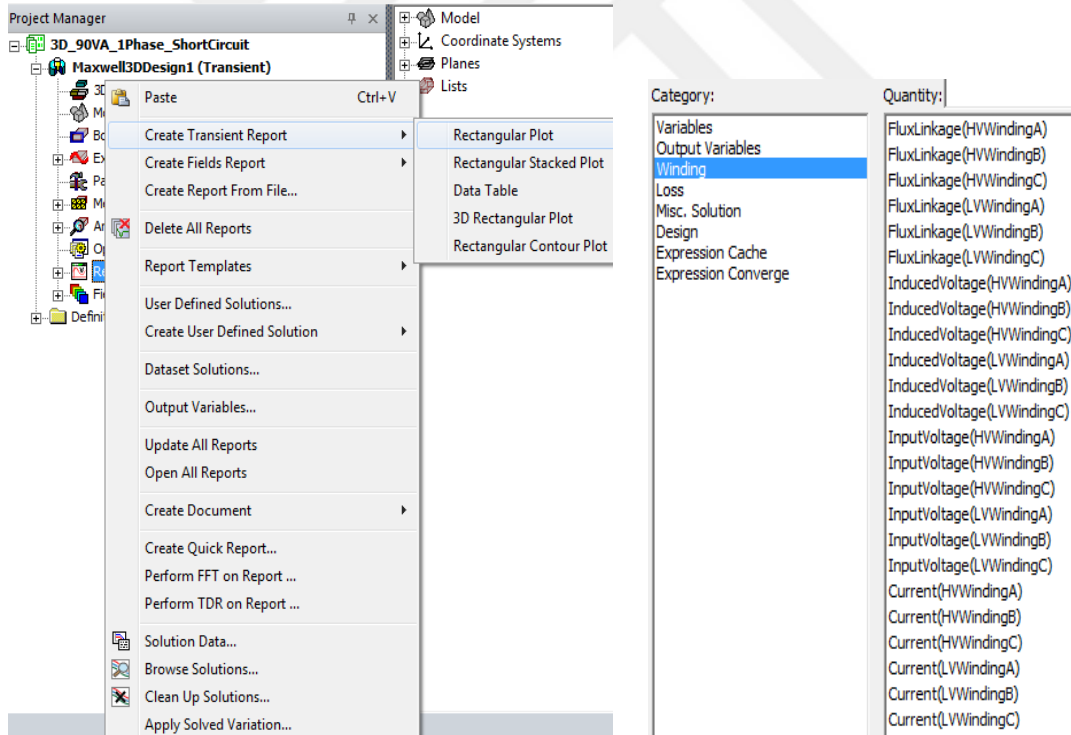
3.9. Oluşturulan Modelde Çözüm Ağı Ayarları

ANSYS Maxwell programında üzerinde çalışılan model için gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra hemen ağ oluşturmaya ve analize başlar. Bir ağ otomatik olarak üretilir daha sonra her model için bir alan çözümü hesaplanır. Model üzerinde oluşan ağ (mesh) sayısı arttıkça elde edilen analizin ve buna bağlı simulasyonun değeri o derece gerçeğe yakın olur. Bir model için oluşan başlangıç düğüm miktarı

genelde yeterli değildir daha sonra her eleman, alan çözümü için yeterli küçük bir bölgeye ayrılır ve ağ miktarı artırılarak doğru çözüme yaklaşılr. Düğüm sayısını arttırmanın bir tek dez avantajı, problemin çözüm süresini uzatmasıdır [4].

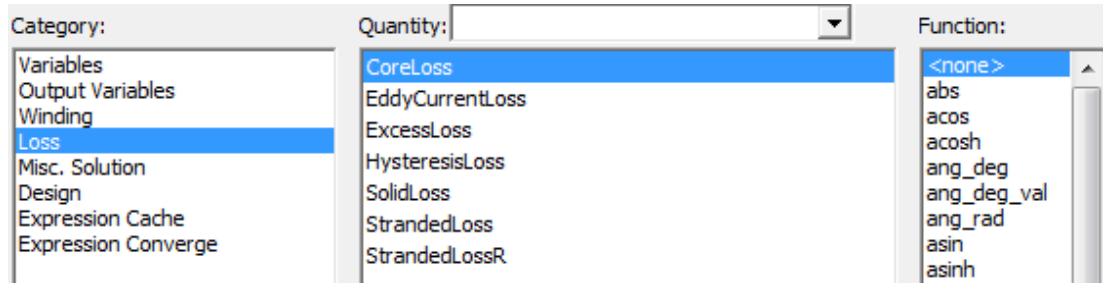
3.10. Simulasyon Sonucunda Değerlerin Elde Edilmesi

ANSYS Maxwell programı hesaplamalar ve analiz sonucunda; kayıplar, akılar, akımlar, gerilimler, akım yoğunlukları, manyetik alan yoğunluğu ve manyetik alan kuvveti sonuçlarını sunabilmektedir. “Create Transient Report” seçeneğinin altında faz gerilimleri, faz akımları, endüklenen gerilimler, endüklenen akılar, kayıplar gibi sonuçların elde edilmesi mümkündür. Analiz işlemi gerçekleşirken veya analiz işleminden sonra programda projenin adı altında ‘Result’ kısmına sağ tıkladıktan sonra ‘Rectangular Plot’ seçeneği seçilmesi durumunda sargılara ait akım, gerilim ve akılar ile ilgili grafikler Şekil 3.18’de görülen menü takip edilerek elde edilebilir.



Şekil 3.18. Simulasyon sonucunda sargılarda oluşan akım, gerilim ve akı grafiklerinin elde edilmesi için izlenen yol

Analiz işlemi gerçekleşirken veya analiz işleminden sonra programda projenin adı altında ‘Result’ kısmına gelip sağ tıkladıktan sonra ‘Loss’ seçeneği tıklanırsa model ile ilgili kayıpların olduğu grafikler Şekil 3.19 da görüldüğü gibi elde edilebilir.



Şekil 3.19. ANSYS Maxwell programında model ile ilgili kayıpların seçildiği ekran

4. UYGULAMA VE SİMULASYON

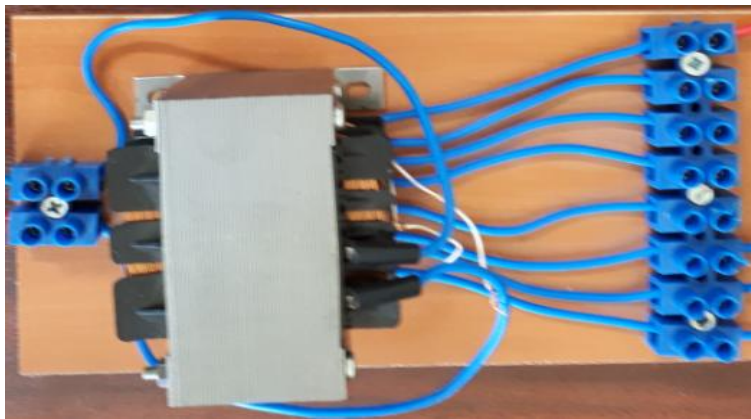
Bu tez çalışmasında daha öncede değinildiği gibi iki tip transformatör ele alınmıştır. Bu transformatörlerden birincisi; tek fazlı 1 giriş 7 çıkışlı düşük güçlü (90 VA) transformatör iken ikincisi 3 fazlı üçgen/yıldız bağlantılı 15 MVA güce sahip güç transformatörüdür.

4.1. Tek Fazlı Transformatörün Analizi

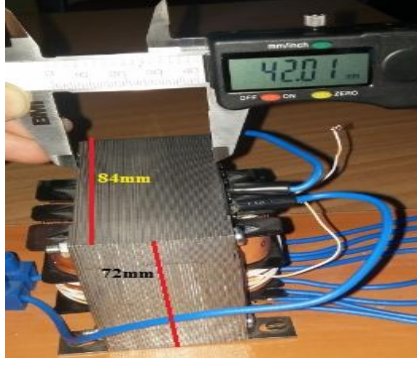
Analiz ve ölçümler için ilk etapta İnönü Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği-Güç Elektroniği Labaratuvarında kullanılmakta olan 90 VA güce sahip transformatörü bir prototip oluşturmak ve elde edilen simulasyon sonuçlarının deneysel ölçümler ile karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

Kullanılan transformatörün genel bilgileri

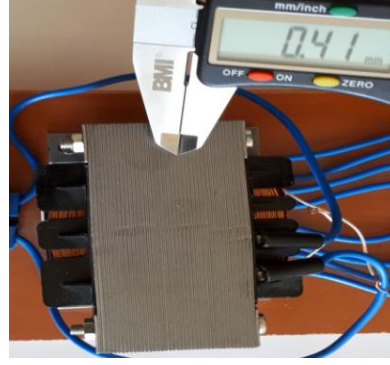
Test ve ölçüm için Mantel tip transformatör kullanılmıştır. Sargılar orta bacağın etrafına sarılmıştır. Transformatör Şekil 4.1.'de görüldüğü gibi giriş gerilimi 220 V AC çıkış gerilimleri 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 V AC dir. Çoğunlukla düşük güçlü devrelerin beslemesinde kullanılan 90 VA güce sahip bu transformatör nüvesinin derinliği 42 mm, yüksekliği 72 mm ve genişliği 84 mm olup lamine haldeki saçlardan meydana gelmiştir. Transformatörü oluşturan lamine haldeki saçlar yaklaşık olarak 0.4 mm olarak kumpas aleti ile Şekil 4.2'de ölçülmüştür. Transformatörün yüksek gerilim sargılarının derinliği 68 mm ve genişliği 52 mm olup kumpas ölçüm aleti ile Şekil 4.3'te görüldüğü gibi ölçülmüştür. Sarım oranı 4.58 olarak çalıştırılmıştır.



Şekil 4.1. 90 VA güce sahip bir girişli yedi çıkışlı olan transformatör resmi

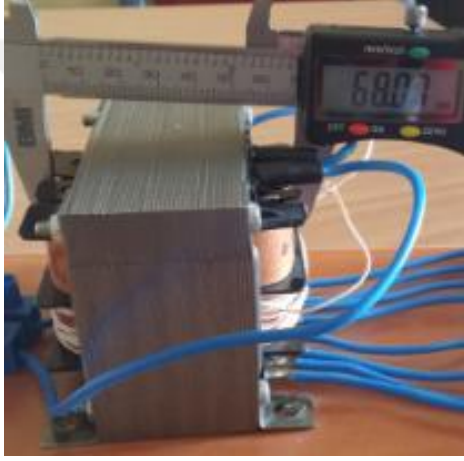


a)



b)

Şekil 4.2. a) Transformatör nüvesinin boyutları b) Nüveyi oluşturan ince saçların kalınlığı



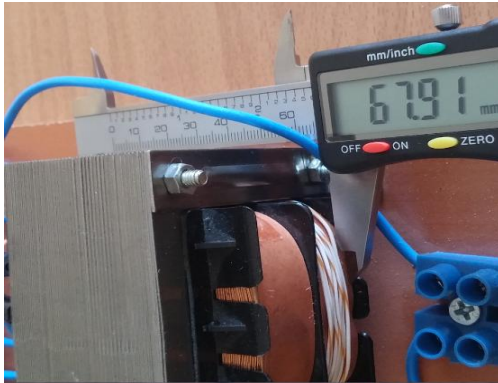
a)



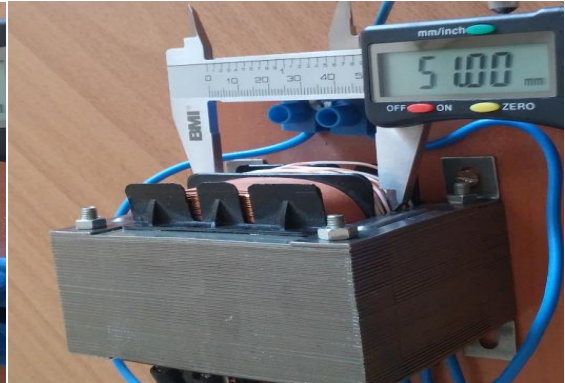
b)

Şekil 4.3. a) Yüksek gerilim tarafı sargıların derinliği, b) Yüksek gerilim tarafı sargıların genişliği

Transformatörün Alçak gerilim sargılarının derinliği 68 mm ve genişliği 51 mm olup kumpas ölçüm aleti ile Şekil 4.4'te görüldüğü gibi ölçülmüştür.



a)

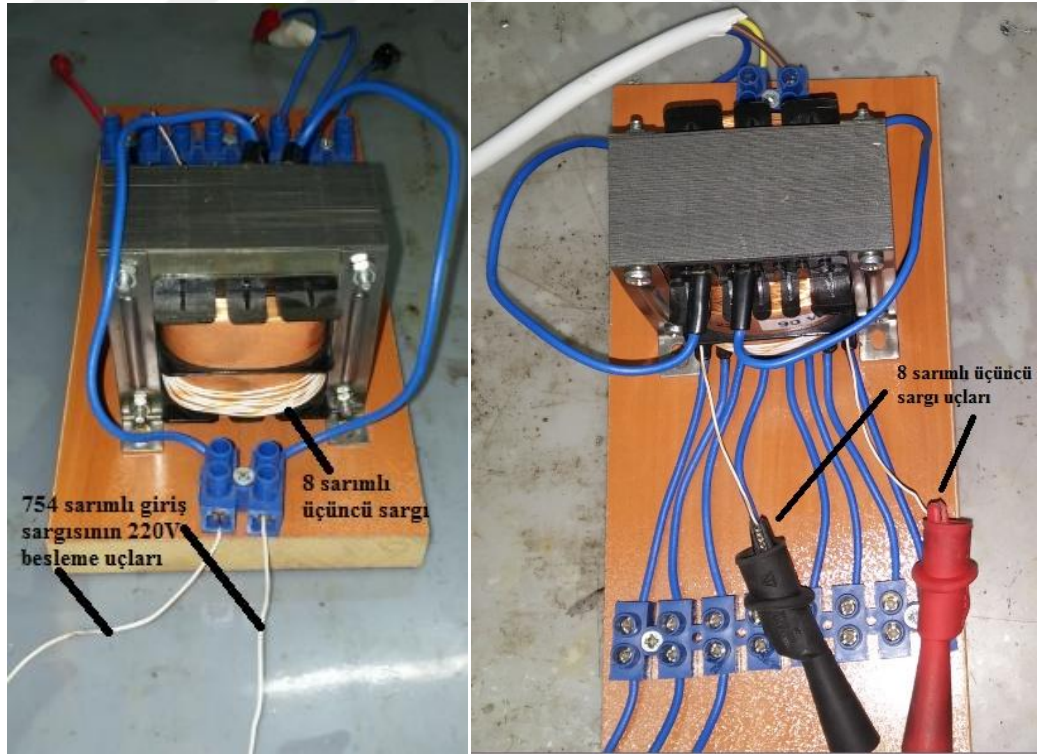


b)

Şekil 4. 4. a) Alçak gerilim tarafı sargıların toplam derinliği b) alçak gerilim tarafı sargılarının toplam genişliği

Bütün transformatörlerde olduğu gibi test için kullanılmakta olan transformatörün de sargı sayıları etiketinde belirtilmediği için giriş ve çıkış sargı sayıları bilinmiyordu. Sargıların sayısını bulmak için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

1. Orta bacakta çıkış sargılarının etrafına ince bakır bir tel ile 8 adet sarım (üçüncü sargı) sıkı halde Şekil 4.5'te görüldüğü gibi sarılmıştır.
2. Yüksek gerilim (220 V) sargılarının uçlarına şebeke gerilimi olan 220 V Şekil 4.6 a'da uygulanmıştır.
3. Üçüncü sargının (8 adet sarıma sahip olan) uçlarından Multimetre ile 2.34 V gerilim Şekil 4.6 b' de görüldüğü gibi ölçülmüştür.
4. Sargı sayısı ve sargı geriliminin doğru orantılı olduğu bilindiği için;
$$\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2} = \frac{V_3}{N_3}$$
 eşitliği kullanılabilir.
5. Burada $V_1 = 220 \text{ V}$, $V_3 = 2.34 \text{ V}$, $N_3 = 8$ sargı; böylece giriş tarafı (yüksek gerilim tarafında) 752 sarım olduğu hesaplanmıştır.
6. Çıkış tarafında sargı sayısını bulmak için $\frac{V_1}{N_1} = \frac{V_2}{N_2}$ formülünden yararlanılmış ve $N_2 = \frac{V_2}{V_1} * N_1$ hesabına göre çıkış tarafı (alçak gerilim tarafında) 164 sarım olduğu hesaplanmıştır.



a) 752 sarım sayılı sargının 220 V AC besleme uçları **b)** 8 sarımlı üçüncü sargının uçları



a)



b)

Şekil 4.6.a) Transformatörün giriş sargı uçları 220 V AC şebekeye bağlanmış
b) Transformatör 220 V AC şebekeye bağlı iken çıkış sargı uçlarından 2.34 V AC ölçülmüş

4.2. Transformatör Parametrelerinin Ölçümü

4.2.1 Sargı Dirençleri Değerlerinin Tespiti

Sargı dirençlerinin tespit edilebilmesi için iki ayrı yöntem uygulanmıştır.

Bu yöntemlerden birincisi: Transformatör herhangi bir kaynağa bağlı değil iken ohmmetre kullanılarak giriş ve çıkış sargılarının direnç değerleri ölçülmüştür. Bu durumda transformatör herhangi bir kaynağa bağlı değil iken giriş sargısında ölçülen direnç değeri 21.13Ω kadarken çıkış sargılarında 7 farklı gerilim kademesi bulunduğundan dolayı her bir kademe için ayrı ayrı direnç değerleri ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Transformatörün alçak gerilim tarafı sargı dirençlerinin değerleri

Kademe	Etiket gerilimi (V)	Ölçülen gerilim (V)	0 kademesi ile ölçülen direnç (Ω)
0	0	0	
1	12	12.2	0.41
2	18	17.9	0.51
3	24	23.8	0.66
4	30	30.1	0.80
5	36	36.4	0.89
6	42	42.3	1.04
7	48	47.9	1.20

Bu yöntemlerden ikincisi: DC güç kaynağı kullanıldı. Nominal akım değeri hesaplanmış ve bu akım değerinin yarısı büyüklükte DC akım transformatörün uçlarına uygulanmıştır, ölçülen DC gerilim ve DC akım değerleri kullanılarak sargı dirençleri hesaplanmıştır. Transformatörün görünür gücü değerinden yola çıkılarak giriş sargı değeri ve çıkış tarafında 7. kademede bulunan sargı dirençleri aşağıdaki

$$S = V_P i_P = V_S i_S$$

$$90 = 220 i_P = 48 i_S$$

$$i_P = 0.409 \text{ A}, \quad i_S = 1.875 \text{ A}$$

ölçüm değerlerinden yola çıkılarak hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde S transformatörün görünür gücünü ifade etmektedir. Test esnasında yüksek gerilim ve alçak gerilim taraflarının sargı dirençlerinin değeri aşağıda belirtilen yöntem ile hesaplanmıştır.

$i_{PDC} = 0.20 \text{ A}$ olacak şekilde ayarlanmış ve $V_{PDC} = 4.3 \text{ V}$ olarak ölçülmüştür, bu aşamadan sonra hesaplanan giriş sargı direncinin değeri ohm kanunu gereği

$$R_P = \frac{V_{PDC}}{i_{PDC}} = \frac{4.3}{0.20} = 21.5 \Omega \text{ olarak bulunmuştur}$$

$i_{SDC} = 0.938 \text{ A}$ olacak şekilde ayarlandı ve $V_{SDC} = 0.969 \text{ V DC}$ olarak ölçülmüştür bu aşamadan sonra hesaplanan çıkış sargı direnci değeri

$$R_S = \frac{V_{SDC}}{i_{SDC}} = \frac{0.97}{0.94} = 1.03 \Omega \text{ olarak bulunmuştur.}$$

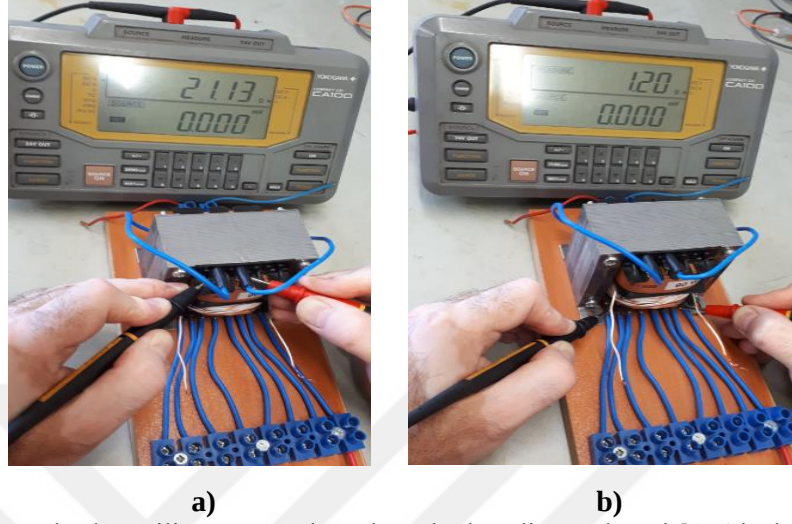
Transformatör herhangi bir kaynağa bağlı değil ken sırasıyla yüksek gerilim ve alçak gerilim sargılarının dirençleri Ohmmetre ile Şekil 4.7’de görüldüğü gibi ölçülmüştür.

4.2.2. Boşta Çalışma Testi

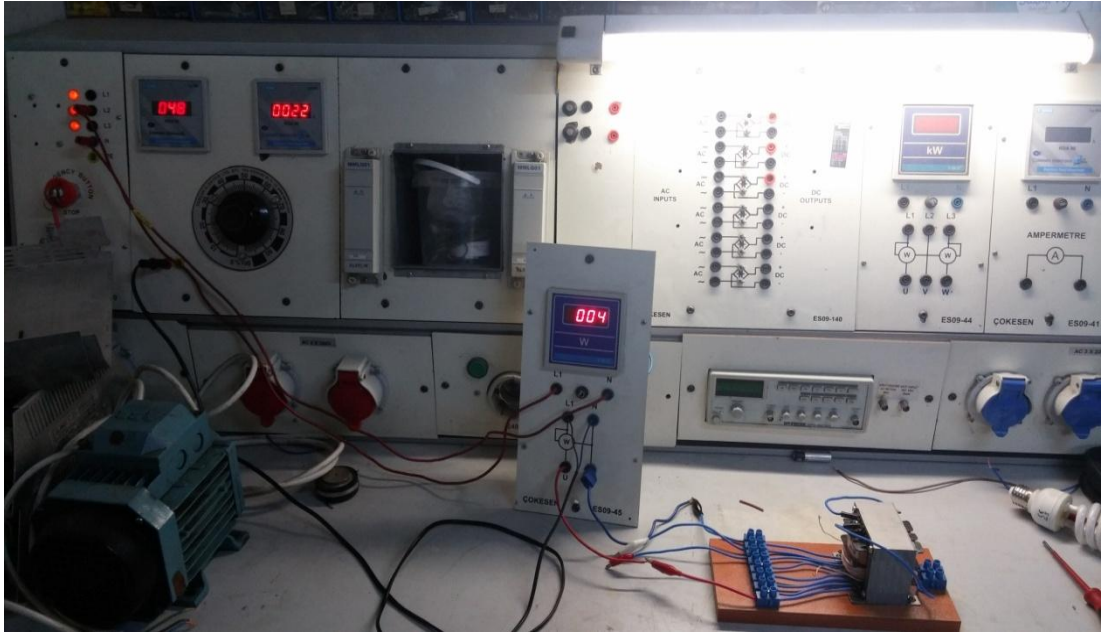
Transformatörün yüksek gerilim (220 V) sargı uçları açık devre edildi ve alçak gerilim sargı uçlarına nominal hat gerilimi (48 V) uygulandı. Alçak gerilim tarafında ampermetre devreye seri şekilde bağlandı ve açık devre akımı 152 mA olarak ölçülmüştür. Bu aşamadan sonra hesaplanan devre admittansının büyüklüğü;

$$|Y_{OCL}| = \frac{|i_{OC}|}{|V_{OC}|} = \frac{152 * 10^{-3}}{48} = 3,17 * 10^{-3}$$

Afşin Elbistan B Termik Santral İşletme Müdürlüğü / Elektrik Bakım atölyesinde transformatörün açık devre durumundaki gücü Wattmetre ile Şekil 4.8’de görüldüğü gibi 4 W olarak ölçülmüş ve teorik olarak 3.99 W olarak hesaplanmıştır elde edilen bu değerler daha sonra ANSYS Maxwell simülasyonun sonucu ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.7. a) Yüksek gerilim sargı uçlarından ölçülen direnç değeri b) Alçak gerilim sargı uçlarından ölçülen direnç değeri



Şekil 4.8. Boşta çalışma testinde Wattmetre ile ölçülen nüve kaybı

$$\text{Güç faktörü} = \cos \theta = \frac{P_{OC}}{|v_{OC}| |i_{OC}|}$$

$$\text{Güç faktörü açısı} = \theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{OC}}{|v_{OC}| |i_{OC}|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{4}{48 \times 0.152} \right) = 56.75^\circ$$

olarak hesaplanmıştır. Teorik olarak nüve kaybının değeri ve transformatörün uyartım koluna ait admittans değeri aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$P_{OC} = (48) \times (0.152) \times \cos(56.8) \cong 3.99W \quad P_{OC} = (48) \times (0.152) \times \cos(56.8) \cong 3.99W$$

$$Y_{eL} = \frac{i_{OC}}{V_{OC}} \angle(-\theta)$$

$$Y_{eL} = 3.17 * 10^{-3} \angle(-56.75) = \frac{1}{R_{CL}} + \frac{1}{jX_{ML}} = 1.736 * 10^{-3} - j2.648 * 10^{-3}$$

olarak hesaplanmıştır, direnç ve reaktans değerleri ise aşağıdaki şekilde bulunmuştur.

$$R_{CL} \cong 576 \, \Omega, \quad X_{ML} \cong 377 \, \Omega = 2\pi fL = 100\pi L$$

4.2.3. Kısa Devre Testi

Transformatörün alçak gerilim (48 V) sargı uçları kısa devre edildi, yüksek gerilim sargı uçları değişken bir gerilim kaynağı yardımıyla nominal hat akımı ($\sim 400 \, mA$) uygulandı. Test nominal akım değerlerinde uygulandığı için bakır kayıpları nominal yükteki bakır kayıplarına eşittir. Test esnasında transformatörün giriş gücü (P_{SC}), giriş akımı (i_{SC}) ve giriş gerilimi (V_{SC}) Şekil 4.9'da görüldüğü gibi 9 W olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.9. Kısa devre testinde Wattmetre ile ölçülen bakır kaybı

$$P_{SC} = 9W, \quad i_{SC} = 401 \text{ mA}, \quad V_{SC} = 24 \text{ V}$$

Transformatörün yüksek gerilim tarafına göre seri empedans değerinin büyüklüğü

$$|Z_{SE}| = \frac{|V_{SC}|}{|i_{SC}|} = \frac{24}{0.4} = 60 \Omega$$

$$\text{Güç faktörü} = \cos \theta = \frac{P_{SC}}{|V_{SC}| |i_{SC}|}$$

$$\text{Güç faktörü açısı} = \theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{SC}}{|V_{SC}| |i_{SC}|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{9}{24 \times 0.4} \right) = 20.36^\circ$$

olarak hesaplanmıştır. Akım gerilimden vektörel olarak geride olduğu için empedansın açısı pozitifdir.

$$\mathbf{Z}_{SEH} = \frac{V_{SC}}{i_{SC}} \angle(\theta) = \frac{24}{0.4} \angle(20.36^\circ) = 60 \angle(20.36^\circ) \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{SEH} = 56.25 + j20.86$$

olarak elde edilmiştir. Transformator elektriksel modelinin toplam seri empedansı $\mathbf{Z}_{SE}$ olarak ifade edilirse

$$\mathbf{Z}_{SEH} = R_{ES} + jX_{ESH}$$

$$\mathbf{Z}_{SEH} = (R_H + a^2 R_L) + j(X_H + a^2 X_L),$$

$$a = \frac{N_H}{N_L} = 4.58 \text{ ve } a^2 = 20.98$$

$$\mathbf{Z}_{SEH} = 56.25 + j20.86$$

56.25= 21.5+20.98 R_L ve böylece; $R_L = 1.66 \Omega$ olarak bulunur.

Ayrıca genel olarak transformatorlerin giriş ve çıkış empedansları arasında

$$X_H = a^2 X_L = 0.5 X_{ESH}, \quad X_{ESH} = 20.86, \text{ böylece}$$

$$X_H = 10.43 \Omega = 2\pi f L_H = 100\pi L_H$$

$$L_H \cong 33 \text{ mH} \text{ olarak bulunur ve}$$

$$X_L \cong 0.49 \Omega = 2\pi f L_L = 100\pi L_L$$

$$L_L \cong 1.58 * 10^{-3} \text{H}$$

bulunur. Transformatör sargılarının direnci teorik olarak da hesaplanmış ve bu sargılardan dolayı transformatörde oluşan bakır kaybı hesaplanmıştır. Daha önceki bölümlerde de ifade edildiği letken bir telin direnci aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir.

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

l : İletkenin uzunluğu,

A : İletkenin kesit alanı

ρ : Öz iletkenlik katsayısı

olup bakır sargı iletkeni için oda şartlarında ρ değeri $0.0175 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ 'dir.

