

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

**TRANSFORMATÖRLERİN ELEKTROMANYETİK ALAN VE ISIL
ANALİZLERİNİN SONLU ELEMANLAR KULLANILARAK
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**



DOKTORA TEZİ

Yıldırım ÖZÜPAK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

EKİM 2020

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

**TRANSFORMATÖRLERİN ELEKTROMANYETİK ALAN VE ISIL
ANALİZLERİNİN SONLU ELEMANLAR KULLANILARAK
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

**Yıldırım ÖZÜPAK
23616150001**

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

EKİM 2020

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında yardım, öneri, bilgi, tecrübe ve desteklerini esirgmeden beni her konuda yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ'e,

Araőtırmacı olduğum proje kapsamına birlikte yaptığımız çalışmalarda benden desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Müslüm ARKAN'a, Tez İzleme Komitesinde yer alan ve benden bilgisini esirgemeyen Prof. Dr. Asım KAYGUSUZ'a,

Tezin uygulama aşamasında FBA-2017-639 nolu projemize vermiő oldukları maddi ve manevi destekten dolayı, İnönü Üniversitesi BAP birimine,

Beni hep destekleyen eőime, oğluma ve aileme

teşekkür ederim.



ONUR SÖZÜ

Doktora tezi olarak sunduğum “Transformatörlerin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Sonlu Elemanlar Kullanılarak Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığına ve yararlandığım bütün kaynakların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Yıldırım Özüpak



İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR VE ÖNSÖZ	iii
ONUR SÖZÜ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
1. GİRİŞ	1
2. TRANSFORMATÖRLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ.....	9
2.1 Transformatörlerin Tarihçesi	9
2.3 Transformatör Teorisi.....	11
2.3.1 Transformatörlerin elektriksel modeli	11
2.4 Transformatör Çeşitleri	15
2.5 Yapılarına Göre Transformatörler	15
2.6 Güç Değerlerine Göre Transformatörler	16
2.6.1 Güç transformatörleri	16
2.6.2 Dağıtım trafosu	17
2.7 Ölçü Transformatörleri	18
2.7.1 Akım trafosu	18
2.7.2 Gerilim trafosu.....	18
2.8 Transformatör Kayıpları	19
2.8.1 Nüve kayıpları	19
2.8.2 Histerezis kaybı	19
2.8.3 Girdap akım kayıpları.....	20
2.8.4 Bakır Kaybı	20
2.8.5 Kaçak kayıp	20
2.8.6 Dielektrik kaybı	21
2.9 Üç Fazlı Trafonun Yüksüz Durumdaki Kaybın Ölçüm Yöntemi	21
2.9.1 Üç fazlı bir transformatörün yüksüz kaybına ait ölçüm devreleri	22
2.10 Transformatörlerdeki Elektromanyetik Kuvvetler	24
2.11 Transformatörlerin Termal Alanının Matematiksel Modeli.....	25
2.12 Transformatörlerde Meydana Gelen Harmonikler	27
2.12.1 Harmonikler.....	28
2.12.2 Üçgen bağlantı.....	29
2.12.3 Yıldız bağlantı	30
2.12.4 Harmoniklerin sebep olduğu etkiler	31
2.12.5 Harmoniklerin filtrelenmesi	31
2.13 Transformatörlerin Soğutma Sistemleri	32
2.13.1 Kuru tip transformatörün soğutma yöntemleri	32
2.13.2 Yağlı tip transformatörler	33
2.14 Transformatörlerde Kullanılan Manyetik Malzemeler.....	36
2.14.1 Manyetik malzemelerin manyetizma esasları	36
2.15 Ferromanyetik Malzemeler ve Mıknatıslanma Özellikleri.....	38
2.15.1 Manyetik malzemeler	41
2.15.2 Yumuşak manyetik malzemeler	41
2.15.3 Sert manyetik malzemeler	42
2.16 Elektriksel Çelikler	42
2.16.1 Silikonlu elektriksel çelikler	42

2.16.2 Elektriksel çeliğin kalınlığı.....	44
3. TRANSFORMATÖRLERİN NÜMERİK-MODELLENMESİ.....	45
3.1 Sonlu-Elemanlar-Yöntemi.....	46
3.2 Bileşenlerin Sınır Şartlarının Belirlenmesi.....	47
3.3 ANSYS@MAXWELL Programı.....	48
3.3.1 Maxwell denklemlerinin-diferansiyel şekli.....	49
3.4 Transformatorün Geometrisi ve-Simetrisi.....	49
3.5 Transformatorlerin Genel Yapısı.....	51
3.5.1 Transformatorün nüve modeli.....	52
3.5.2 Transformatorün sargı-modeli.....	55
3.6 Modelin Uyarma Yöntemi.....	57
3.7 Modelin Elektromanyetik-Hesaplamaları.....	58
3.7.1 Nüve kayıpları.....	58
3.7.2 Akı yoğunluğu dağılımı.....	63
3.7.3 Sargı kayıpları.....	63
3.7.4 Kayıpların-yoğunluk-dağılımı.....	68
3.7.5 Son-işlemci (post--processing).....	69
4.TRANSFORMATÖRÜN ANSYS@MAXWELL ORTAMINDA MODELLENMESİ	70
.....	70
4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi.....	70
4.2 ANSYS Electromagnetic.....	71
4.3 Transformatorün Simülasyon Modelinin Oluşturulma Aşamaları.....	72
4.3.1 Tasarımın boyutlarının 2D veya 3D olarak seçilmesi.....	73
4.3.2 Nüvenin tasarlanması.....	73
4.3.3 Sargıların tasarlanması.....	75
4.3.4 Trafo terminallerinin belirlenmesi.....	77
4.3.5 Trafonun uyarılması.....	77
4.3.6 Sargıların oluşturulması.....	78
4.3.7 Çözücünün tipinin belirlenmesi.....	79
4.3.8 Nüve ve sargılar için malzeme belirleme.....	81
4.3.9 Simülasyon için sürenin ayarlanması.....	87
4.3.10 Modelin ağ (mesh) ayarları.....	88
4.3.11 Analiz raporlarının oluşturulması.....	89
4.3.12 Kayıp eğrileri.....	90
4.3.13 Elektromanyetik alanlar.....	90
4.3.14 Elektromanyetik kuvvetler.....	91
4.3.15 Termal analizler.....	92
5. TRANSFORMATÖR MODELLERİNİN ELEKTROMANYETİK VE TERMAL	95
ANALİZLERİNİN SONUÇLARI.....	95
5.1 Elektromanyetik Analiz.....	95
5.2 Termal Analiz.....	95
5.3 Elektromanyetik ve Termal Modellerin Birleşimi.....	96
5.4 Ototransformatörlerin Elektromanyetik ve Kayıp Analizleri.....	97
5.4.1 Transformatorün uyarılması ve analizi.....	101
5.5 Farklı Malzemeler Kullanılarak Tasarlanan Transformatorlerin Analizi.....	107
5.5.1 Transformatorün 2/3D SEY modelleri.....	108
5.5.2 Simülasyon sonuçları.....	111
5.6 Farklı Malzemelerin Sac Kombinasyonlarının Elektromanyetik Analizleri.....	118
5.6.1 Transformatorünün modellenmesi ve analizi.....	119
5.6.2 Farklı materyallerin kombinasyonu ile modellenen trafoların analizleri.....	123

5.7 Transformatörlerde Meydana Gelen Elektromanyetik Kuvvetler	127
5.7.1 Elektromekanik alan analizi	128
5.7.2 Transformatörün elektromanyetik kuvvet analizi için modellenmesi	129
5.7.3 Modelin simülasyonu ve sonuçları	130
5.8 Transformatörlerin Termal Analizleri	137
5.8.1 Giriş	137
5.8.2 Termal alanın matematiksel modelinin analizi.....	139
5.8.3 Transformatörün ANSYS@MAXWELL ile modellenmesi	140
5.8.4 Modelin simülasyonu ve sonuçları	142
5.9 Güç Transformatörlerinde Yıldırım Darbe Analizlerinin İncelenmesi	145
5.9.1 Transformatörün normal çalışma koşullarındaki analizi	146
5.9.2 Elektromanyetik alan ve kayıp analizi	146
5.9.3 Yıldırım darbesinin tasarlanan modele uygulanması	147
5.9.3.1 Yıldırım darbesi uygulanan modelin analizi	148
5.10 Ölçü Transformatörlerinin Analizlerinin Gerçekleştirilmesi	150
5.10.1 Akım transformatörlerinin elektromanyetik alan analizi	150
5.10.2 Akım transformatörlerinin yıldırım darbe analizi	156
5.10.3 Gerilim transformatörlerinin analizi.....	159
5.10.4 Gerilim transformatörünün yıldırım darbesi analizi	163
5.11 Güç Transformatörlerinin Nüve Boyutlarının Değiştirilerek Analizi	167
5.11.1 Nüve boyutları küçültülen transformatörlerin analizleri	167
5.11.1 Nüve boyutları artırılan transformatörlerin analizleri	171
5.12 Farklı Frekans Değerleri İçin Transformatörün Analizi.....	174
5.12.1 Kayıpların analizi	176
5.12.2 Farklı frekanslardaki modellerin elektromanyetik alan analizleri.....	177
5.13 Transformatörün Harmonik Analizleri.....	179
5.13.1 Transformatörün modellenmesi ve analizi	179
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	183
KAYNAKLAR.....	187
EKLER	193
ÖZGEÇMİŞ	194

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 : Transformatörde kullanılan malzemelerin termal özellikleri	97
Çizelge 5.2 : Modellenen transformatörün Değerleri	99
Çizelge 5.3 : Trafonun densesel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması	107
Çizelge 5.4 : Trafoya ait tasarım bilgileri	112
Çizelge 5.5 : Farklı model ve nüve materyalleri için kayıp değerlerinin karşılaştırılması.	115
Çizelge 5.6 : Farklı nüve materyallerinin akı değerlerinin karşılaştırılması.....	118
Çizelge 5.7 : Üç Fazlı 15 MVA Transformatör Tasarım Öncesi Bilgileri.....	120
Çizelge 5.8 : İki Farklı Materyalin Manyetik Nüvesindeki Kayıp Katsayıları	122
Çizelge 5.9 : Nüve kayıplarının karşılaştırılması.....	126
Çizelge 5.10 : Nüve malzemelerinin manyetik akı yoğunluklarının karşılaştırılması	127
Çizelge 5.11 : YG sarılarının eksenel elektromanyetik kuvvetleri	133
Çizelge 5.12 : AG sarılarının eksenel elektromanyetik kuvvetleri	134
Çizelge 5.13 : Transformatörün Kısa Devre Durumundaki Toplam Radyal Elektromanyetik Kuvvetlerin Analitik sonuçlarla Karşılaştırılması.....	137
Çizelge 5.14 : Transformatörün materyallerinin özellikleri.....	140
Çizelge 5.15 : Transformatörde meydana gelen nüve ve bakır kayıpları	141
Çizelge 5.16: Modelin Normal Çalışma Koşullarındaki Elektromanyetik akı ve Kayıp değerleri.....	147
Çizelge 5.17 : Akım trafosunun tasarım parametreleri	151
Çizelge 5.18 : Gerilim trafosunun tasarım parametreleri.....	159
Çizelge 5.19 : Trafoya ait tasarım verileri	167
Çizelge 5.20 : Sonuçların Karşılaştırılması.....	171
Çizelge 5.21 : Trafoya ait tasarım verileri	171
Çizelge 5.22 : Sonuçların Karşılaştırılması.....	173
Çizelge 5.23 : Farklı frekanstaki kayıp değerleri.....	177
Çizelge 5.24 : Sonuçların karşılaştırılması	182

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 : Trafo çekirdeğinin \emptyset -I eğrisi a) Normal durum b) Yarım döngü doyumu durumu	2
Şekil 2.1 : a-) Faradayın keşfi olan trafo, b-) William Stanleyin keşfi olan trafo..	9
Şekil 2.2 : Günümüzde güç sistemlerinde kullanılan transformatörler.....	10
Şekil 2.3 : Elektrik enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketim süreci şematik görünümü	10
Şekil 2.4 : İdeal transformatörlerin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.5 : İdeal olmayan bir transformatöre ait modelin şematik diyagramı	14
Şekil 2.6 : a) Tek faz çekirdek tip transformatör, b) 3-faz çekirdek tip trafo.....	15
Şekil 2.7 : c) Tek faz mantel tip transformatör, d) Üç faz mantel tip transformatör..	16
Şekil 2.8 : Üç fazlı bir transformatörün wattmetre ile güç kaybı ölçüm devresi	21
Şekil 2.9 : Transformatör sargılarının yıldız (Y) bağlantı şekli	23
Şekil 2.10 : Transformatör sargılarının üçgen (Δ) bağlantı şekli.....	23
Şekil 2.11 : Meydana gelen harmonikler	28
Şekil 2.12 : Üçgen bağlantı	29
Şekil 2.13 : Yıldız bağlantı	30
Şekil 2.14 : ONAN soğutmalı trafo.....	33
Şekil 2.15 : ONAF soğutmalı trafo	34
Şekil 2.16 : OFAF soğutmalı trafo.....	35
Şekil 2.17 : OFWF soğutmalı trafo	36
Şekil 2.18 : Ferromanyetik malzemelerdeki mikro manyetik alan	39
Şekil 2.19 : Miknatıslanmış bir materyale ait B-H eğrisi.....	40
Şekil 2.20 : B-H eğrisine bağlı olarak malzemenin sertliğinin belirlenmesi	41
Şekil 2.21 : a) Amorf malzemeye ait atomik yapı, b) Kristal atomik yapı	43
Şekil 2.22 : Elektriksel çeliğin hadde düzlemi.....	43
Şekil 3.1 : Üç bacaklı ve üç fazlı transformatör modelinin 1/4 simetrisi.....	50
Şekil 3.2 : Üç bacaklı ve üç fazlı transformatör-modelinin 1/2 simetrisi	50
Şekil 3.3 : Transformatörün 3D tam modeli	51
Şekil 3.4 : Transformatörüm-2D modeli	51
Şekil 3.5 : a) Bindirme tipi nüve eklemi, b) Adım lap tipi nüve eklemi.....	53
Şekil 3.6 : Nüve kesiti	54
Şekil 3.7 : Üç fazlı ve üç bacaklı bir transformatör modelinin nüvesi.....	55
Şekil 3.8 : Disk tipi bobin	56
Şekil 3.9 : Katman tipi bobin	56
Şekil 3.10 : Üç fazlı trafo modelinin harici uyarma devresi	57
Şekil 3.11 : Üç fazlı trafo modelinin programın ara yüzündeki uyarma devresi	58
Şekil 3.12 : Nüve materyaline ait B-H eğrisi	59
Şekil 3.13 : Nüve materyaline ait B-P eğrisi.....	59
Şekil 3.14 : Tasarımda kullanılan nüve levhalarına ait bilgiler	59
Şekil 3.15 : Girdap akım kayıplarının akı yoğunluğuna ve sac kalınlığına bağlı olarak değişimi	63
Şekil 3.16 : Değişen dış kaçak akılara maruz kalan sargı	65
Şekil 3.17 : Sargı iletkenlerindeki deri etkisi.....	68
Şekil 4.1 : Yapılarda oluşturulan ağ örgüsü	70
Şekil 4.2 : ANSYS@MAXWELL ortamındaki tasarımın blok diyagramı.....	71
Şekil 4.3 : SEY ile modelleme ve analiz için adım adım blok diyagramı.	72
Şekil 4.4 : Programın Project ara yüzü	73
Şekil 4.5 : Tasarım için nüve seçim aşamaları	74
Şekil 4.6 : Nüveye ait geometrik özelliklerin yer aldığı pencere.....	74