Bu bilgiler ışığında sargıların direncini bulmak için yüksek gerilim ve alçak gerilim sargılarının uzunluğunu ayrı ayrı hesaplamak gerekir. Sargıların her ikisinde transformatörün orta bacağının etrafında sarıldığı bilinmektedir. Transformatör bacağının etrafında bir iletkenin ortalama uzunluğu 200 mm, yüksek gerilim tarafında 752 sargı bulunduğu için toplam uzunluk $752 * (0.2 \text{ m})$ dir. Yüksek gerilim sargısını oluşturan iletkenin çapı 0.8 mm, dolayısı ile yarı çapı 0.4 mm ve yüzey alanı $A = \pi r^2$ hesabıyla bulunur, bu durumda yüksek gerilim sargı direnci

$$R_H = \rho \frac{l_H}{A_H} = 0.0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \frac{752(0.2\text{m})}{\pi(0.2\text{mm})^2} \cong 20.95 \Omega \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Alçak gerilim tarafında 164 sargı bulunduğu için toplam uzunluk $164 * (0.2 \text{ m})$ kadardır. Alçak gerilim sargısını oluşturan iletkenin çapı 0.4mm, dolayısı ile yarı çapı 0.2mm ve yüzey alanı $A = \pi r^2$, bu durumda alçak gerilim sargı direnci

$$R_L = \rho \frac{l_L}{A_L} = 0.0175 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \frac{164(0.2\text{m})}{\pi(0.4\text{mm})^2} \cong 1.14 \Omega \text{ olarak bulunmuştur.}$$

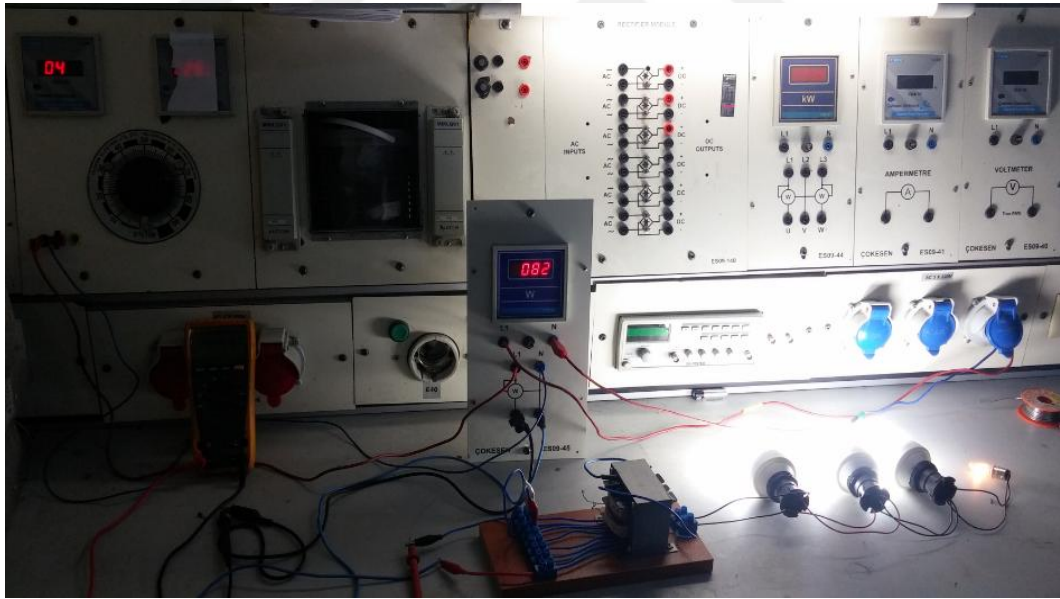
90 VA görünür güce sahip transformatörün yüksek gerilim ve 7. kademedeki alçak gerilim sargılarının çeşitli yöntemler ile ölçülen, hesaplanan direnç değerleri Çizelge 4.2'de belirtilen şekildedir.

Çizelge 4.2. YG ve AG sargı direçlerinin farklı metodlar ile ölçülen-hesaplanan değerleri

	Ölçüm aleti ile ölçülen değer	Elektriksel model ile hesaplanan değer	DC test ile hesaplanan değer	İletkenin direnç hesabı ile hesaplanan değer
R_H	21.13 Ω	21.5 Ω	21.5 Ω	20.95 Ω
R_L	1.20 Ω	1.66 Ω	1.03 Ω	1.14 Ω

4.2.4. Tam Yük Testi

Bu test gerçekleştirilirken transformatör alçak gerilim (48 V) tarafından beslendi ve yüksek gerilim tarafına yük olarak 4 adet lamba bağlandı. Giriş tarafına varyaktan gerilimi ayarlarken ampermetreden nominal akım ($\sim 1,875$ A) akım elde edilene kadar 48 V verilmiş oldu. Yüksek gerilim tarafına yük olarak 82 W gücünde ($3 \times 24W$ ve $1 \times 10W$) toplamda 4 adet lamba paralel halde bağlandı, bu esnada ampermetreden 1,878 A (pratikteki akım değeri) ve wattmetreden Şekil 4.10'da görüldüğü gibi 82 W değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.10. Tam yük testinde yükün(lambaların) çektiği güç Wattmetre ile ölçülmüştür

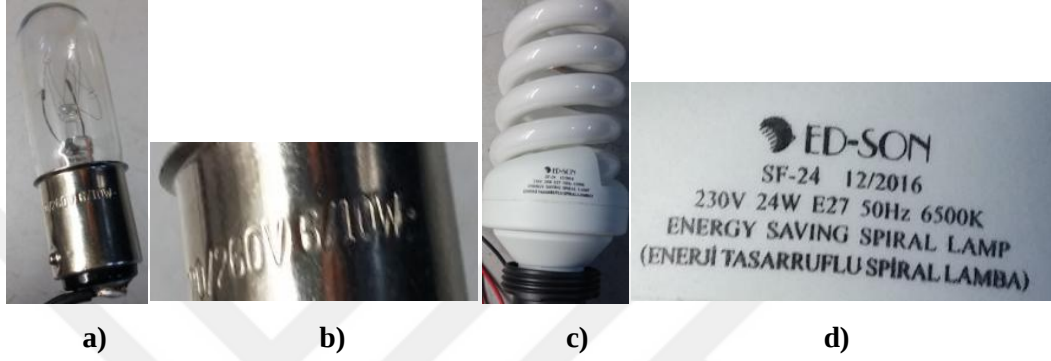
Tam yük testinde transformatörün alçak gerilim (48 V) tarafı ile beslenirken yüksek gerilim tarafına Şekil 4.11'de etiket değerleri görülen lambalar yük olarak bağlanmıştır.

Transformatörün bakır kayıpları ayrıca teorik olarak hesaplanmıştır. Bu kapsamda giriş ve çıkış sargı dirençleri ve nominal akım değerleri göz önünde bulundurularak elektriksel güç formülleri ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir.

$$P_H = i_H^2 \cdot R = (0.409^2)(21.13) = 3,535 \text{ W}$$

$$P_L = i_L^2 \cdot R = (1,875^2)(1.20) = 4,219 \text{ W}$$

Böylece toplam bakır kaybı teorik olarak $P_{SC} = P_H + P_L = 7,754 \text{ W}$ değerine eşittir. Bu tez çalışmasında kullanılan 90 VA gücüne sahip transformatör ile ilgili elde edilen somut değerler Çizelge 4.3'te bir araya getirilmiştir.



Şekil 4.11. a-b) Yük olarak kullanılan 1 adet 220V/10 W güce sahip ampül ve etiketi **c-d)** Yük olarak kullanılan 1 adet 220V/24 W güce sahip ampül ve etiketi



Şekil 4.12. Tam yük testinde ampermetrenin ölçtüğü yük akımının değeri ve transformatörün alçak gerilim besleme voltajı

Çizelge 4.3. Kullanılan tek faz transformatör için verilen, ölçülen ve hesaplanan değerler

Güç(VA)	90
Giriş Gerilimi(V)	220
Çıkış Gerilimi (V)	48
Giriş Sargı Sayısı (N)	752
Çıkış Sargı Sayısı (N)	164
Giriş Faz Akımı (A)	0.409
Çıkış Faz Akımı (A)	1.875
Frekans (Hz)	50
Bakır Kaybı (W)	9
Nüve Kaybı (W)	4
Nüve Hacmi (m ³)	$0.222 * 10^{-3}$

ANSYS Maxwell programı ile herhangi bir model analiz edilirken; model çizilir, malzeme tanımlanır, sınır durumları atanır ve çözüm parametrelerinin belirlenip tanımlandıktan sonra çözüm süreci başlamaktadır. Çözüm süreci boyunca programın yazılımı Sonlu Elemanlar Yöntemi ile ilk önce modeli elemanlara bölerek ağ oluşturmakta ve bu ağlarda çözüm gerçekleştirmektedir. Bu tez çalışmasında bir adet tek faz ve bir adet üç faz transformatör seçilmiştir. Bu transformatörlerde ANSYS Maxwell programının analizi yoluyla kayıplar hesaplanmış daha sonra aynı güçte transformatörlerin pratik yolundan elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

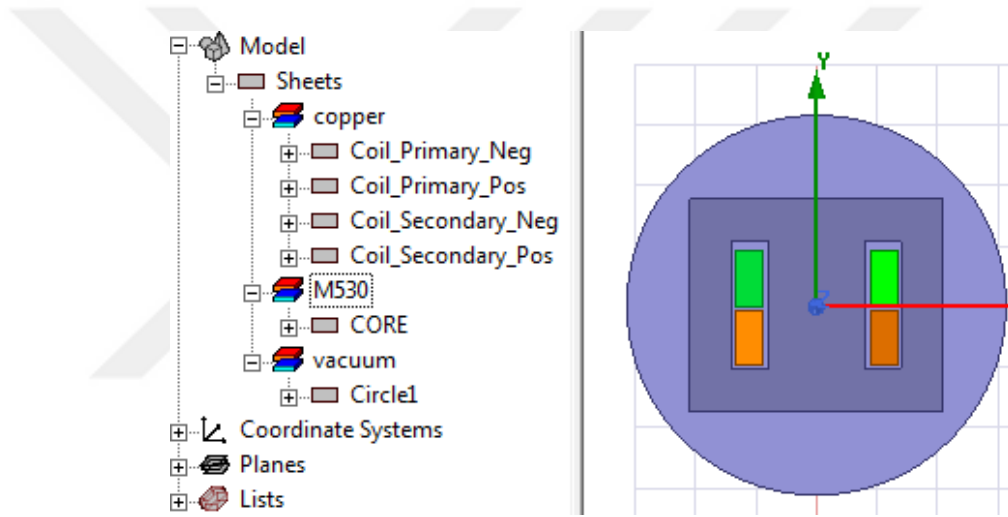
4.3. ANSYS Maxwell İle Transformatörün 2D Modeli

Örnek olarak ele alınan transformatör, tek fazlı 90 VA gücüne sahip olan bir güç transformatörü çeşididir. Bu transformatörü ANSYS Maxwell programı ile analiz edebilmek için elektriksel, mekaniksel ve manyetiksel özellikleri göz önünde bulundurularak Şekil 4.13 'de görüldüğü gibi modellenmiştir. Laboratuvar ortamında ölçülen değerler ile kıyas edebilmek için bu transformatöre simulasyon ortamında sırasıyla kısa devre ve açık devre testi uygulanmıştır.

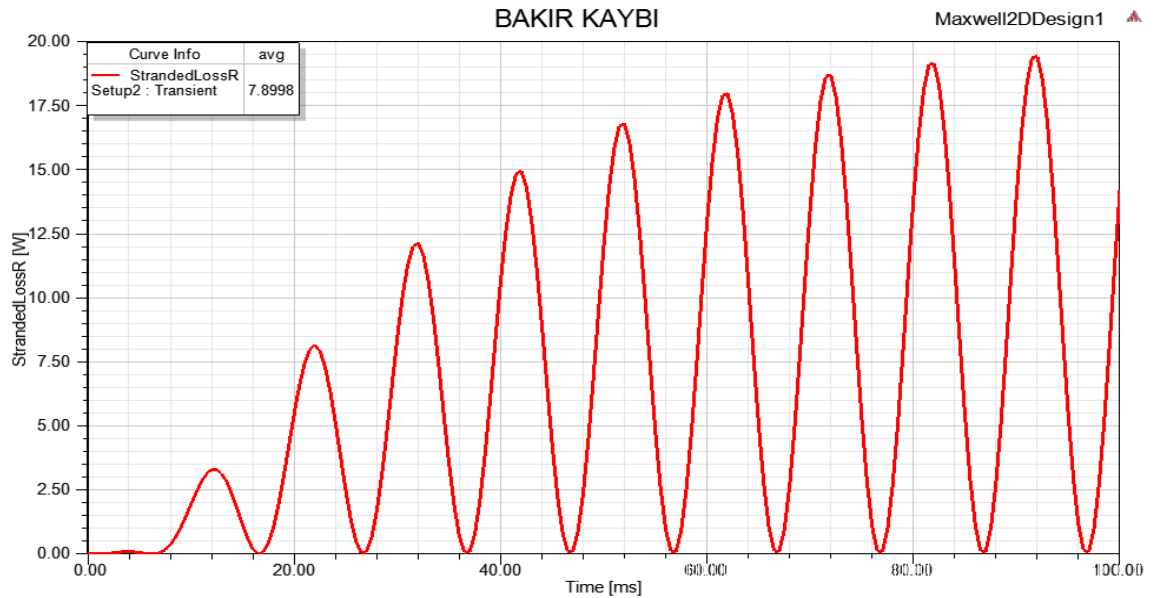
4.3.1. Transformatörün 2D Modelinin Kısa Devre Test Analizi

Bu test çalışması ile transformatörü oluşturan sargıların üzerinde meydana gelen bakır kaybının ANSYS Maxwell programı ile 2 boyutlu düzlemde hesap edilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda kısa devre testi için yüksek gerilim sargılarının uçlarına

test boyunca 50 Hz frekansta 24 V etkin değere sahip gerilim uygulanarak alçak gerilim sargıları kısa devre edildi, transformatöre ait diğer elektriksel değerler ANSYS Maxwell ortamında oluşturulmuştur. Simulasyon sonucunda Şekil 4.14'te görüldüğü gibi bakır kaybının ortalama değeri $t=70-100$ ms aralığında 7.899 W olarak ANSYS ortamında hesaplanmıştır. ANSYS Maxwell programında simulasyon sonunda kayıplar ile ilgili oluşan sinyal grafiklerinin ortalama değerleri program arayüzü ile seçilebilmektedir. Bunun neticesinde kayıplar ile ilgili daha rahat yorum yapılabilir. Şekil 4.14' te verilen bakır kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra kalıcı rejimde bakır kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

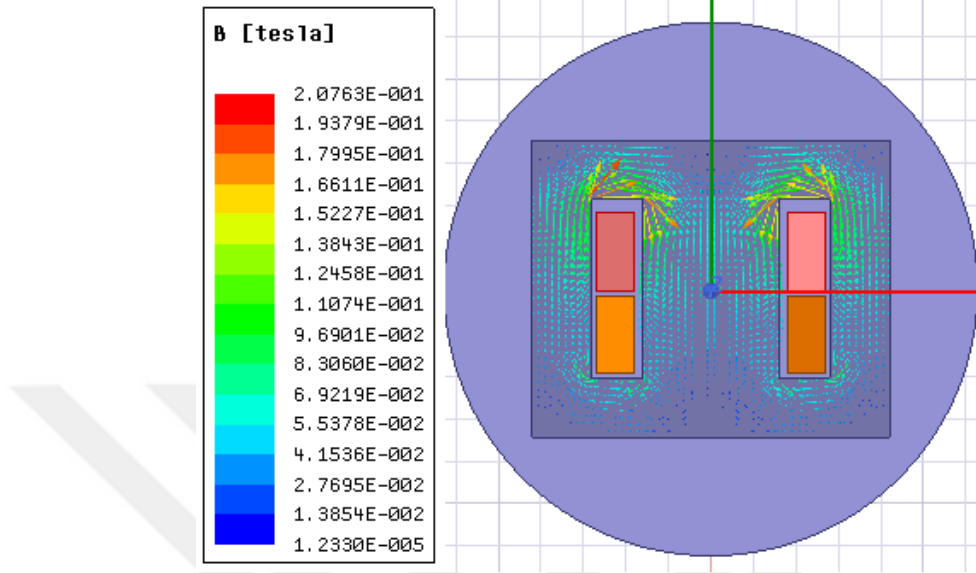


Şekil 4.13. ANSYS Maxwell Programı ile transformatörün 2D olarak modellenmesi



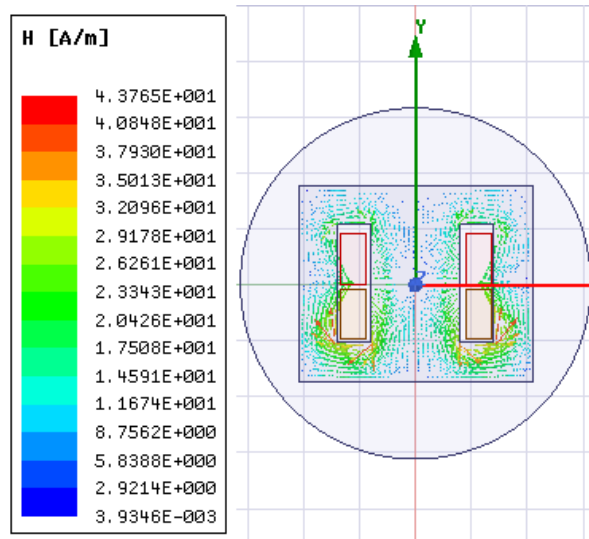
Şelil 4.14. Kısa devre testinde 2D düzlemde oluşan bakır kaybının grafiği

ANSYS Maxwell programı ile 2 boyutlu düzlemde simulasyon sonucunda nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğunun vektörel dağılımı Şekil 4.15'te görüldüğü gibidir.



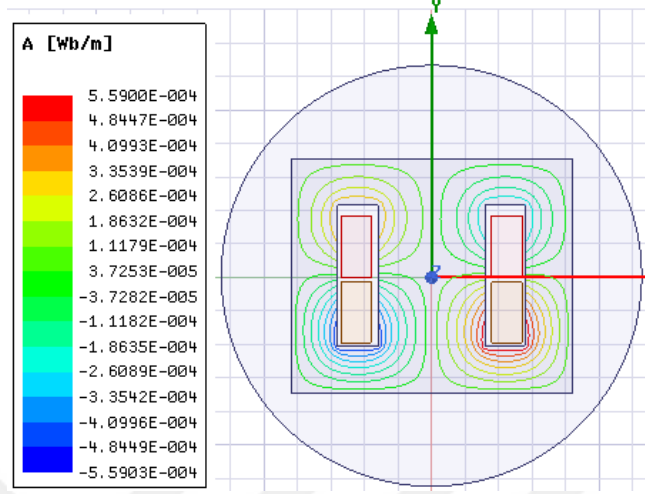
Şekil 4.15. Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğunun vektörel dağılımı

ANSYS Maxwell programı ile 2 boyutlu düzlemde simulasyon sonucunda nüvede oluşan manyetik alan şiddetinin vektörel dağılımı Şekil 4.16'da görüldüğü gibidir.

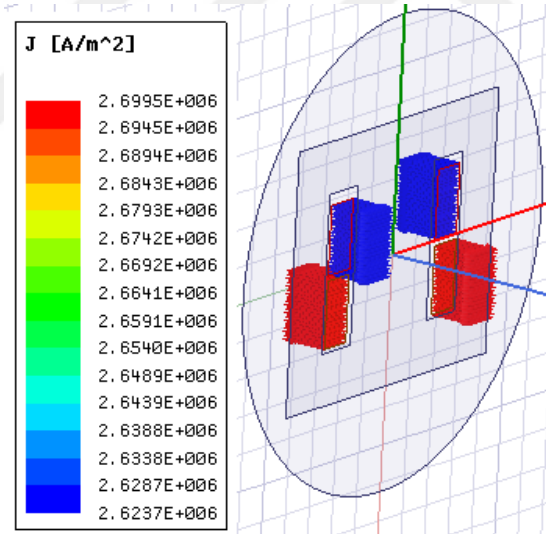


Şekil 4.16. Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik alan şiddetinin vektörel dağılımı

ANSYS Maxwell programı ile 2 boyutlu düzlemde simulasyon sonucunda nüvede oluşan manyetik akı eğrilerinin dağılımı Şekil 4.17’de ve sargılarda oluşan akım yoğunluğunun vektörel dağılımı Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Kısa devre testinde 2D düzlemde nüvede oluşan manyetik akı çizgilerinin dağılımı

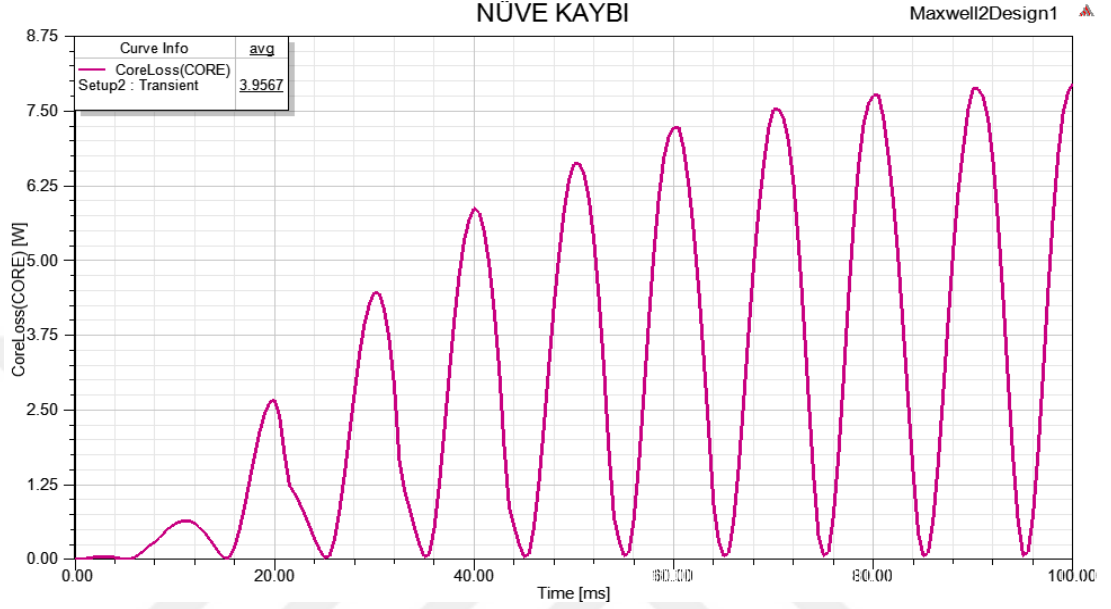


Şekil 4.18. Kısa devre testinde 2D düzlemde sargılarda oluşan akım yoğunluğunun vektörel dağılımı

4.3.2. Transformatörün 2D Açık Devre Test Analizi

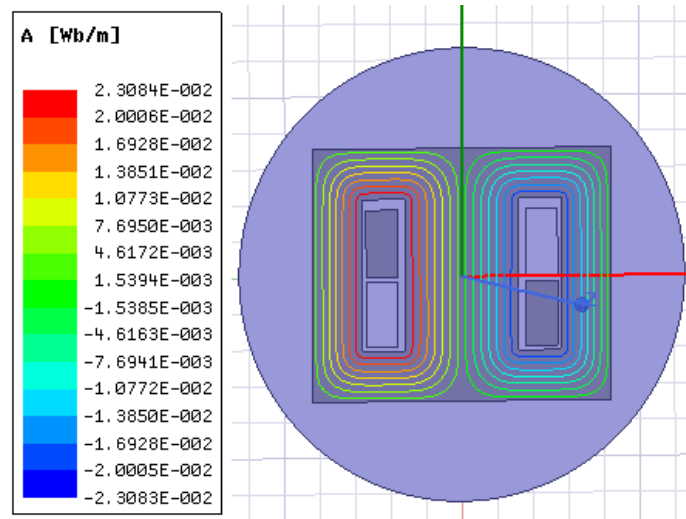
Bu testin amacı ANSYS Maxwell programı vasıtası ile 50 Hz frekansta 2D düzleminde nüve kaybı değerini hesaplamak ve çıkan sonucu laboratuar ortamında ölçülen nüve kaybı değeri ile karşılaştırmaktır. Açık devre testi yapılmadan önce nüvenin alçak gerilim sargıları 48 V AC etkin gerilim değeri ile laboratuar testlerinde

olduğu gibi beslenmiş ve yüksek gerilim sargıları açık devre edilmiştir. Böylece nüve üzerinde harcanan güç diğer bir ifade ile nüve kaybı Şekil 4.19’da olduğu gibi ortalama değer olarak 3.9567 W olarak elde edilmiştir. Aşağıda verilen nüve kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra nüve kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

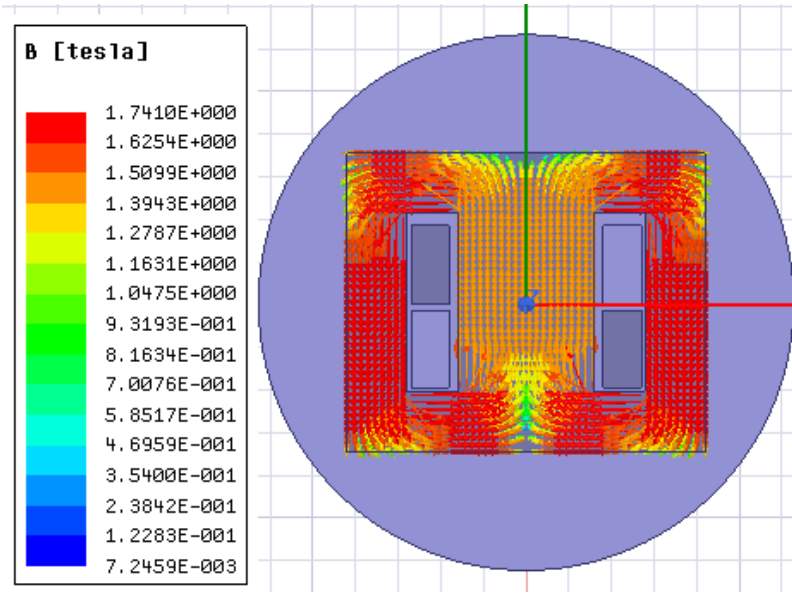


Şekil 4.19. Açık devre testinde 2D modelin 50 Hz frekanstaki nüve kaybı grafiği

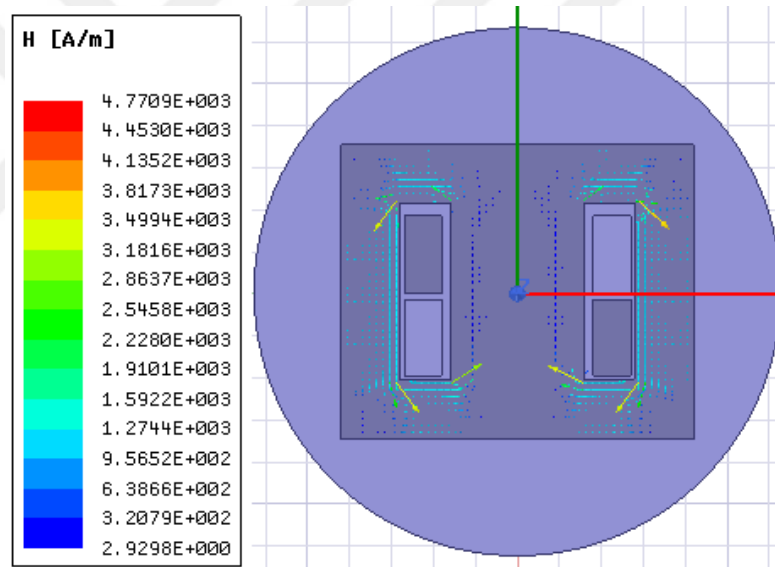
Bu test yapılırken laboratuvar testlerinde ölçülemeyen nüvede meydana gelen; manyetik akı çizgileri, manyetik alan yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, akım yoğunluğu, grafikler halinde elde edilmiş. Bu sonuçlar sırasıyla Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.20. Açık devre testinde 2 D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik akı eğrileri dağılımı

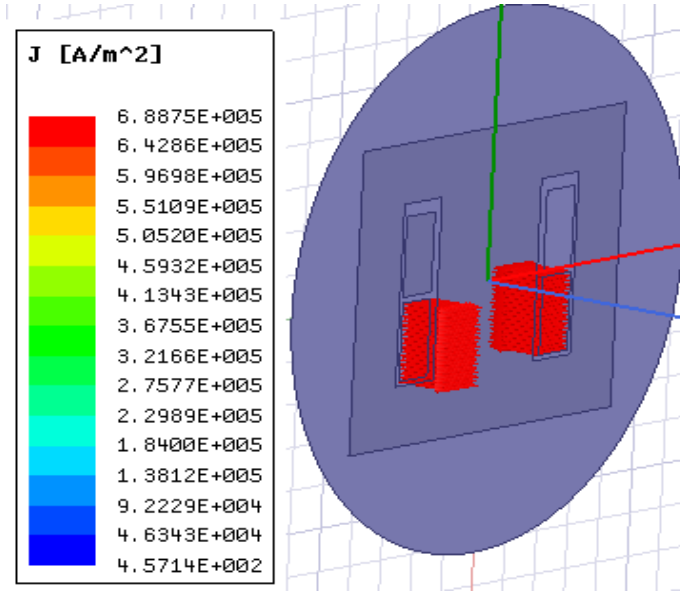


Şekil 4.21. Açık devre testinde 2 D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik alan yoğunluğu vektörel dağılımı



Şekil 4.22. Açık devre testinde 2 D modelin nüvesinde meydana gelen manyetik alan şiddetinin vektörel dağılımı

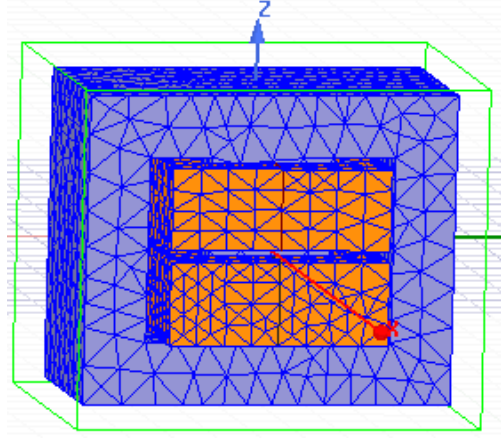
Şekil 4.23’de görüleceği üzere açık devre testinde sadece alçak gerilim sargıları gerilim kaynağına bağlı olduğu, yüksek gerilim sargılarının uçları boşta olduğu için ve bundan dolayı sadece alçak gerilim sargılarından akım geçeceği için akım yoğunluğu yalnızca alçak gerilim sargılarında oluşacaktır.



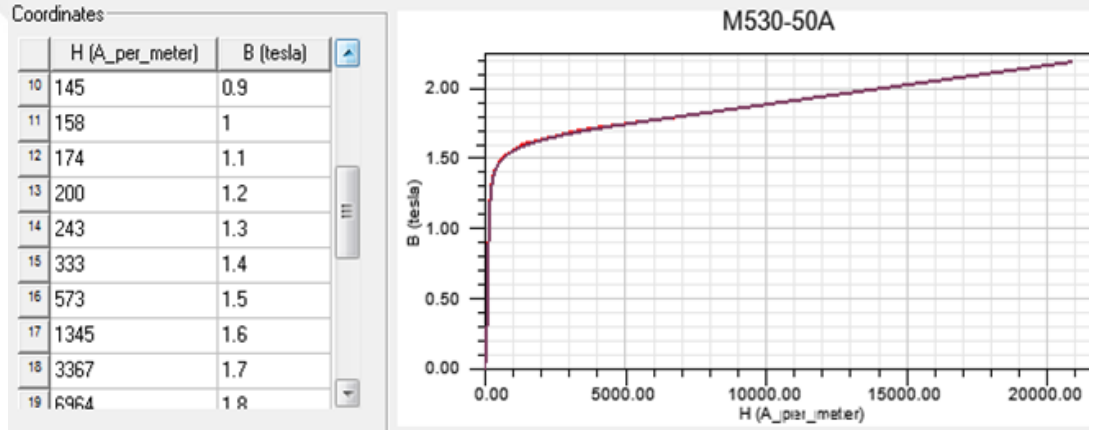
Şekil 4.23 Açık devre testinde 2D modelin sargılarında oluşan akım yoğunluğunun vektörel dağılımı

4.4. ANSYS Maxwell İle Transformatorün 3D Modeli

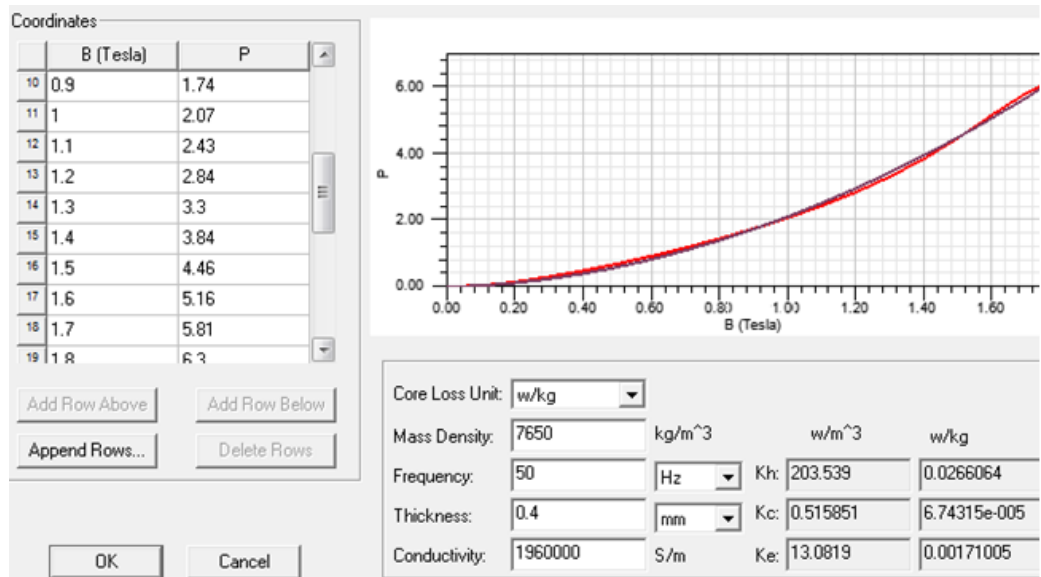
Bölüm 4’te belirtilen adımlar uygulanarak pratikte ölçü ve hesaplamaları yapılan transformatorün modeli ANSYS Maxwell programı ile oluşturularak analiz edilmiştir. Transformator modeli oluşturulurken gerçek boyutları dikkate alınarak incelenmiştir. Ayrıca transformator modelinin tasarımı 10000 adet ağ oluşturularak analiz edilmiştir. Analiz edilen transformatorde yüksek gerilim sargıları yukarıda alçak gerilim sargılarında aşağıda olmak üzere kullanılan mantel tip nüvenin orta bacağına sarıldı. Geçici durum analizi işlemi 0.1 saniye süre ile gerçekleştirildi. Bu süre zarfı sonunda transformator modeli ile ilgili akım, akım yoğunluğu, gerilim, akı, manyetik alan yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, B-H eğrisi, kayıplar, 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kayıpları ayrı ayrı analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Gerçek transformator modelinde olduğu gibi kalınlığı 0.40 mm olan saclar nüve malzemesi olarak kullanılmıştır. Aynı cins nüveden meydana gelen transformator için hem açık devre testinde hemde kısa devre testinde oluşan B-H eğrileri ve B-P (özgül nüve kayıpları) eğri değerleri birbirine eşittir. Tek fazlı düşük güçlü transformatorün 3D yapısında ağı görüntüsü Şekil 4.24’ te gösterilmiştir. Transformatorde nüve malzemesi olarak kullanılan M530-50A materyalinin 50 Hz frekanstaki B-H eğrisi ve özgül nüve kayıp grafikleri sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da gösterildiği gibidir.



Şekil 4.24. Tek fazlı düşük güçlü (90VA) transformatörün ANSYS Maxwell Programı 3D boyutlu arayüzünde ağırlıklı haldeki görüntüsü



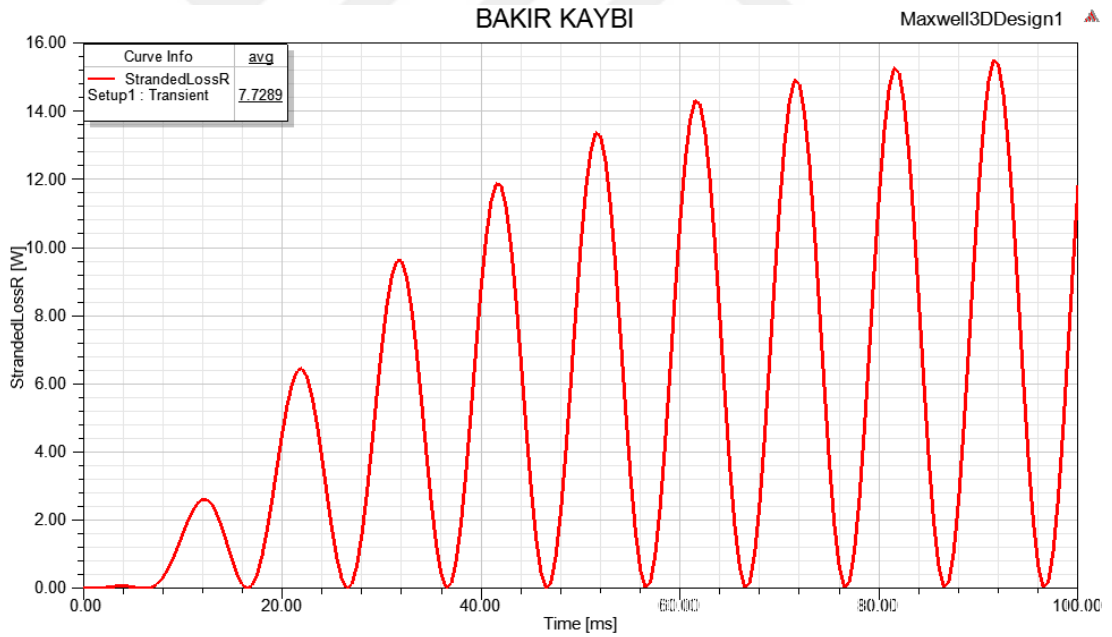
Şekil 4.25. Transformatör nüvesinde kullanılan M530-50A malzemesinin B-H eğrisi



Şekil 4.26. M530-50A tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kaybı ve kayıp katsayılar

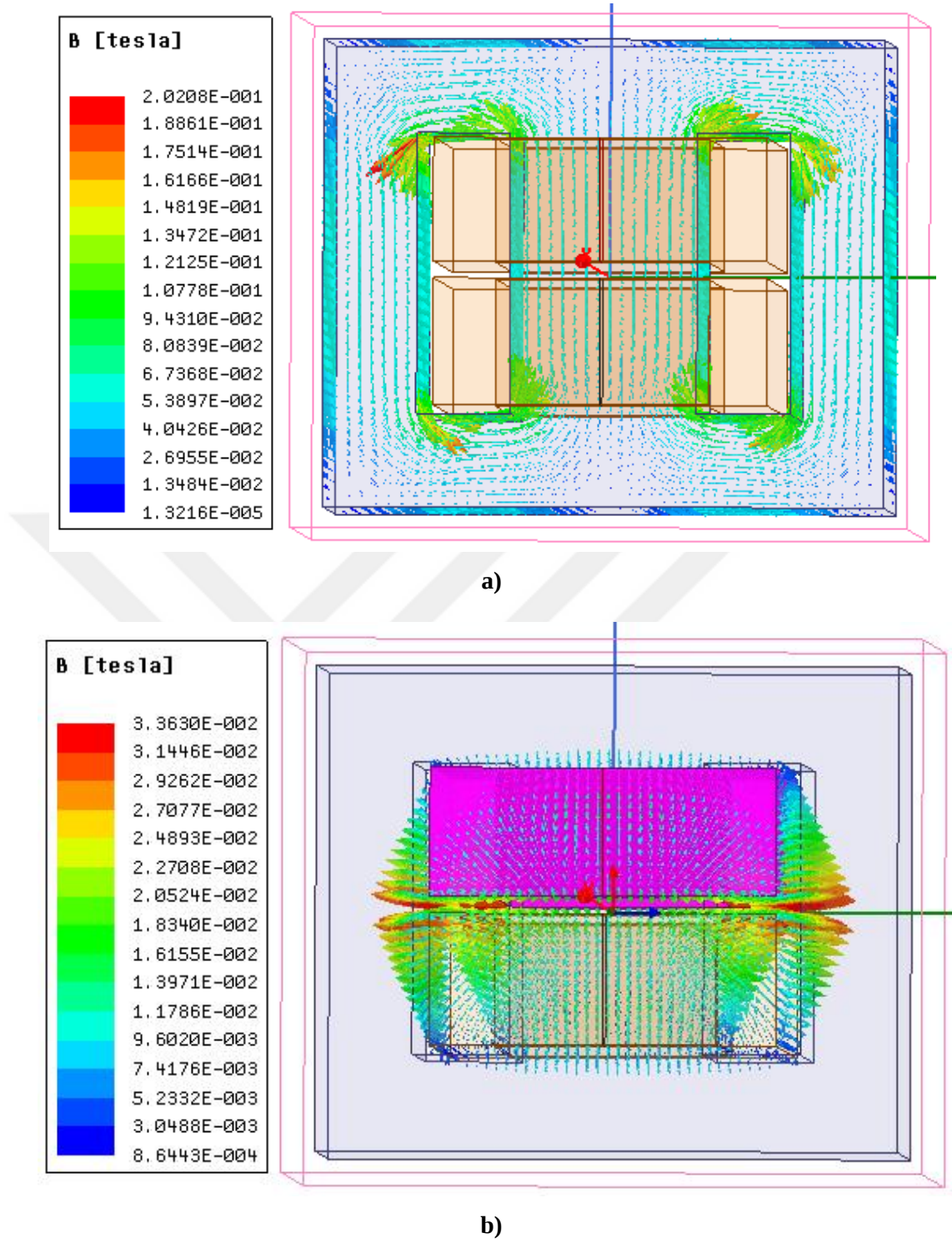
4.4.1. Transformatörün 3D Kısa Devre Test Analizi

Kısa devre testinde yüksek gerilim sargıları nominal gerilim değerinin %10.9'u büyüklüğündeki bir gerilim ile beslenmiştir. 2 boyutlu transformatörün kısa devre testinde olduğu gibi bu testte de geçici rejim analize bağlı simulasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. Bu simulasyon testinde transformatörün 3D modelinin simulasyonundan 50 Hz frekans için bakır kayıpları elde edilmiştir. Bakır kayıpları, verilen zaman aralığında sargılardan geçen akımın karesinin direnç ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Yukarıda belirtilen değişkenlere bağlı olarak elde edilen kayıp eğrisi aşağıda Şekil 4.27'de sunulmuştur. Aşağıda verilen bakır kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra bakır kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir. Hesaplanan bakır kaybı $t=70-100$ ms zaman aralığındaki kalıcı durum analizinin ortalama değeridir.



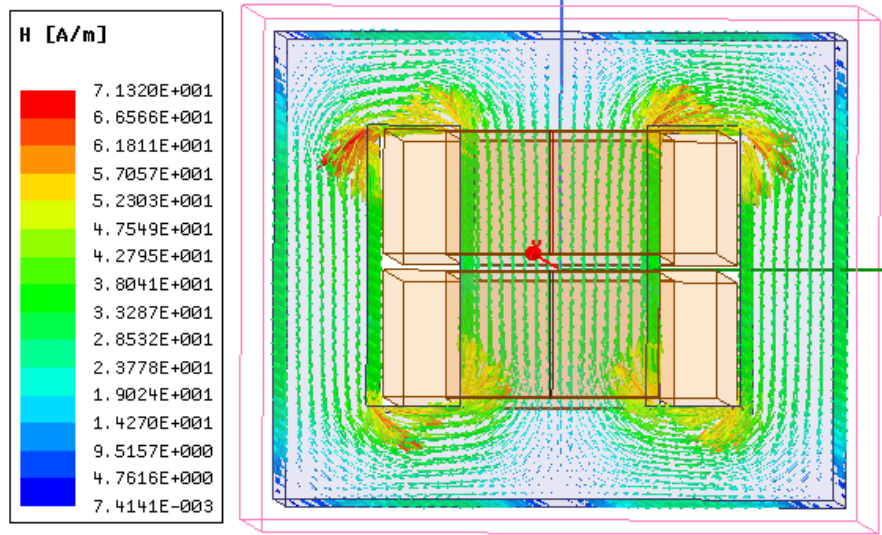
Şekil 4.27. Kısa devre testinde 3D boyutunda oluşan bakır kaybının grafiği

Kısa devre testinde yüksek gerilim sargıları uçları gerilim kaynağı ile beslenirken alçak gerilim sargılarının uçları kısa devre edilmiş böylece her iki sargıda akım akmaktadır. Kısa devre testinde transformatörün nüve ve sargılarında oluşan manyetik alan yoğunluğunun vektörel dağılımları Şekil 4.28'de görüldüğü gibidir.

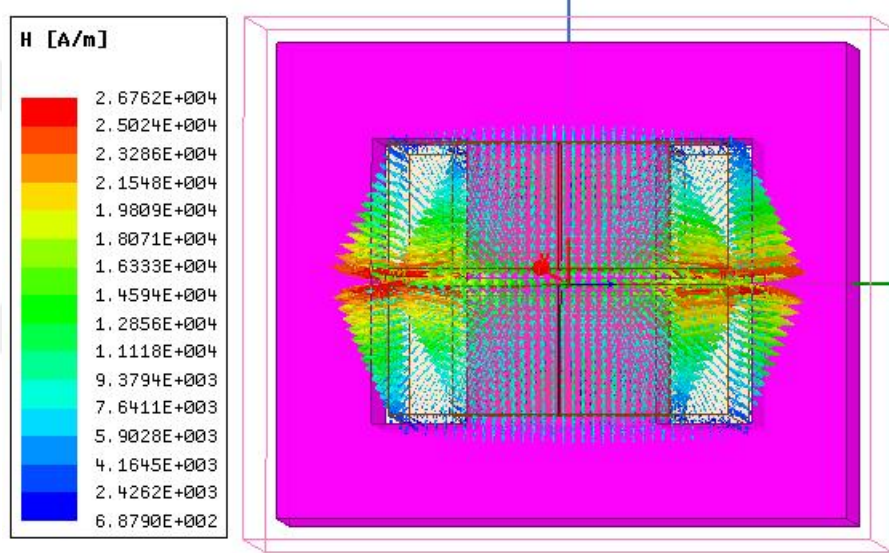


Şekil 4.28. Kısa devre testinde **a)** nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

Kısa devre testinde nüvede ve sargılarda oluşan manyetik alan şiddetlerinin vektörel dağılımı Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



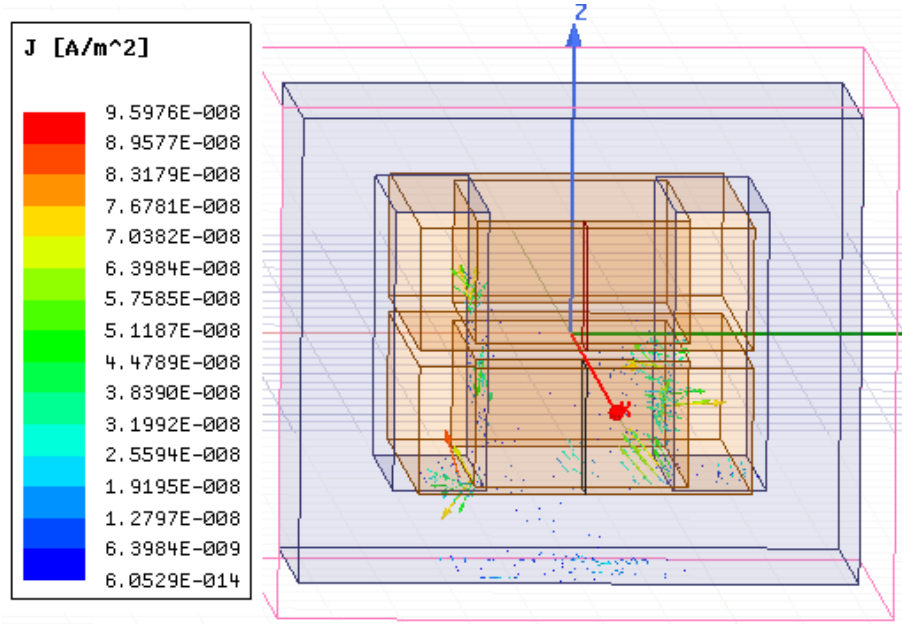
a)



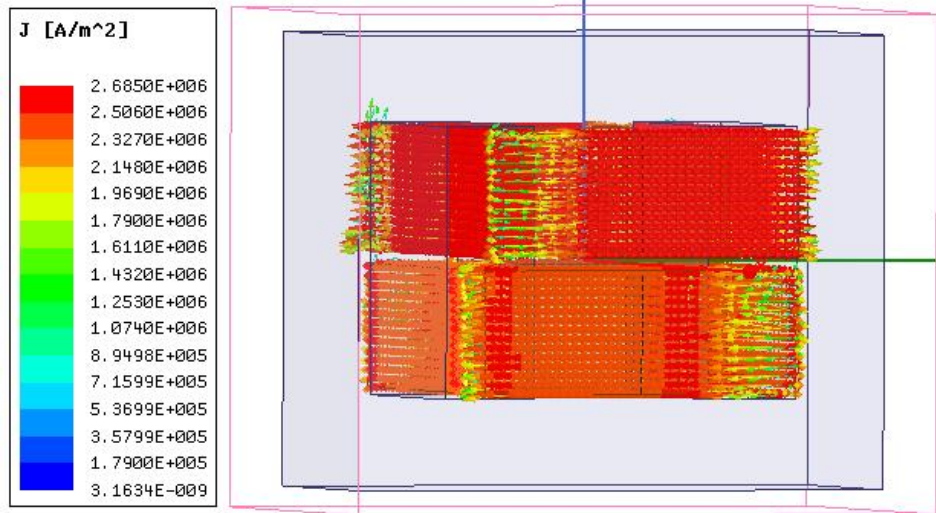
b)

Şekil 4.29. Kısa devre testinde **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı

Kısa devre testinde ayrıca nüve ve sargılarda oluşan akım yoğunluklarının vektörel dağılımı Şekil 4.30'da verildiği gibi elde edilmiştir. Dikkat edilmesi gereken husus; hem yüksek gerilim hemde alçak gerilim sargılarında akım dolaştığı için her iki sargıda da akım yoğunluğu meydana gelirken. Nüvede dolaşan girdap akımlarından dolayı da akım yoğunluğu meydana gelmektedir. Girdap akım değerleri çok küçük ve nüvenin boyutu büyük olduğu için akım yoğunluklarının yoğunluğuda ihmal edilecek büyüklükte kalmaktadır.



a)



b)

Şekil 4.30. Kısa devre testinde a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı, b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

4.4.2. Transformatörün 3D Açık Devre Test Analizi

Açık devre testinde alçak gerilim sargıları nominal gerilim ile beslenmiştir. Yüksek gerilim sargılarının uçarlı ise açık devre edilmiştir. Açık devre testi için geçici rejim analize bağlı simülasyonda önceden tanımlanmış olan $t=0-0.1$ s zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. Bu simülasyon testinde transformatörün 3D modelinin simülasyonundan 50 Hz frekans için nüve kayıpları

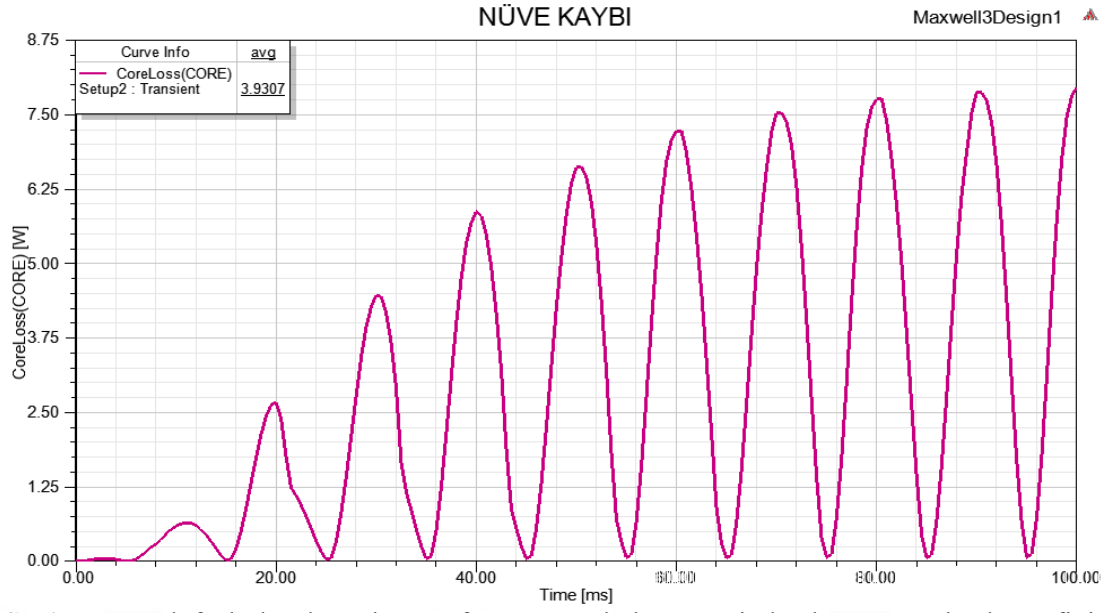
elde edilmiştir. Nüve kayıpları, verilen zaman aralığında elde edilen toplam kayıpların zamana göre ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Yukarıda belirtilen değişkenlere bağlı olarak elde edilen nüve kayıp eğrisi aşağıda Şekil 4.31’de sunulmuştur.

Transformatörde yapılan açık devre testi ile transformatörün sırasıyla nüvesinde, sargılarında oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve bu değerlerin vektörel dağılımı Şekil 4.32.a ve Şekil 4.32.b’de gösterildiği gibi $t=0-0.1$ s zaman aralığındaki bir anda elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aynı transformatörün 2D modeli sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 2D modelde nüvedeki H değeri $4.7709E+003$ iken 3D modelde H değeri $4.7654E+003$; 2D modelde sargılarda elde edilen H değeri $3.4501E+002$ iken 3D modelde sargılarda elde edilen H değeri $3.4044 E+002$ olarak bulunmuştur.

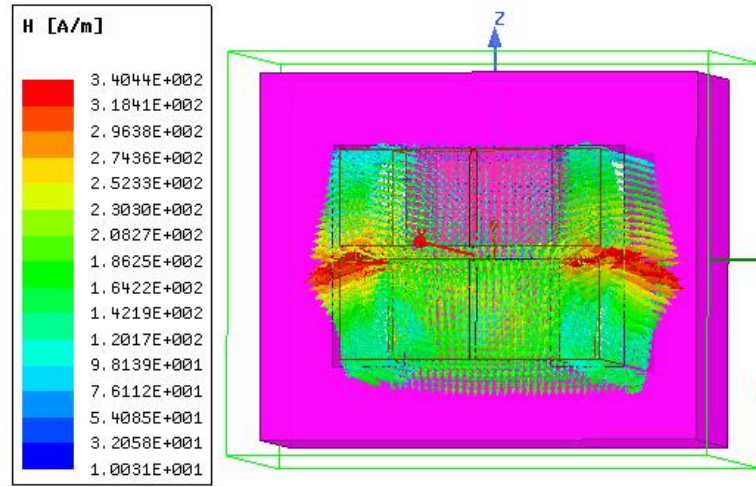
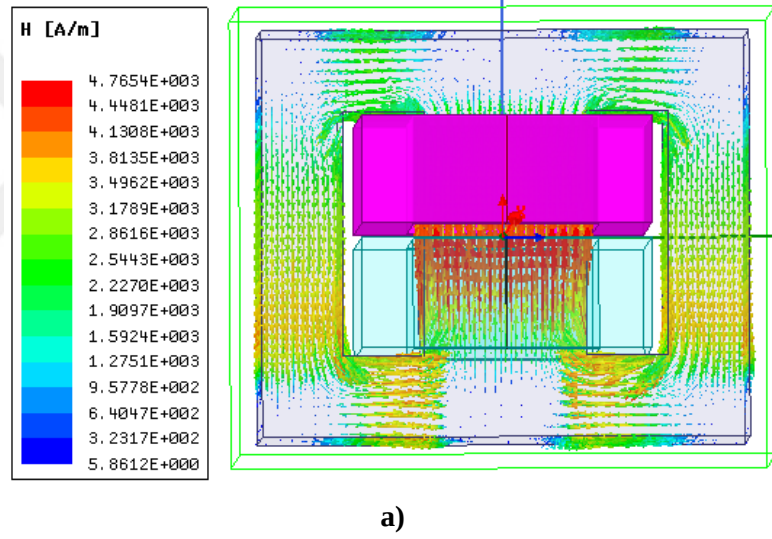
Transformatörün nüve ve sargılarda elde edilen manyetik akı yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.33.a ve Şekil 4.33.b’de gösterilmiştir. 2D ve 3D transformatör modellerine ait B değerleri karşılaştırıldığında 2D modelde nüvede B değeri $1.741E+000$ iken 3D model için B değeri $1.841E+000$; 2D modelde sargılarda elde edilen B değeri $4.2536E-004$ iken 3D modelde sargılarda elde edilen B değeri $4.2780E-004$ olarak bulunmuştur.

Bunlarla aynı transformatörün nüve ve sargılarda elde edilen akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.34.a ve Şekil 4.34.b’de gösterilmiştir. 2D ve 3D transformatör modellerine ait J değerleri karşılaştırıldığında 2D modelde nüvede J değeri 0 iken 3D model için J değeri sıfır değerine çok yakın $1.291E-010$; 2D modelde sargılarda elde edilen J değeri $6.8875E+005$ iken 3D modelde sargılarda elde edilen J değeri $6.5865E+005$ olarak bulunmuştur.

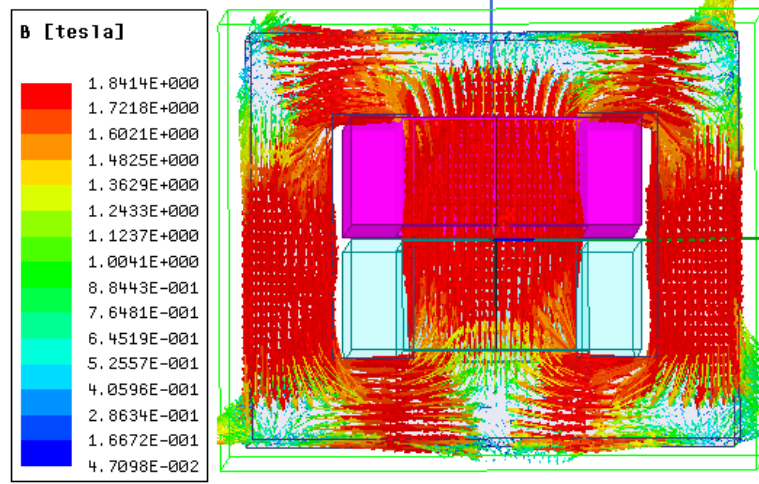
Aynı transformatör için yapılan test sonucunda 2D ve 3D modellerde elde edilen değerlerin birbirine bu kadar yakın olması tek fazlı transformatörün parametrelerinin doğru seçildiğini ve dolayısıyla transformatörün doğru modellendiğini göstermektedir. Şekil 4.31’de verilen nüve kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra nüve kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir. Nüve kaybını ifade eden grafik $t=70-100$ ms zaman aralığında kalıcı rejim davranışı sergilediği görülmüştür bundan dolayı nüve kaybının ortalama değeri bu zaman aralığında hesaplanmıştır.