Şekil 4.7 : Tasarlanan nüve modelleri.....	75
Şekil 4.8 : Sargıların seçimi	76
Şekil 4.9 : Sargıların geometrisine ait değerlerin tanımlandığı pencere	76
Şekil 4.10 : Sargı terminallerinin atanması	77
Şekil 4.11 : Terminallerin programa tanıtılması ve değer atamasının yapılması.....	78
Şekil 4.12 : Sargıların uyarılma devresi.....	79
Şekil 4.13 : Çözücü tipi ve uyartım modeli.....	80
Şekil 4.14 : Transformatorün nüvesine malzeme tayini	82
Şekil 4.15 : Nüve için malzeme seçiminin yapılması	82
Şekil 4.16 : Kütüphane dışından çağrılan nüve malzemesinin dosyaları.....	83
Şekil 4.17 : M125-027S malzemesinin B-H ve B-P eğrileri.....	83
Şekil 4.18 : M530-50A malzemesinin B-H ve B-P eğrileri	84
Şekil 4.18 : M530-50A malzemesinin nüve kaybı katsayıları ve 50 Hz frekanstaki özgül nüve kayıpları.....	85
Şekil 4.19: M125-027S malzemesinin nüve kaybı katsayıları ve 50 Hz frekanstaki özgül nüve kayıpları.....	86
Şekil 4.20 : Tasarımın Analsis Setup ayarları.....	87
Şekil 4.21 : Modeli doğrulama ekranı.....	88
Şekil 4.22 : Transformator modelinin ağ (mesh) örgüsü	89
Şekil 4.23 : Simülasyon sonucunda sonuç raporlarının oluşturulması	89
Şekil 4.25 : Elektromanyetik alanların belirlenmesine ait görseller	90
Şekil 4.26 : Kuvvet parametresinin analiz sürecine eklenmesi.....	91
Şekil 4.27 : Elektromanyetik kuvvet grafiklerinin elde edildiği ekran.	91
Şekil 4.28 : Termal analiz türünün seçilmesi.....	92
Şekil 4.29 : Materyal atamasının yapılması	93
Şekil 4.30 : Modelin “Mechanical” ortamına aktarılması.....	93
Şekil 4.31 : Modelin malzeme ataması ve mesh (ağ)’in gerçekleştirilmesi.....	94
Şekil 4.32 : Modelin malzeme ataması ve mesh (ağ)’in gerçekleştirilmesi.....	94
Şekil 5.1 : ANSYS Workbench ortamında Mechanical ile Maxwell 3D’ın birleştirilmesi	97
Şekil 5.2 : Transformatorün nüvesinde kullanılan materyalin doğrusal olmayan B-H eğrisi	100
Şekil 5.3 : Transformatorün nüvesinde kullanılan materyalin doğrusal olmayan B-P eğrisi	100
Şekil 5.4 : Tasarlanan transformatorün modeli	101
Şekil 5.5 : Farklı zaman aralıkları için manyetik akı dağılımı	103
Şekil 5.6 : Farklı zaman aralıkları için manyetik akının vektörel dağılımı	104
Şekil 5.7 : Manyetik akı dağılımının grafiksel gösterimi.....	105
Şekil 5.8 : Trafonun nüvesinde meydana gelen toplam kayıp.	105
Şekil 5.9 : Trafonun girdap (eddy) akım kayıpları.....	106
Şekil 5.10 : Trafonun hysteresis kayıpları.	106
Şekil 5.11 : Transformatorün 3D Modeli.....	108
Şekil 5.12 : Transformatorün 2D Modeli.....	109
Şekil 5.13 : M125-27S Materyaline ait özellikler ve B-P eğrisi	109
Şekil 5.14 : M530-50A Materyaline ait özellikler ve B-P eğrisi	110
Şekil 5.15 : Transformator Giriş Voltajı	110
Şekil 5.16 : Trafo modelinin 2D mesh’i (ağ).....	111
Şekil 5.17 : Trafo modelinin 3D mesh’i (ağ).....	111
Şekil 5.18 : M125-027S materyali için nüve kayıp eğrileri	113
Şekil 5.19 : M530-50A materyali için nüve kayıp eğrileri	114

Şekil 5.20 : M125-027S nüve malzemesinin farklı zaman aralıklarındaki transformatörün 2D ve 3D modellerinin manyetik akı dağılımları.....	116
Şekil 5.21 : M530-50A nüve malzemesinin farklı zaman aralıklarındaki transformatörün 2D ve 3D modellerinin manyetik akı dağılımları.....	117
Şekil 5.22 : 15 MVA dağıtım transformatörünün sargı modeli.	120
Şekil 5.23 : Transformatörün manyetik nüvesinin kesit görünümü ve laminasyon temel adımları.....	121
Şekil 5.24 : Nüve malzemelerinin doğrusal olmayan B-H ve B-P eğrileri.....	122
Şekil 5.25 : Transformatörünün ağı (mesh).	123
Şekil 5.26 : Farklı sac kombinasyonlarının manyetik akı dağılımı.....	123
Şekil 5.27 : Sargılardaki akı yoğunluğu dağılımı.....	124
Şekil 5.28 : Farklı sac kombinasyonlarının nüvedeki manyetik alan şiddeti.....	124
Şekil 5.29 : Sac kombinasyonu için nüve kayıp eğrisi	124
Şekil 5.30 : Ferromanyetik normal malzemenin manyetik akı dağılımı.....	125
Şekil 5.31 : Sargılardaki akı yoğunluğu dağılımı.....	125
Şekil 5.32 : Ferromanyetik nüvedeki manyetik alan şiddeti.....	125
Şekil 5.33 : Ferromanyetik malzemenin nüve kayıp eğrisi.....	126
Şekil 5.34 : Bir güç transformatörünün eş merkezli sargısındaki elektromanyetik kuvvet ve kaçak akı dağılım yoğunluğu	129
Şekil 5.35 : Transformatörün 3D Modeli.....	130
Şekil 5.36 : Normal durumda manyetik akı yoğunluğu dağılımı.....	130
Şekil 5.37 : Geçici bir durumda manyetik akı yoğunluğu dağılımı.	131
Şekil 5.38 : YG sargısında radyal kuvvetler.	132
Şekil 5.39 : AG sargısında radyal kuvvetler.	132
Şekil 5.40 : YG sargısındaki eksenel elektromanyetik kuvvetler.	135
Şekil 5.41 : AG sargılarında meydana gelen eksenel elektromanyetik kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişimi.	136
Şekil 5.43 : 3-fazlı transformatörün ağ örgüsü.....	141
Şekil 5.44 : Transformatörün nüvesindeki 2D sıcaklık dağılımı	142
Şekil 5.45 : Trafo sargılarının en yüksek ve en düşük sıcak noktalarının 2D gösterimi	142
Şekil 5.46 : Transformatörün 2D ısı akış dağılımı.....	143
Şekil 5.47 : Transformatörün farklı zaman dilimlerindeki kritik noktalardaki ısı akışının 3D gösterimi.....	143
Şekil 5.48 : Sargıların 3D ısı akışı	143
Şekil 5.49 : Nüvenin 3D toplam ısı akışı	144
Şekil 5.50 : Nüvedeki 3D sıcaklık dağılımı.	144
Şekil 5.51 : Transformatörün giriş gerilimi	146
Şekil 5.52 : 3D Akı Yoğunluğu Dağılımı	147
Şekil 5.53 : Manyetik nüvenin kayıp eğrisi	147
Şekil 5.54 : Uygulanan yıldırım darbesine ait grafik.	148
Şekil 5.55 : Yıldırım darbesindeki gerilim-elektrik alanı ilişkisi.....	148
Şekil 5.57 : Transformatör modelinin yıldırım darbesi durumunda elektrik alanın dağılımları	149
Şekil 5.58 : Akım trafosunun geometrik modeli.....	152
Şekil 5.59 : Açık devre durumunda manyetik akının vektörel dağılımı	153
Şekil 5.60 : 2D Modelin açık devre durumundaki akı dağılımı.....	153
Şekil 5.61 : Modelin elektromanyetik kuvvet dağılımı.....	154
Şekil 5.62 : Kısa devre şartlarında akının vektörel dağılımı.	155
Şekil 5.63 : Kısa devre şartlarında trasfonun 2D modeline ait akının dağılımı.	155

Şekil 5.64 : Kısa devre durumunda elektromanyetik kuvvet dağılımı.....	156
Şekil 5.65 : Uygulanan gerilimin dağılımı.....	157
Şekil 5.66 : 2D transformatör modelinin yıldırım darbesi için elektrik alanı	158
Şekil 5.67 : Yıldırım darbesi durumunda gerilim-elektrik alan dağılımı.....	158
Şekil 5.71 : Gerilim trafosunun geometrik modeli.....	159
Şekil 5.69 : Açık devre durumunda akının vektörel dağılımı	160
Şekil 5.70 : Açık devre durumunda akı yoğunluğu dağılımı	160
Şekil 5.71 : Açık devre durumunda elektromanyetik kuvvet dağılımı	161
Şekil 5.72 : Açık devre durumunda akım yoğunluğu dağılımı	161
Şekil 5.73 : Kısa devre koşullarında akının vektörel dağılımı.....	162
Şekil 5.74 : Kısa devre koşullarında 2D modelin akı yoğunluğu dağılımı	162
Şekil 5.75 : Kısa devre durumunda elektromanyetik kuvvet dağılımı.....	163
Şekil 5.76 : Kısa devre durumunda akı şiddeti dağılımı	163
Şekil 5.77 : Uygulanan gerilimin dağılımı.....	164
Şekil 5.78 : 2D modelinin yıldırım darbesi için elektrik alan dağılımı.....	164
Şekil 5.79 : Yıldırım darbesi durumunda gerilim-elektrik alan ilişkisi	165
Şekil 5.80 : Nüve boyutlarının küçültülmesi ile elde edilen kayıp eğrileri.....	168
Şekil 5.81 : Nüve boyutları değiştirilmeden önce elde edilen kayıp eğrileri	169
Şekil 5.82 : Nüve boyutlarının küçültülmesiyle elektromanyetik alan dağılımları .	170
Şekil 5.83 : Nüve Boyutlarının artırılmasıyla elde edilen kayıp eğrileri	172
Şekil 5.84 : Nüve boyutlarının büyütülmesi ile elde edilen elektromanyetik alan dağılımları	173
Şekil 5.85 : Giriş gerilimi.....	175
Şekil 5.86 : 3D modelde mesh	175
Şekil 5.87 : 3D modelin 50 Hz frekanstaki nüve kaybı	176
Şekil 5.88 : 3D modelin 60 Hz frekanstaki nüve kaybı	176
Şekil 5.89 : 50 Hz'lik 3D transformatör modelinde akı yoğunluğu dağılımı	178
Şekil 5.90 : 60 Hz'lik 3D transformatör modelinde akı yoğunluğu dağılımı	178
Şekil 5.91 : Transformatörün harmonic altındaki akı dağılımı	181
Şekil 5.92 : Transformatörün normal koşullardaki altındaki akı dağılımı	181
Şekil 5.93 : Transformatörün harmonikler için kayıp eğrileri	181

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
H	: Manyetik Alan Şiddeti
E	: Elektrik Alan Şiddeti
D	: Elektrik Akı Yoğunluğu
J	: Elektrik Akım Yoğunluğu
ρ	: Hacimsel Elektrik Yüğü Yoğunluğu
P	: Güç
L	: Endüktans
V	: Gerilim
I	: Akım
f	: Frekans
F	: Kuvvet
'X'	: Steinmetz Sabiti
K_e	: Girdap Akımının Sabiti
∇T	: Isının Akış Yönündeki Sıcaklığın Oran Değişimi
k	: Malzemenin Termal İletkenliği
σ	: İletkenlik
B_r, B_ϕ ve B_z	: Silindirik Koordinattaki Akı Yoğunluğunun Bileşenleri
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Hava Aralığının Manyetik Geçirgenliği
μ_r	: Bağlı Geçirgenlik
d	: Laminasyon Tabakasının Kalınlığı
f_0	: Kayıp eğrisi test frekansı.
k_c	: Girdap akım katsayısı
K_{exc}	: Aşırı Kayıp Katsayısı
H_c	: Koersitive
w	: Uygulanan Manyetik Alanın Frekansı
ω	: Açısal Frekansı
T	: Zamana ve ortama bağlı sıcaklık dağılımının fonksiyonu
c	: Spesifik ısı kapasitesi
ρ	: Spesifik materyal yoğunluğu
λ	: Termal iletkenlik sabiti
q_v	: Gözlenen noktada muhtemel ısı kaynağının ısı üretimi

t	: Süre
T_B	: Kütle Sıcaklığı
h	: Katman Katsayısı
C_p	: Sıcaklığa bağlı spesifik ısı kapasitesi
Q	: Birim hacimdeki ısı.
q_{Tot}	: Toplam kaybın meydana getirdiği ısı
C_{th-oil}	: Yağ sıcaklık kapasidansı
R_{th-oil}	: Termal direnç
Θ_{oil}	: Üst yağ sıcaklığı
q_w	: En sıcak nokta için toplam kaybın meydana getirdiği ısı
C_{th-H}	: En sıcak nokta için yağ sıcaklık kapasidansı
R_{th-H}	: En sıcak nokta için termal direnç
Θ_H	: En sıcak nokta için üst yağ sıcaklığı
Ph	: Histeresiz Kaybı
Pc	: Nüve Kaybı
Pexc	: Hesaplanmayan Kayıplar
Pe	: Girdap Akım Kaybı
StrndlossR	: Sargı Kayıpları
ONAN	: Oil Natural Air Natural
ONAF	: Oil Natural Air Forced
OFAF	: Oil Forced Air Forced
OFWF	: Oil Forced Water Forced
ODAF	: Oil Directed Air Forced
AT	: Akım Trafosu
GT	: Gerilim Trafosu
KGS	: Kesintisiz Güç Kaynağı

ÖZET

Doktora Tezi

TRANSFORMATÖRLERİN ELEKTROMANYETİK ALAN VE ISIL ANALİZLERİNİN SONLU ELEMENLAR KULLANILARAK GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

YILDIRIM ÖZÜPAK

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

195+XIVsayfa

2020

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

Güç transformatörlerinin tasarımında, transformatörün kullanılacağı sistem ve sisteme aktaracağı elektriksel güç, sistemin devamlılığı ve güvenliği açısından önemlidir. Üretim sürecindeki bir transformatörün mekaniksel, elektriksel ve manyetiksel özelliklerinin bilinmesi gereklidir. Tasarımı yapılacak transformatörlerin hedeflenen değerlerde ve verimlilikte çalışabilmesi için güvenilir bir simülasyon programı ile modellenmesi, test kriterlerinin sağlanması, sonradan ortaya çıkabilecek problemlerin en aza indirgenmesi açısından önemlidir.

Bu tez çalışmasında transformatör benzetiminde yaygın olarak kullanılan ve Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@Maxwell simülasyon programı kullanılmıştır. Bu program kullanılarak transformatörlerin çoklu fizik analizlerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda transformatörün malzeme oranları, modelin geometrisi, her bir yüzey için ısı transfer katsayıları, ferromanyetik etkileri, manyetik malzemelerin özellikleri ve non-lineer davranışları program ortamında giriş değerleri olarak tanımlanmıştır. Manyetik alanın ve sıcaklık dağılımlarının doğru sonuçları için elektromanyetik ve ısı akış alanı denklemleri sayısal yöntemler ve analitik yöntemler kullanılarak çözümlenmiştir.

Nüvenin en yüksek sıcaklığı, manyetik akı yoğunluğunun maksimum olduğu bölgelerde elde edilmiştir. Bu bölgelerde fazla ısının meydana geldiği ve buna bağlı olarak kayıpların çok olduğu belirlenmiştir. Modellerin performansları analitik olarak belirlenen transformatör performansıyla ve deneysel olarak belirlenen transformatör performansıyla karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların literatürle çok iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Sargıların ve nüvenin optimizasyonunu sağlanmış, sargılarda oluşan elektromanyetik kuvvetler hesaplanmış, sargı ve nüvedeki ısı dağılımları belirlenmiş, elektrostatik alan dağılımları incelenmiş, yıldırım darbesi durumundaki elektrik alan dağılımı incelenmiş, sorunlu bölgeler tespit edilmiş ve farklı transformatör modellerinin değişik koşullardaki toplam kayıpları ve termal etkileri elde edilerek tasarım parametreleri belirlenmiştir. Kullanılan yöntem, prototip sayısının azaltılması, maliyetin düşürülmesi, üretim sürecinin kolaylaştırılması ve teknik performansın artırılması gibi faydalar sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, Elektromanyetik Alan, Isıl Alan, SEY, Kayıplar.

ABSTRACT

Phd. Thesis

REALIZATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD AND THERMAL ANALYSIS OF TRANSFORMERS USING FINITE ELEMENTS

YILDIRIM ÖZÜPAK

Inonu University
Graduate School of Nature and Applied Sciences
Department of Electrical&Electronics Engineering

195+XIV sayfa

2020

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMIŞ

In the design of power transformers, the system and the electrical power that the transformer will transfer to the system are important for the continuity and safety of the system. It is necessary to know the mechanical, electrical and magnetic properties of a transformer in the production process. In order for the transformers to be designed to operate at targeted values and efficiency, it is important to model them with a reliable simulation program, to provide test criteria and to minimize the problems that may arise later.

In this thesis, ANSYS @ Maxwell simulation program, which is widely used in transformer simulation and which performs solutions based on the Finite Elements Method (FEM), was used to analyze multiple physics analysis of transformers. For this purpose, the material proportions of the transformer, geometry of the model, heat transfer coefficients for each surface, ferromagnetic effects, properties of magnetic materials and non-linear behaviors are defined as input values in the program environment. For accurate results of magnetic field and temperature distributions, electromagnetic and heat flow field equations are solved using numerical methods and analytical methods.

The highest temperature of the core is obtained in regions where the magnetic flux density is maximum. It was determined that excessive heat occurred in these regions and accordingly, there were many losses. The performances of the models were compared with the transformer performance determined analytically and available experimentally determined performance, and the results obtained were found to be in good agreement with the literature. The optimum values for the windings and cores have been calculated, the electromagnetic forces formed in the windings have been determined, the heat distribution in the winding and core has been obtained, the electrostatic field distributions have been examined, the electric field distribution in the case of lightning impulse has been examined, the problematic areas have been determined and the total losses and thermal effects of different transformer models under different conditions have been obtained. The method used provided benefits such as, reducing costs, simplifying the production process and increasing technical performance.

Keywords: Transformer, Electromagnetic Field, Thermal Field, FEM, Losses.