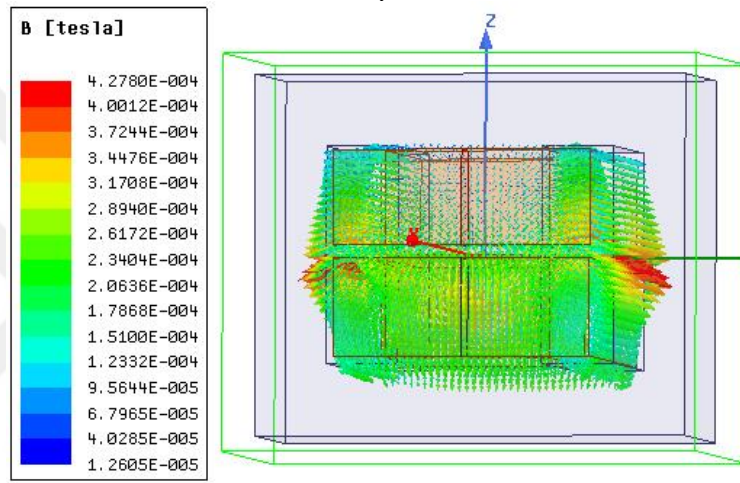
Şekil 4.31. Tek fazlı düşük güçlü transformör açık devre testinde oluşan nüve kaybı grafiği



Şekil 4.32. Açık devre testinde **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı

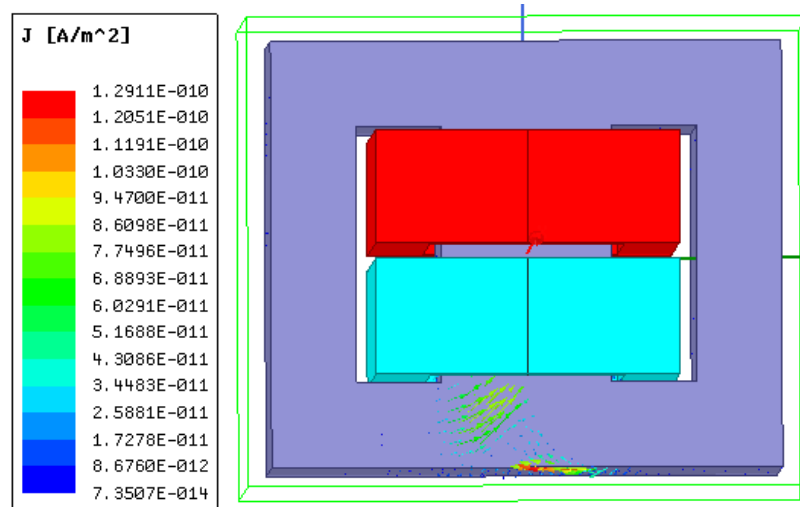


a)

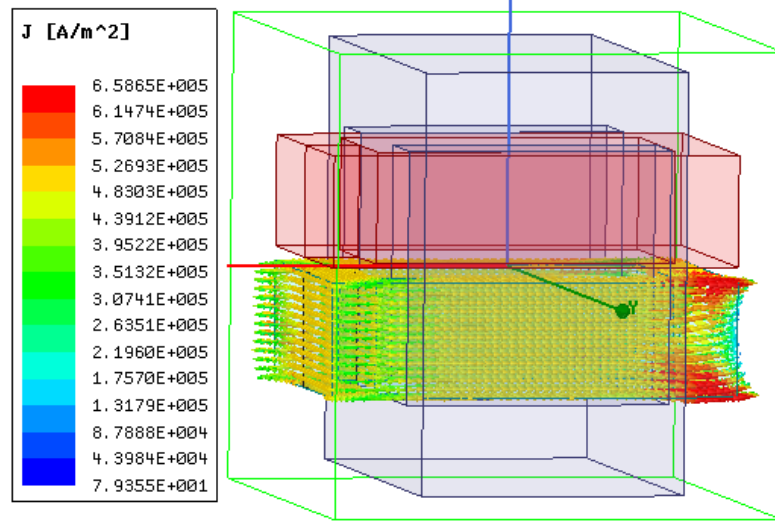


b)

Şekil 4.33. Açık devre testinde **a)** nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı



a)

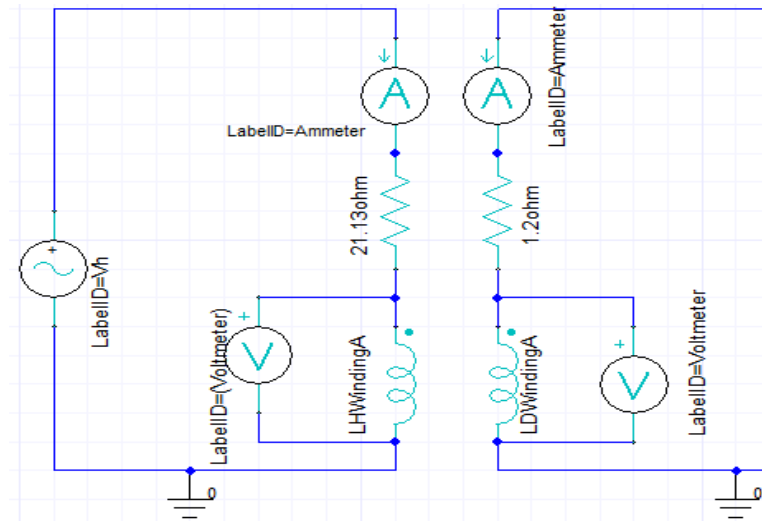


b)

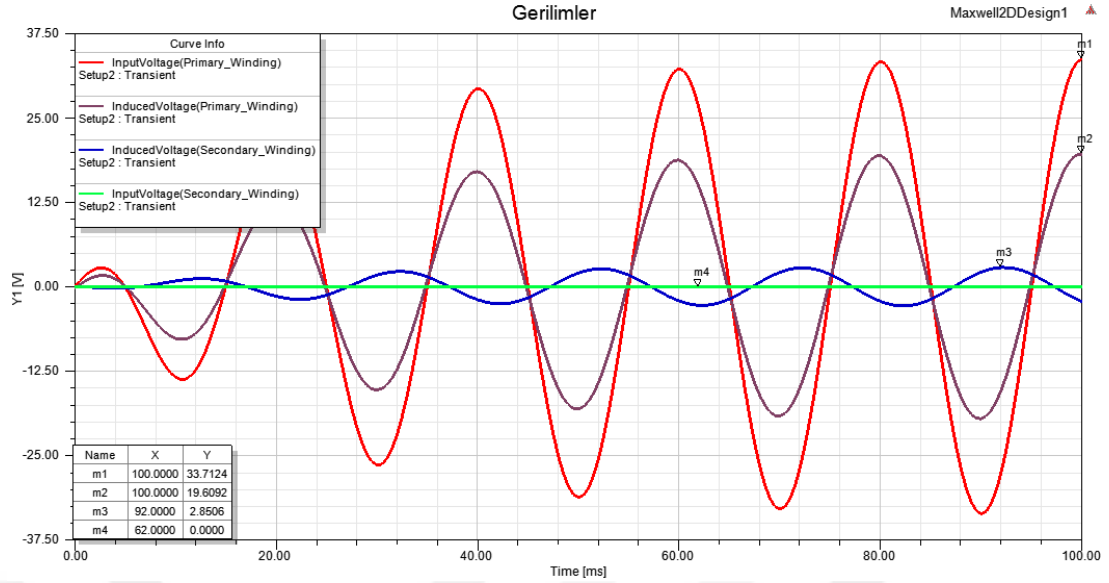
Şekil 4.34. Açık devre testinde a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

4.5. Transformatörün Kısa Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri

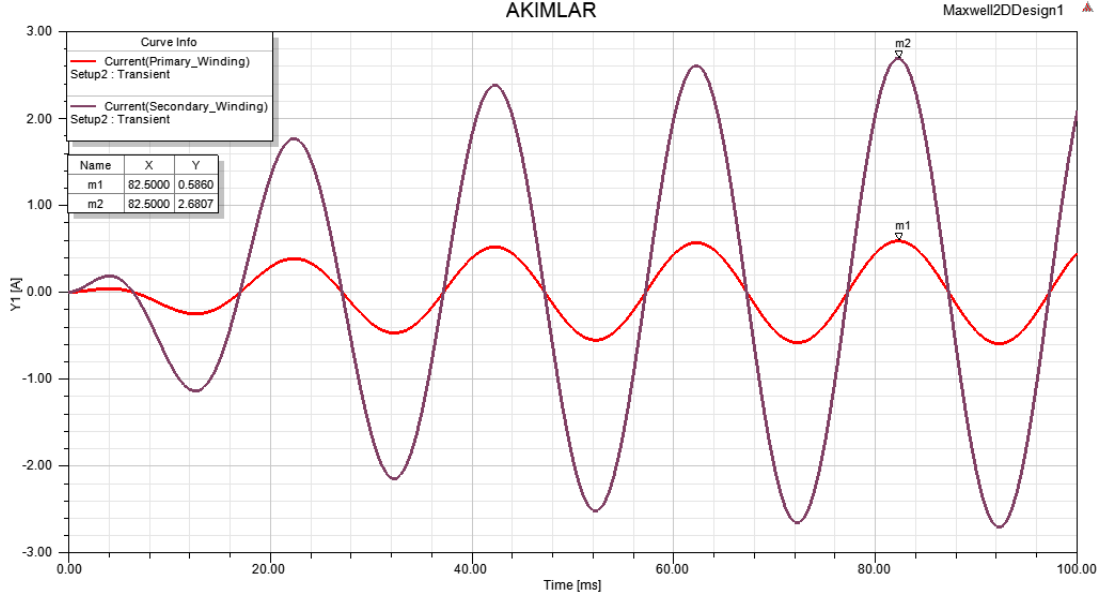
Kullanılan 90 VA güce sahip transformatörün oluşturulan harici devre şeması Şekil 4.35'deki gibidir. Burada test ANSYS Maxwell ile devre tasarımı gerçekleştirilirken laboratuarda kullanılan transformatörün devre parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Yüksek gerilim sargı uçları nominal gerilimin % 10'9 u kadar (24 V) bir gerilim ile beslenirken alçağakeilim sargı uçları kısa devre edilmiştir. Giriş sargılarından nominal akım değerinde akım geçişi olmuş ve çıkış sargılarında nominal akım değerinde akım geçişi gerçekleşmiştir. ANSYS Maxwell programı ile kısa devre testinde elde edilen akım ve gerilim sinyallerinin 0-0.1 s zaman aralığındaki değişimleri sırasıyla Şekil 4.36.a. ve Şekil 4.36.b'de verilmiştir.



Şekil 4.35. Kısa devre testinde üzerinde çalışılan transformatörün harici devre şeması



Şekil 4.36.a 90 VA gücüne sahip transformatör kısa devre testinde çıkış tarafı sargı gerilimi, çıkış sargısı endüklenen gerilim ve giriş sargısı endüklenen gerilim grafiği

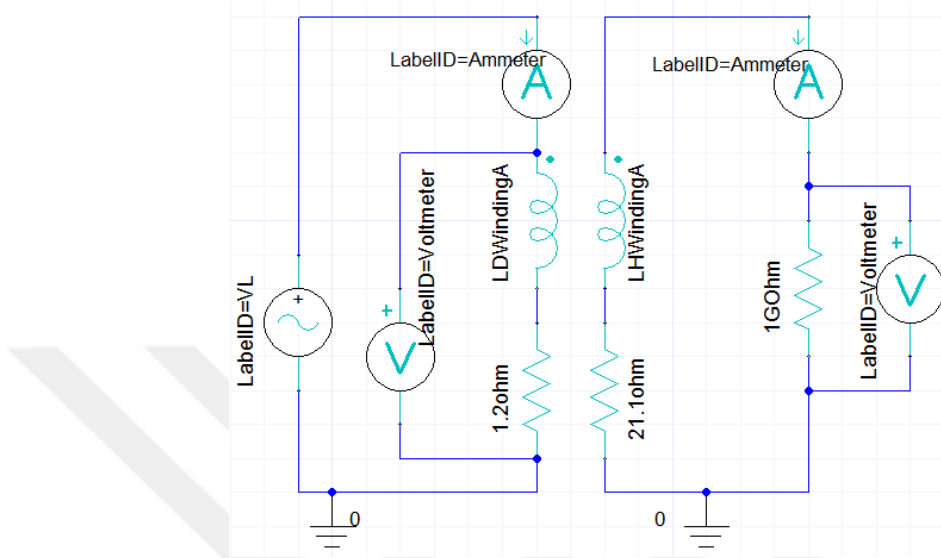


Şekil 4.36.b. 90 VA gücüne sahip transformatör kısa devre testinde giriş tarafı sargılarından geçen akım ve çıkış tarafı sargılarından geçen akım grafiği

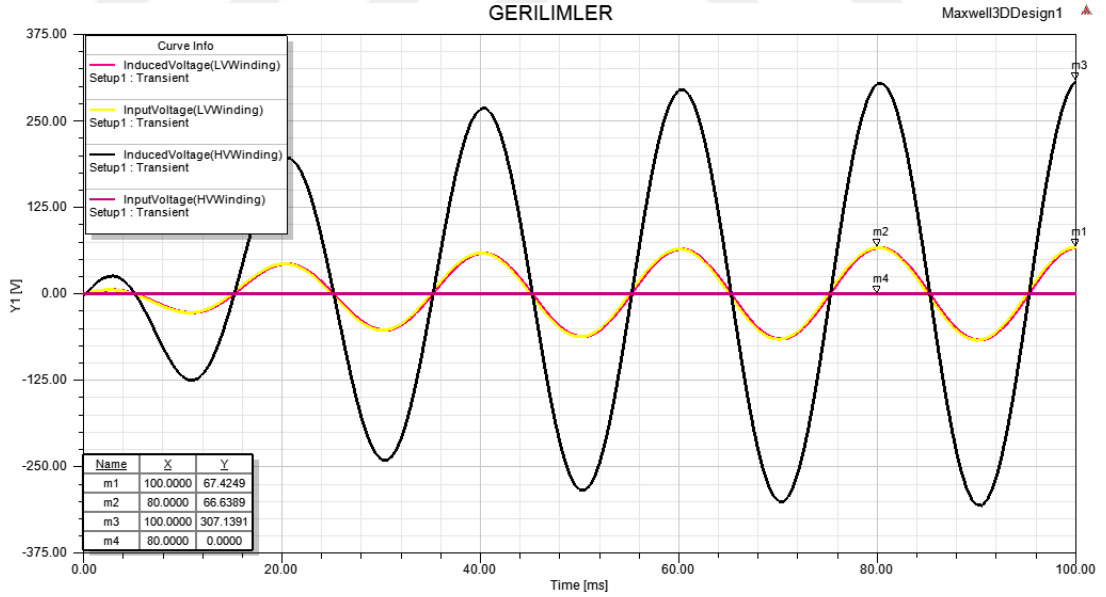
4.6. Transformatörün Açık Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Grafikleri

Kullanılan 90 VA güce sahip transformatörün oluşturulan harici devre şeması şekil 4.37'deki gibidir. Burada ANSYS Maxwell ile devre tasarımı gerçekleştirilirken laboratuarda kullanılan transformatörün devre parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Alçak gerilim sargı uçları nominal gerilim (48 V) ile beslenirken yüksek gerilim sargı uçları açık devre edilmiştir. Çıkış sargıları açık devre olduğu

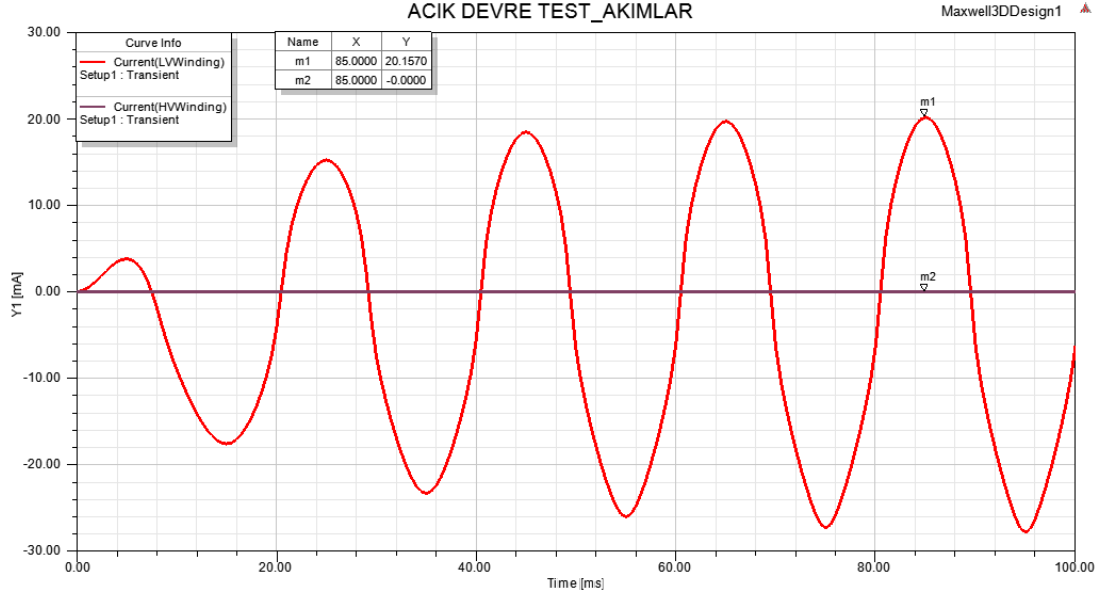
için bu sargılardan akım geçişi olmamıştır, bundan dolayı giriş sargılarında da sadece miliamper seviyelerinde akım geçişi olmuştur. ANSYS Maxwell programı ile açık devre testinde elde edilen akım ve gerilim sinyallerinin 0-0.1 s zaman aralığındaki değişimleri sırasıyla Şekil 4.38.a ve Şekil 4.38.b’de verilmiştir.



Şekil 4.37. Açık devre testinde üzerinde çalışılan transformatörün harici devre şeması



Şekil 4.38.a 90VA gücüne sahip transformatör açık devre testinde giriş tarafı sargısında endüklenen gerilimi, giriş sargısının gerilimi, çıkış tarafı sargısında endüklenen gerilim ve giriş sargısı gerilimi grafiği



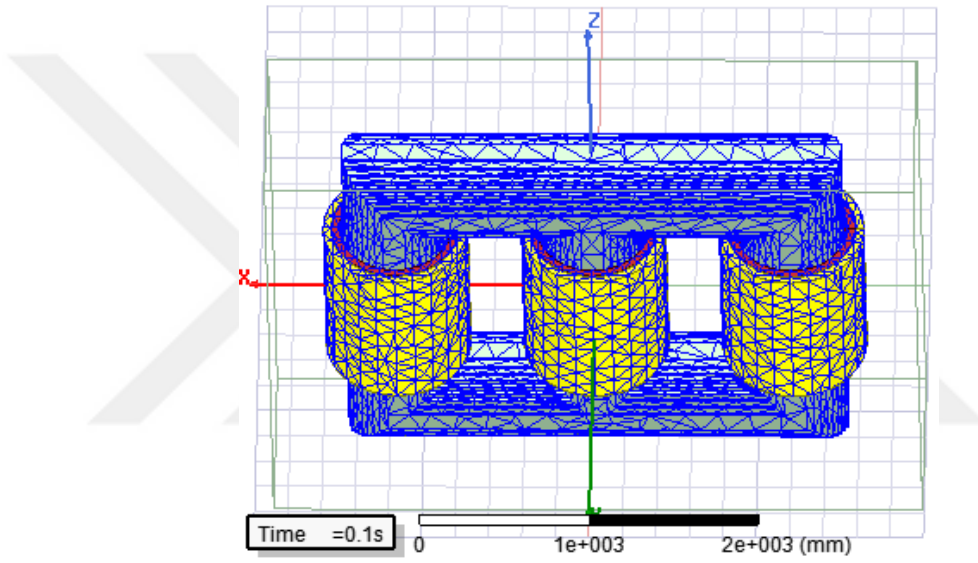
Şekil 4.38.b 90 VA gücüne sahip transformatör açık devre testinde alçak gerilim ve yüksek gerilim sargılarının akım değerleri grafiği

4.7. Üç Fazlı Güç Transformatörlerinin Ansys Maxwell İle Modellenmesi

Üç fazlı bir transformatörün tasarlanabilmesi için mevcut, çalışan bir transformatörün parametrelerinin bilinmesi gerekmektedir aksi takdirde transformatör parametreleri bilinmeden tasarlanacak bir transformatör üzerinde çok fazla çalışılsa bile pratikte kullanılan bir transformatörün performansını sergilemesi neredeyse imkansızdır. Bu durumdan dolayı ANSYS Maxwell programı ile bir transformatör modeli tasarlanacaksa mümkün mertebe hali hazırda kullanılmakta olan bir transformatör parametrelerine yakın değerlerde parametreler kullanılarak tasarımın gerçekleştirilmesi var olan transformatörün program üzerinden performansını analiz etmeyi kolaylaştıracaktır. Bu nedenle bu tez çalışmasında özel bir firmadan tedarik edilen, mekaniksel, fiziksel ve elektriksel verileri Çizelge 4.4'te verilen transformatörün tasarım öncesi değerleri dikkate alınmıştır. Çizelge 4.4'te tasarım öncesi değerleri kullanılarak transformatörün sırasıyla 2 boyutlu ve 3 boyutlu durumlarındaki kısa devre ve açık devre testleri gerçekleştirilmiş söz konusu testler neticesinde transformatörün elektromanyetik analizi ve kayıpları incelenmiştir. Elektromanyetik analiz ve kayıp değerlerinin ortaya çıkması sonucunda bir takım değerlendirmelerde bulunulmuştur.

4.7.1. Üç Fazlı Transformatörün 2D Kısa Devre Test Analizi

Ele alınan 15 MVA görünür güce sahip sarım oranı 5.18 olan üç fazlı güç transformatörünün Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi tasarım öncesinde bakır kaybı 97 kW olarak belirtilmiştir. Aynı transformatör için ANSYS Maxwell ile gerçekleştirilen analiz sonucunda program tarafından hesaplanan bakır kaybının 0-0.1 s zaman aralığındaki değişimi ve ortalama değeri Şekil 4.40'da sunulduğu gibi elde edilmiştir. Program tarafından bakır kaybının ortalama değeri 95.124 kW olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer transformatörün tasarım öncesi değerine göre % 1.93 kadar daha düşük olabileceğini ifade etmektedir.



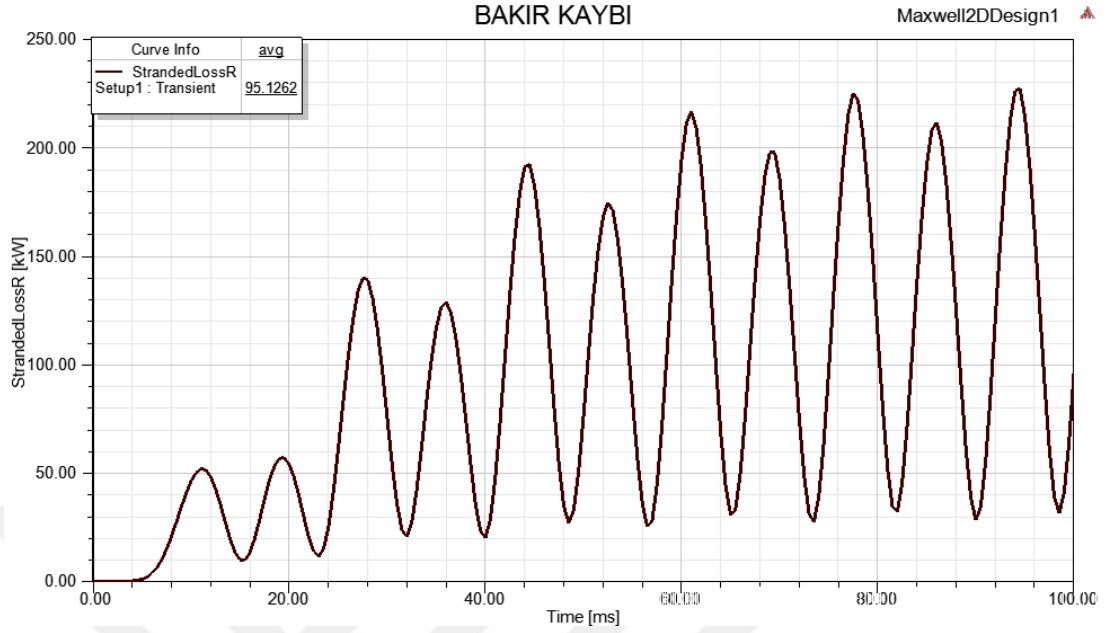
Şekil 4.39. 15 MVA güce sahip transformatörün ANSYS Maxwell programı ile 3 boyutlu ağı görünümü

Çizelge 4.4 15 MVA güce sahip transformatör bilgileri

YG	33.000 V		YG Bağlantı	DELTA
AG	11.000 V		AG Bağlantı	YILDIZ
Nüve Kaybı	12.500 W		YG Spir Sayısı	675
Bakır Kaybı	97.000 W		AG Spir Sayısı	131
YG Sargı Direnci	1.7 Ω		YG Faz Akımı	152 A
AG Sargı Direnci	40 m Ω		AG Faz Akımı	785 A
YG Akım Yoğunluğu	3.81 A/m ²		YG Sargı Uzunluğu	4000 M
AG Akım Yoğunluğu	3 A/m ²		AG Sargı Uzunluğu	650 M
U _k	% 11		I _o	% 0.44

Bakır kaybı grafiği incelendiğinde; t=0-70 ms zaman aralığındaki geçici durumdan

sonra bakır kaybının ortalama değerinin hesaplandığı ve $t=70$ ms den sonra bu kaybı ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.40. 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformör için kısa devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan bakır kaybının grafiği ve ortalama değeri

Transformör kısa devre testi sırasında yüksek gerilim sargılarının uçları nominal gerilim değerinin % 10 'u kadar bir gerilim ile beslenmiş ve alçak gerilim sargı uçları kısa devre edilmiştir. Bundan dolayı ANSYS Maxwell ile tasarım gerçekleştirilirken kısa devre testi için faz gerilimlerinin büyüklüğü ve 3 ayrı fazın gerilimleri faz farkı göz önünde bulundurularak Şekil 4.41 a, b, c, d'de sunulmuştur.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
Vmx	$33000 \cdot \sqrt{2} / 10$	V	4666.90475583...	Design

a)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$Vmx \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time})$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	0	deg	0deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

b)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{mx} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + (2/3 \cdot \pi))$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	120	deg	120deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

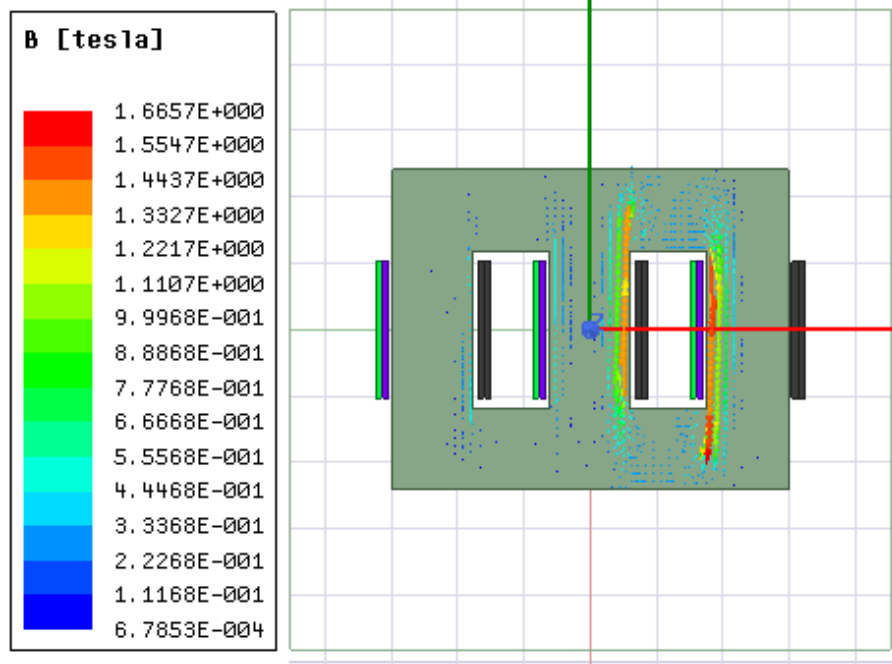
c)

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{mx} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + (4/3 \cdot \pi))$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	-120	deg	-120deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

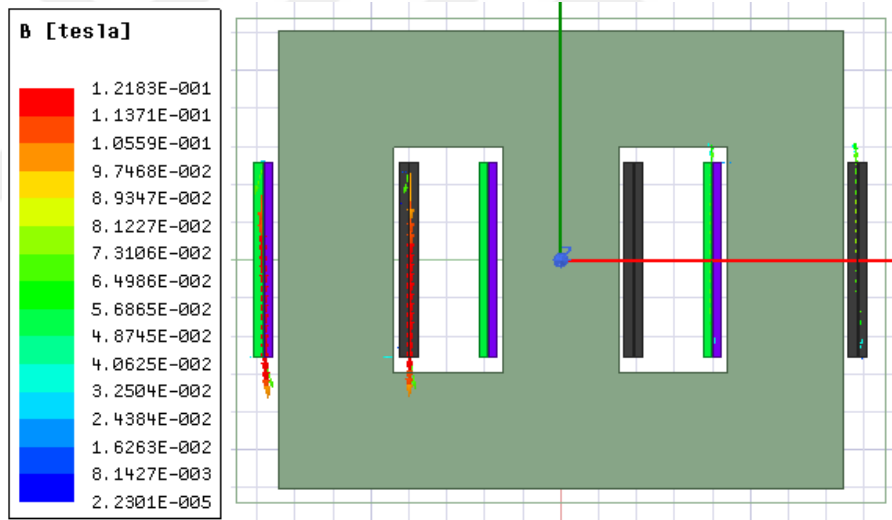
d)

Şekil 4.41. a)YG sargıları, besleme gerilimlerinin pik değeri **b)**YG tarafı A fazına ait sargısının besleme gerilimi **c)** YG tarafı B fazına ait sargısının besleme gerilimi **d)** YG tarafı C fazına ait sargısının besleme gerilimi

Kısa devre testinde transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.42’de sunulmuştur. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hem de sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan yoğunluğu oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olacaktır. Transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.43’ te sunulmuştur. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hemde sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan şiddeti oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olmaktadır.

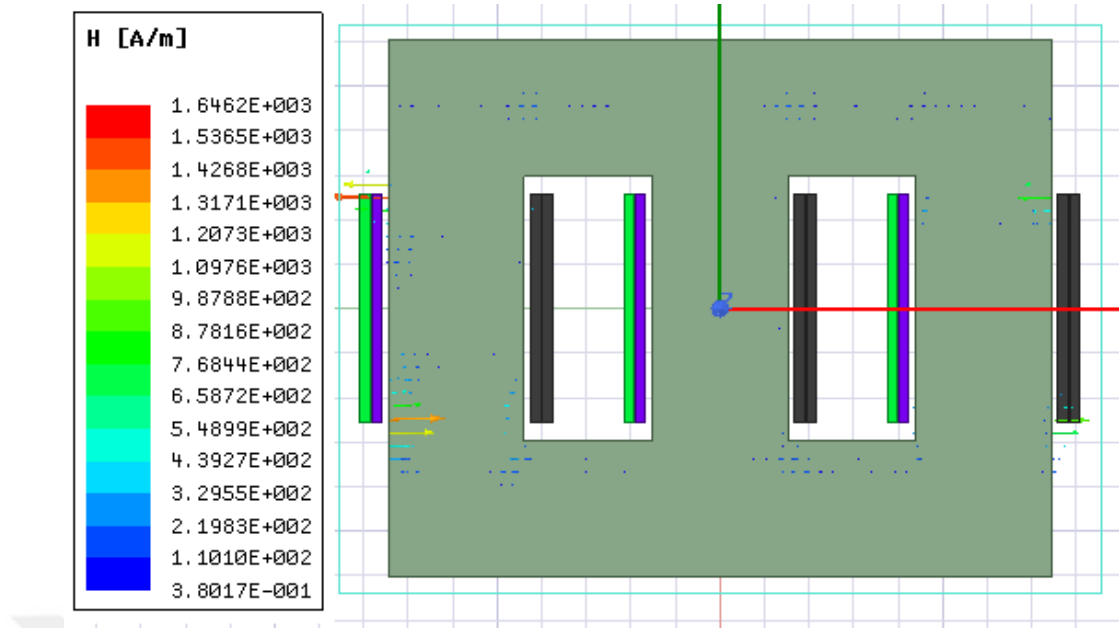


a)

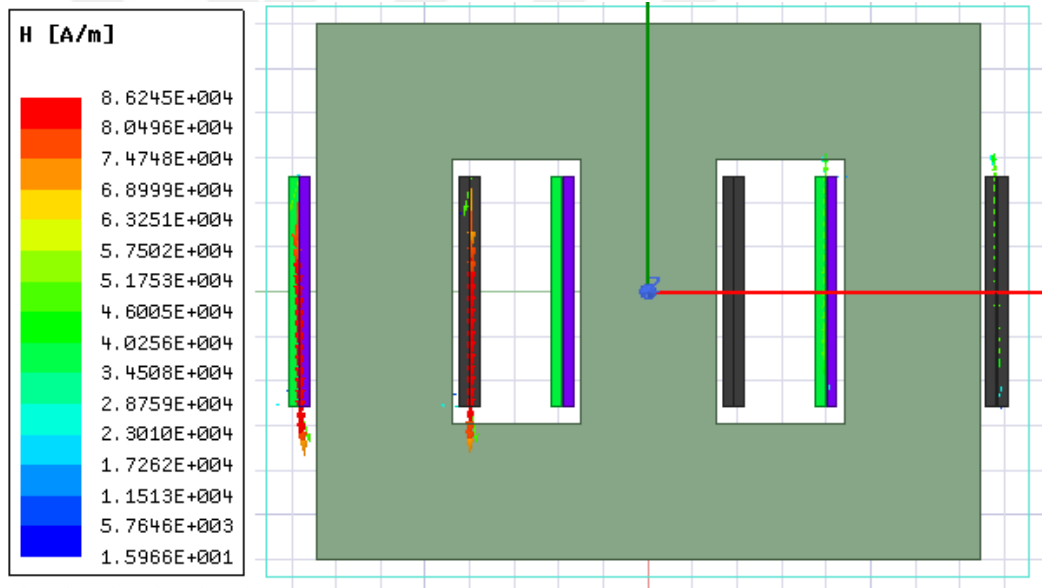


b)

Şekil 4.42. 2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı



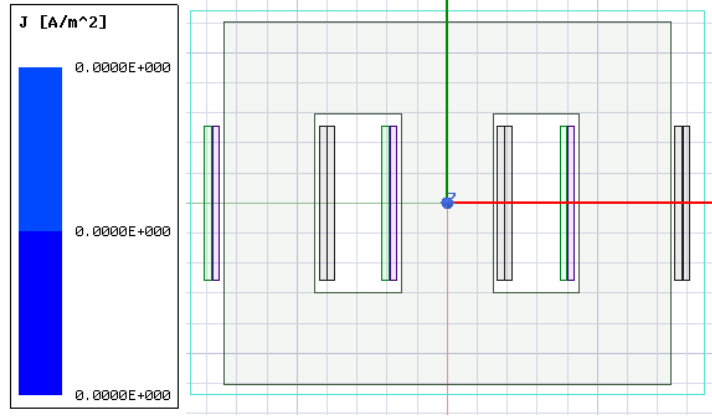
a)



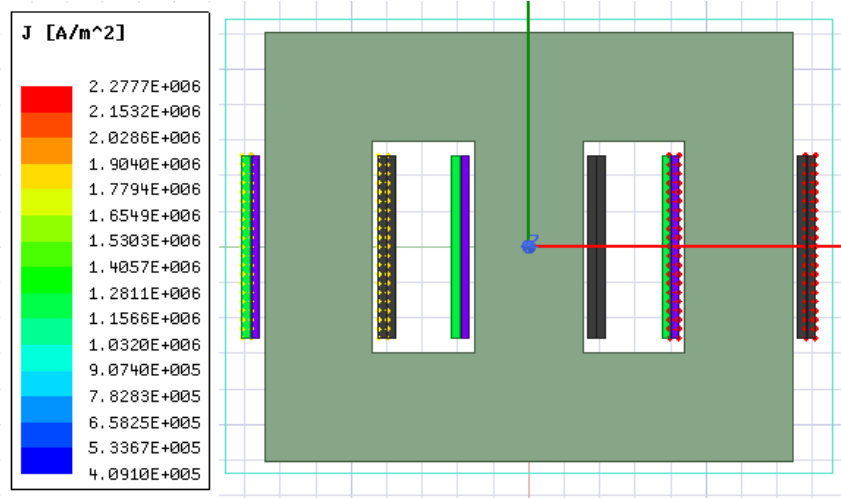
b)

Şekil 4.43. 2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan kuvveti ve vektörel dağılımı

Kısa devre testinde transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında, meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.44'te sunulmuştur. 2 Boyutlu düzlemde görüldüğü üzere transformatörün nüvesinde oluşan akım yoğunluğu 0 değerinde iken, sargılarda oluşan akım yoğunluğu 0 dan yüksek değerlerdedir. Bu durum sırasıyla Şekil 4.44.a ve Şekil 4.44.b'de sunulmuştur.



a)



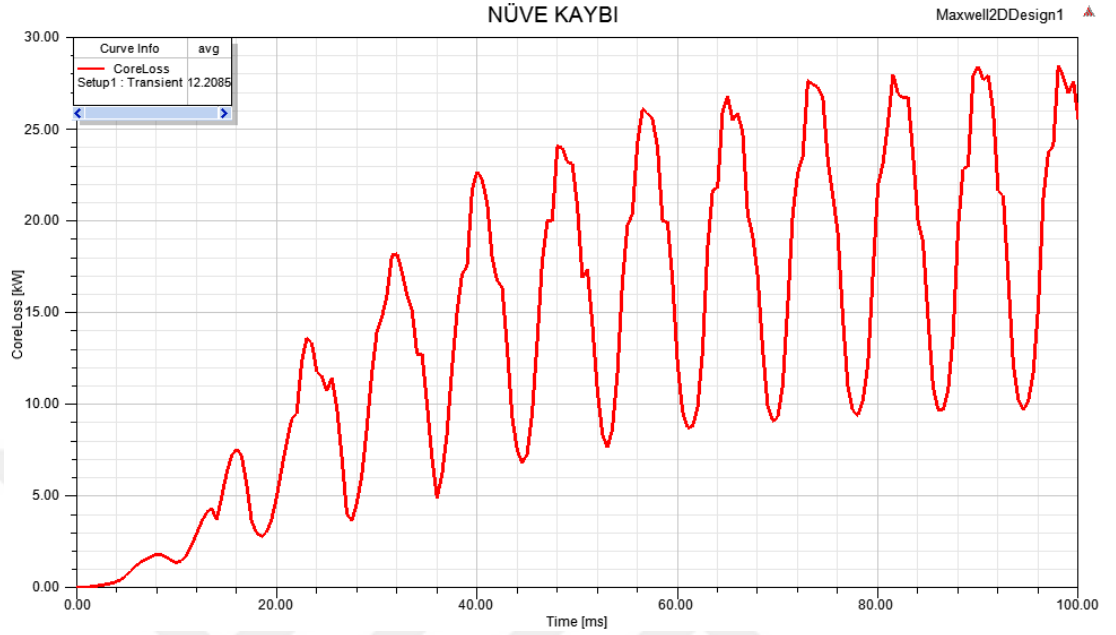
b)

Şekil 4.44. 2D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan akım yoğunluğunun değeri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

4.7.2. Üç Fazlı Transformatörün 2D Açık Devre Test Analizi

Çizelge 4.4'te teknik verileri belirtilen transformatör için karşılaştırma yapmak ve optimum tasarım elde etmek için çizelgede belirtilen transformatör verileri dikkate alınarak ANSYS Maxwell programı ile açık devre testi gerçekleştirilmiştir. Açık devre testi ile tasarlanan transformatör modelinin nüve kaybı, manyetik akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, akım yoğunluğu, akım ve gerilim bilgileri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar fabrika dizayn verileri ile kıyas edilmiştir. Açık devre testinde transformatörün nüvesinde oluşan nüve kaybının 0-0.1 s zaman aralığında değişimi Şekil 4.45'te sunulmuştur. Aşağıdaki nüve kaybı grafiği

incelendiğinde; t=0-70 ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra nüve kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir. Nüve kaybı t=70-100 ms zaman aralığındaki grafiğin ortalama değeridir.



Şekil 4.45. 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatör için açık devre testinde t=0-0.1 s zaman aralığında oluşan nüve kaybı grafiği ve ortalama değeri

Açık devre testinde AG sargılarının besleme gerilimlerinin pik değeri ve 3 sargının besleme gerilimlerinin fazör bilgisi ile ifadesi Şekil 4.46'da sunulmuştur.

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
Vpeak	$11000 \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$	V	8981.46239020...	Design

a)

Properties			
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{peak} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time})$		-----
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	0	deg	0deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

b)

Properties			
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{peak} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + (2/3 \cdot \pi))$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	120	deg	120deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

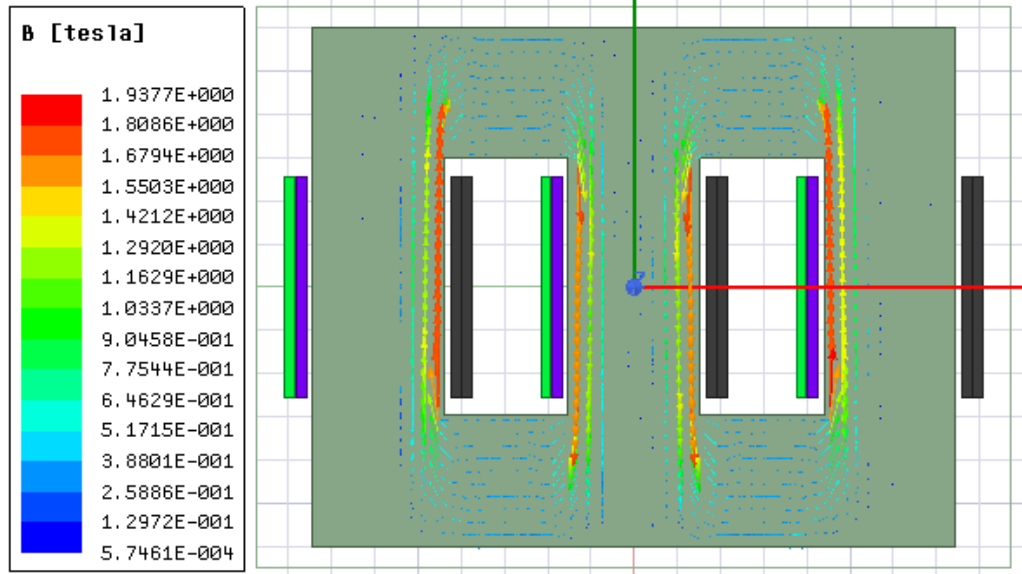
c)

Properties			
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{peak} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time})) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + (4/3 \cdot \pi))$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	-120	deg	-120deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

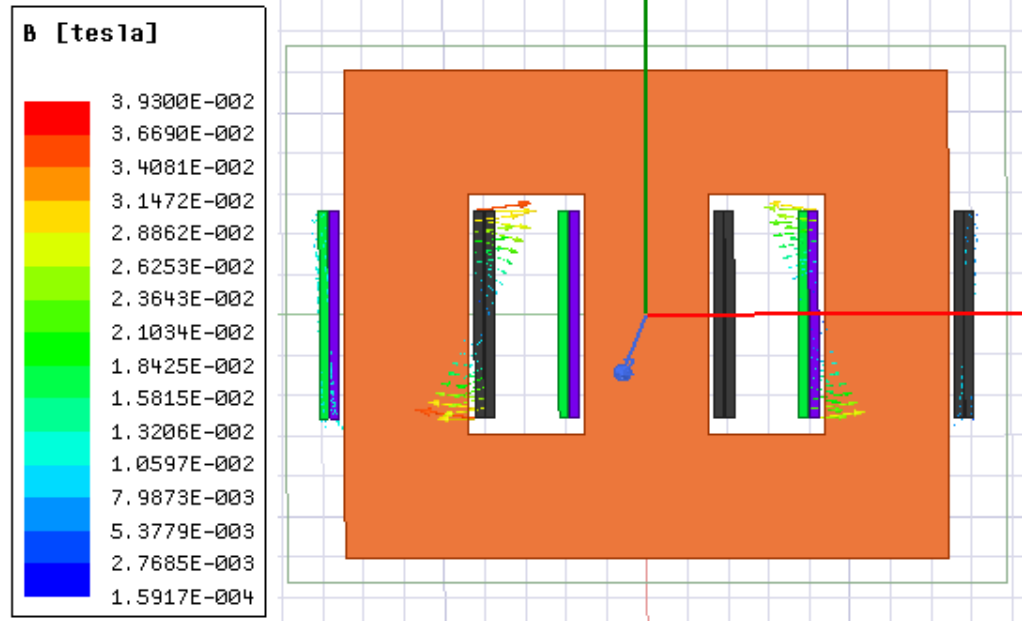
d)

Şekil 4.46. a) Açık devre testinde AG beslemesinin pik değeri **b)** AG A fazına ait besleme gerilimi değerleri **c)** AG B fazına ait besleme değerleri **d)** AG C fazına ait besleme değerleri

Açık devre testinde transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.47’de sunulmuştur. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hemde sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan yoğunluğu oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olmaktadır.



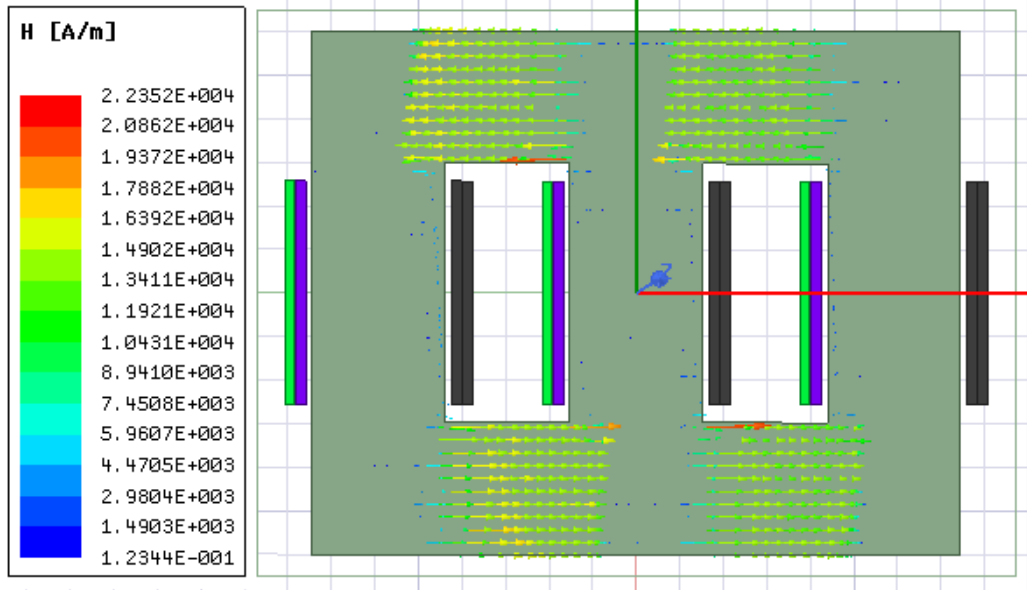
a)



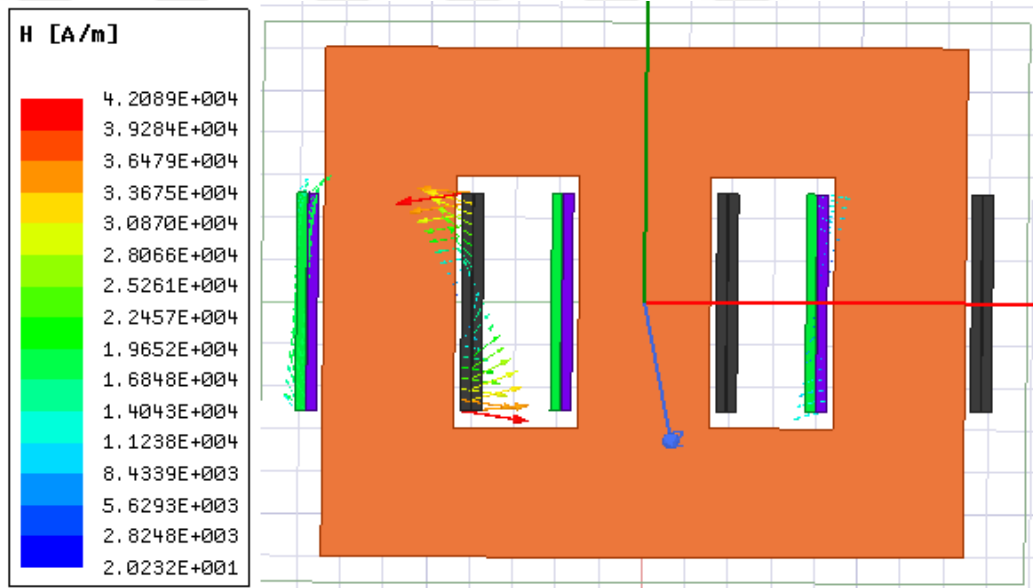
b)

Şekil 4.47. Açık devre testinde $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

Açık devre testinde transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.48’ de sunulmuştur. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hemde sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan şiddeti oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olmaktadır.



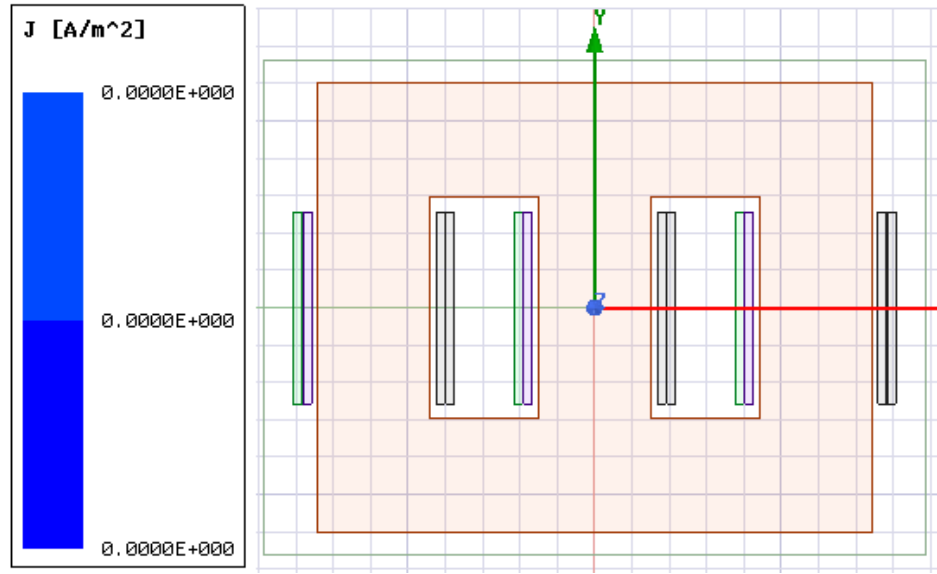
a)



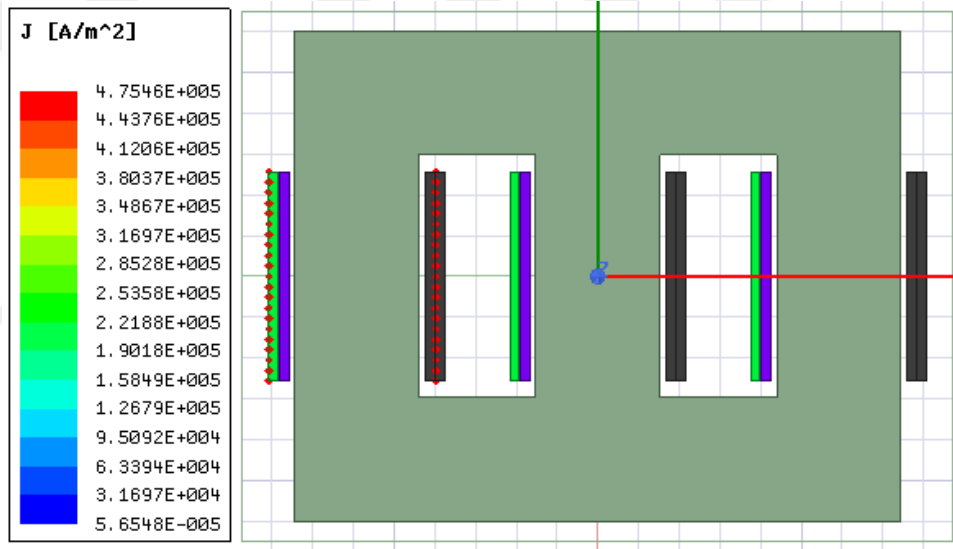
b)

Şekil 4.48. Açık devre testinde $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı

Açık devre testinde $t=0.1$ s zaman anında, 2 Boyutlu düzlemde transformatörün nüvesinde oluşan akım yoğunluğu 0 değerinde iken, sargılarda oluşan akım yoğunluğu 0 dan farklı olmak ile birlikte, akım yoğunluğu o an için belli bir sargıda gerçekleşecektir bu durum Şekil 4.49’da gösterildiği gibidir.



a)



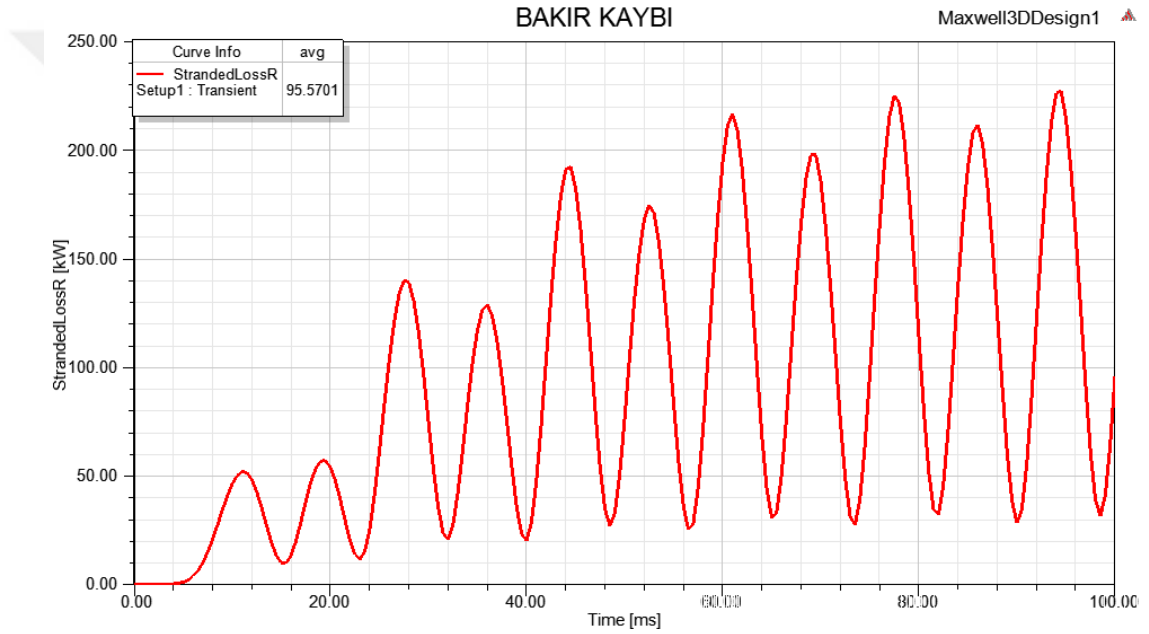
b)

Şekil 4.49. Açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

4.7.3. Üç Fazlı Transformatörün 3D Kısa Devre Test Analizi

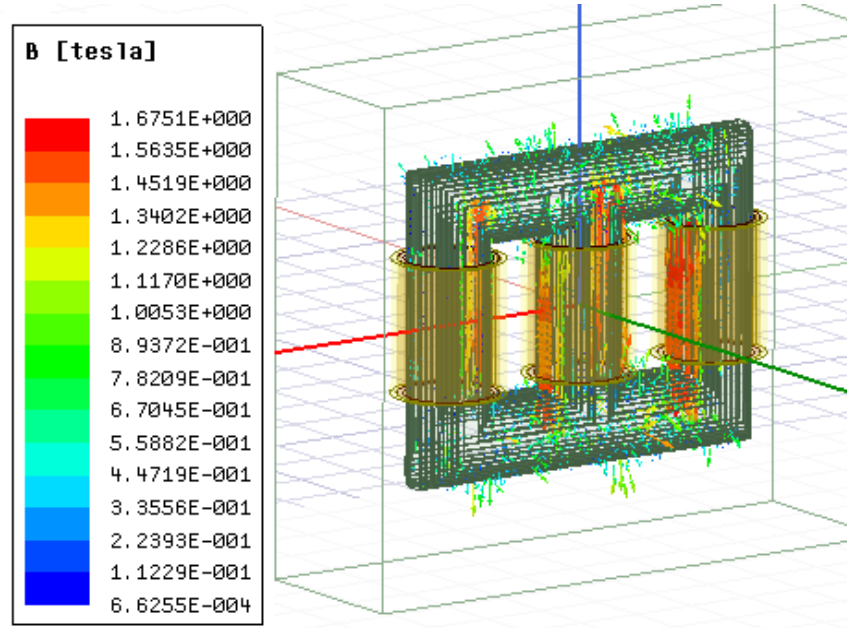
Üç fazlı 15 MVA transformatörün kısa devre testi gerçekleştirilirken yüksek gerilim sargılarının uçları nominal gerilim değerinin % 10 'u kadar bir gerilim ile beslenmiş ve alçak gerilim sargı uçları kısa devre edilmiştir. 2D modelin transformatörün kısa devre testinde olduğu gibi bu testte de geçici rejim analize bağlı simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. Bu simülasyon

testinde transformatörün 3D modelinin simulasyonundan 50 Hz için bakır kayıpları Şekil 4.50’de gösterildiği gibi elde edilmiştir. Çizelge 4.4’te belirtildiği üzere tasarım öncesinde bakır kaybı 97 kW olarak verilen transformatörün analiz sonucunda program tarafından hesaplanan bakır kaybının 0-0.1 s zaman aralığındaki değişimi ve $t=70-100$ ms zaman aralığındaki ortalama değeri 95.570 kW olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer transformatörün tasarım öncesi değerine göre % 1.47 kadar daha düşük olabileceğini ifade etmektedir. Aşağıdaki bakır kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra $t=70-100$ ms zaman aralığında bakır kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

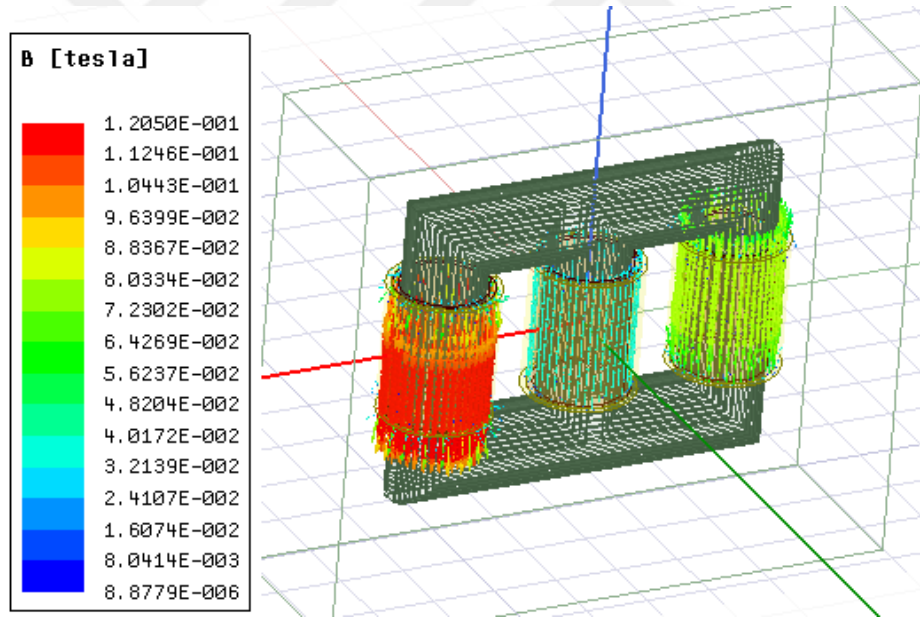


Şekil 4.50. 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatörün 3D kısa devre testinde 0-0.1 s zaman aralığında oluşan bakır kaybının grafiği ve ortalama değeri

2D modelde olduğu gibi transformatörün 3D modelinin kısa devre testinde transformatörün nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı incelenmiş ve bu değişimler Şekil 4.51’de gösterilmiştir. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hem de sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan yoğunluğu oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olacaktır.