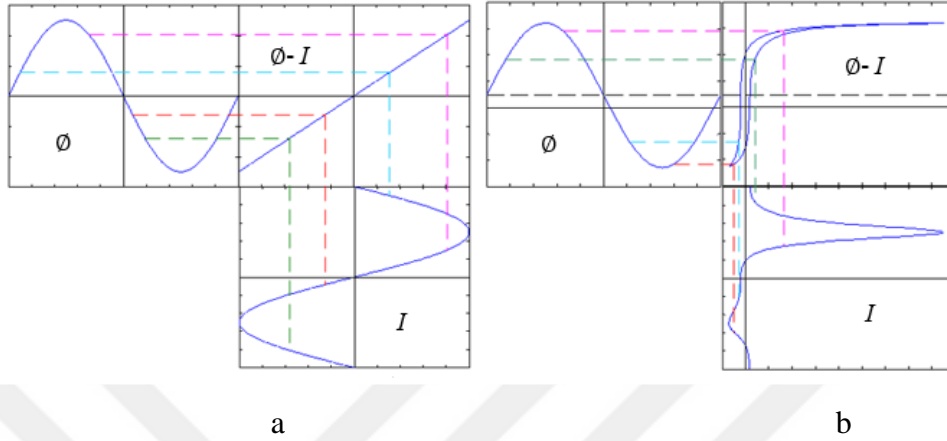
1. GİRİŞ

Enerji ihtiyacı dünya genelindeki nüfusun artmasına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak sürekli artmaktadır. Diğer enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi, verimi yüksek, kullanımını kolay ve temiz bir enerji kaynağıdır.

Elektrik enerjisinin insan hayatındaki önemi arttıkça, enerjinin son kullanıcıya daha kaliteli ve güvenli iletilmesi ile ilgili araştırmalar yoğunlaşmıştır. Üretilen enerjinin daha verimli bir şekilde iletilmesi için gerilimin yeteri kadar yüksek olması gerekmektedir. Son yıllarda doğru akımla elektrik enerjisi iletimi büyük önem kazanmasına rağmen bu konuda henüz beklenen seviyeye gelinememiştir. Bu nedenle günümüzde enerjinin iletilmesinde daha çok alternatif akım (AC) tercih edilmektedir. Transformatörler ile alternatif akımlı elektrik enerjisinin gerilimi kolay bir şekilde yükseltip düşürülebildiğinden dolayı elektrik enerjisinin AC iletimi tercih edilmektedir. Bu konu dikkate alındığında enerji iletiminde transformatörlerin önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Bu sebeple ekonomik kayıplara sebebiyet vermemek için, transformatörlerin yalıtım koşulları, faydalı çalışma ömürleri ve yüklenebilme kapasiteleri iyi bilinmelidir. Transformatörlerin tasarım şartlarının üzerindeki bir yükleme durumu, transformatörün faydalı ömrünün kılmasına neden olur. IEEE Kılavuzuna göre transformatörün faydalı ömrü, anma gücünde, normal ortam şartlarında ve sargının en sıcak-nokta sıcaklığı 110°C 'yi geçmediğinde, 180 000 saat olarak belirtilmektedir [1].

Transformatörün faydalı ömrünü etkileyen ve transformatörün yüklenme sınırını belirleyen temel kriter, transformatörün termal performansdır. Gelişen teknoloji ile beraber son yıllarda çekirdek çelikten oluşan malzemelerin geliştirilmesi ve nüve kayıplarının azaltılması, trafo teknolojisinde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Transformatörün nüvesinde kullanılan çelik malzemenin B-H eğrisi gibi özellikleri hızlı bir biçimde değişerek daha keskin bir eğri haline dönüşmüştür. Bu gelişmeler, transformatörlerin daha yüksek bir verimlilik ile çalışmalarını sağlamaktadır. Bu gelişmelerle birlikte dengesiz gerilim, çeşitli arızalar, çevresel nedenler ve ferrozonans gibi problemler nüvenin doyuma gitmesine neden olmaktadır. Nüvenin doyuma gitmesi, akımın belli bir eşik değere ulaşması, o değerde sabit kalması veya yavaş değişmesi ile olur ve geçici bir durum olarak tanımlanır. Geçici

rejim kısa bir sürede gerçekleşmesine rağmen, güç sisteminin bileşenlerinde yüksek gerilimden dolayı tahribata, dolayısıyla sistemde enerji kesintisine yol açabilir. Aşağıdaki şekilde normal durumda ve yarım döngü doyumu durumunda trafo çekirdeğinin Φ - I eğrisinin karşılaştırması sunulmuştur [2].



Şekil 1.1: Trafo çekirdeğinin Φ - I eğrisi a) Normal durum b) Yarım döngü doyumu durumu

Transformatörler için farklı soğutma yöntemleri bulunmaktadır. Trafonun farklı boyutu, dizaynı ve kullanıldığı yer gibi değişen şartlara göre soğutma yöntemleri değişmektedir. Trafoda oluşan ısı doğru şekilde dağıtılmazsa, trafonun sıcaklığı sürekli olarak artacak, dolayısıyla da trafonun kağıt ve sıvı izolasyon ortamında hasara neden olacaktır. Soğutma sistemi yönünden transformatörler, yağ soğutmalı transformatörler, gaz izoleli transformatörler ve kuru tip transformatörler şeklinde sınıflandırılabilir. Yağ soğutmalı transformatörlerde yağ, gaz izoleli transformatörlerde ise gaz, yalıtımı sağlamak ve soğutma amacıyla kullanılır. Kuru tip transformatörlerde ise soğutma için herhangi bir akışkan bulunmamaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de transformatörler üzerinde yapılan çalışmalarda son yıllarda dikkate değer bir gelişme vardır. Güç sistemlerinde işaret edilen belli bir aralıktaki elektromanyetik bozukluklar, transformatör performansının düşmesine ve arızalanmalara neden olmaktadır. IEEE-1159 standardında güç kalitesini etkileyen bu bozulmalar TEİAŞ'a ait 200'e yakın transformatör merkezinde transformatör primer ve sekonder taraflarında, ÇYG, YG ve OG iletim hatlarındaki ölçümler, güç kalitesini izlemeye ve problemleri tespit etmeye yönelik çalışmalar yapılmıştır [3,4]. Güç sistemlerinin bileşenleri üzerinde bu yeni çalışma koşullarının etkisi, özellikle transformatörler için daha detaylı araştırılması gereklidir.

Transformatör tasarımcıları, tasarım aşamasında maliyet optimizasyonu ile maliyeti en aza indirmeyi hedefler. Ancak transformatörün üretim maliyeti ile performansı arasındaki dengeyi sağlayabilmek için takip edilecek yöntemin tasarım kriterlerine uygun olması önem teşkil etmektedir [5,6]. Transformatörlerde genel olarak nüve ve bakır kaybı bulunmaktadır. Transformatörlerin yüklü veya yüksüz çalışma koşullarında nüve kaybı daima meydana gelmektedir. Bu nedenle güç transformatörlerinde kayıpların az olması için uygun malzemeler kullanılmaya özen gösterilir. Bakır kaybı ise sadece transformatör yük altında çalışırken oluşmaktadır.

Nüve kaybını azaltmak için kullanılan en yaygın yöntemlerden biri transformatörün demir nüvesinin lamine saclar ile tasarlanmasıdır. Nüvenin materyalinin üst üste ince silisli saclar ile oluşturulmasıyla girdap akımların neden olduğu kayıpların azaltılması sağlanır. Bu yöntemlerin üretim aşamasında gerçekleştirilmeye çalışılması hem zor hem de maliyetli olmaktadır. Bu nedenle transformatörlerin üretim öncesi tasarlanması ve analizlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler yazılım ve bilgisayar endüstrisinin gelişmesiyle mühendislik çözümleri için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. En yaygın kullanılan ve bu tez çalışmasında da tercih edilen yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL analiz ve simülasyon programıdır. Bu program Sonlu Elemanlar Yönteminin (SEY) manyetik ve elektriksel analiz için kullanılmaktadır. Bu program ile elektrik makinaları, transformatörler, bara, busbar, kablo, hat uygulamaları, sargılar ve bobinler tasarlanabilir ve bunların çözümleri gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda birçok farklı çalışma ve uygulama gerçekleştirilmiştir.

ANSYS@MAXWELL simülasyon ortamında magnetostatik sayısal çözücü tipi kullanılarak 3-fazlı çekirdek tipi bir transformatörün tasarımı ve modellenmesi ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır [7]. Bu program ile transformatörlerin 2D ve 3D modellerinin nüve kayıpları 50 Hz ve 60 Hz gibi farklı frekanslar için ayrı ayrı hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılarak hangi frekanstaki nüve kayıplarının daha yüksek olduğu görülmüştür [8]. Aynı analiz yöntemiyle 100 kVA transformatörün orta bacağı 60° ile T şeklinde birleştirilmiş üç fazlı dağıtım transformatörünün yüksüz durumdaki testlerinden frekansın 50 Hz'den 55 Hz'e ve manyetik akı değerinin 1 Tesla'dan 1.5 Tesla'ya yükseltildiğinde meydana gelen girdap akımı kaybının % 39.1 oranında arttığı görülmüştür. Ayrıca frekansın yükseltilmesi ile manyetik akının bir kısmının bağlantı noktalarında kaybolmasına, nüvenin orta bacağı ve yan bacaklarında akının tamamının farklı anlarda geçmediğine değinilmiştir. Bu nedenle

frekansın artırılması ile transformatörün nüvesinde meydana gelen kayıpların arttığı ifade edilmiştir. [9].

Transformatörler tasarlanırken dikkat edilmesi gereken konulardan birisi de elektromanyetik zorlanmalardır. Bir transformatörün kısa devre testi gerçekleştirildiğinde transformatörün sargılarında elektromanyetik kuvvetler meydana gelir. Bu kuvvetler, mekanik hasarlara hatta transformatörün patlamasına dahi neden olabilirler. Bu nedenle, transformatörün kısa devre durumlarındaki dayanıklılığı güç transformatörlerinin temel özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir [10]. Bir elektrik dağıtım tesisine güç trafosu kurulmadan önce, kısa devre akımlarından kaynaklanan elektromanyetik kuvvetlerin tahmin edilmesi, güvenli çalışma şartlarının tasarım aşamasında bilinmesi trafonun ömrü için büyük önem taşımaktadır. Transformatörün kısa devre testlerini gerçekleştirmek için, özel cihazlar ve bu testleri gerçekleştirebilen uzmanlar gerekmektedir. Transformatörün nominal güç değeri arttıkça kısa devre testini gerçekleştirmek daha da zorlaşmaktadır. Bu nedenle, güç transformatörlerinin kısa devre durumlarında meydana gelen geçici elektromanyetik kuvvetleri tahmin edebilmek için sayısal bir model gereklidir [11]. ANSYS@MAXWELL ile 15 MVA nominal gücündeki üç fazlı bir transformatörün 3D modeli kullanılarak transformatörün sargılarında ani akım ve kısa devre akımı nedeniyle meydana gelen elektromanyetik kuvvetler incelenmiştir [11]. Çalışma sonucunda kısa devre akımının anma değerinin ani akımın en yüksek değerine eşit olduğu görülmüştür. Ayrıca bu akımların transformatör sargılarında ciddi deformasyonlara yol açabildiği de vurgulanmıştır. Aynı zamanda ani akımlarda meydana gelen eksenel kuvvetlerin kısa devre durumundaki akımın meydana getirdiği eksenel kuvvetlerden yüksek olduğu belirlenmiştir.

Transformatör tasarımında dikkat edilmesi gereken diğer bir konu, indüklenen manyetik alanlardan meydana gelen, nüve ve sargılarda ısıya dönüşen kayıplardır. Bu kayıplar, transformatörlerde açığa çıkan ısının ana kaynağıdır. Bundan dolayı, transformatörü aşırı ısınmalara karşı korumak ve transformatörün yalıtım malzemesinin bozulmasını engellemek için sıcaklığın uygun bir biçimde düşürülmesi büyük önem teşkil etmektedir. Transformatörlerde oluşan en yüksek sıcaklık değeri, tasarıma, dış ortam şartlarına, transformatörün çalıştırıldığı yüke, soğutma sistemine ve soğutma yağının özelliklerine bağlıdır [12]. Transformatör tasarlanırken transformatörün çalışabileceği maksimum sıcaklık derecesi tasarım için kritik bir etkidir. Uluslararası Standartta sıcaklık artışının sınır aralığı açıkça belirtilmiştir [13]. Transformatörlerin bileşenlerinin sıcaklık dağılımları Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) gibi çeşitli sayısal yöntemlere dayanan yazılım ve

simülasyon programlarıyla termal analizler gerçekleştirilerek tahmin edilebilir. Bu yöntemler, ısıl teste ve formüllere muadil ve uyumlu bir hesaplama yöntemi kabul edilmiştir [14]. Bu yöntemler ile soğutma yağı ve sargıların sıcaklık değerlerinin deneysel olarak elde edilen sıcaklık değerlerine çok yakın olmuştur. Yağ soğutmalı dağıtım transformatörlerinin elektromanyetik alanın termal alan üzerindeki etkisi incelenmiştir [15]. Transformatörler tasarlanırken sıcaklık dağılımları varsayımsal bir biçimde tahmin edilmektedir. Güç dağıtımında önemli ve pahalı cihazlara zarar verebilen veya düşük performansa neden olabilen sıcaklık derecesinin tasarım sınırından daha fazla olmaması gerekmektedir. Bundan dolayı, üretim sürecinden önce kritik sıcaklık değerlerini elde etmek amacıyla termal modeller oluşturulur.

Tasarımlarda önem teşkil eden bir husus da manyetik akı dağılımıdır. Manyetik akı dağılımının etkilerini incelemek amacıyla sayısal yöntemlerle 100 kVA ve 11/0.4 kV nominal değerlere sahip 3-fazlı kuru tip transformatör tasarımında meydana gelen akı yoğunluğu ve akım yoğunluğu gibi ilk tahmin değerlerini kontrol etmek amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. Bu sayede dağıtım transformatöründe 1.8-2.5 A/mm² aralığında olması gereken akım yoğunluğunun alçak gerilim sargılarında maksimum 2.1 A/mm², yüksek gerilim sargılarında ise maksimum 1.8 A/mm² olduğu görülmüştür [16].

Nüve kayıplarının hesaplamasında yüksek frekansta ve akı yoğunluğu (kayıp katsayılarının frekans ile değişmektedir) dinamik histerizis eğrisi toplam kayıpların hesaplamasında önemli bir etkiye sahiptir. Bu katsayıların değişikliklerini ifade etmek amacıyla güncellenmiş yeni bir formül önerilmiştir [16].

SEY ile aynı transformatörün 3D modeli ve 2D modeli analiz edilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve 3D modellerin 2D modellere oranla gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür [17]. SEY'e dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL ile yedi farklı T-bağlantı tipi için aynı nüve malzemesine sahip bir transformatörün akı yoğunluğu ve nüve kayıpları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan kayıpların en az 30°, -120°, -30°'lik modelde meydana geldiği ve atıl malzemenin en az 15°, -90°, -75°'lik modelde olduğu görülmüştür. Bundan dolayı orta bacak boyunun boyunduruklara uzanan kısmının mümkün olduğunca kısa tutulması nüve kaybını ve atıl malzemeyi azalttığı görülmüştür [18].

Transformatörün yüksek frekanslı aşırı gerilimlerden zarar görmeden çalışabilmesi için üretilen transformatörler standart olarak 1,2 µs tepe değeri ve 50 µs yarılanma süresi olan

yıldırım darbe gerilimi ile test edilmektedir. Burada amaç, daha az prototip üretip ve daha az işletme maliyeti ile aşırı gerilimlere karşı dayanıklı uzun yıllar çalışabilen transformatörler tasarlamaktır. Gerilim trafosunun davranışını belirleyebilmek için birçok analiz yöntemi mevcuttur. Ancak bu yöntemlerden sadece bir kaç geçici rejim analizleri için uygundur.

Modern güç sistemlerinde, doğrusal olmayan yüklerin büyük oranda artması harmonik bozulmalara yol açmıştır [19]. Bu durum, harmoniklerin güç transformatörleri üzerindeki etkisini ilgi alanı haline getirmiştir. Sinüzoidal olmayan akımlar, aşırı sargı kayıplarına, transformatörlerin aşırı ısınmasına ve faydalı ömürlerinin azalmasına neden olmaktadır. Mevcut harmoniklerle ilgili aşırı sargı kayıplarını önlemek için değer kaybı olarak adlandırılan verimli bir teknik yaygın olarak kullanılır. Bu kayıp, temel olarak doğrusal olmayan bir yük sağlamaya çalışan bir transformatörün yükleme kapasitesindeki kasıtlı azalma olarak yorumlanabilir. Harmoniklerinin hem büyüklüğünün hem de faz açısının transformatörlerin yüksüz kaybını etkilediği ve düşük dereceli harmoniklerin transformatörlerin yüksüz kayıpları üzerinde yüksek dereceli harmoniklerden daha fazla etkisi olduğu görülmüştür [20,21]. Transformatörlerin yüksüz kaybının, gerilim toplam harmonik bozulması ile belirgin şekilde artabileceği anlaşılmıştır [22]. Bununla birlikte, % 5'in altındaki toplam harmonik bozulma seviyelerinin, harmonik voltajların çekirdek kaybı üzerindeki etkisinin ihmal edilebileceği görülmüştür [23]. Bu sonuçlara göre, transformatörlerin sargı ve çekirdek kayıplarının özellikle alt harmoniklerle uyarma gerilimleri altında yüksüz durum için araştırılması gerektiği söylenebilir.

Bu tez çalışmasında farklı özelliklere sahip transformatör modelleri kullanılarak bu 2D ve 3D modellerinin manyetik akı, elektromanyetik alan, elektromanyetik kuvvet, yıldırım darbe analizleri ve termal analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında özetle aşağıdaki konularda araştırmalar uygulama çalışmaları yapılmıştır.

- Transformatörün nüve kayıplarının azaltılması için farklı nüve malzemelerini elektromanyetik açıdan analiz değerlendirilerek uygun malzemeler belirlenmiştir.
- Kullanılan malzemelerin kalınlığının ve çalışma frekansının program ortamında tanıtılması ile B-H ve B-P eğrileri oluşturulmuştur.
- ANSYS@MAXWELL ile tasarlanan 2D ve 3D transformatör modellerinin manyetik alan analizleri, akı yoğunlukları, histeresis kayıpları, girdap akım kayıpları, aşırı akım kayıpları, toplam çekirdek kayıpları ve bakır kayıpları hesaplanmıştır. Bu değerlerin zamana göre değişimi grafiksel olarak elde edilmiştir.

- Kısa devre durumların transformatörlerin sargılarında meydana gelen aşırı akımların, transformatörde oluşturduğu elektromanyetik zorlanmalar ve elektromanyetik kuvvetler incelenmiştir.
- Yıldırım darbe analizlerinde ani olarak yükselen yüksek gerilim değerlerinin transformatörlerde meydana getirdiği etkiler araştırılmıştır.
- Transformatörlerin 3D ve 2D modellerinin analiz sonuçları karşılaştırılıp doğrulukları incelenmiştir.
- Ölçü transformatörlerinin geçici rejim altındaki davranışları kararlı durum davranışları ile karşılaştırılmıştır.
- ANSYS@MAXWELL ortamında elektromanyetik açıdan analizleri gerçekleştirilen modellerin ANSYS@Workbench ve ANSYS@Mechanical bütünleşik ortamında termal alan analizleri gerçekleştirilmiştir.
- Bu sayede transformatörün ölçülmesi çok zor olan kısımlarının en sıcak nokta (hot-spot) sıcaklıkları belirlenmiştir.
- Elektromanyetik ve termal analizler sayesinde kullanılan malzemenin en zayıf noktaları belirlenmiştir.
- Transformatörlerin termal analizleri ile sargılarda ve nüvede meydana gelen kayıpları azaltılması transformatörlerin uzun yıllar güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için transformatörlerin en sıcak nokta sıcaklıkları belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu tez çalışması altı bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde konu ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar sunularak literatürde eksik görülen konulardaki çalışmalar anlatılmıştır.

İkinci bölümde transformatörlerin tarihçesi, teorisi, elektriksel modeller, yapıları, soğutma sistemleri, kayıpları ve transformatörlerde kullanılan manyetik malzemeler ve bu malzemelerin ferromanyetik özelliklerinden bahsedilmiştir. Nüve malzemesi olarak kullanılan materyallerin mıknatıslanma özellikleri manyetik davranış eğrileri üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde ise transformatörün nümerik modellenmesi, değişen manyetik alana bağlı olarak meydana gelen kayıpları, kayıplara neden olan parametreleri ve transformatör nüvelerinde kullanılan manyetik malzemelerin özellikleri ve standartları üzerinde durulmuştur. Ayrıca transformatörlerin elektromanyetik davranışları, elektromanyetik kayıplar ve bu kayıpların formülleri anlatılmıştır.

Tezin dördüncü bölümünde ANSYS@MAXWELL ile transformatörlerin modelleme aşamaları anlatılmıştır. Bu modellerin hem elektromanyetik hem de termal açıdan analizlerinin yapılabilmesi için gerekli adımlar görsel ve teorik olarak anlatılmıştır.

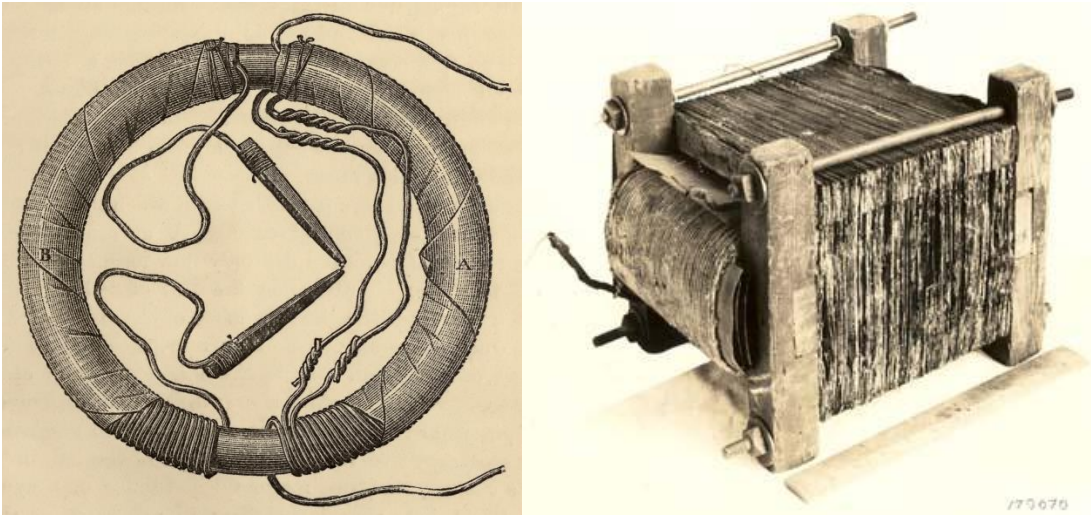
Beşinci bölümde ise modellenen transformatörlerin analizleri ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Modellenerek analizi gerçekleştirilen transformatörlerin sonuçları incelenip çıkarımlarda bulunulmuştur. Bu sayede tasarlanacak olan yeni modellerin parametrelerinin ve kullanılacak materyallerin özelliklerinin tasarım öncesi tahmini için fikirler sunulmuştur. Son bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapılmıştır.

Transformatörler ile ilgili yukarıda bahsedilen çokça çalışma yapılmış olmasına rağmen, ANSYS@MAXWELL ortamında, transformatörlerde meydana gelen elektromanyetik kuvvetler, farklı frekanslardaki nüve kayıpları, harmonik analizler, termal analizlerde sıcaklığı ölçülemeyen noktaların sıcaklıkları ve ölçü transformatörlerinin yıldırım darbe analizleri gerçekleştirilmemiştir. Bu eksiklikler bu tez çalışmasında ele alınmıştır. Bu tezin ana hedeflerinden biri, geçici ve kalıcı rejimlerde transformatörün performansını Sonlu Elemanlar Yöntemi dayalı ANSYS@MAXWELL ile detaylı olarak incelenmesi ve bu durumlarda transformatörde meydana gelen kayıplardaki artış nedeniyle daha fazla ısınmaması için yeni yöntem ile deratasyon yapılmasıdır. Yani transformatörün ömrünü uzatmak için maksimum kapasitesinden düşük bir değerde çalışmasıdır. Bu çalışmamızın diğer önemli amaçlarından biri de, iyileştirilmiş elektrik-termal model ile transformatörün nüve ve tüm metal bölgelerindeki sıcaklık artışının incelenmesidir.

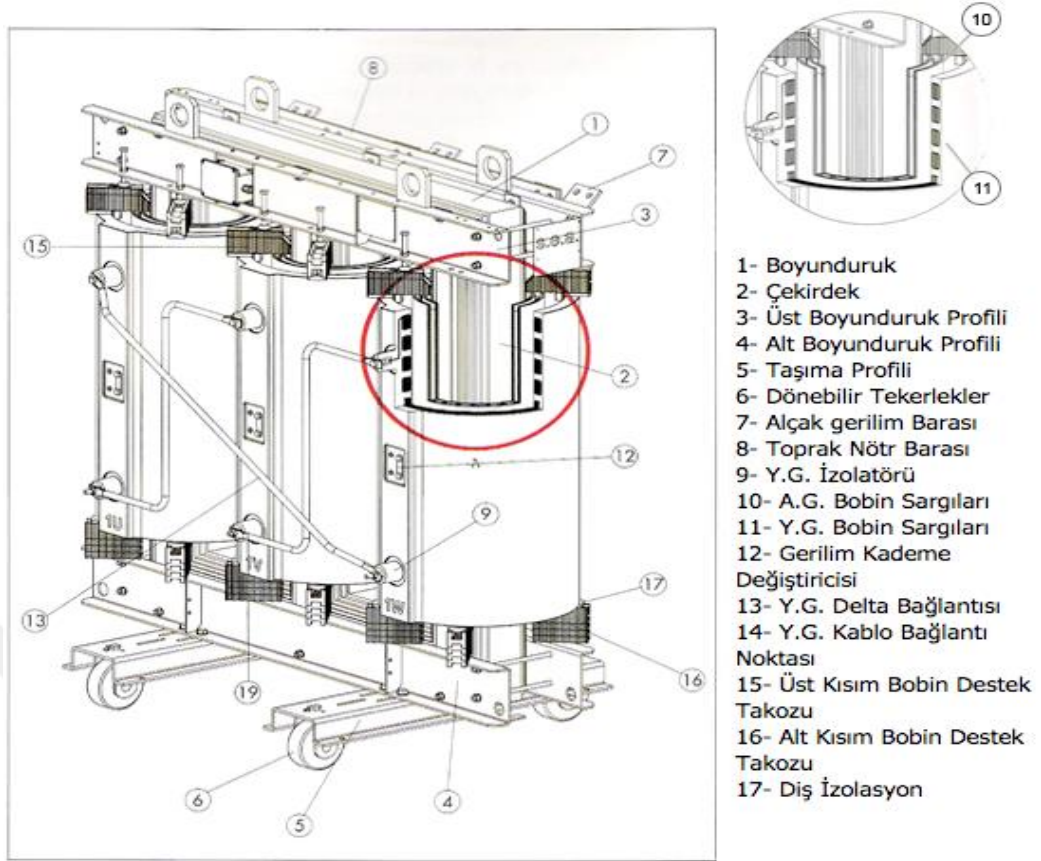
2. TRANSFORMATÖRLERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

2.1 Transformatörlerin Tarihçesi

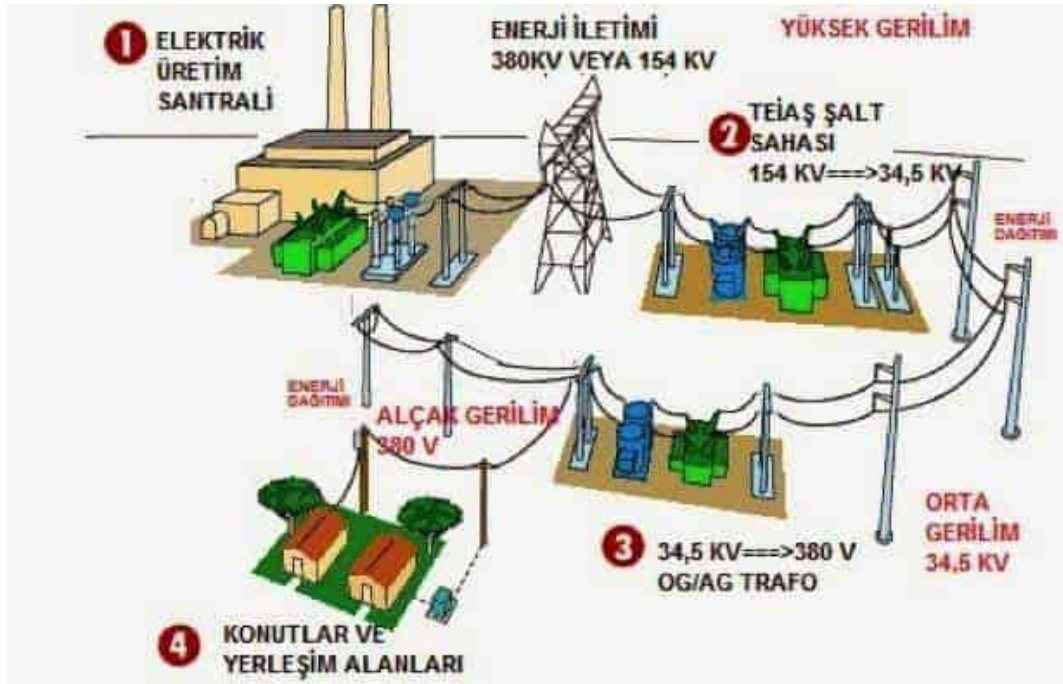
Güç transformatörleri de diğer elektrik makineleri gibi elektromanyetik prensip sistemine göre çalışmaktadır. 1831 yılında Michael Faraday manyetizmanın elektrik enerjisine, elektrik enerjisinin de manyetizmaya çevrilebileceğini keşfetti. Michael Faraday'ın keşfettiği ilk transformatör aşağıda Şekil.2.1a'da sunulmuştur. Ayrıca, 1882 yılında Gibbs ve Gaulard elektrik dağıtım sisteminde transformatörleri ve AC kullanarak Michael Faraday'ın keşfi olan transformatörü geliştirerek İngilizce patentini almışlardır. Patentten başarı elde edilmese de, güç sistemlerinde enerjinin iletimi açısından yeni bir fikrin doğması sağlanmıştır. Ayrıca, 1885 yılında George Westinghouse transformatör ve AC sistemlerini geliştirmek için Gibbs ve Gaulard patentlerinin Amerikan telif haklarını satın almıştır. 1886 yılında ise William Stanley aşağıda Şekil 2.1b'de verilen AC iletim sistemlerini başarılı bir şekilde geliştirmiştir. Bu sistemler, jeneratörlerden elde edilen yüksek akımı ve düşük gerilimi uzak mesafelerdeki yüklere iletkenler aracılığıyla iletilmesi için gerekli olan yüksek gerilim ve düşük akım seviyesine dönüşümünü sağlamıştır. Günümüzde modern güç dağıtım ve iletim sistemleri daha kapsamlı olup, güç sistemlerinde kullanılan transformatörlerin verimleri %98 dolaylarındadır. Güç sistemlerinde kullanılan gelişmiş transformatörler Şekil 2.2'de verilmiştir. Enerjinin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim aşamalarının süreci Şekil 2.3'te şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.1: a-) Faraday'ın keşfi olan trafo, b-) William Stanley'in keşfi olan trafo



Şekil 2.2: Günümüzde güç sistemlerinde kullanılan transformatörler [24]



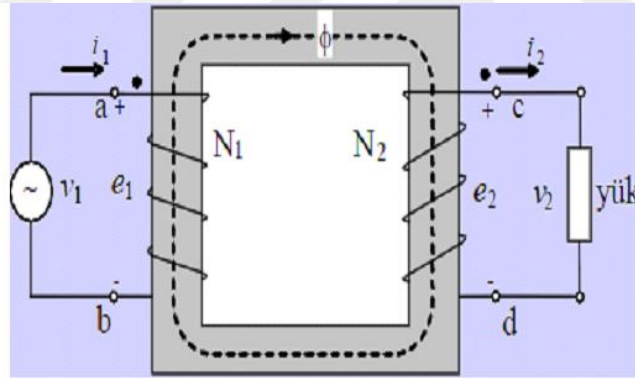
Şekil 2.3: Elektrik enerjinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketimine ait sürecin şematik görünümü

2.3 Transformatör Teorisi

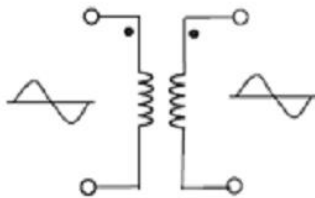
Elektrik enerji sistemlerini oluşturan bileşenler göz önüne alındığında transformatörlerin boyut, ağırlık ve maliyet bakımından en yüksek değerlere sahip cihazlar olduğu görülmektedir. Bu durum transformatörlerin tasarımında, transformatörün devre parametrelerinin belirlenmesinde ve fiziksel değerlerinin optimum değerlerde olmasını çok önemli kılmıştır. Bu bölümde transformatörlerin teorisi ve çalışma prensibi özetlenerek, günümüzde enerji sistemlerinde kullanılan güç transformatörlerinin farklı yapıları ve uygulamaları anlatılmıştır.

2.3.1 Transformatörlerin elektriksel modeli

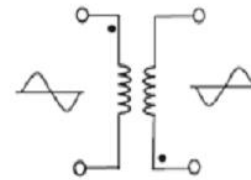
Manyetik indüksiyon kuralına göre çalışan primer ve sekonder sargılarına sahip kayıpsız transformatörler ideal transformatörler olarak tanımlanır. Yani ideal transformatörler, kapalı manyetik bir devrede bulunan iki bobin arasındaki manyetik enerji iletimi esasına dayanmaktadır. İdeal transformatörlerin şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Yük altındaki 1-fazlı ideal transformatör.



Aynı fazlı transformatör.



Zıt fazlı transformatör.

Şekil 2.4: İdeal transformatörlerin şematik gösterimi [25]

İdeal bir transformatöre ait özellikler aşağıda verilmiştir.

- Sargı dirençleri çok küçüktür.
- Nüve kayıpları yok denilebilecek kadar düşüktür.
- Sargıların kapasite değerleri ihmal edilebilecek derecede küçüktür.