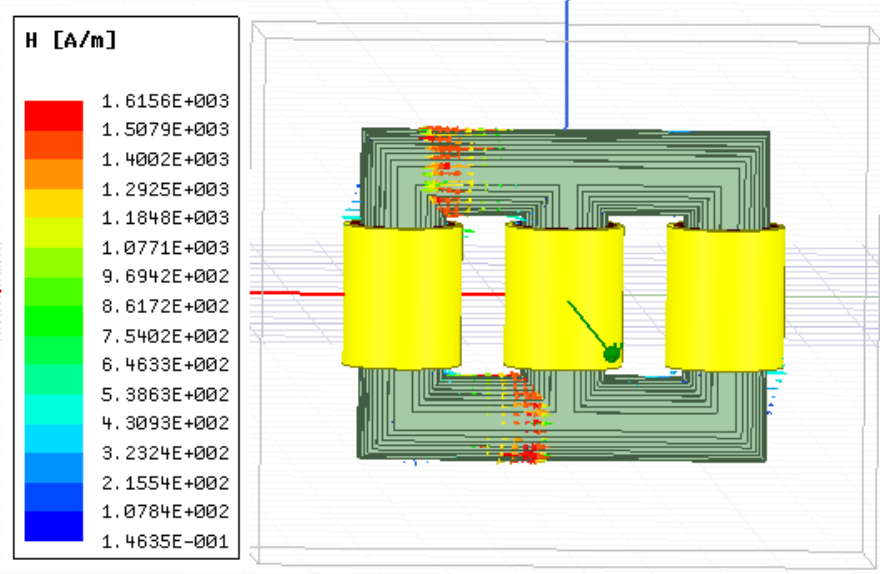
a)



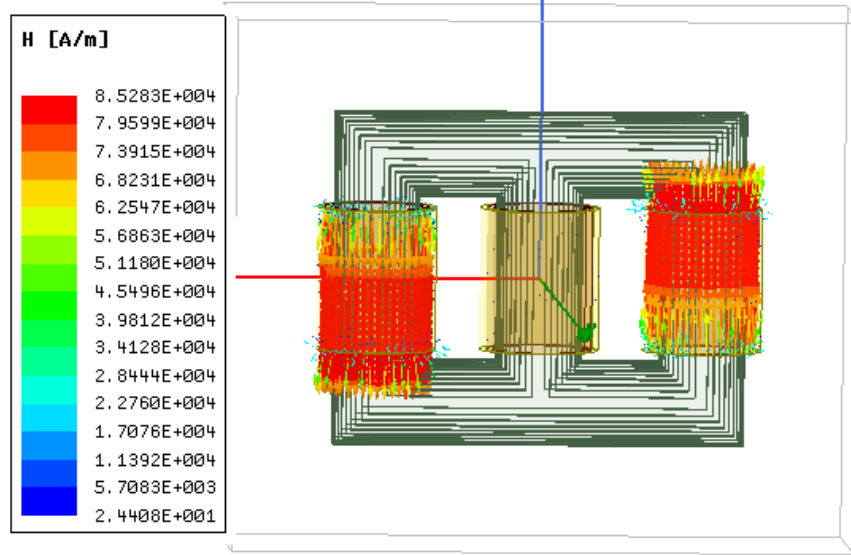
b)

Şekil 4.51. 3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan değerleri ve vektörel dağılımı

Kısa devre testinde transformatörün sırasıyla nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.52’de sunulmuştur. Analizler belli bir zaman anına aittir.



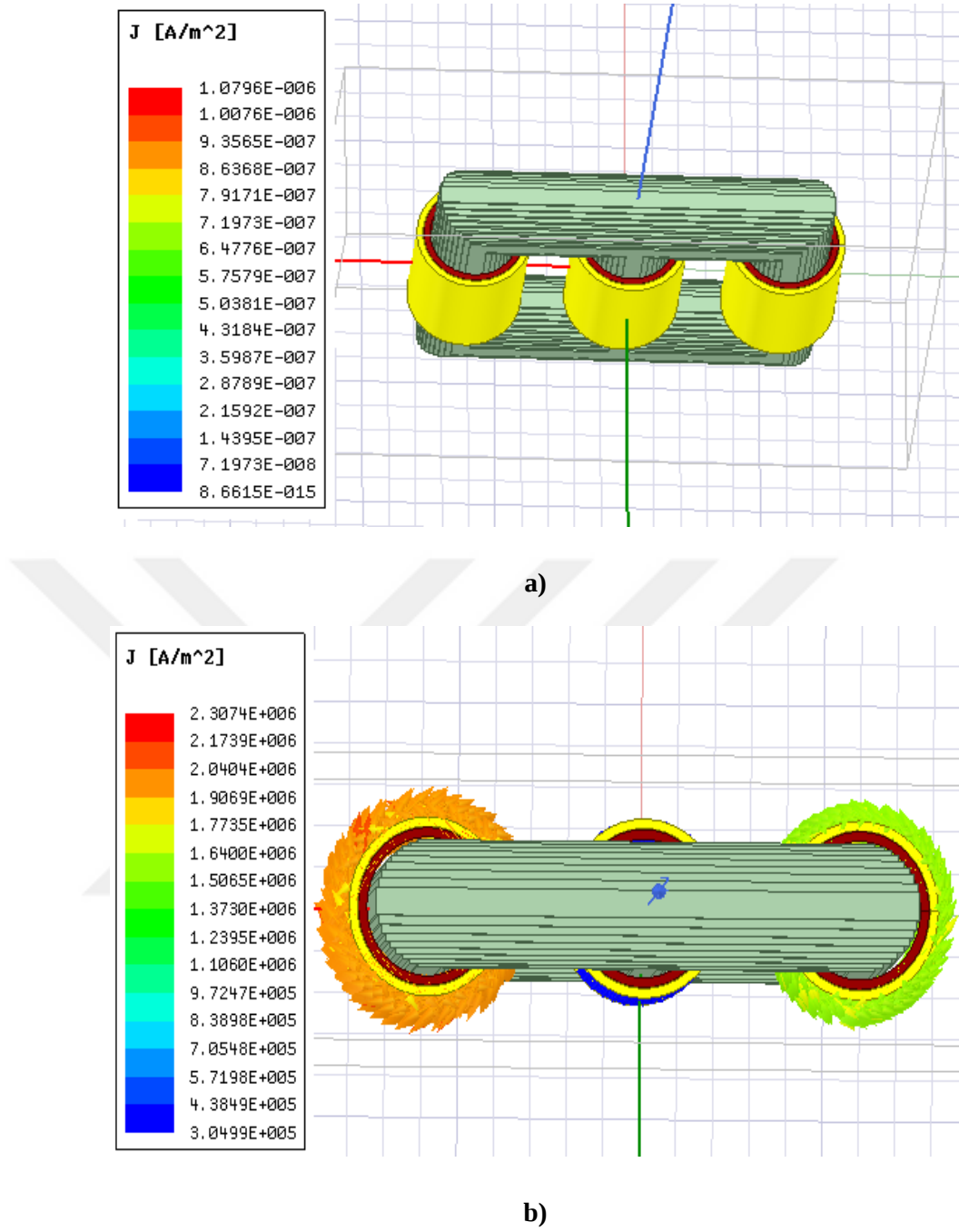
a)



b)

Şekil 4.52. 3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan kuvveti ve vektörel dağılımı

Kısa devre testinde transformatörün sırasıyla nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında, meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.53'te gösterilmiştir. 3D modelde görüldüğü üzere transformatörün nüvesinde oluşan akım yoğunluğu mikron mertebelerinde iken, sargılarda oluşan akım yoğunluğu 0 dan yüksek değerlerdedir. Bu durum sırasıyla Şekil 4.53.a ve Şekil 4.53.b'de sunulmuştur.

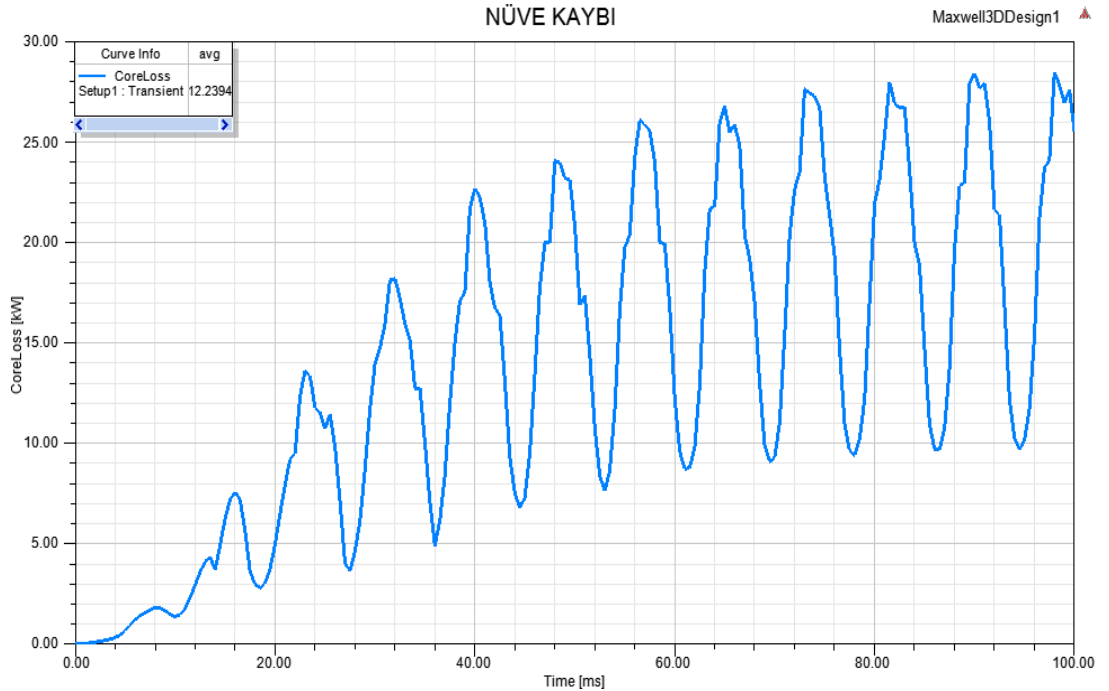


Şekil 4.53. 3D modelin kısa devre testi $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan akım yoğunluğunun değeri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

4.7.4. Üç Fazlı Transformatörün 3D Açık Devre Test Analizi

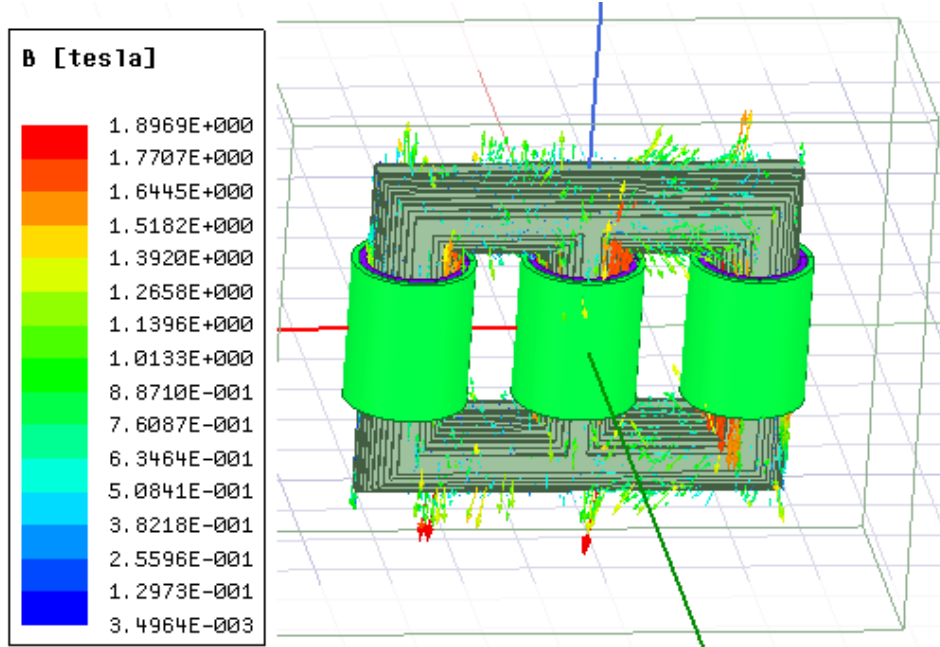
Çizelge 4.4'te teknik verileri belirtilen transformatör için 2D modelinin analizi sonucu ile karşılaştırma yapmak ve optimum analiz sonuçlarına ulaşmak için çizelgede belirtilen transformatör verileri dikkate alınarak ANSYS Maxwell 3D modelin açık devre testi gerçekleştirilmiştir. Üç fazlı 15 MVA transformatörün açık

devre testi gerçekleştirilirken alçak gerilim sargılarının uçları nominal gerilim değeri kadar bir gerilim ile beslenmiş ve yüksek gerilim sargı uçları açık devre edilmiştir. Açık devre testi ile tasarlanan transformatör modelinin nüve kaybı, manyetik akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, akım yoğunluğu, akım ve gerilim bilgileri elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar tasarım öncesi çizelge verileri ile kıyas edilmiştir. Açık devre testinde transformatörün nüvesinde oluşan nüve kaybının 0-0.1 s zaman aralığında değişimi Şekil 4.45'te sunulmuştur. 2D modelin transformatörün açık devre testinde olduğu gibi bu testte de geçici rejim analize bağlı simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. Bu simülasyon testinde transformatörün 3D modelinin simülasyonundan 50 Hz frekans için nüve kayıpları Şekil 4.54'te gösterildiği gibi elde edilmiştir. Çizelge 4.4'te belirtildiği üzere tasarım öncesinde nüve kaybı 12.500 kW olarak verilen transformatörün analiz sonucunda program tarafından hesaplanan nüve kaybının $t=70-100$ ms zaman aralığındaki değişimi ve ortalama değeri 12.239 kW olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değer transformatörün tasarım öncesi değerine göre % 2.09 kadar daha düşük olabileceğini ifade etmektedir. Aşağıdaki nüve kaybı grafiği incelendiğinde; $t=0-70$ ms zaman aralığındaki geçici durumdan sonra nüve kaybını ifade eden güç fonksiyonunun 100 Hz frekansa sahip olduğu görülmektedir.

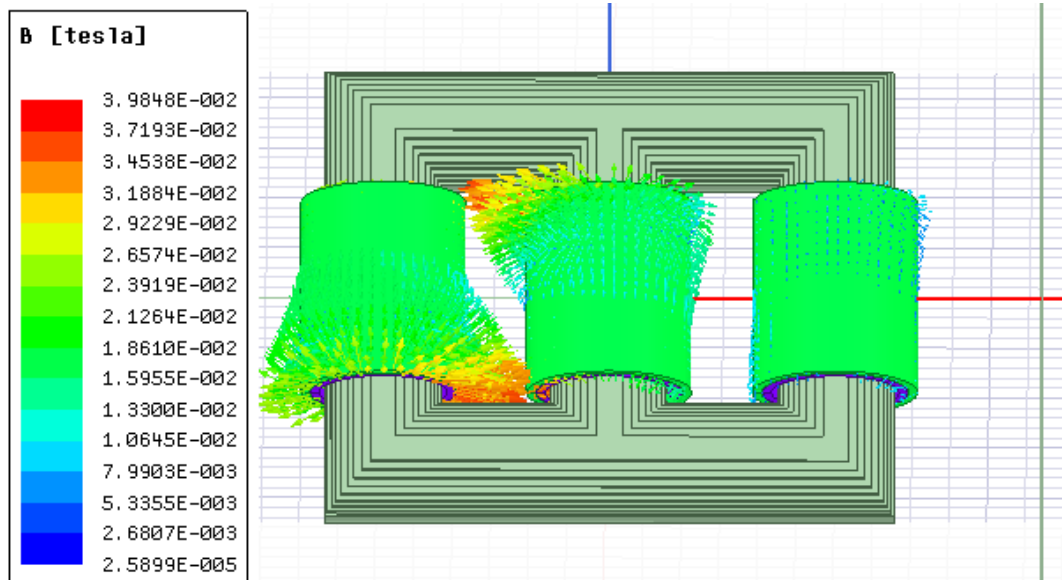


Şekil 4.54. 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatörün 3D modeline ait açık devre testinde $t=0-0.1$ s zaman aralığında oluşan nüve kaybı grafiği

Transformatörün 3D modelinin açık devre testi yapılırken nüvesinde ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan yoğunluğunun değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.55'te sunulmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olacaktır.



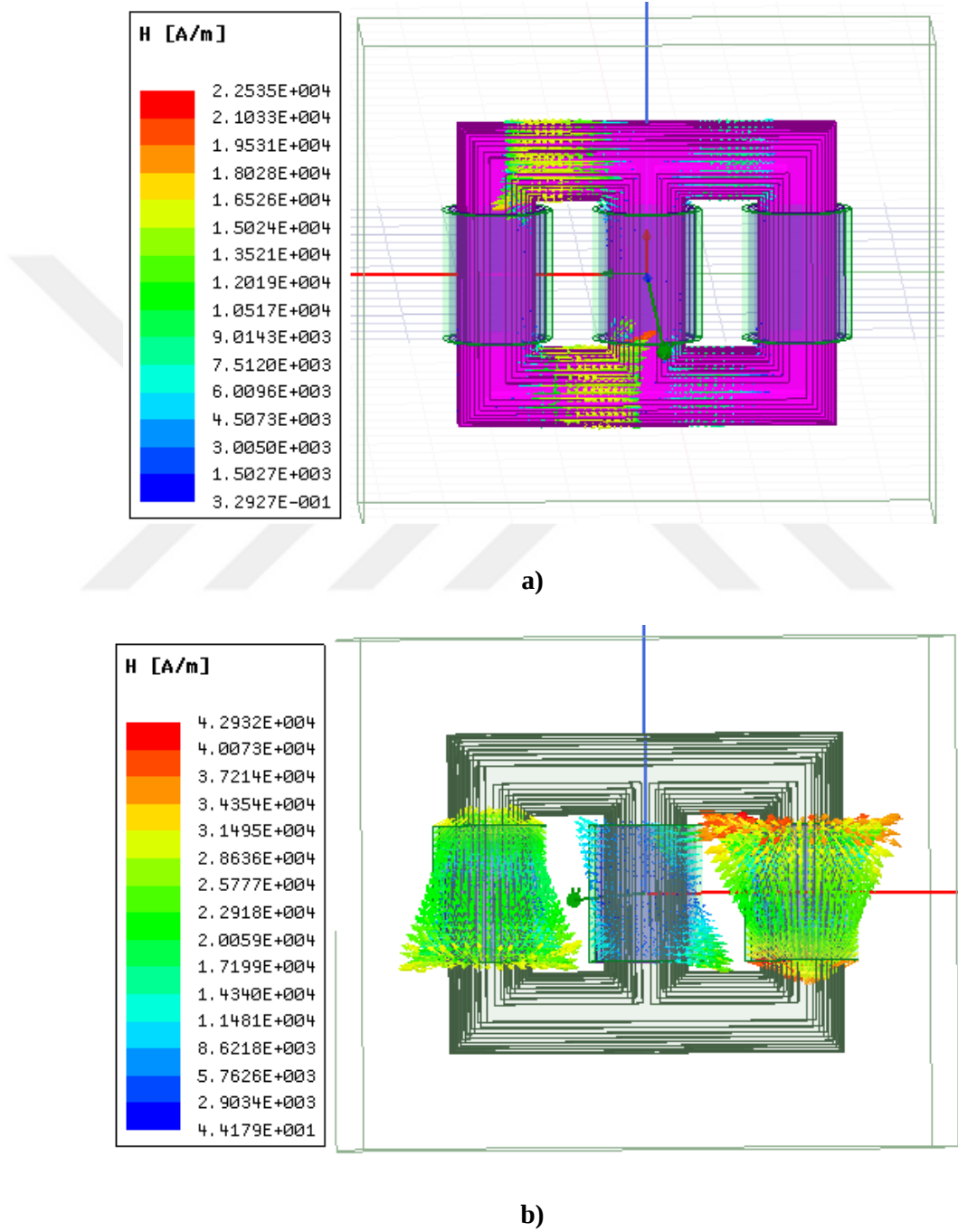
a)



b)

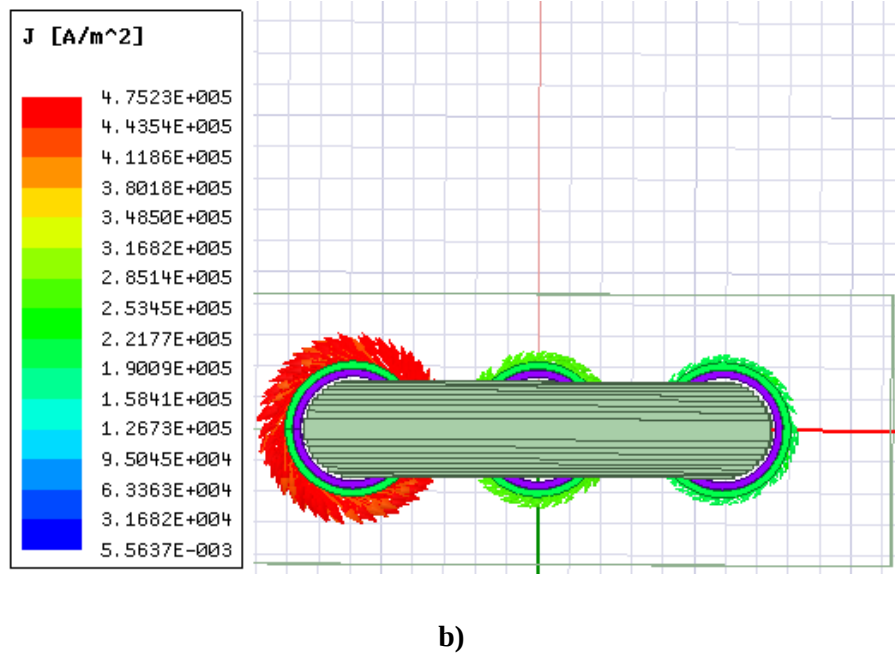
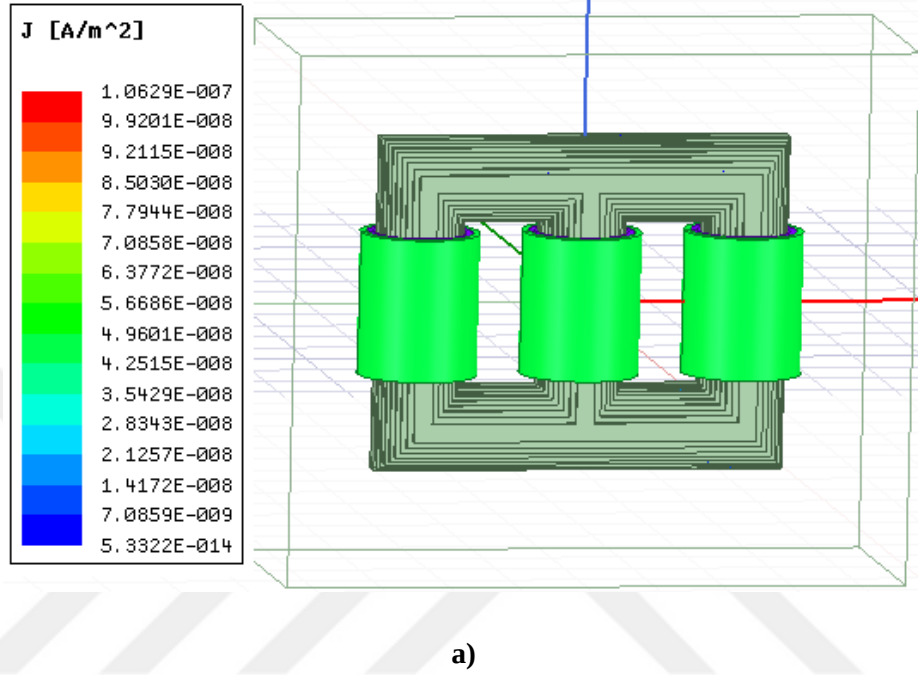
Şekil 4.55. 3D modelin açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan manyetik alan yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

Transformatörün 3D modelinin açık devre testinde, nüvesi ve sargılarında $t=0.1$ s anında meydana gelen manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı Şekil 4.56'da sunulmuştur. Belli bir zaman anı için analiz edildiği için hem nüvede hemde sargılarda spesifik noktalarda manyetik alan şiddeti oluşmuştur. Farklı bir zaman anında oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve nüve-sargılardaki yerleri farklı olmaktadır.



Şekil 4.56. 3D modelin açık devre testinde $t=0.1$ s anında **a)** nüvede oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı **b)** sargılarda oluşan manyetik alan şiddeti değerleri ve vektörel dağılımı

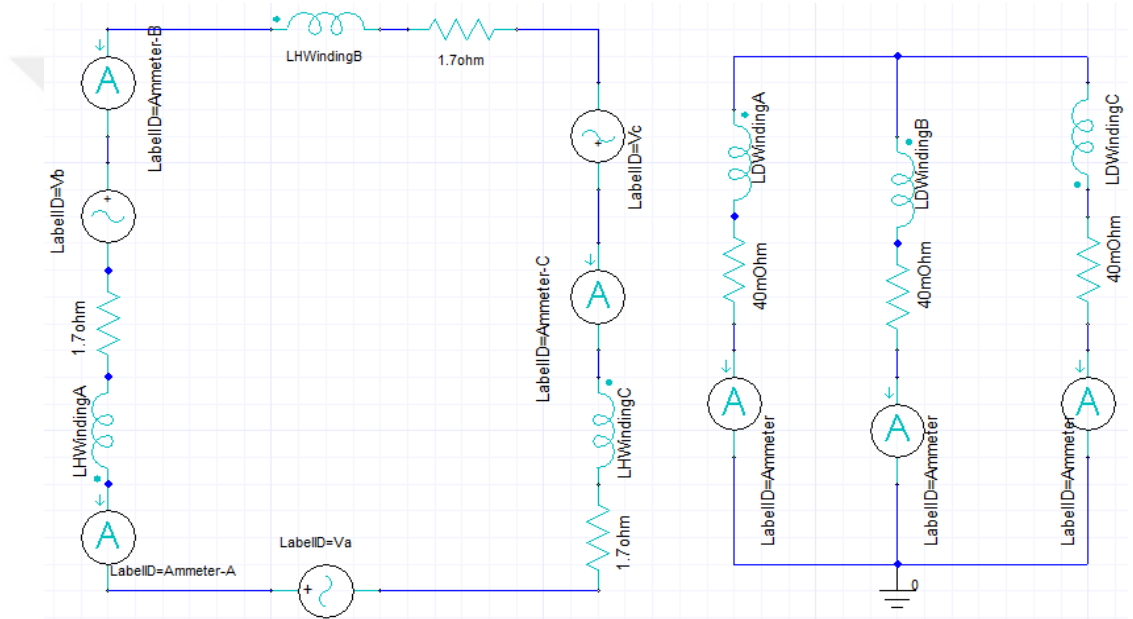
Transformatörün 3D modelinin açık devre testinde $t=0.1$ s zaman anında, transformatörün nüvesinde oluşan akım yoğunluğu mikron mertebelerinde iken, sargılarda oluşan akım yoğunluğu 0 dan farklı olmak ile birlikte her sargıda eşit olmadığı Şekil 4.57.a ve Şekil 4.57.b’de gösterilmiştir.



Şekil 4.57. Açık devre testinde $t=0.1$ s anında a) nüvede oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı b) sargılarda oluşan akım yoğunluğu değerleri ve vektörel dağılımı

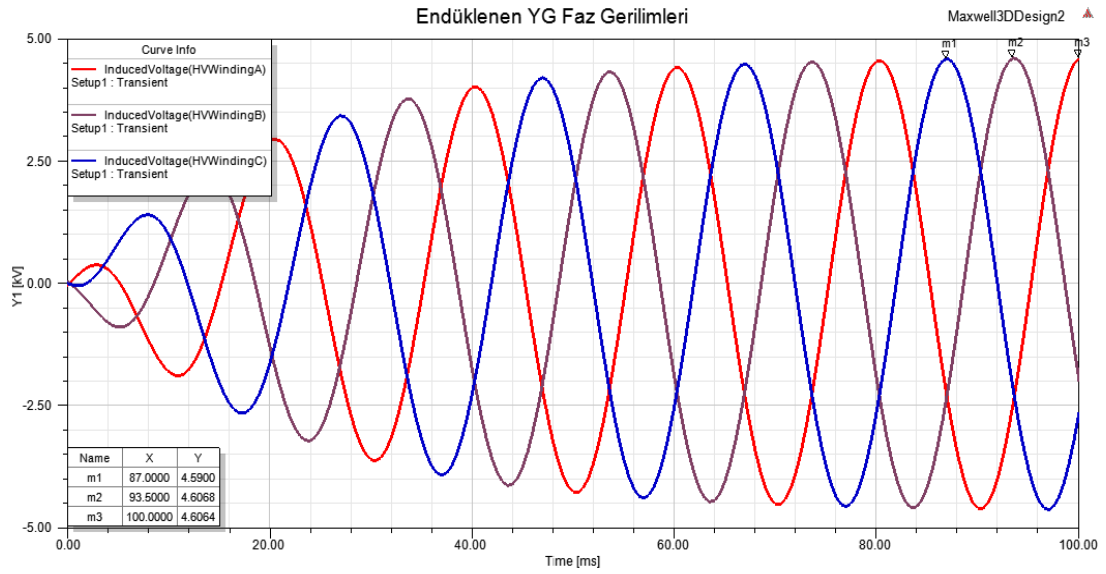
4.8. Üç Fazlı Transformatörün Kısa Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Değerlerinin Grafikleri

15 MVA güce sahip transformatör için oluşturulan harici devre şeması Şekil 4.58’de sunulduğu şekildedir. Burada transformatörün ANSYS Maxwell ile tasarımı gerçekleştirilirken transformatörün devre parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Yüksek gerilim sargı uçları nominal gerilim değerinin %10 u kadar (3300 V) ortalama bir gerilim ile beslenirken alçak gerilim sargı uçları kısa devre edilmiştir. Giriş sargılarında nominal akım değerinde akım geçişi olmuş ve çıkış sargılarında nominal akım değerinde akım geçişi gerçekleşmiştir.