Bir transformatörün girişine gerilim verildiğinde oluşan manyetik akı transformatörün çıkışında belli oranda bir gerilim indükler. Giriş ve çıkış gerilimlerinin frekansları aynı fakat indüklenen gerilimin genliği ve giriş-çıkış gerilimlerinin faz açıları farklı olmaktadır. Faraday kanununa göre primer tarafına uygulanan AC gerilim akınının primer ile sekonder arasındaki nüvenin üzerinden akışını sağlamaktadır.

$$\phi = |\phi|. e^{j\omega t} \quad (2.1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = |\phi|. e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (2.2)$$

$$V(t) = \int_{t_0}^t V_1(t) dt + \lambda_1(t_0) \quad (2.3)$$

şeklinde olmaktadır.

Burada V sargı indüksiyon gerilimini, ϕ akı, λ ise akı bağıını ifade etmektedir. Nüvenin geçirgenliği etrafındaki havanın geçirgenliğine oranla çok yüksek olduğundan manyetik akının büyük bölümü nüveden geçer. Bu akıya ortak akı denilmektedir. Fakat, akının az bir bölümü nüvenin etrafındaki hava boşluğundan geçer. Nüvenin çevresindeki hava boşluğundan geçen bu akı, kaçak akı olarak tanımlanır. Amper yasası aşağıda verildiği gibidir:

$$\sum NI = \oint H. dl \quad (2.4)$$

Burada H manyetik alan şiddetini, N sargılardaki sarım sayısını ve I akan akımı temsil etmektedir. Transformatörün sekonder sargısının açık devre olması durumunda akım sadece primer sargısı üzerinden akar. Bu durum, (2.4) eşitliğine göre nüve üzerinde meydana gelen manyetik alan birleşimi ile orantılıdır. Bu akım mıknatıslanma akımı olarak adlandırılmaktadır. Transformatörün yüklü durumundaki çalışma koşullarında sekonder sargısından bir akım geçer ve bu akım yük akımı olarak tanımlanır. İdeal bir transformatör nüvesinde geçirgenlik değeri yüksektir. Ancak, mıknatıslanma için gerekli olan MMF ve kaçak akı değeri neredeyse sıfırdır. Bunun yanı sıra ideal bir iletkenin öz direnç değeri de sıfıra yakındır. Bu koşullar döz önünde bulundurularak ideal bir transformatörün sargılarının

gerilim-akım ilişkisini aşağıda verilen eşitliklerle gösterebiliriz:

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.5)$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (2.6)$$

Transformatörün primer tarafına uygulanan akım $i_p(t)$ ile transformatörün sekonder tarafından elde edilen akım $i_s(t)$ arasındaki bağıntı:

$$P(t) = v_p(t)i_p(t) = v_s(t)i_s(t) \quad (2.7)$$

şeklindedir. Fazör gösterimde akım-gerilim değerlerinin ilişkisi ise,

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.8)$$

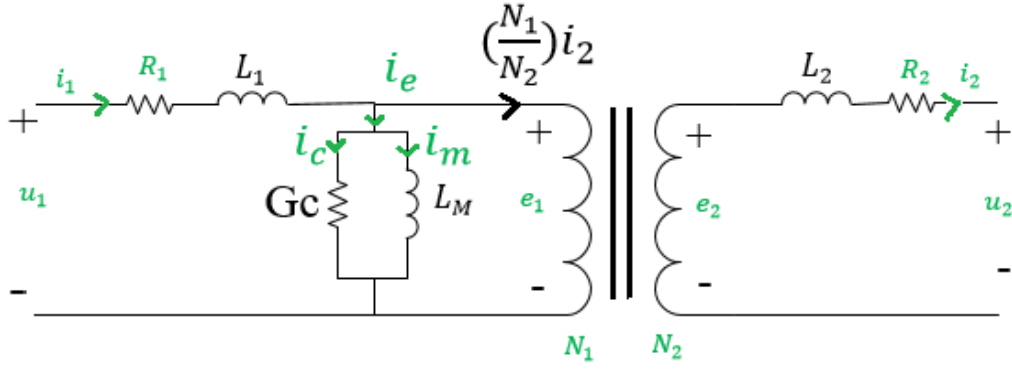
şeklinde ifade edilmektedir. Tek fazlı bir ideal transformatörde primer gerilimi V_p ile sekonder gerilimi V_s arasında faz farkı yoktur. Dolayısıyla ideal bir transformatörde sargıların oranı akım ve gerilimi doğrudan etkilemektedir [26]. Yukarıda verilen denklemler ideal transformatörler için türetilmiştir. Ancak, bazı düzeltmeler ile verilen bu denklemler gerçek bir transformatör için de oldukça tatmin edici sonuçlar vermektedir. Fakat pratikte ideal nüve ve sargı yapısında bir transformatör mevcut değildir. Gerçek bir elektromanyetik transformatör modeli tasarlamak için sargıların ve nüvenin ideal olmayan özellikleri ve transformatörde meydana gelen kaçak akıların neden olduğu etkiler dikkate alınmalıdır.

Pratikte Kullanılan (ideal olmayan) Transformatörler

İdeal olmayan transformatörlere ait özellikler aşağıda verilmiştir.

- Sargılardaki direnç sıfır değildir.
- Akının tamamı nüveden geçmediği için manyetik akı kaybı meydana gelir
- Trafonun sargılarda kapasitans vardır.

İdeal olmayan bir transformatöre ait modelin şematik diyagramı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5: İdeal olmayan bir transformatöre ait modelin şematik diyagramı

Bu transformatörler için primer ve sekonder gerilim eşitlikleri aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$u_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\phi_1}{dt} = R_1 i_1 + e_1 \quad (2.9)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + N_2 \frac{d\phi_2}{dt} = R_2 i_2 + e_2 \quad (2.10)$$

Burada;

u_1 ve u_2 , terminal gerilimlerin anlık değerini

i_1 ve i_2 , sekonder ve primer akımlarını

R_1 ve R_2 , sargılara ait dirençleri

ϕ_1 ve ϕ_2 , akı ilişkisini

e_1 ve e_2 , transformatörün her iki tarafında indüklenen gerilimleri ifade etmektedir.

Bu transformatörlerde sekonder ve primer sargılarında meydana gelen akı bağı aşağıda verilen eşitlikler ile ifade edilmektedir.

$$\phi_1 = L_1 i_1 + L_M i_2 \quad (2.11)$$

$$\phi_2 = L_2 i_2 + L_M i_1 \quad (2.12)$$

Bu eşitliklerdeki L_1 ve L_2 trafodaki kaçak endüktansları L_M ise ortak endüktansı ifade etmektedir. Bu eşitliklerde L_1 ve L_2 primer ve sekonder sargıları üzerinden akan akım tarafından meydana getirilen akı bağı bileşeni, (L_M) ise ortak sargı üzerinden akımın ürettiği

akı bağı bileşeni olarak tanımlanır. Denklemler yeniden düzenlenecek olursa transformatörün sargılarına ait gerilim eşitlikleri aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_M \frac{di_2}{dt} \quad (2.13)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_M \frac{di_1}{dt} \quad (2.14)$$

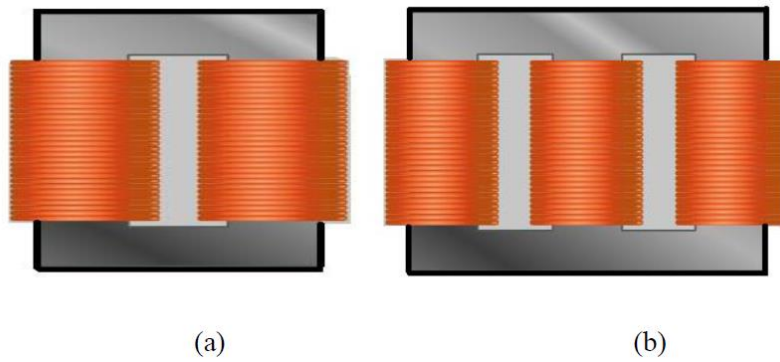
İdeal olmayan transformatörlerin sargılarında bir direnç mevcuttur. Bu direnç transformatörde bir enerji kaybı meydana getirir. Transformatörün sargılardaki reaktanstandan dolayı trafonun sekonderinde bir gerilim düşümü meydana gelmektedir. Ayrıca nüvenin geçirgenliği de gerçekte sonsuz olmadığından dolayı sekonder tarafına aktarılan akıda kayıplar olmaktadır. Yani ideal olmayan transformatörlerde manyetik enerjinin tamamı kayıpsız bir biçimde sekonder tarafına aktarılmaz. Transformatörlerin demir nüvesindeki relüktanstan dolayı transformatörde histerezis ve manyetik akı kayıpları oluşmaktadır.

2.4 Transformatör Çeşitleri

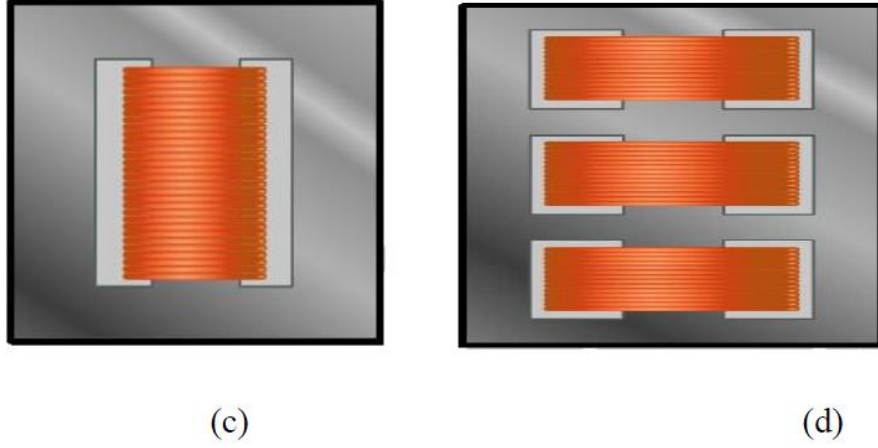
Elektrik güç sisteminde, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtımı gibi farklı amaçlar için kullanılan çeşitli transformatör tipleri vardır. Transformatörler güç değerlerine ve yapılarına göre sınıflandırılmaktadır.

2.5 Yapılarına Göre Transformatörler

Transformatörler nüve ve sargı yapıları baz alınarak kategorize edilmektedirler. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 'de verildiği gibi transformatörler çekirdek tipi ve mantel tipi olarak ikiye ayrılırlar.



Şekil 2.6: a) Tek faz çekirdek tip transformatör, b) Üç faz çekirdek tip transformatör



Şekil 2.7: c) Tek faz mantel tip transformatör, d) Üç faz mantel tip transformatör.

Mantel tipi transformatörlerde sargılar manyetik çekirdek tarafından sarılmış vaziyettedir. Bu transformatörler yüksek akımlarda düşük gerilimleri kompakt tasarımları sayesinde sağlamaktadırlar Mantel tipi transformatörlere ark ocaklarında kullanılan transformatörler örnek olarak verilebilir. Güç transformatörlerinin tasarımında ise çekirdek yapısı yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun sebebi, meydana gelebilecek kısa devre durumlarında iyi performans göstermesidir. Bu tez çalışmasında sadece çekirdek tipi transformatörler kullanılmıştır. Çekirdek tip transformatörlerde, sargılar çekirdeğin bacalarına sarılmaktadır. Üç fazlı transformatörlerde üç bacaklı ve beş bacaklı çekirdek tipleri olmak üzere iki çeşit çekirdek tipi bulunmaktadır. Üç bacaklı bir çekirdek tipi transformatörde bacaklardaki akı bağlarının cebirsel toplamı sıfıra eşit değilse akının bir bölümü devresini havadan tamamlar. Beş bacaklı çekirdek tipleri, transformatörün yüksekliğini, kaçak akılarını ve buna bağlı olarak girdap akım kayıplarını azaltmak için kullanılır. Çekirdek ve mantel tipi transformatörlerin nüvesinde kullanılan yönlendirilmiş laminasyon sacın bir kısmı silisten meydana gelmektedir.

2.6 Güç Değerlerine Göre Transformatörler

2.6.1 Güç transformatörleri

Güç transformatörleri genellikle iletim şebekesinde gerilim seviyesini yükseltmek veya düşürmek için kullanılır. Bu transformatörler esas olarak yüksek veya tepe yüklerde çalışır ve tam yükte veya tam yüke yakın bir değerinde maksimum verime sahiptirler. Elektrik tesislerinde kullanılan dağıtım transformatörleri, dağıtım amaçlı gerilimi yeterli seviyelere düşürerek kullanıcılara ulaştırmak için kullanılmaktadır. İyi bir gerilim regülasyonuna

sahiptirler ve tam yükte maksimum % 50 verimlilikle çalışmaktadır. Güç transformatörleri genellikle yüksek güçte üretilirler. Güç değerleri (> 5 MVA) olarak derecelendirilmiştir. Güç iletim tesislerinde kullanılmakta ve dağıtım transformatörlerine göre boyutları daha büyük olmaktadır.

Güç ve dağıtım transformatörü arasındaki temel fark, dağıtım transformatörü normalde her zaman tam yükte çalışmadığı için yük altında iken maksimum % 60 ile % 70 verimlilik için tasarlanmış olmalarıdır. Yükü ise dağıtım talebine bağlıdır. Güç trafosu ise her zaman tam yükte çalıştığı için maksimum (%100'e yakın) verimlilik için tasarlanmıştır. Üretim istasyonlarında yüksek izolasyon gerektiren yerlerde kullanılırlar

2.6.2 Dağıtım trafosu

Bu tip transformatör, 11 kV, 6.6 kV, 3.3 kV, 440 V ve 230 V gibi daha düşük gerilim derecelerine sahiptir. Güçleri 200 MVA'dan düşüktür ve dağıtım şebekesinde voltaj seviyesini düşürerek güç sisteminde kullanılır. Dağıtım transformatörünün birincil bobini emaye kaplı bakır veya alüminyum tel ile sarılır. Yüksek akım, düşük voltaj sargısı olan transformatörün sekonder olmasını sağlamak için kalın bir alüminyum ve bakır şerit kullanılır. Yalıtım amacıyla reçine emdirilmiş kağıt ve yağ kullanılır.

Transformatördeki yağ;

- Soğutma
- Sargıların yalıtımı
- Nemden koruma amacıyla kullanılır.

Dağıtım transformatörünün çeşitli tipleri aşağıdaki temelde sınıflandırılmıştır ve aşağıda verilmiştir:

- Montaj yeri
- Yalıtım tipi

33 kV'dan daha düşük dağıtım transformatörü endüstrilerde, 440, 220 V ise evsel amaçlı kullanılmaktadır. Boyut olarak daha küçüktür, kurulumu kolaydır ve düşük manyetik kayıplara sahiptir ve her zaman tam olarak yüklenmez. Gündüz 24 saat boyunca sabit yükte çalışmadığı için, yükü en yüksek seviyededir ve gece saatlerinde çok hafif yüklenir. Bu nedenle verimlilik yük döngüsüne bağlıdır ve tüm gün verimliliği olarak hesaplanır. Dağıtım transformatörleri % 60 ile % 70 maksimum verimlilik için tasarlanmıştır.

2.7 Ölçü Transformatörleri

Genellikle izolasyon transformatörü olarak bilinirler. Ölçü transformatörü, akımı ve voltaj seviyesini dönüştürmek için kullanılan bir elektrikli cihazdır. Bu transformatörlerin kullanım amacı primer yüksek voltaj ve yüksek akım beslemesine sahip olduğunda ikincil sargıyı güvenli bir şekilde izole etmektir. Böylece transformatörün sekonder tarafına bağlı ölçüm cihazı, enerji sayaçları veya röleler hasar görmez. Ölçü transformatörü iki türe ayrılır:

- Akım Trafosu (AT)
- Gerilim Trafosu (GT)

2.7.1 Akım trafosu

AT, ölçüm ve koruma için kullanılır. Devredeki akım doğrudan ölçüm cihazına uygulanacak kadar yüksek olduğunda, akım trafosu yüksek akımı devrede istenen akımın istenen değerine dönüştürmek için kullanılır.

AT'nin birincil sargısı, ana kaynağa ve ampermetre, voltmeter, wattmetre veya koruyucu röle bobini gibi çeşitli ölçüm cihazlarına seri olarak bağlanır. AT'de oran terimi büyük bir öneme sahiptir.

AT'nin doğruluğu, yük, sıcaklık, faz değişimi, derecelendirme, doygunluk, vb. birçok faktöre bağlıdır. Akım trafosunda çalışma prensibi aşağıdaki denklemle açıklanabilir.

$$I_p = I_0 + \frac{I_s}{K_T} \quad (2.15)$$

Burada, I_p primer akımı, I_s sekonder ters akım, I_0 uyarma akımı, K_T dönüş oranıdır.

2.7.2 Gerilim trafosu

Birincil sargı, voltajı ölçülecek olan yüksek gerilim hattına bağlanır ve tüm ölçüm cihazlar ve sayaçları transformatörün ikincil tarafına bağlanır. GT'nin ana işlevi gerilim seviyesini güvenli bir limite veya değere düşürmektir. GT'nin birincil sargısı bir güvenlik noktası olarak topraklanır. Gerilim hatası, aşağıda gösterilen denklemle verilir.

$$\%V_e = \frac{V_p - K_T V_s}{V_p} 100 \quad (2.16)$$

Burada, V_e gerilimdeki hatayı, V_p primer gerilimi ve V_s sekonder gerilimi ifade etmektedir.

2.8 Transformatör Kayıpları

Transformatörde demir kayıpları, bakır kayıpları, histerezis kayıpları, girdap akım kayıpları, kaçak kayıplar ve dielektrik kayıplar gibi çeşitli kayıp türleri vardır. Transformatörlerde meydana gelen çeşitli kayıp türleri aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Transformatörlerdeki kayıplar;

- Nüve kayıpları
- Histeresiz kaybı
- Girdap akım kaybı
- Bakır kaybı veya omik kayıp
- Kaçak kayıp
- Dielektrik kayıp

Kayıplardan meydana gelmektedir. Bu kayıplar takip eden bölümde sırasıyla incelenmiştir.

2.8.1 Nüve kayıpları

Nüve kayıpları, transformatörün çekirdeğindeki değişen akıdan kaynaklanmaktadır. Bu kayıp esas olarak transformatörün manyetik çekirdeğinde meydana gelir ve çekirdek malzemenin manyetik özelliklerine bağlıdır. Bu kayıplar, histerezis kaybının ve girdap akımlarının meydana getirdiği kayıpların toplamıdır. Nüve kaybı aşağıda verilen denklemle ifade edilebilir.

$$P_{core} = P_h + P_e = k_h f B_m^x + K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (2.17)$$

Burada, P_h histeresiz kaybı, P_e eddy (girdap) akım kaybını, k_h ve K_e ana malzemenin hacmine, miktarı ve kullanılan birimlerle orantılı bir sabitleri ifade etmektedir.

2.8.2 Histerezis kaybı

Transformatörün çekirdeği, alternatif bir mıknatıslama kuvvetine maruz bırakılır histerezis döngüsü izlenir. Güç, histerezis kaybı olarak bilinen ısı şeklinde dağıtılır ve aşağıda gösterilen denklemle ifade edilir.

$$P_h = k_h f B_m^x \quad (2.18)$$

Burada, B_m çekirdekdeki maksimum akı yoğunluğu, f alternatif akımın frekansı ve x üssüne Steinmetz sabiti denir. Çekirdek malzemenin manyetik özelliklerine bağlı olarak değeri 1.5 ile 2.5 arasında değişir.

2.8.3 Girdap akım kayıpları

Akı kapalı bir devre ile bağlandığında, devrede bir elektromanyetik kuvvet (emf) indüklenir ve akım akar. Akımın değeri devre etrafındaki emf miktarına ve devrenin direncine bağlıdır. Çekirdek iletken malzemedan yapıldığından, bu emf'ler akımın malzemenin gövdesi içinde dolaşmasını sağlar. Bu dolaşım akımlarına girdap akımı denir. İletkende değişen bir manyetik alan meydana geldiğinde bu akımlar oluşmaktadır. Girdap akımı kaybı, çekirdeği ince laminasyonlarla yaparak en aza indirilir. Girdap akım kaybının denklemi;

$$P_e = K_e B_m^2 t^2 f^2 V \quad (2.19)$$

Burada, K_e girdap akımının eş verimliliği değeri çekirdek malzemenin hacmi ve öz direnci, laminasyonların kalınlığı gibi manyetik malzemenin doğasına bağlıdır. B_m akı yoğunluğunun maksimum değeri Wb/m^2 , t laminasyon kalınlığı, f frekans, V m^3 cinsinden manyetik malzeme hacmidir.

2.8.4 Bakır Kaybı

Bu kayıplar, transformatör sargılarının omik direncine bağlı olarak meydana gelir. I_1 ve I_2 birincil ve ikincil akım, R_1 ve R_2 , birincil ve ikincil sargı dirençleridir. Birincil ve ikincil olarak sargılarda meydana gelen bakır kayıpları aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{bakır} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.20)$$

Bu kayıplar yüke göre değişmektedir ve bu nedenle değişken kayıplar olarak da bilinir. Bakır kayıpları yük akımının karesi olarak değişir.

2.8.5 Kaçak kayıp

Bu kaçak kayıpların meydana gelmesi, sızıntı alanının varlığından kaynaklanmaktadır. Bu kayıpların yüzdesi demir ve bakır kayıplarına kıyasla çok küçük olduğundan ihmal edilebilir.

$$P_{toplam} = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 \quad (2.21)$$

Wattmetreler aracılığıyla elde edilen toplam anlık güç:

$$P_{top.wtr} = e'_1 i_1 + e'_2 i_2 + e'_3 i_3 \quad (2.22)$$

şeklinde olmaktadır.

Burada üç fazlı transformatörün anlık faz-nötr gerilimleri e_1, e_2, e_3 , wattmetre ile gerilim elemanlarının arasındaki ani gerilimler e'_1, e'_2, e'_3 ve i_1, i_2, i_3 iletken üzerindeki ani akımlar olarak isimlendirilir.

Şekil 2.8'de O ve C noktaları arasındaki anlık gerilimin değeri v ise,

$$e_1 = v + e'_1 \quad (2.23)$$

$$e_2 = v + e'_2 \quad (2.24)$$

$$e_3 = v + e'_3 \quad (2.25)$$

Bu değerler (2.21) eşitliğinde yerine konulursa;

$$P_{toplam} = e_1 i_1 + e_2 i_2 + e_3 i_3 - v(i_1 + i_2 + i_3) \quad (2.26)$$

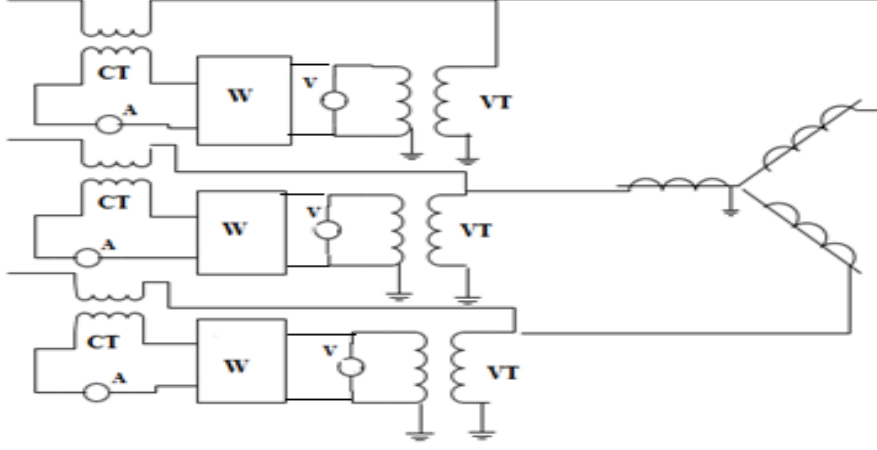
eşitliği elde edilir.

Şekil 2.8'de görüldüğü üzere, O ve C noktaları arasında bir bağlantı olmadığı zaman $i_1 + i_2 + i_3$ akımlarının toplamı sıfır olur. O ve C noktaları birbirine bağlı ise V değeri sıfır olur. Her iki durumda da faz dengesizliğinin olduğu şartlarda aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

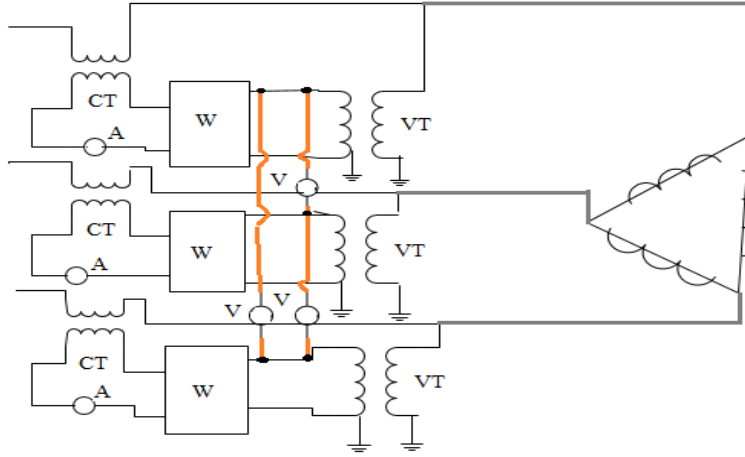
$$P_{toplam} = P_{top.wtr} \quad (2.27)$$

2.9.1 Üç fazlı bir transformatörün yüksüz kaybına ait ölçüm devreleri

Transformatörlerin sargıları genel olarak Y (yıldız) veya üçgen (Δ) düzeninde bağlanmaktadır. Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da (Y) ve (Δ) biçiminde bağlanmış transformatör sargıları gösterilmektedir.



Şekil 2.9: Transformator sargılarının yıldız (Y) bağlantı şekli



Şekil 2.10: Transformator sargılarının üçgen (Δ) bağlantı şekli

Üç fazlı transformatorlerde, sargıların bağlantı biçimleri için dört farklı seçenek bulunmaktadır. Bu bağlantılar Y-Δ , Δ-Y , Δ-Δ ve Y-Y şeklinde tanımlanmaktadır.

Transformatorlerin sargılarındaki Y-Δ bağlantı şekli, yüksek gerilimi düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. Primer sargısının Y bağlantısında bulunan nötr noktası, transformatorün arızalanması halinde meydana gelebilecek bozulmaları önlemek ve yalıtım maliyetlerini azaltmak amacıyla topraklanır. Y-Δ bağlantı şeklinde primer sargısında daha az sarıma gerektiğinden gerilimi düşürme oranı yüksek seviyede olan transformatorler için daha ekonomiktir. Diğer bir bağlantı şekli olan Δ-Y bağlantısı, düşük gerilimi yüksek gerilim seviyesine çıkarmak amacıyla kullanılır. Sekonder tarafındaki Yıldız (Y) bağlantıda bulunan nötr ile izolasyon maliyetleri düşürülür. Δ-Δ bağlantı şekli ise orta gerilim iletim sistemlerinde kullanılır. Üçgen-üçgen bağlantı şeklinde (Δ-Δ), hat akımları faz akımlarından

$1/\sqrt{3}$ kat daha fazla olduğundan dolayı sargıların iletken kesiti küçüktür. Bu sebeple, bu bağlantı türü için orta gerilim iletim sistemleri daha uygundur. Y-Y bağlantısı ise, yüksek gerilimin 1kV dan büyük olduğu durumlarda uygulanmaktadır. Bu bağlantıda, faz ve hat akımlarının eşit olmasından dolayı sargıların kesiti büyüktür. Bundan dolayı yüksek iletim sistemleri bu bağlantı türü için daha uygundur.

2.10 Transformatörlerdeki Elektromanyetik Kuvvetler

Güç transformatörlerindeki elektromanyetik kuvvetler, yerel manyetik akı yoğunluğundan hesaplanmaktadır. Trafonun sargılarından akım geçtiğinde manyetik alanın temel denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır [28]:

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.28)$$

Burada, μ manyetik geçirgenlik, \vec{A} manyetik vektör potansiyeli, \vec{J}_s akım yoğunluğu ve σ iletkenliktir. Transformatörün sargılardan akan geçici kısa devre akımları elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanmasında önemli bir parametredir. Kısa devre durumu, sistemden çok büyük akımların aktığı arıza durumlarıdır. Kısa devre durumunda sistemden akan akım nominal akımdan çok büyük olmaktadır. Kısa devre geçici akımları yaklaşık olarak aşağıda verilen denklemdeki gibi hesaplanmaktadır [29]:

$$I_{sc}(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} \sin(\omega t - \theta) \quad (2.29)$$

burada I_0 nominal akım, R , L ve X direnç ve V_m maksimum gerilimdir. Bu çalışmada, güç trafosunun sargılarında meydana gelen geçici elektromanyetik kuvvetler, kısa devre akımı ve manyetik akı yoğunluğu parametreleri ile tahmin edilmiştir. Transformatörün sargılarındaki elektromanyetik kuvvetler, geçici akımlar ve sargılardaki kaçak akı arasında kalan bölgedeki kombinasyonun bir sonucu olarak meydana gelir [30]. Bu nedenle, güç trafosundaki elektromanyetik kuvvet, Lorentz kuvveti olarak ifade edilir:

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.30)$$

Burada, F kuvvet ve B akı yoğunluğudur. Daha önce belirtildiği gibi elektromanyetik kuvvetlerin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olan manyetik vektör potansiyeli,

manyetik alan analizinden hesaplanmaktadır. Manyetik akı yoğunluğunun radyal ve aksenal bileşenleri aşağıdaki denklemlerde ifade edilmiştir [31]:

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z} \quad (2.31)$$

$$B_\phi = 0 \quad (2.32)$$

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial r A_\phi}{\partial r} \quad (2.33)$$

B_r , B_ϕ ve B_z , silindirik koordinattaki akı yoğunluğunun bileşenleridir. Manyetik akı yoğunluğu radyal ve aksenal bileşenlerine ayrıştırıldığında, elektromanyetik kuvvetlerin radyal ve aksenal bileşenleri birleştirilebilir ve kuvvet hesabı:

$$\vec{F} = \int_v J_\phi \hat{\phi} \times (B_r \hat{r} + B_z \hat{z}) dv = F_r \hat{r} + F_z \hat{z} \quad (2.34)$$

şeklinde yapılır.

2.11 Transformatörlerin Termal Alanının Matematiksel Modeli

Transformatörlerde açığa çıkan ısı, AC'nin bir sonucu olarak ortaya çıkan elektromotor kuvvetinin elektriksel dirençte meydana getirdiği ısıdır. Toplam kayıplar (bakır ve nüve kayıpları), program ortamında termal alan analizi için üretilen ısı olarak daha sonra kullanılmak üzere, üretici firma tarafından sargılarda ve nüve denysel olarak ölçülmüştür. Dağıtım transformatörünün bileşenlerindeki ısı transferi süreci için aşağıdaki adımlar takip edilmektedir. Transformatörün nüvesinde ve sargılarda açığa çıkan ısı, nüvenin dış yüzeyine ve iletim kanallarından sargılara yetişene kadar malzemelerden geçirilir. Aşağıda gibi verilen Fourier yasası iletim modundaki yönetim denklemi olarak ifade edilmektedir:

$$q = -k\nabla T \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.35)$$

Burada ∇T ısının akış yönündeki sıcaklığın oran değişimi, k malzemenin termal geçirgenliğini temsil etmektedir.

Termal ve elektromanyetik alanların ana kaynakları, transformatörün sargılarından akan akımlardır. Diğer bir ifade ile iletkenler vasıtasıyla akan akımın ortaya çıkan joule kayıplarıdır. Termal alanı aşağıda verilen denklemle açıklanabilmektedir [32]:

$$\nabla(\lambda\nabla T) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + q_v = 0 \quad (2.36)$$

Bu denklem kalıcı olmayan ısı transferinin diferansiyel denklemini ifade etmektedir.

Burada

T - ortama ve zamana bağlı olan sıcaklık dağılımının fonksiyonunu [$^{\circ}\text{C}$]

c - özel ısı kapasitesi [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]

ρ - özel matzeme yoğunluğu [kg/m^3]

λ - termal iletkenlik sabiti [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]

q_v - Belirlenen noktadaki olası ısı kaynağının ısı üretimi [J]

t - süre [s]

Yukarıda verilen denklemler ortam ve sıcaklığa ait fonksiyonlarıdır. Nüve, sargı, ortam havası ve yağ yüzeyleri arasındaki ısı değişimi aşağıda ifade edilmiştir:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial t} = a(T_p - T_f) \quad (2.37)$$

Diferansiyel denklemlerin belirtilen başlangıç ve bitiş şartlarındaki çözümü için SEY kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanarak, ısı transferinin kısmi diferansiyel denklemini çözme problemi, eşzamanlı lineer denklemler sisteminin çözümüne indirgenmektedir. Burada tüm geometri sınırlı sayıda sonlu elemana bölünerek çözüm gerçekleştirilir. Eleman düğümlerinin sıcaklıkları çözüm olarak elde edilirken, elemanların içerisindeki sıcaklıklar eleman düğümlerinin değerleri kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanmaktadır.

Transformatörün sıcaklık farkının bir sonucu olarak, ısı transferinin radyasyon modu, ortam ve transformatör bileşenleri arasında gerçekleşmektedir. Fakat, transformatör bileşenleri emisyonu düşük olan malzemelerden üretildiği için radyasyon etkisi çok az olmaktadır. Az olan bu etki dikkate alınmamaktadır. Bu durum, hesaplama sonuçlarının doğruluğunda çok az da olsa bir etki yaratmaktadır. Termal modellemenin geliştirilmesinde ve transformatörün termal alan analizinin gerçekleştirilmesinde birçok varsayım dikkate alınmıştır:

- Transformatör, simetriye bağlı olarak, paralel düzlemde bir yapı olarak düşünülebilir. Bu sebeple, SEY kullanılarak elektromanyetik ve termal alan yönünden analiz gerçekleştirildiğinde 2D olarak (bir düzlemde) simüle edilebilir.
- Günlük dış ortam sıcaklığının maksimum değeri dikkate alınır.
- Sıcaklık artışından çok etkilenen izolasyon yağı özellikleri hariç, transformatör malzemelerinin ısıl özelliklerinin sıcaklıkları sabit kabul edilir.
- Nüve ve sargı gibi aktif malzemelerin içinde açığa çıkan ısı, birim hacimde ve birim zamanda düzgün bir şekilde dağıldığı kabul edilir.