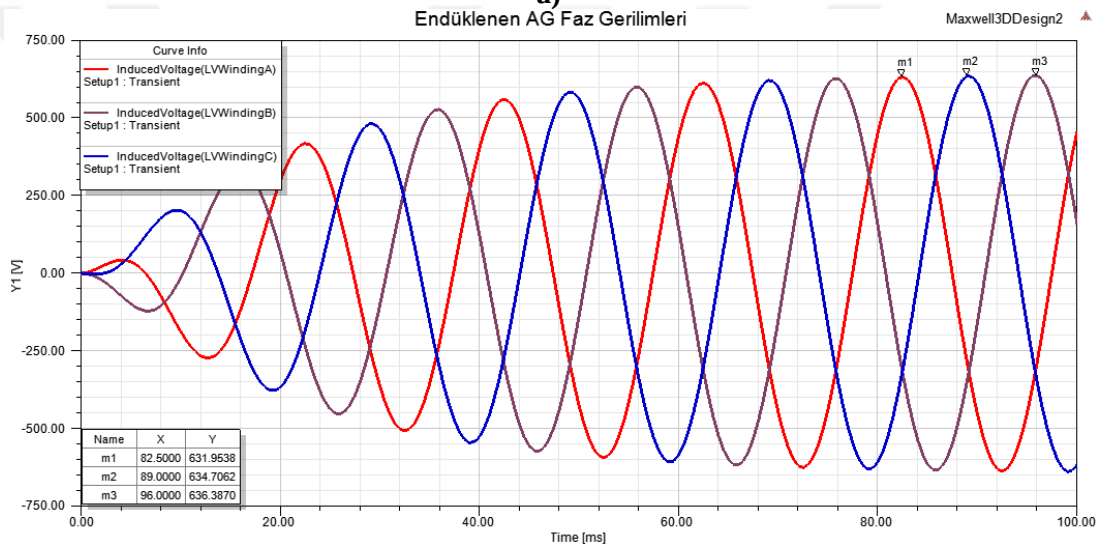


Şekil 4.58. 15 MVA güce sahip üçgen / yıldız bağlantılı transformatörün kısa devre testi için harici devre şeması

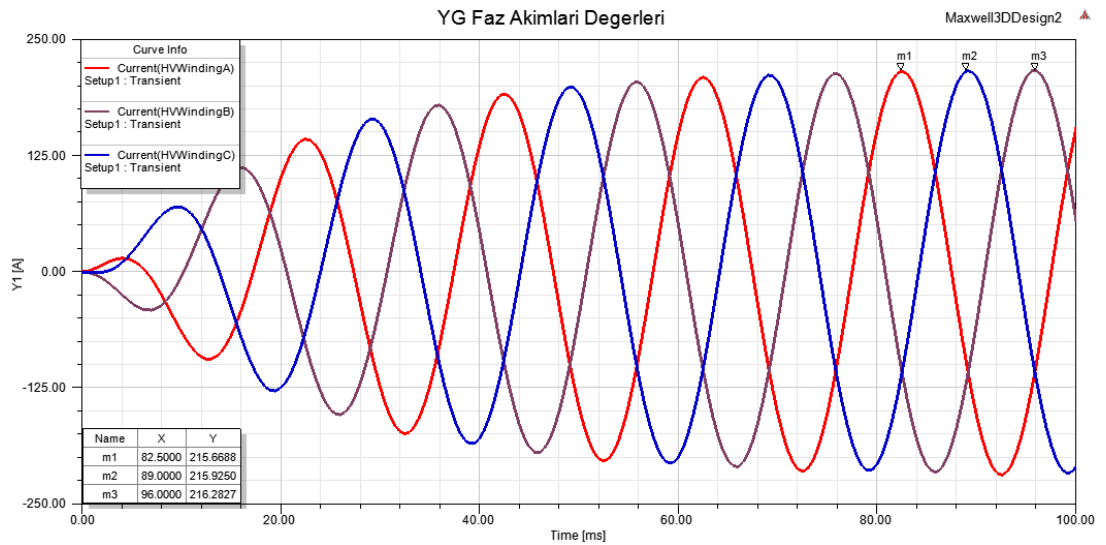
Kısa devre testinde endüklenen YG faz değerleri, endüklenen AG faz değerleri, YG faz akımları ve AG faz akımlarının 0-0.1 s zaman aralığındaki değişimleri sırasıyla Şekil 4.59.a, b, c, d’de sunulmuştur. Grafiklerdende anlaşılacağı üzere yüksek gerilim sargıları nominal gerilim değerinin % 10 değeri kadar bir gerilim ile beslenirken alçak gerilim tarafında (yük tarafında) bulunan sargılardan nominal değere yakın bir akım geçişi gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.59.a, b, c, d’ incelendiğinde endüklenen YG faz gerilimleri, AG faz gerilimleri, YG akım ve AG akım değerleri t=0-70 ms zaman aralığında geçici rejimi yaşarken t=70 ms anından sonra endüklenen gerilimler ve akım sinyalleri kararlı olduğu görülebilmektedir.



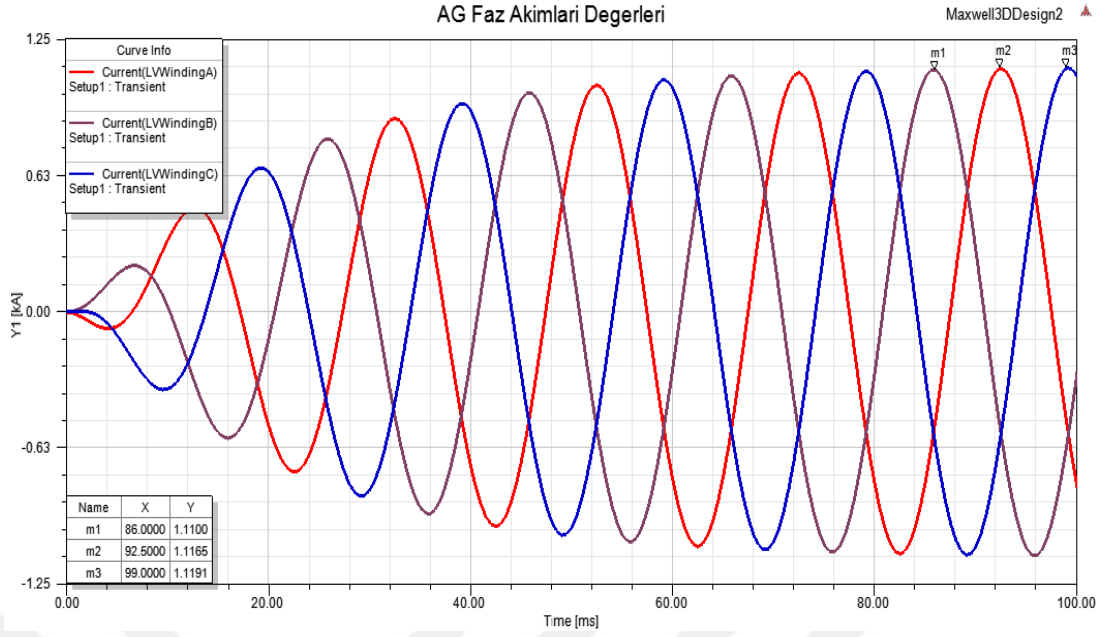
a)



b)



c)



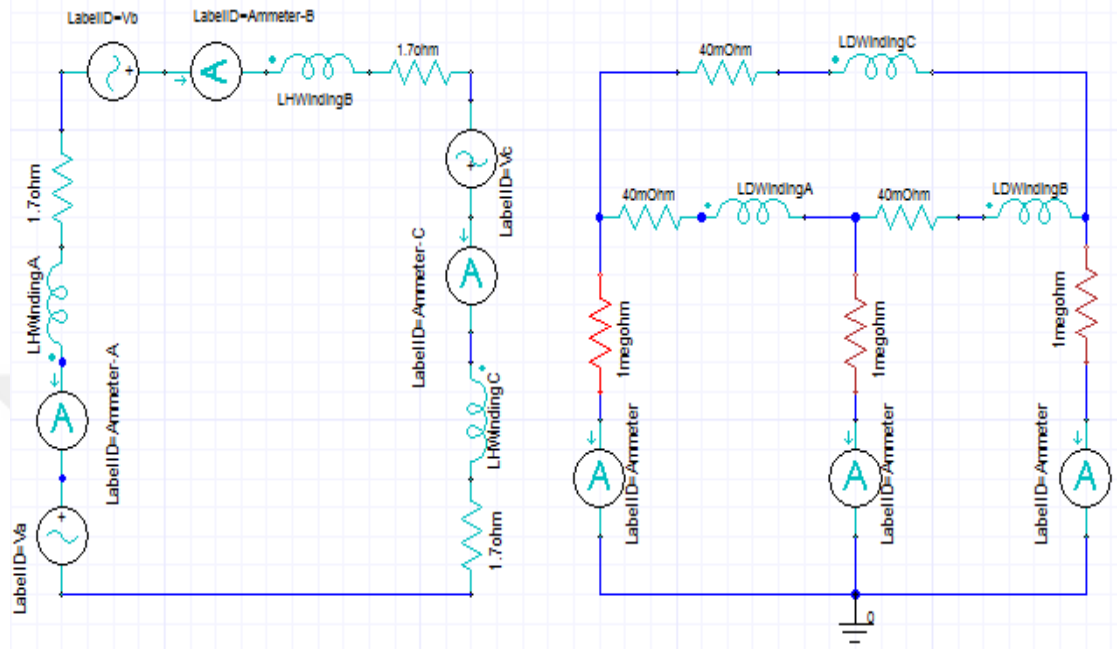
d)

Şekil 4.59. 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı transformatör için kısa devre testinde oluşan **a)** YG sargılarında endüklenen faz gerilimleri **b)** AG sargılarında endüklenen faz gerilimleri **c)** YG sargılarında oluşan faz akımları **d)** AG sargılarında oluşan faz akımları

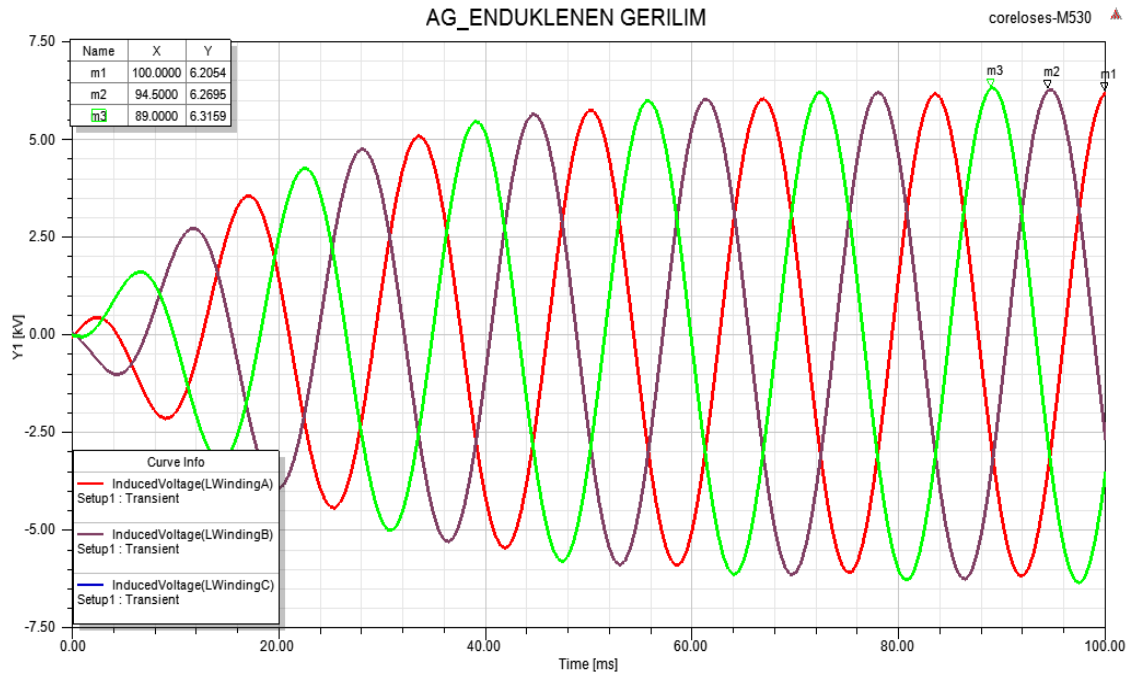
4.9. Üç Fazlı Transformatörün Açık Devre Testinde Harici Devre Şeması, Gerilim ve Akım Değerlerinin Grafikleri

ANSYS Maxwell ile tasarım yapılırken kaynak olarak dahili(internal) ve harici (external) ile modelin beslenmesi mümkündür. Bu kapsamda bu tez çalışmasının genelinde ANSYS Maxwell ile tasarım gerçekleştirilirken kaynak olarak gerilim kaynağıyla besleme sağlanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte 15 MVA gücüne sahip 3 fazlı güç transformatörünün harici devre şeması Şekil 4.60'ta sunulmuştur. Burada transformatörün ANSYS Maxwell ile tasarımı gerçekleştirilirken transformatörün devre parametreleri göz önünde bulundurulmuştur. Açık devre testinde güç transformatörü pratikte olduğu gibi AG sargı uçları nominal gerilim (6350 V) ile beslenirken yüksek gerilim sargı uçları açık devre edilmiştir. Sargılar arasındaki sarım oranı dikkate alınarak yüksek gerilim sargı uçlarında da bir gerilimin endüklenmesine neden olmuştur. Çıkış sargıları açık devre olduğu için bu sargılardan akım geçişi olmamıştır, bundan dolayı giriş sargılarında da sadece miliamper seviyelerinde akım geçişi olmuştur. Açık devre testinde endüklenen AG faz değerleri, endüklenen YG faz değerleri, AG faz akımları, YG faz

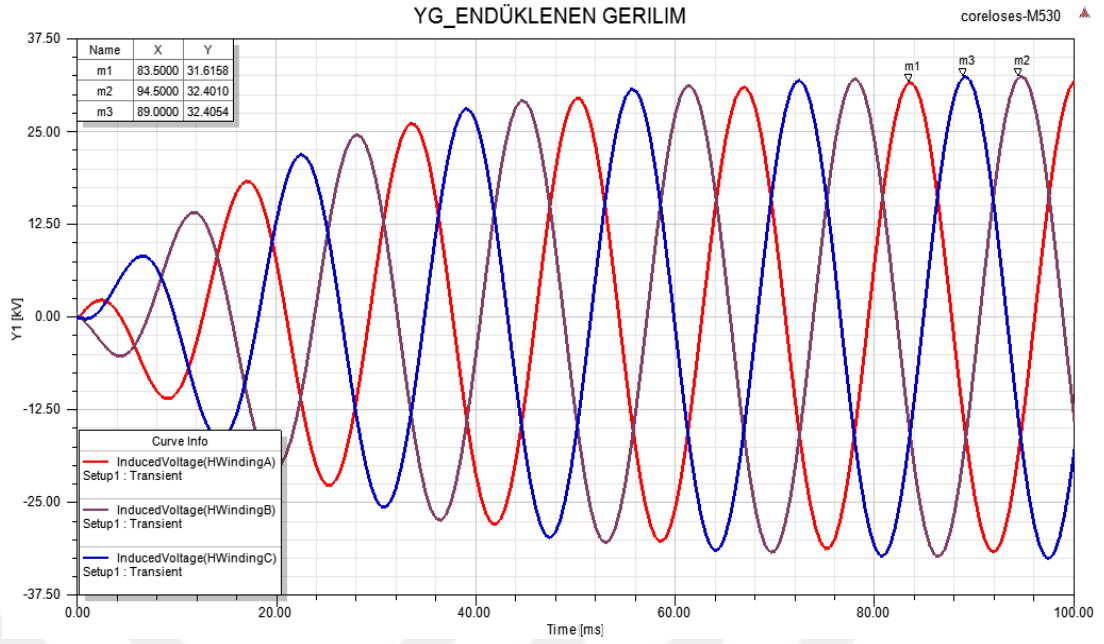
akımlarının $t=0-0.1$ s zaman aralığındaki değişimi sırasıyla Şekil 4.61.a, b, c, d’de verilmiştir.



Şekil 4.60. 15MVA güce sahip üçgen / yıldız bağlantılı transformatörün açık devre testi için harici devre şeması

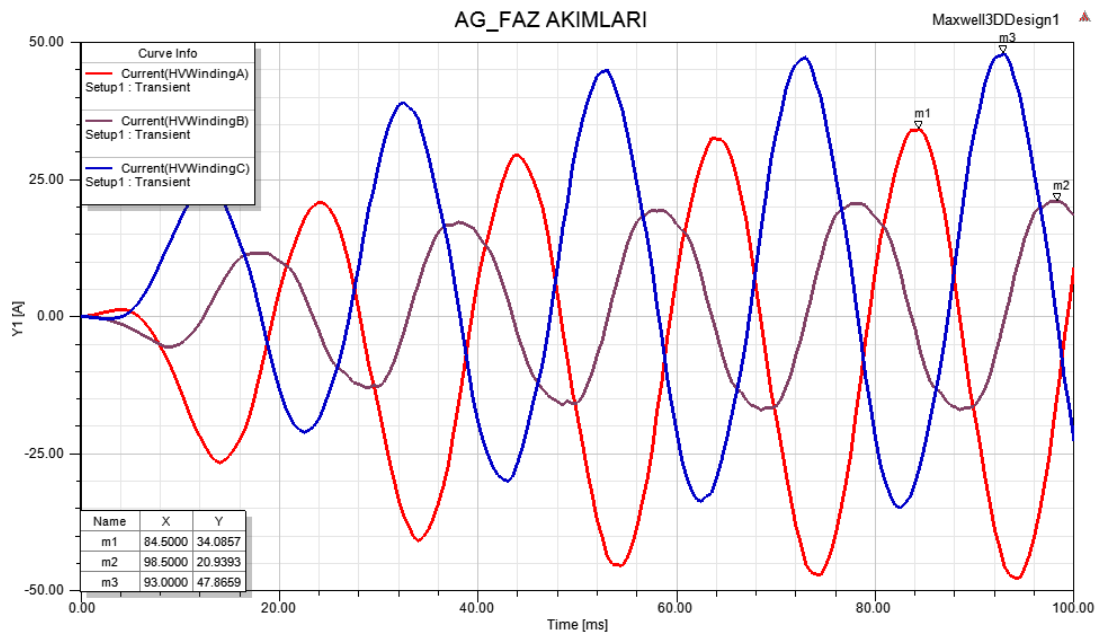


a)

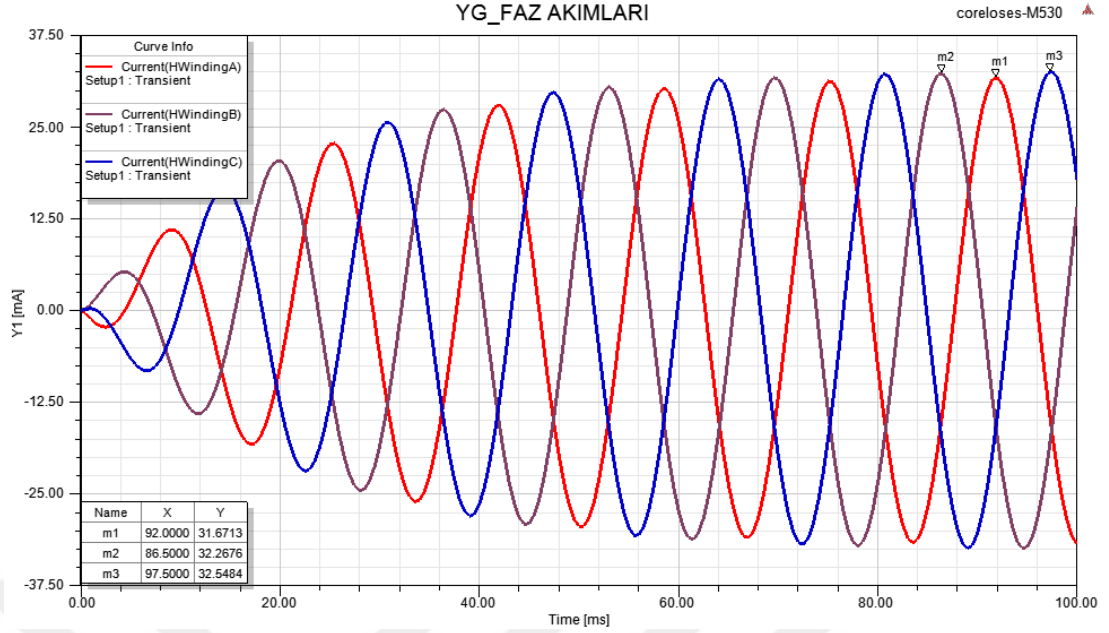


b)

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere AG sargıları nominal gerilim değeri kadar bir gerilim ile beslenirken YG tarafı sargı uçlarında sargı sarım oranında gerilim endüklenmiş olur. YG sargından neredeyse hiç akım akmazken AG sargılarından bir miktar akım geçişi gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.61.a, b incelendiğinde endüklenen YG faz gerilimleri, AG faz gerilimleri değerleri $t=0-70$ ms zaman aralığında geçici rejimi yaşarken $t=70$ ms anından sonra endüklenen gerilimlerin değişimleri stabil olduğu görülebilmektedir.



c)



d)

Şekil 4.61. Açık devre testinde $t=0-0.1$ s zaman aralığında **a)** AG sargı uçlarında endüklenen gerilimin değişim grafiği **b)** YG sargı uçlarında endüklenen gerilimin değişim grafiği **c)** AG sargılarından geçen faz akımlarının değişim grafiği **d)** YG sargılarından geçen faz akımlarının değişim grafiği

4.10. Tek Faz 90 VA Transformatörün $t=0-200$ ms Zaman Aralığında Kısa Devre Testi

Bölüm 4.4.1’de tek faz 90 VA transformatörün 3D modelinde kısa devre testi için $t=0-100$ ms zaman aralığında ANSYS Maxwell programı kullanılarak analiz edilmiştir. Simulasyon sonuçları ile incelendiğinde $t=0-70$ ms zaman aralığında geçici rejim durumunun yaşandığı ve $t=70-100$ ms zaman aralığında kalıcı rejim durumunun yaşandığı görülmüştür. Kısa devre testinde sargılarda meydana gelen bakır kaybı $t=70-100$ ms zaman aralığında ortalama değeri alınarak program tarafından hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğunun teyit edilmesi açısından söz konusu transformatörün kalıcı durumu daha uzun bir süre ($t=70-200$ ms) için elde edilmiştir. Bu süre zarfında Şekil 4.62’de görüldüğü gibi transformatörün YG sargılarına aynı besleme gerilimi (24 V AC) verilmiş, aynı zaman adımı ($t=0.0005$ s) kullanılmış ve simulasyon süresi ($t=0-200$ ms) iki katına çıkarılmıştır. Ayarlanan simulasyon süresi sonucunda transformatör sargılarına ait bakır kaybı, primer ve sekonder sargılarına ait akım ve gerilim grafikleri Şekil 4.63’te görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Name:

Parameters

Type: ☐ Solid ☒ Stranded

Initial Current:

Resistance:

Inductance:

Voltage:

Properties

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
V	$24\sqrt{2}$	V	33.9411254969...	Design

a)

Solve Setup

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Name: ☒ Enabled

Transient Setup

Stop time:

Time step:

Solve Setup

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Sweep Setup

Type:

Start:

Stop:

Step Size:

Please note the stop time defined in the General Page will be included automatically.

Time
0.1900001
0.1905001
0.1910001
0.1915001
0.1920001
0.1925001
0.1930001
0.1935001
0.1940001
0.1945001
0.1950001
0.1955001
0.1960001
0.1965001
0.1970001
0.1975001
0.1980001
0.1985001
0.1990001
0.1995001

Solve Setup

General | Save Fields | Advanced | Solver | Expression Cache | Defaults

Nonlinear Residual:

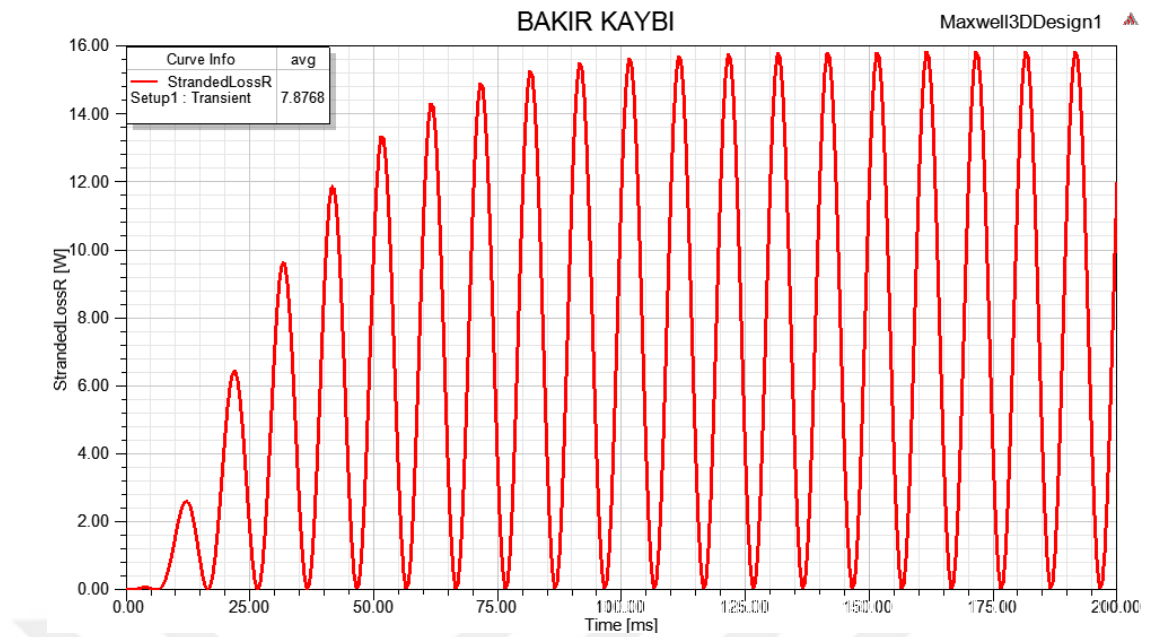
☐ Output error

Scalar Potential:

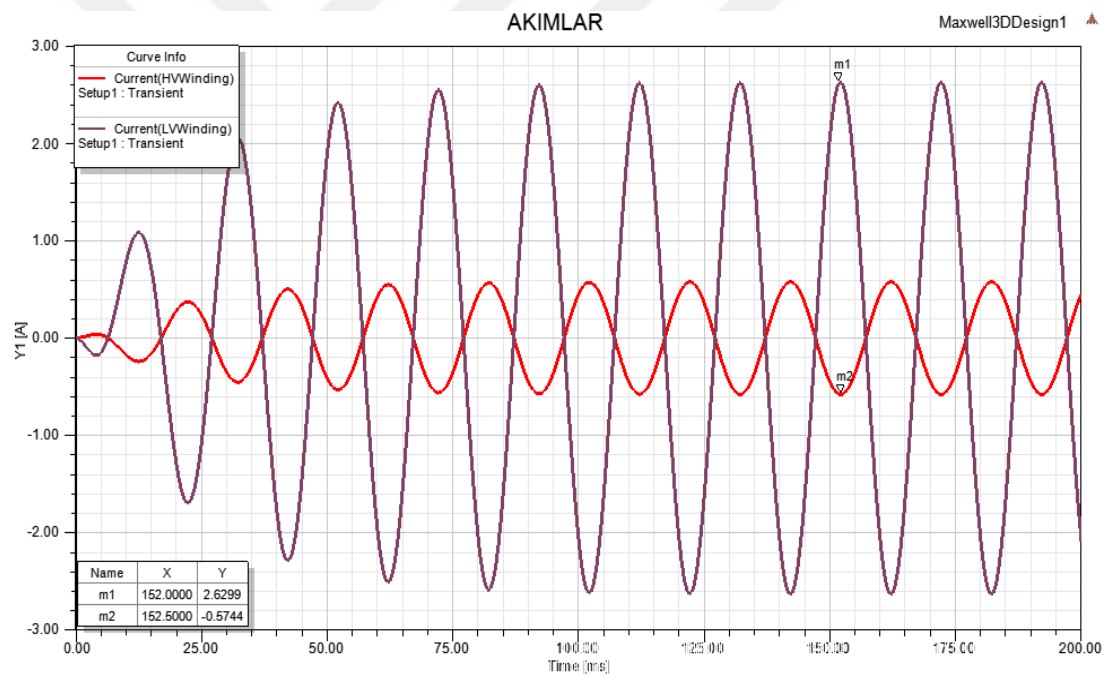
b)

Şekil 4.62. Kısa devre testinde a)YG sargısına ait sargı direnci ve besleme gerilimi değerleri
b)analiz için örnekleme zaman aralığı ve simülasyon toplam süresi

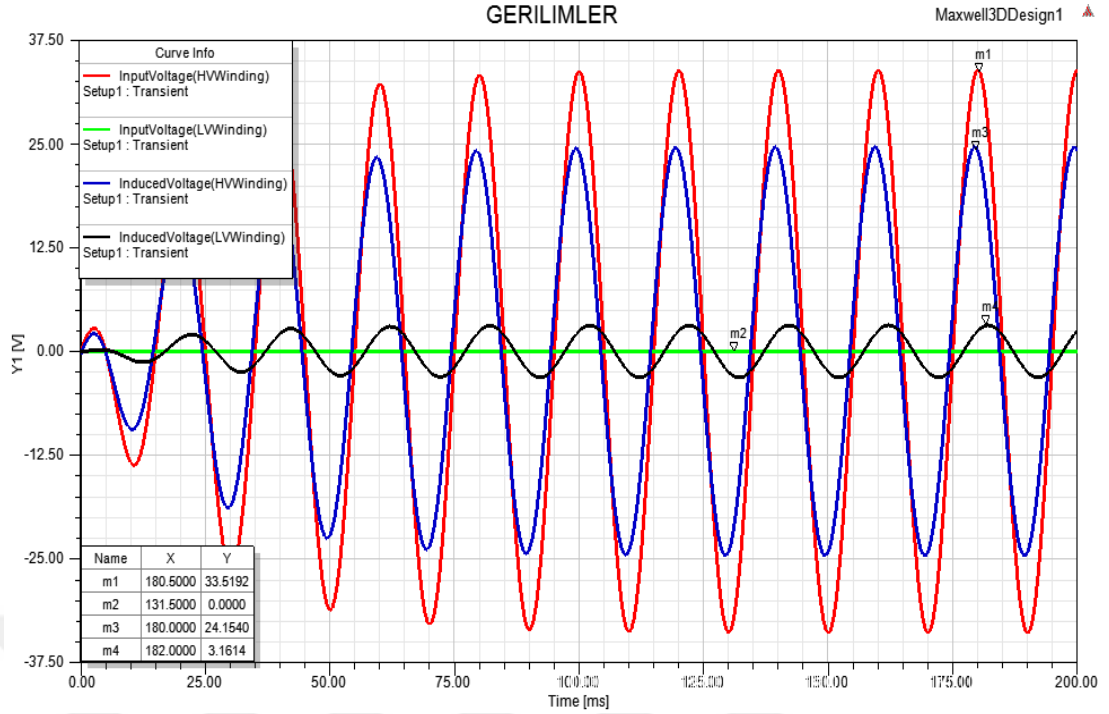
Aynı transformatör için $t=70-100$ ms zaman aralığındaki kalıcı durum için oluşan bakır kaybının ortalama değeri 7.7289 W olarak elde edilmişti. Analiz sonuçları incelendiğinde sargılarda meydana gelen bakır kaybının $t=70-200$ ms zaman aralığındaki ortalama değeri 7.8768 W olarak elde edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında ikinci durumda oluşan bakır kayı değerinin ilk durumda elde edilen sonuç ile çok yakın olmasına rağmen laboratuvar şartlarında ölçülen (9 W) bakır kaybı değerine bir miktar daha yakın sonuç verdiği görülmüştür. Akım ve gerilim grafikleri $t=70$ ms anından sonra kalıcı rejimde oldukları ve kararlı bir durum sergiledikleri görülmüştür.



a)



b)



c)

Şekil 4.63. Kısa devre testinde $t=0-200$ ms için elde edilen a) bakır kaybı b) YG ve AG sargılarından geçen akım c) sargılarda endüklenen gerilim değerleri

4.11. Tek Faz 90 VA Transformatörün $t=0-200$ ms Zaman Aralığında Açık Devre Testi

Bölüm 4.4.2’de tek faz 90 VA transformatörün 3D modelinde açık devre testi için $t=0-100$ ms zaman aralığında ANSYS Maxwell programı kullanılarak analiz edilmiştir. Simulasyon sonuçları ile incelendiğinde kısa devre testinde olduğu gibi $t=0-70$ ms zaman aralığında geçici rejim durumunun yaşandığı ve $t=70-100$ ms zaman aralığında kalıcı rejim durumunun yaşandığı görülmüştür. Açık devre testinde sargılarda meydana gelen nüve kaybı $t=70-100$ ms zaman aralığında ortalama değeri alınarak program tarafından hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğunun teyit edilmesi açısından söz konusu transformatörün kalıcı durumu daha uzun bir süre ($t=70-200$ ms) için elde edilmiştir. Bu süre zarfında Şekil 4.64’te görüldüğü gibi transformatörün AG sargılarına nominal besleme gerilimi (48 V AC) verilmiş, aynı zaman adımı ($t=0.0005$ s) kullanılmış ve simulasyon süresi ($t=0-200$ ms) iki katına çıkarılmıştır. Ayarlanan simulasyon süresi sonucunda transformatör sargılarına ait nüve kaybı, primer ve sekonder sargılarına ait akım ve gerilim grafikleri Şekil 4.65’te görüldüğü gibi elde edilmiştir. Açık devre testinde $t=70-100$ ms zaman aralığındaki kalıcı durum için oluşan nüve kaybının ortalama değeri 3.9307 W olarak elde edilmişti. Analiz sonuçları incelendiğinde sargılarda meydana gelen nüve kaybının $t=70-200$ ms zaman aralığındaki ortalama değeri 4.4712 W olarak elde edilmiştir.