- Bakır ve nüve kayıplarına oranla dielektrik izolasyon kayıpları çok küçük olduğu için ihmal edilir.
- Konveksiyon yöntemi ile ısı transferi tabii bir konveksiyon şeklinde kabul edilir.

Transformatörün aktif parçalarının 2D denklem şeklindeki enerji dengesi, aşağıda verilen kararlı bir durum şartı ile formüle edilebilir [32]:

$$\dot{q}V = \frac{d}{dx} \left(kA \frac{dT}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(kA \frac{dT}{dy} \right) \quad (2.38)$$

Nüve ve sargı malzemelerinin içindeki herhangi bir noktada açığa çıkan ısının düzgün dağılımı ise aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi hesaplanmaktadır:

$$\dot{q}_{core} = \frac{P_{L,core}}{V_{core}} \quad (2.39)$$

$$\dot{q}_{L.V.} = \frac{P_{L,L.V.}}{V_{H.V.}} \quad (W/m^3) \quad (2.40)$$

$$\dot{q}_{H.V.} = \frac{P_{L,H.V.}}{V_{L.V.}} \quad (W/m^3) \quad (2.41)$$

Transformatörün aktif kısımlarının dış yüzeylerinde (izolasyon yağıyla etkileşen yüzeyler), enerji dengesi aşağıdaki denklemlerdeki gibi uygulanır:

$$-kA \frac{dT}{dx} - kA \frac{dT}{dy} = h(T - T_B) \quad (2.42)$$

T_B : Kütle sıcaklığı (°C)

h: katman katsayısı ($W/m, ^\circ C$)

2.12 Transformatörlerde Meydana Gelen Harmonikler

Sürekli gelişen teknoloji ile birlikte sistemlerdeki yükler her geçen gün çeşitlilik kazanmaktadır. Bu yüklerin daima lineer yükler olması istenir. Fakat yarı iletken teknolojisinin son yıllarda hızla gelişmesinin etkisi ve değişik çalışma şartları ile sistemlerdeki lineer olmayan yüklerde büyük bir artış görülmektedir.

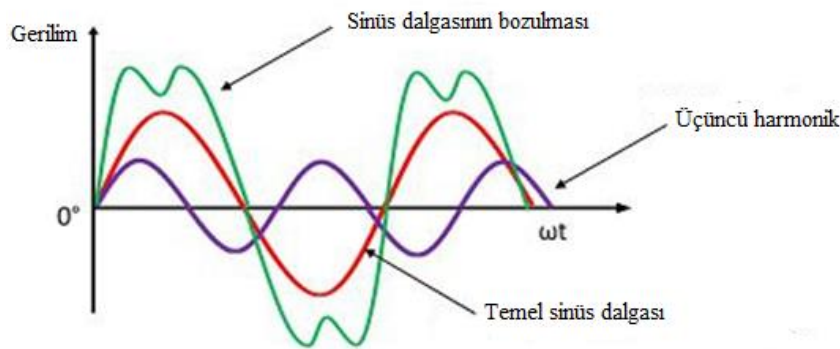
Karakteristiği doğrusal olmayan yüklere nonlineer yükler denir. Uç karakteristiklerine baz alınarak elemanlar, nonlineer ya da lineer olarak adlandırılır. Bir dirençte gerilim-akım, bobinde akım-akı, kondansatörde gerilim-yük ilişkileri lineerliği tayin etmektedir. Sistemde harmonik akım ve gerilimlerin meydana gelmesine sistemde mevcut olan linner olamayan

elemanlar sebep olurlar. Transformatörler, Kesintisiz Güç Kaynakları, dönüştürücüler ve güç elektroniği elemanları sistemde harmoniklerin meydana gelmesine sebep olan yüklerdir. Harmonikler sistemde ek enerji kayıplarına, ısınmalara, yalıtımlarının zarar görmelerine yol açarlar. Bu nedenle, mümkün olmasa bile bir sistemde harmoniklerin olmaması sistem açısından önemlidir. Harmoniklerin elimine etmenin için en önemli metodu harmonik filtreler kullanmaktır.

2.12.1 Harmonikler

Elektrik sisteminde, gerilim ve akımın dalga formu genellikle bir sinüs dalgası biçimindedir. Benzer biçimde, şebekeden çekilen akımın da sinüsoidal formda olması istenir. Fakat günümüzde şebeke sistemlerinde bulunan nonlineer yüklerden dolayı elektrik şebekelerinde sinüs dalga formundaki akım ve gerilim dalga şekillerini görmek zorlaşmış, akım ve gerilim dalga formları Şekil 2.11'deki gibi sinüsoidalden daha farklı bir forma gelmeye başlamıştır. Şebekenin esas frekansı olan 50 Hz frekanstan başka frekans oluşturan, diğer sinüsoidal şeklindeki bileşenler harmonik olarak ifade edilir.

Üç fazlı bir transformatörlerde, mıknatıslama akımının sinüzoidal olmaması, istenmeyen sinüzoidal akıların üretilmesine yol açar. Transformatördeki faz mıknatıslama akımları, sinüzoidal bir akı üretmek için gerekli üçüncü harmonikleri ve daha yüksek harmonikleri içermektedir.



Şekil 2.11: Meydana gelen harmonikler

Her fazdaki faz geriliminin sinüsoidal kalması için faz mıknatıslama akımlarını aşağıdaki formda olması gerekir [33]:

$$I_{A0} = I_m \sin \omega t + I_{3m} \sin(3\omega t + \phi_3) + I_{5m} \sin(5\omega t + \phi_5) \dots \quad (2.43)$$

$$I_{B0} = I_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ) + I_{3m} \sin[(3\omega t - 120^\circ) + \phi_3]$$

$$+I_{5m}\sin[(3\omega t - 120^\circ) + \phi_3] \dots \quad (2.44)$$

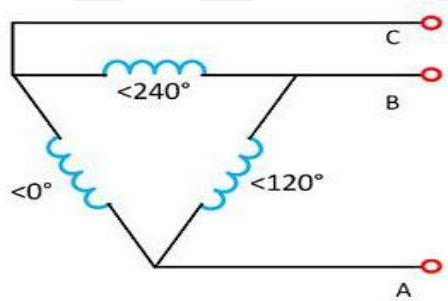
$$I_{B0} = I_{1m}\sin(\omega t - 120^\circ) + I_{3m}\sin[(3\omega t + 120^\circ) + \phi_3] \\ + I_{5m}\sin[(5\omega t + 120^\circ) + \phi_5] \dots \quad (2.45)$$

$$I_{C0} = I_{1m}\sin(\omega t - 240^\circ) + I_{3m}\sin[(3\omega t - 240^\circ) + \phi_3] \\ + I_{5m}\sin[(3\omega t - 240^\circ) + \phi_3] \dots \quad (2.46)$$

$$I_{C0} = I_{1m}\sin(\omega t - 240^\circ) + I_{3m}\sin(3\omega t + \phi_3) + I_{5m}\sin(5\omega t + 240^\circ + \phi_5) \dots$$

2.12.2 Üçgen bağlantı

Üçgen bağlantısı sadece iletim hattında üçüncü harmonik akımı olmayan bir sinüzoidal akı ve gerilime izin verir. Bu nedenle, 3 fazlı transformatörlerin çoğunda üçgen bağlantılı sargılar vardır. Üçgen bağlantıda birincil veya ikincil bağlantının uygun olmadığı yerlerde, üçüncül bir sargı sağlanır. Şekil 2.12’de üçgen bağlantı biçimi sunulmuştur. Üçüncül sargılar, çekirdeğin her bir uzvunda sinüzoidal akının dolaşan üçüncü harmonik akımını taşır.



Şekil 2.12: Üçgen bağlantı

I_{AO} , I_{BO} ve I_{CO} bir üçgen bağlantıda faz miktatsızlama akımlarını temsil etmektedir. Hat akımları iki faz akımının çıkarılmasıyla bulunabilir:

$$I_{ABO} = I_{AO} - I_{BO} \quad (2.47)$$

$$I_{ABO} = \sqrt{3}I_{1m}\sin(\omega t + 30^\circ) - \sqrt{3}I_{5m}\sin(5\omega t - 30^\circ + \phi_5) + \dots \quad (2.48)$$

Üç fazlı transformatörün faz miktatsızlama akımında bulunan üçüncü harmonik hat akımında mevcut değildir. Üçüncü harmonik bileşenler ortak fazdır ve dolayısıyla hatta iptal edilir. Üçüncü harmonik bileşenler deltanın kapalı döngüsünün çevreleyen akımlardır.

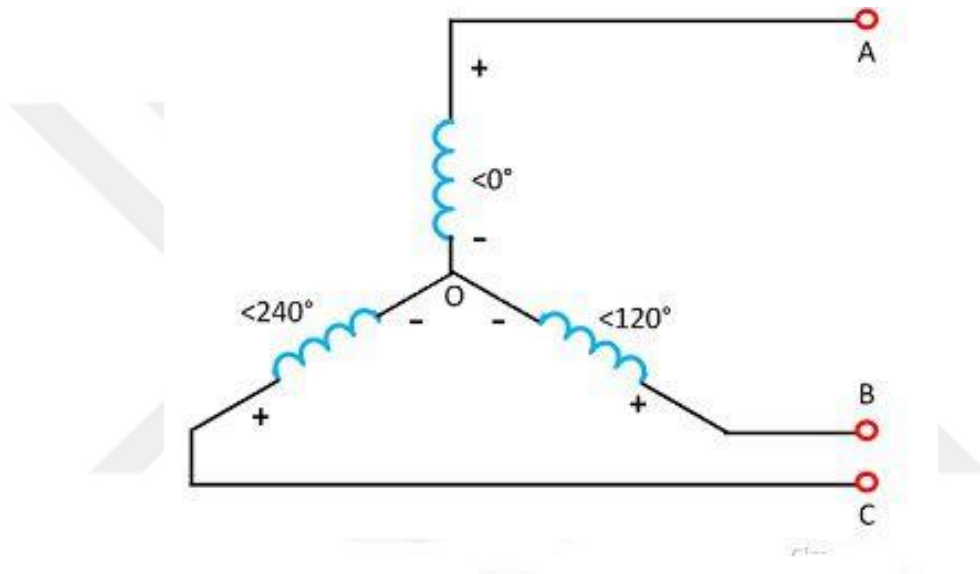
Bir üçgen bağlantıda, kapalı döngüde etki eden gerilim:

$$V_A + V_B + V_C = 3V_m \sin(3\omega t + \phi'_3) \quad (2.49)$$

şeklinde olmaktadır. Bu gerilim üçüncü bir harmonik gerilimdir ve deltanın kapalı döngüsü etrafında üçüncü bir harmonik akımını çevirir.

2.12.3 Yıldız bağlantı

Bu kısımda yıldız bağlantı şeklindeki harmonikler incelenmiştir. Bu bağlantıdaki gerilim dengesizliği ve faz açılarının farklılığı Şekil 2.13'te verilmiştir.



Şekil 2.13: Yıldız bağlantı

I_{AO} , I_{BO} ve I_{CO} , yıldız bağlantısında faz miktatsızlama akımını temsil ettiği varsayılarak,

$$I_{AO} + I_{BO} + I_{CO} = I_N \quad (2.50)$$

$$I_{AO} + I_{BO} + I_{CO} = 3I_m \sin(3\omega t + \phi_3) \quad (2.51)$$

Yedinci harmonikler ihmal edilir. Denklem (8), dengeli koşullar altında nötr teldeki akımın üçüncü harmonik akım olduğunu gösterir. Üçüncü harmonik akımının büyüklüğü, üçüncü faz akımının büyüklüğüdür.

Benzer şekilde, harmonikleri içeren üçüncü denge faz gerilimi şu şekilde yazılabilir [33]:

$$V_A = V_{1m} \sin(\omega t + \phi'_1) + V_{3m} \sin(3\omega t + \phi'_3) + V_{5m} \sin(5\omega t + \phi'_5) \dots \quad (2.51)$$

$$V_B = V_{1m} \sin(\omega t - 120^\circ + \phi'_1) + V_{3m} \sin(3\omega t + \phi'_3) + V_{5m} \sin(5\omega t + 120^\circ + \phi'_5) \dots \quad (2.52)$$

$$V_C = V_{1m} \sin(\omega t - 240^\circ + \phi'_1) + V_{3m} \sin(3\omega t + \phi'_3) + V_{5m} \sin(5\omega t + 240^\circ + \phi'_5) \dots \quad (2.53)$$

Yıldız bağlantıdaki hat gerilimi iki faz gerilimi çıkarılarak elde edilebilir:

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (2.55)$$

$$V_{AB} = \sqrt{3} V_{1m} \sin(\omega t + 30^\circ + \phi'_1) - \sqrt{3} V_{5m} \sin(5\omega t + 30^\circ + \phi'_5) + \dots \quad (2.56)$$

Transformatörler elektrik sistemlerinin en önemli cihazlarından biridir ve büyük oranda harmonik meydana gelmesine sebep olmaktadır. Transformatörlerin nüve sargılarındaki mıknatıslanma özelliğinden kaynaklanan harmonikler, sistemde harmonik akımları akıtarak harmonik bozulmalara sebep olmaktadır.

2.12.4 Harmoniklerin sebep olduğu etkiler

Akım ve gerilim dalga şekillerinin harmoniklerle değişmesi elektrik güç sistemlerinde farklı problemlere neden olmaktadır. Gerilim düşümünün artması, elektriğin üretiminde ve iletiminde kayıpların artması, ek kayıpların meydana gelmesi, şebeke geriliminin dalga biçiminin bozulması, kompanzasyon tesislerinin zarar görmeleri, Kesintisiz Güç Kaynaklarının veriminin düşmesi, koruma sistemlerinin yanlış sinyal göndermesi, izolasyon malzemelerinin delinmeleri, elektrikli cihazların kullanım ömrünün kısılması ve gürültülere neden olması problemlerden en önemlileridir. Transformatörlerin boşa çalışmasında ve düşük yüklerde harmoniklerin etkisi, tam yük durumuna göre daha büyüktür.

2.12.5 Harmoniklerin filtrelenmesi

Harmoniklerin etkilerini azaltmak için tasarıma yönelik alınan önlemler yeterli değildir. Bu önlemlere ek olarak harmonik akımlarının şebeke sistemine geçişinin önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sisteme eklenmesi gereken ilave devrelere gereksinim vardır. Devreye ilave edilen ve harmonik akımlarının sisteme geçişini engelleyen bu devreler harmonik filtre olarak adlandırılır. Burada amaç farklı frekanslardaki akım veya gerilimlerin harmonik düzeyini azaltmak ya da yok etmektir.

Filtreler, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve temel frekans haricindeki bileşenleri yok eden seri veya paralel olarak bağlanmış kondansatör ve bobin bileşimidir. Filtreler ile istenmeyen harmonik bileşenin frekansı için uygun L ve C değerleri belirlenerek, harmonik akımının elenmektedir.

2.13 Transformatörlerin Soğutma Sistemleri

Transformatörler gerçek anlamda ideal değildirler. Bu nedenle tüm transformatörlerde ısıya dönüşen bazı kayıplar meydana gelmektedir. Bu ısı düzgün şekilde dağıtılmazsa, transformatördeki aşırı sıcaklık ciddi sorunlara neden olabilir. Bu yüzden transformatörlerinde bir soğutma sistemi zorunluluk teşkil etmektedir. Transformatörün soğutulması, transformatörde üretilen ısının güvenli bir değere dağıtılması veya işlenmesi işlemidir. Bu, mevcut transformatörün çeşitli soğutma yöntemleri ile elde edilir [34]. Transformatörde ısı oluşumu için ana faktör, histerezis, girdap akımı, demir ve bakır kaybı gibi çeşitli kayıplardır. Tüm çeşitli kayıplar arasında ısı üretiminin en büyük katkısı bakır kaybıdır.

Soğutma sistemleri;

- Doğal Hava (AN)
 - Hava Zorlamalı (AF)
 - ONAN
 - ONAF
 - OFAF
 - ONWF
 - OFWF
- O : Oil (Yağ)
N : Natural (Doğal)
A : Air (Hava)
W : Water (Su)
F : Forced (Zorlama)

Transformatörün sıcaklığı hızla artmaya devam ederse, transformatörde kullanılan yalıtımın bozulmasına ve çeşitli parçaların hasar görmesine ve dolayısıyla transformatörün arızalanmasına neden olacaktır. Bu nedenle, transformatörün verimli çalışması, daha uzun ömür ve daha yüksek verimlilik için ısının uygun şekilde düşürülmesi gerekir.

2.13.1 Kuru tip transformatörün soğutma yöntemleri

Kuru Tip Trafo aşağıda verilen iki yöntemle soğutulur:

i. Doğal Hava (AN)

Bu yöntem ile transformatörde açığa çıkan ısı doğal havanın sirkülasyonu ile soğutulur. Transformatörün sıcaklığı, çevredeki havanın sıcaklığına kıyasla daha yüksek olduğunda, doğal konveksiyon işlemi ile ısıtılan hava, soğuk hava ile değiştirilir. Bu yöntem aynı zamanda kendi kendine soğutulan bir yöntem olarak da bilinir. Bu yöntem, 1.5 MVA'dan daha küçük olan transformatörleri soğutmak için kullanılır.