Name: Secondary_Winding

Parameters

Type: Voltage ☐ Solid ☒ Stranded

Initial Current: 0 A

Resistance: 1.2 ohm

Inductance: 0 mH

Voltage: $V_s \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \exp(-50 \cdot \text{time}))$

Properties

Name	Value	Unit	Evaluated Value	Type
Vs	48	V	48V	Design

a)

Solve Setup

General Save Fields Advanced Solver Expression Cache Defaults

Name: Setup1 ☒ Enabled

Transient Setup

Stop time: 0.2 s

Time step: 0.0005 s

Solve Setup

General Save Fields Advanced Solver Expression Cache Defaults

Sweep Setup

Type: Linear Step

Start: 100 ns

Stop: 200 ms

Step Size: 0.0005 s

Add to List >>

Replace List >>

Add Single Point

Delete Selection

Clear All

Undo Last Change

Please note the stop time defined in the General Page will be included automatically.

Time
0.1900001
0.1905001
0.1910001
0.1915001
0.1920001
0.1925001
0.1930001
0.1935001
0.1940001
0.1945001
0.1950001
0.1955001
0.1960001
0.1965001
0.1970001
0.1975001
0.1980001
0.1985001
0.1990001
0.1995001

Solve Setup

General Save Fields Advanced Solver Expression Cache Defaults

Nonlinear Residual: 1e-006

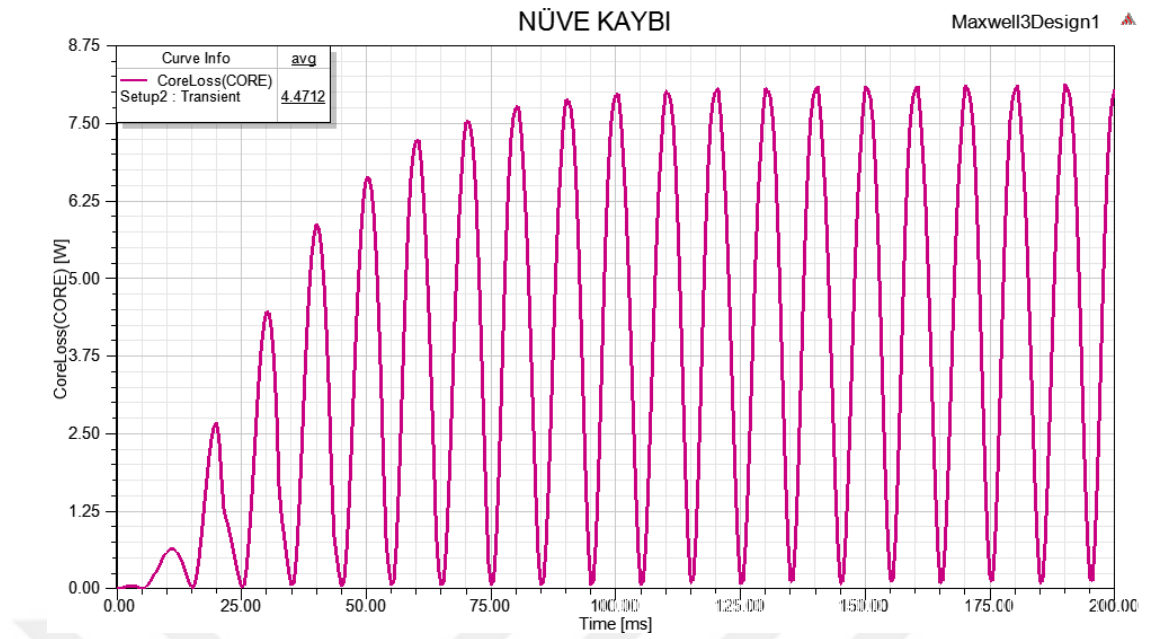
☐ Output error

Scalar Potential: Second Order

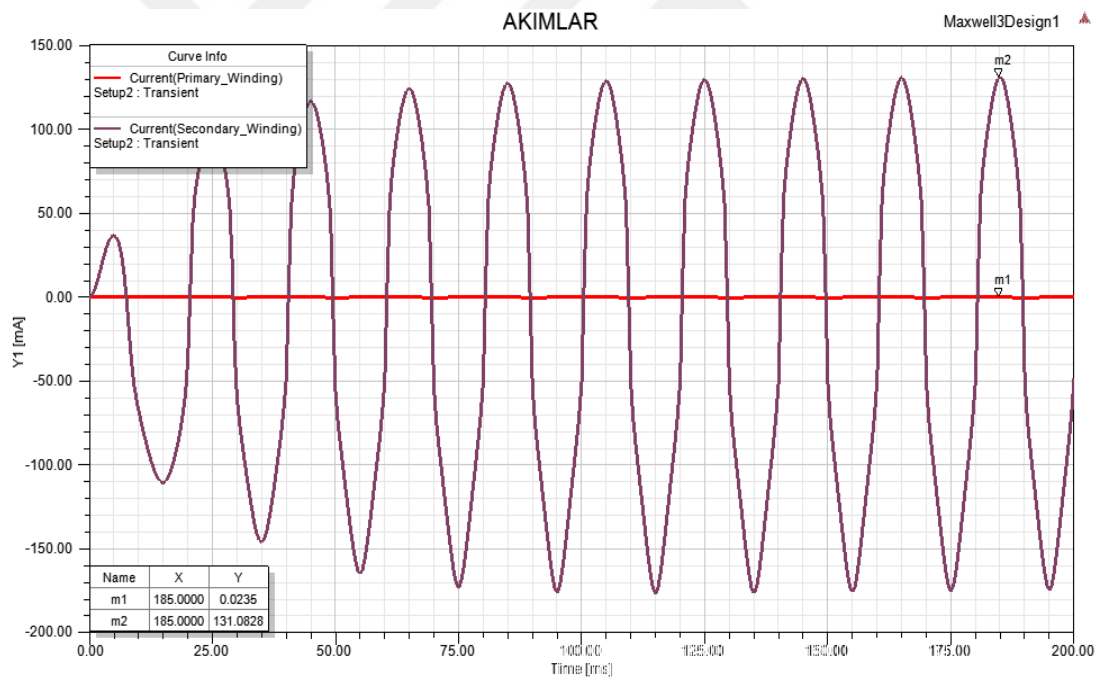
b)

Şekil 4.64. Açık devre testinde a)AG sargısına ait sargı direnci ve besleme gerilimi değerleri
b)analiz için örnekleme zaman aralığı ve simülasyon toplam süresi

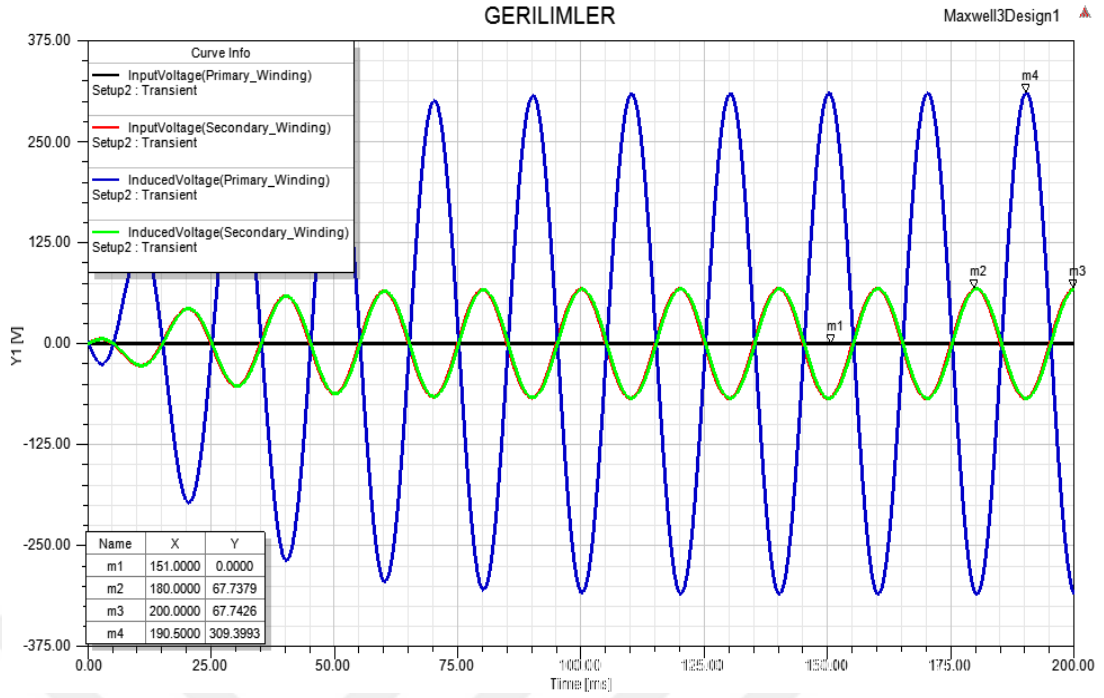
Sonuçlar karşılaştırıldığında ikinci durumda oluşan nüve kaybı değerinin ilk durumda elde edilen sonuçtan ve laboratuvar şartlarında ölçülen (4 W) nüve kaybı değerinden bir miktar daha yüksek (4.4712 W) sonuç verdiği görülmüştür. Akım ve gerilim grafikleri $t=70$ ms anından sonra kalıcı rejimde oldukları ve kararlı bir durum sergiledikleri görülmüştür. Açık devre testinde transformatörün YG sargıları açık devre olduğu için bu sargılardan neredeyse akım geçişinin olmadığı görülmüştür. YG sargıları açık devre olduğu için AG sargılarında çok düşük değerde (tepe değeri 131 mA olan akım) ve sinüse yakın bir grafiğe sahip akım geçişi olmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 4.65. Açık devre testinde $t=0-200$ ms için elde edilen a) nüve kaybı b) YG ve AG sargılarından geçen akım c) sargılarda endüklenen gerilim değerleri

ANSYS Maxwell simülasyonu sonuçlarında görüldüğü gibi aynı transformatör için yapılan açık devre ve kısa devre testinde nüvenün manyetik alan değerinin (B) maksimum ve minimum değerleri nüvede ve sargılarda birbirinden farklıdır. Benzer şekilde manyetik alan kuvvetinin (H) maksimum ve minimum değerleri nüvede ve sargılarda birbirinden farklıdır. Açık devre testinde manyetik alan değerleri (B) ile kısa devre testinde manyetik alan değerleri (B) birbirinden farklıdır. Açık devre testinde manyetik alan şiddeti değerleri (H) ile kısa devre testinde manyetik alan şiddeti değerleri (H) birbirinden farklıdır. Açık devre testinde akım yoğunluğu değerleri (J) ile kısa devre testinde akım yoğunluğu değerleri (J) birbirinden farklıdır. Akım yoğunluğunun değerleri (J) sargılarda ve nüve yüzeyinde birbirinden farklıdır. Bu durum hem açık devre testinde hem de kısa devre testinde görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada SEY bazlı, transformatörlerin simulasyon modelleri sunulmuştur. Tek fazlı transformatör için teorik hesap, deneysel ölçümler ve ANSYS Maxwell programı ile analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Üç fazlı büyük güçlü transformatör ile ilgili ise tasarım öncesi değerler dikkate alınarak ANSYS Maxwell programı ile analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her iki transformatör çeşidi için analizler $t=0-0.1$ s zaman aralığında gerçekleştirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Tek fazlı transformatörün verilen ve elde edilen devre elemanları ile ANSYS Maxwell programında örnek transformatörün tasarımı yapılmıştır fakat gerçek transformatörde kullanılan nüve ve sargıların fiziksel şartlarından dolayı laboratuvar-atölye ortamında yapılan ölçümler ile ANSYS Maxwell programında simulasyon sonucu elde edilen değerlerin çok küçük düzeyde farklı olduğu görülmüştür. Bu tasarımda nüve için programda M530-50A malzeme seçilmiş ve 3D model ile yapılan açık devre testinde nüve kaybı: 3.9307 W ve yapılan kısa devre testinde de bakır kaybı: 7.7289 W olarak bulunmuştur. Bununla birlikte laboratuvar-atölye ortamında yapılan ölçümlerde nüve kaybı 4 W, bakır kaybı ise 9 W olarak ölçülmüştür. Dolayısıyla elde edilen sonuçlar tasarlanan ürünü doğrulamaktadır.
- Üç fazlı güç transformatörü için verilen tasarım öncesi değerler kullanılarak ANSYS Maxwell program ile analiz işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde transformatörün boyutları, sargı kalınlıkları, sargı sayıları ve malzeme yapısı gibi parametreler ile birtakım değişiklikler yapılarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. Optimum sonuçların alındığı transformatör modelinin tasarım öncesi değerleri verilen transformatöre örnek teşkil edebileceği kanaatine varılmıştır. Söz konusu transformatör ile ilgili olarak, bakır kaybı 97 kW olarak verilirken 3D model ile yapılan kısa devre testinde bu değer 95.570 kW olarak bulunmuştur bu durumda bakır kaybının %1.41 daha düşük olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca söz konusu transformatör ile ilgili olarak, nüve kaybı 12.500 kW olarak verilirken 3D model ile yapılan açık devre testinde bu değer 12.239 kW olarak bulunmuştur bu durumda nüve kaybının % 2.09 daha düşük olabileceği öngörülmüştür. Bundan dolayı tasarlanan model ve

elde edilen sonuçların tasarım öncesi değerlere çok yakın olması, modelin üretime hazır olduğunu ortaya koymuştur.

- Her iki tip transformatörde sargılarındaki direnç ve endüktans değerleri geçici rejim zamanı doğrudan etkilediği nüve kaybı ve bakır kaybını ifade eden grafiklerde analiz edilmiştir.
- Çalışma boyunca transformatör modelleri ANSYS Maxwell program ile $t = 0-0.1$ s zaman aralığında analiz edilmiştir. Yapılan bu analizlerde transformatör modelleri için faz sayısı arttıkça, besleme gerilimi arttıkça, sargı sayıları arttıkça, transformatör modelinin ebatları büyüdükçe ve özellikle transformatör 3D boyutlu seçilince analizlerin tamamlanma süreleri artmaktadır. 90 VA transformatör için açık devre ve kısa devre testlerinin analizi 2D modelde birkaç saniyede gerçekleşirken, 3D modelde birkaç dakikada tamamlandığı görülmüştür. Aynı şekilde 15 MVA transformatör için açık devre ve kısa devre testlerinin analizi 2D modelde birkaç dakikada gerçekleşirken, 3D modelde bu analizin birkaç saat sürede tamamlandığı görülmüştür.
- Transformatörlerin 2D ve 3D modellerinin nüve ve bakır kayıpları grafiksel olarak değerlendirilmiştir. Güç fonksiyonu genel olarak akım ve gerilim fonksiyonlarının çarpımına eşittir. ANSYS Maxwell programında tanımlanmış olan akım ve gerilim ifadeleri 50 Hz frekansa sahiptir. Güç ifadesi ise iki sinus fonksiyonunun çarpımı sonucunda oluştuğu için bu ifadenin frekansı 100 Hz dolayısıyla periyodu 10 ms civarı bulunmuştur. Bu durum hem tek fazlı hem de üç fazlı transformatörün 2D ve 3D modellerinin analizinde gözlemlenmiştir.
- Hem tek fazlı hem de üç fazlı transformatörlerin 2D ve 3D modelleri için ANSYS Maxwell ortamında yapılan kısa devre testi ve açık devre testi sonucu elde edilen bakır ve nüve kayıpları karşılaştırıldığında, değerler birbirlerine yakın olmasına rağmen, transformatörlerin oluşturulan 3D modelleri ile elde edilen analiz değerlerinin gerçeğe daha yakın olduğu gözlemlenmiştir.
- Tek fazlı transformatörün 2D ve 3D modelleri için yapılan elektromanyetik analiz sonuçlarının (I , V , B , H , J) birbirlerine oldukça yakın değerler olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum üç fazlı transformatörün 2D ve 3D modelleri analiz sonuçları karşılaştırıldığında da geçerli olduğu gözlemlenmiştir.
- ANSYS Maxwell programı gerçek zamanlı olup analiz sonuçları pratik değerlere oldukça yakındır bu durum bu program kullanılmaktaki en büyük nedendir ancak oluşturulan 3D modellerin analizi birkaç saat sürdüğü için

analiz sonucunu değerlendirmek için oldukça uzun bir sure beklenmesini gerekli kılmaktadır.

- ANSYS Maxwell programı sayesinde tasarım öncesinde yapılması düşünülen transformatör için model parametreleri ile değişiklik yapılarak maliyet kaybına uğramadan verimli transformatör modellerinin elde edilebileceği kanaatine varılmıştır.
- Tasarım yapılırken, nüve ile sargılar arasındaki mesafe azaltılarak veya arttırarak, çekirdek manyetik malzemesi olarak da M530-50A gibi lamine elektriksel çelikler kullanılarak optimum tasarımlar elde edilebilmektedir. Kayıpların azaltılması için SEY gibi yöntemler kullanılarak farklı çözümler geliştirilebilir.
- Bundan sonraki çalışmalarda tüm çalışma modları için nüve-bakır kayıplarının hesaplanması, simülasyon modellerine ve analize dayanan transformatörün verimlilik faktörünün elde edilmesi üzerinde daha fazla araştırma, inceleme yapılması büyük maliyet ve uzun zaman kayıplarının önlenerek optimum tasarımlar elde edilmesine olanak sağlayacaktır.
- Tez süresince üzerinde çalışılan transformatörler 50 Hz frekans değeri için incelenmiştir. ANSYS Maxwell programının kütüphanesinde seçilen nüve malzemenin çeşidine, nüveyi oluşturan sacların laminasyon kalınlığına ve çalışma frekansına gore nüve kayıp katsayılarının değiştiği görülmüştür. Transformatörler 60 Hz frekansında da çalışabildiği için ele alınan her iki tip transformatörün 60 Hz alışma frekansında performanslarının ve kayıplarının incelenmesinin tasarımcılar açısından faydalı olacaktır. Ayrıca ANSYS Maxwell program kullanılarak üçüncü harmonik (150 Hz), beşinci harmonik (250 Hz) ve yedinci harmonik (350 Hz) frekans değerlerinde transformatörlerde meydana gelen kayıp değerleri bir başka akademik çalışma konusu olarak incelenebilecektir.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth Edition, BAE Systems Australia, 2005
- [2] E.I. Amoiralis, M.A. Tsili, A.G. Kladas, *Transformer design and optimization: a literature survey*, **IEEE Transactions on Power Delivery**, 24:4 (2009) 1999-2024.
- [3] P. S. Georgilakis, M. A. Tsili, and A. T. Souflaris, *A heuristic solution to the transformer manufacturing cost optimization problem*, **Journal of Materials Processing Technology**, 181 (2007) 260–266.
- [4] M. Kazemighotlou. *Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Transformatörün Manyetik Alan ve Kayıp Analizi*. Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2013
- [5] M. A. S. Arkan, “ *Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları*”, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Türkiye, 2005.
- [6] Y. Rao KN., *Structural modeling of a three phase core type transformer using ANSYS Maxwell 3D*, **International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering**, 4:4 (2016) 17-20.
- [7] S. Vasilija, *FEM 2D and 3D design of transformer for core losses computation*, **Scientific Proceedings XIV International Congress "Machines, Technologies, Materials."**, 5 (2017) 345-348.
- [8] M.B.B. Sharifian, R. Esmailzadeh, M. Farrokhifar, J. Faiz, M. Ghadimi and G. Ahrabian, *Computation of a single-phase shell-type transformer windings forces caused by inrush and short-circuit currents*, **Journal of Computer Science**, 4:1 (2008) 51-58.
- [9] T. Orosz, G. Kleizer, T. Iváncsy and Z. Á. Tamus, *Comparison of methods for calculation of core-form power transformer's core temperature rise*, **Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science**, 60:2 (2016) 88-95.
- [10] M. L. Myint and Y. A. OO, *Analysis of distribution transformer design using FEA*, **International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)**, 3: 4 (2014) 773-775.
- [11] G. H. Chitaliya and S. K. Joshi, *Finite element method for designing and analysis of the transformer – a retrospective*, **Proc. of Int. Conf. on Recent Trends in Power, Control and Instrumentation Engineering**, (2013) 54-58.
- [12] N. A. M. Yusoff, K. A. Karim, S. A. Ghani, T. Sutikno, A. Jidin, *Multiphase transformer modelling using finite element method*, **International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)**, 6:1 (2015) 56-64.
- [13] D. Maizana, *Analyze eddy current loss in the three phase 100 kVA transformer core with the mix 60°-0° T joint core*, **Asian Journal Of Scientific Research**, 6:1 (2013) 122-128.
- [14] Y. Chen and P. Pillay, *An improved formula for lamination core loss calculation in*

machine operating with high frequency and high flux density excitation, **IEEE**, 2002

- [15] K. Dawood, M. A. Cinar, B. Albayracı, O. Sonmez, *Efficient finite element models for calculation of the no-load losses of the transformer*, **International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)**, 9:3 (2017) 11-21.
- [16] A. Karademir ve M. K. Eker, *Transformatör T-bağlantı yapısının çekirdek kayıplarına etkisi*, **Journal of Polytechnic**, 19:4 (2016) 389-397.
- [17] O. Gürdal, *“Elektrik Makinalarının Tasarımı”*, Atlas Yayın Dağıt. Ltd. Şti., İstanbul, 2001.
- [18] Anonim. (2018). <http://www.senerjieng.com/sea> (Online ulaşma tarihi 10 Mart, 2018).
- [19] G. Dal, *“Transformatörler”*, Seçkin Yayıncılık, 2. Baskı, İstanbul, 2012
- [20] Anonim. (2014). <https://www.google.com/search?q=transformatörlerin+polaritesi> (Online ulaşma tarihi 10 Şubat, 2018).
- [21] Anonim. (2013). <http://www.okuyanmetal.com.tr/index.php/tr/teknik-makaleler/33-onaf-tip-trafolar> (Online ulaşma tarihi 08 Mart, 2018).
- [22] Anonim. (2015). http://www.partneregs.com.tr/wp-content/uploads/BEST_Kuru-Tip-Trafo.pdf (Online ulaşma tarihi 08 Mart, 2018).
- [23] Anonim. (2018). <https://www.eltas.com.tr/urunler> (Online ulaşma tarihi 12 Mart, 2018).
- [24] S. K. Mahmoud. *Yağlı dağıtım transformatörlerde kayıpların hesaplanması*, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2008.
- [25] M. S. Ünal. *Doğal kaynaklardan ve atık malzemelerden Stronsiyum ferrit mıknatıs üretimi*, Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2011.
- [26] A.E. Fitzgerald, C.Kingsley and S. D.Umans, *Electric Machinery*, Mc Grow Hill, New York, 1998, 50-58
- [27] A. Mamizadeh. *Yağlı tip transformatörlerin doğrusal olmayan dinamik termal modellemesi*, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2010.
- [28] A. B. Haliloğlu. *“Güç transformatörlerinin standartlara göre termal analizi”* Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2012.
- [29] Anonim. (2017) <http://www.picproje.org/index.php?topic=25961.0> (Online Ulaşma tarihi 01 Mart, 2018).
- [30] Anonim. (2018). <https://www.ozeninc.com/products/electromagnetic/ansys-maxwell> (Online Ulaşma tarihi 21 Mart, 2018).
- [31] R.W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [32] J. C. Akiror, *Model for core loss prediction at high frequency and high flux density*, Master Thesis, Concordia University Montreal, Canada, 2012.

- [33] N. Mohan, T. M. Undeland and W.P. Robbins, *Power Electronics*, Second Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 1995.
- [34] S.M.H. Hosseini, S.M. EnjaviMadar and M. Vakilian, *Using the finite element method to calculate parameters for a detailed model of transformer winding for partial discharge research*, **Turkish Journal Of Electrical Engineering And Computer Science**, 23:3 (2015) 709-718.
- [35] S. Adak. *Enerji sistemlerinde harmonik distorsiyon azaltılması*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye, 2003
- [36] B. Hochart, *Power Transformer Handbook*, Butterworths & Co. Ltd., London, 1987, 145-148.
- [37] J. Zhu and V.S.Ramsden, *Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines*, **IEEE Transactions on Magnetics**, 34 (1998) 2234-2242.
- [38] P. Meesuk, T. Kulworawanichpong, P. Pao-Ia-or, *Magnetic field analysis for a distribution transformer with unbalanced load conditions by using 3D finite element method*, **World Academy of Science, Engineering and Technology**, 5:12 (2011)
- [39] H. Bharat, “*Principles of Transformers*”, Transformers, Mc Graw Hill, New York, 2005, 12-36.
- [40] T. Boduroğlu, “*Electric Makinaları Dersler, Transformatörler*”, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş, İstanbul, 1988.
- [41] S. Balcı. *Evirici çıkış transformatörlerinin modellenmesi ve analizi*, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Türkiye, 2010.
- [42] V. Lakshminarayanan, B. Anand and P. A. Balakrishnan, *Analysis and design of ferrite core transformer for high voltage high frequency which is used in ozonators*, **International Journal of Engineering and Applied Sciences**, 2:1, 2012
- [43] S. A. Ryder and V.S. Ramsdem, *A simple method for calculating core temperature rise in power transformers*, **IEEE Transactions on Power Delivery**. 19:2 (2004) 637–642.

EKLER

Bu tez çalışmasında ek olarak herhangi bir belge bulunmamaktadır.



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyadı: İbrahim Halil TEKE

Doğum Yeri ve Tarihi: Mardin- 01.01.1991

Adres: Afşin Elbistan B Termik Santralı İşletme Müdürlüğü-Afşin/Kahramanmaraş

E-Posta: ibrahim.halil.teke@gmail.com

Lisans: Dokuz Eylül Üniversitesi-Elektrik-Elektronik Müh-2013

İş Deneyimi: Ölçü Kontrol Mühendisi

Deneyim: 20013- Afşin Elbistan B Termik Santralı Ölçü Kontrol Mühendisi



Yayın Listesi:

1. Teke İ. H., Mamiş M. S., “Difficulties in Installation and Operationa Of Thermal Power Plants Working With Lignite”, ‘13th International Conference on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (ICTPE)’ 21-23 September 2017, Yuzuncu Yil University, Van, Turkey, p.74-78
2. Teke İ. H., Mamiş M. S., Kaygusuz A. “The Effects of Improvements on Coal in Afşin Elbistan B Thermal Power Plant Working with Low Calorie Lignite on Short-term and Long-term Stability”, 8th International Advanced Technologies Symposium (IATS), Elazığ, 19-21 October 2017.

Uluslararası Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. Teke İ. H., Mamiş M. S., “An Investigation of Installation and Operational Difficulties in Lignite Coal Power Plants and Environmental Impacts”, ‘International Journal on Technical and Physical Problems of Electrical Engineering (IJTPE)’, December 2017, p.78-83

Tezden Türetilen Yayınlar

1. Teke İ. H., Mamiş M. S., Göktaş T., Özüpak Y., “3D Design And Analysis Of Three Phase Power Transformers”, ‘International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018)’, November, 14-17, 2018, Diyarbakır/ Turkey, p.1866-1877
2. Özüpak Y., Mamiş M. S., Teke İ. H., “Comparison Of Two Dimensional (2D) And Three Dimensional (3D) Analysis Of Electromagnetic Flux And Core Losses Of Transformers”, ‘International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018)’, November, 14-17, 2018, Diyarbakır/ Turkey, p.1773-1785
3. Teke İ. H., Özüpak Y., Mamiş M. S., “Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method”, International Journal Of Engineering And Computer Science (IJECS), ISSN:2319-7242 Volume 8 Issue 1 January 2019, Page No. 24451-24460