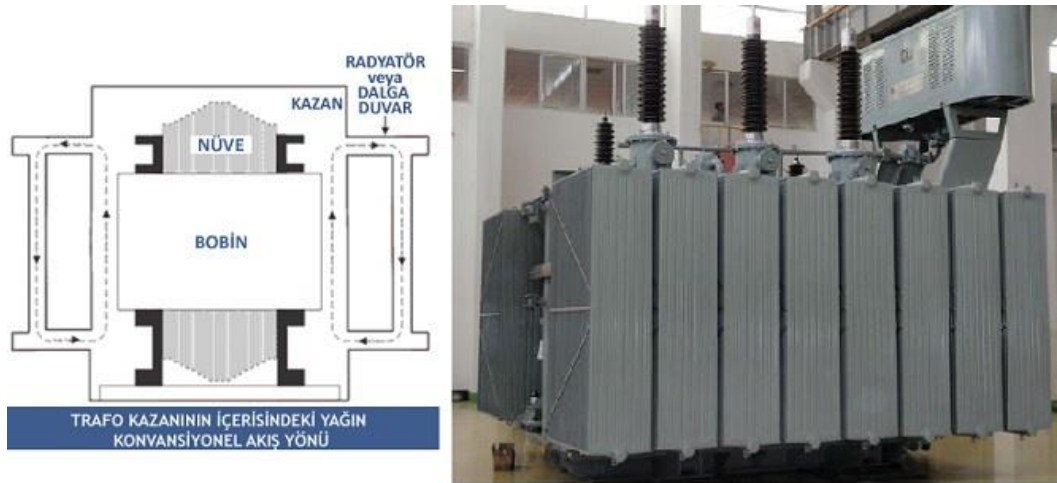
ii. Hava Zorlamalı (AF) veya Hava Patlaması

Bu yöntemde, açığa çıkan ısı cebri hava sirkülasyonu yöntemi ile soğutulur. Fanlar ve üfleyiciler yardımıyla, transformatörün çekirdeğine ve sargılarına hızı yüksek hava gönderilir. Transformatörün içindeki sıcaklık standart güvenli seviyenin üzerine çıktığında, bir alarm etkinleştirilerek fanlar ve üfleyiciler otomatik olarak açılır. Bu yöntem 15MVA'ya kadar transformatörler için kullanılır.

2.13.2 Yağlı tip transformatörler

i. ONAN

Bu tip soğutma için doğal konveksiyon işlemi kullanılır. Çekirdeğin montajı ve sargılar yağa batırılmış tanka yerleştirilir. Çekirdek ve sargılar ısındıkça, transformatördeki yağın sıcaklığı yükselir. Sonuç olarak, yağ yukarı doğru hareket eder ve transformatör tankının üst kısmından akar. Bu sıcak yağ, doğal konveksiyon ve iletim işlemi ile havadaki ısıyı dağıtır, yağ, doğal havanın dolaşımı ile soğutulur ve transformatörün kullanımını için radyatörden tekrar geçer. Bu tip soğutma, 30 MVA'ya kadar olan transformatör değerleri için kullanılır. Şekil 2.14'de bu sistem verilmiştir.



Şekil 2.14: ONAN soğutmalı trafo

ii. ONAF

ONAF yöntemi, nominal gücü 60 MVA kadar olan transformatörün soğutulması için kullanılır. Yukarıda anlatıldığı gibi, ONAN yönteminde, ısının yayılması, havanın soğuması için doğal olarak sirküle edildiği konveksiyon işlemiyle gerçekleşir. Ancak bu tipte cebri hava, transformatörün soğutulması amacıyla kullanılır.

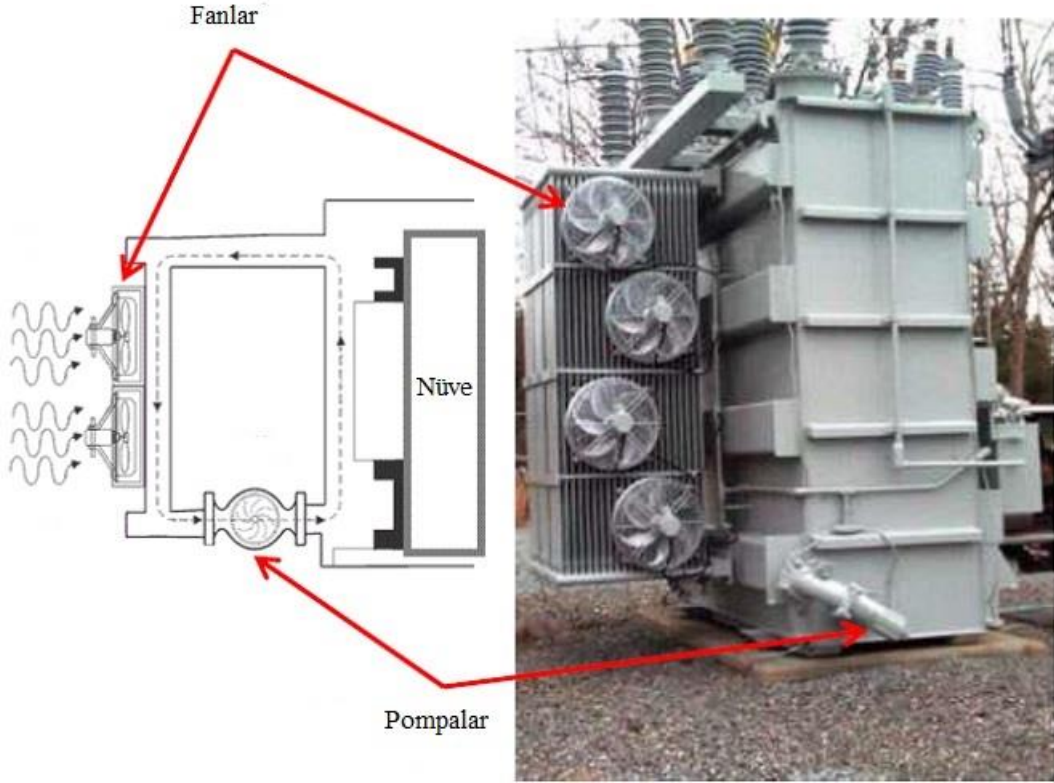
Transformatörün tankının alanı arttırılırsa yağın soğutulması daha hızlı olacaktır. Bu da ısı dağılım seviyesinin artmasına neden olur. Fanlar ve üfleyiciler monte edildiğinde, radyatöre ve soğutma kulelerine yüksek hızda hava uygulayarak yağın daha hızlı ve verimli bir şekilde soğutulması sağlanır. Bu yöntemde fan ve üfleyiciler ilave bir soğutma ekipmanı olarak bağlandığından, yağ ve hava dolaşımının doğal olarak yapıldığı başka bir işleme kıyasla maliyet daha yüksektir. Şekil 2.15'te bu sistem verilmiştir.



Şekil 2.15: ONAF soğutmalı trafo

iii. OFAF

Isı değiştirici, bir pompa yardımıyla sıcak yağın sirküle edildiği bir yere monte edilir. Hava, yüksek hızlı fanların yardımıyla ısı eşanjörünü geçmeye zorlanır. Bu yöntem ONAN'a benzer, transformatör üzerinde düşük yük olduğunda soğutma basit bir ONAN yöntemiyle yapılır ve yük arttığında üretilen ısı da daha fazla olur ve bu nedenle sensör bir alarm verir. ısının yayılması güvenli değeri aşar ve bunun sonucunda fanlar ve pompalar otomatik olarak açılır ve böylece soğutma OFAF yöntemi ile gerçekleşir. Aşağıda Şekil 2.16'da bu sistem verilmiştir.



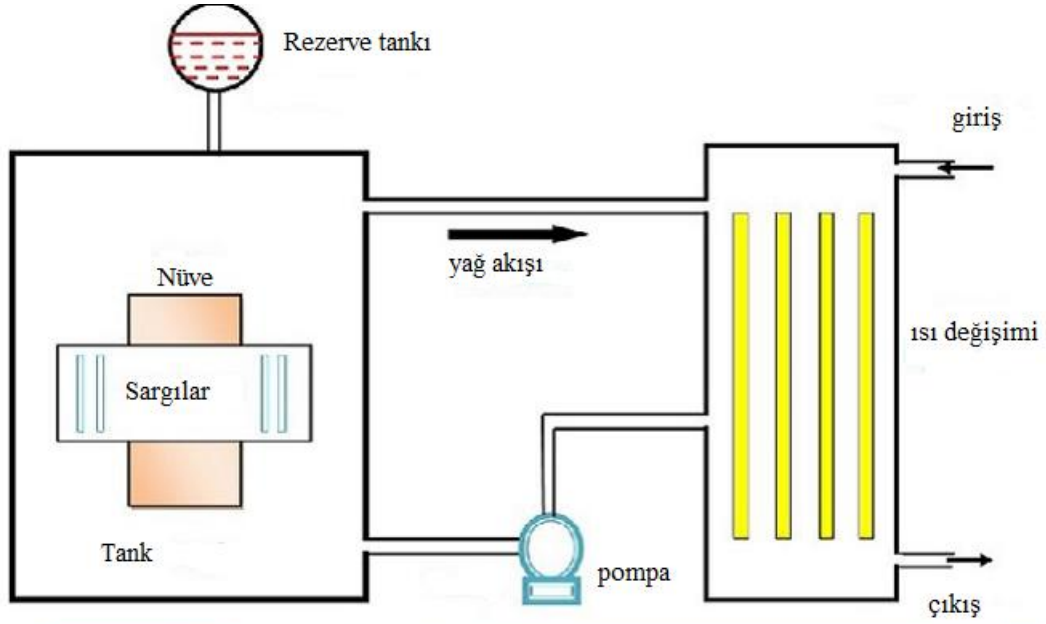
Şekil 2.16: OFAF soğutmalı trafo

iv. ONWF

Bu soğutma yönteminde transformatör çekirdeği ve sargılar yağ tankına daldırılır. Tankın dışına bir radyatör monte edilir sıcaklık yükselir, yağ ısınır ve yukarı doğru hareket eder, doğal konveksiyon işlemi ile ısı dağılır ve yağ radyatörden geçirilir. Ancak su pompaları ve soğutma için ısı eşanjöründen geçirilir.

v. OFWF

Bir pompa yardımıyla hem yağın hem de suyun geçirildiği bir ısı eşanjörü kurulur. Yağın seviyesi ve basıncı her zaman suyunkinden daha yüksek tutulur. Böylece sistemde herhangi bir sızıntı olursa, yağ su ile karışabilir ancak su yağla karışmaz. Bu tip bir yöntem, birkaç yüz MVA derecesine sahip veya transformatör bankalarının kurulu olduğu transformatörün büyük kapasitesi için uygundur. Esas olarak bu tip soğutma hidroelektrik santraline monte edilen transformatör için yapılır. Şekil 2.17’de bu sistem sunulmuştur.



Şekil 2.17: OFWF soğutmalı trafo

2.14 Transformatörlerde Kullanılan Manyetik Malzemeler

Tez çalışmasının bu bölümünde transformatörlerin teorisi, transformatöre ait genel kavramlar ve transformatörlerde kullanılan manyetik malzemelerle ilgili temel kavramlar açıklanmıştır. Aynı zamanda güç kayıpları ve yönlendirilmiş silisli sacı içeren mıknatıslanma mekanizmaları üzerinde durulmuştur.

2.14.1 Manyetik malzemelerin manyetizma esasları

İletkenler üzerinden elektrik yükleri aktığı zaman bir elektromanyetik alan meydana gelir. Meydana gelen manyetik alanlar, üzerinden elektrik yükü akan iletkenlerde elektromanyetik kuvvetler aracılığıyla belirlenmektedir. Manyetik Alan şiddeti (H) iletkenlerde her bir

metreye düşen akım olarak ölçülmektedir (A/m). Malzeme varlığından doğan ve manyetik ortamın tepkisi olarak nitelendirilen ek manyetik alan artımına manyetik akı yoğunluğu (B) denilmektedir. Manyetik akının birimi Weber 'dir. Manyetik akı yoğunluğu ise Weber/metre² (Wb/m^2) olmaktadır. Fakat Tesla (T) birimi de uluslararası SI birim sisteminde yoğun olarak kullanılmaktadır. Manyetik alan şiddetinden etkilenen bir materyalde meydana gelen manyetik alan kuvvetinin büyüklüğü Tesla (T). Alan vektörleri olan H ve B , hem büyüklükleri hem de yönleri ile tanımlanırlar. Manyetik akı yoğunluğu ve alan şiddeti arasındaki bağıntı (2.57)'de verilmiştir:

$$B = \mu_0 H \quad (T) \quad (2.57)$$

Burada μ_0 hava aralığının manyetik geçirgenliğidir. ($\mu_0=4.\pi.10^{-7}$ H/m).

Malzeme karakteristiğine bağlı olarak B ve H arasındaki bağıntı ise (2.2) eşitliği ile ifade edilmektedir. Bir malzemenin manyetik alan etkisi ile kazandığı mıknatıslanma özelliğine manyetik geçirgenlik denir. Bir malzemenin-maddenin manyetik geçirgenliği, boşluğun manyetik geçirgenliği (μ_0) ile bağıl manyetik geçirgenliğine (μ_r) bağlıdır. Geçirgenlik Yunan alfabesinde (μ) harfi ile gösterilir ve aşağıdaki denklemde verildiği gibi hesaplanır:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (T) \quad (2.58)$$

Gerilme, kimyasal bileşim ve mıknatıslanma frekansı gibi farklı çalışma şartları geçirgenliğe etki etmektedir. Bağıl geçirgenlik (μ_r) ve μ_0 kullanılarak bütün materyallerin geçirgenliklerinin kıyaslaması yapılmaktadır. Malzeme geçirgenliği ile vakum geçirgenliği oranı olarak aşağıdaki denklem ile elde edilir. Bağıl geçirgenlik, malzemelerin manyetik karakteristiklerini ifade etmek için yararlanılan önemli parametredir. Bağıl geçirgenlikte madde içindeki geçirgenliğin vakumun geçirgenliğine oranıdır. Bu oran:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.59)$$

şeklindedir. Manyetik malzemeleri kategorize etmek için μ_r 'ın değeri kullanılır. Bağıl manyetik geçirgenlik özelliklerine açısından materyaller 3 sınıfta incelenir:

i. Diamanyetik Materyaller

- Bağıl geçirgenlik değeri 1'den küçük ($\mu_r < 1$) olan materyallerdir.

- Bu materyaller manyetik alan ile etkileşime geçtiklerinde zayıf bir manyetik alan oluşmaya başlar.
- Başlıca diamanyetik materyaller; karbon, gümüş, bakır gibi maddelerdir.

ii. Paramanyetik Materyaller

- Bağıl geçirgenlikleri 1'den büyük olan ($\mu_r > 1$) materyallerdir.
- Bu materyaller, manyetik alanı biraz sıklaştırırlar.
- Mangan ve alüminyum bu materyallerdendir.

iii. Ferromanyetik Materyaller

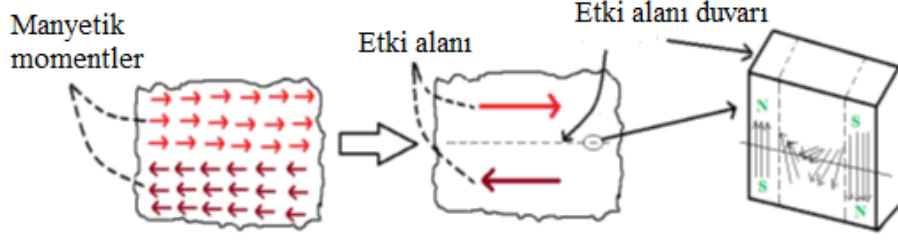
- Bağıl geçirgenlik değeri 1'den çok fazla olan ($\mu_r \gg 1$) materyallerdir.
- Bu materyallerin mıknatıslanma özellikleri yüksek olduğundan manyetik alan şiddetini çok arttırırlar.
- Bu sebeple, ferromanyetik materyaller nüve malzemesi olarak tercih edilirler.
- Demir, nikel ve kobalt ferromanyetikdir.

μ_r 'ın değeri 1'den küçük olan materyallerin manyetikleşme özellikleri zayıf olur. μ_r 'ın değeri 1'den çok büyük ferromanyetik materyallerin mıknatıslanma özellikleri güçlü olur. Bu nedenle bu materyaller transformatör tasarımında daha çok tercih edilmektedir. Bir sonraki bölümde Ferromanyetik materyallere ait manyetizasyon süreci ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.15 Ferromanyetik Malzemeler ve Mıknatıslanma Özellikleri

Ferromanyetizmada olduğu gibi, elektronların tamamı aynı yöne doğru konumlanır. Bu durum, sürekli mıknatısların zıt kutuplarının, güney-kuzey, birbirlerini etkilemesine yani çekim gücünün oluşmasına, aynı kutupların ise birbirlerini itmelerine neden olur.

Herhangi bir dış manyetik alanın olmadığı durumda, ferromanyetik maddede meydana gelen atomların manyetik momentleri Şekil 2.18'de gösterilmiştir. Manyetik alan etkisi, bir bölgede meydana gelen tüm manyetik alan çizgilerinin aynı yönde olması olarak tanımlanmaktadır. Herhangi harici bir manyetik alan uygulandığında, manyetik momentler kendilerini alan yönünde sıralarlar.



Şekil 2.18: Ferromanyetik malzemelerdeki mikro manyetik alan

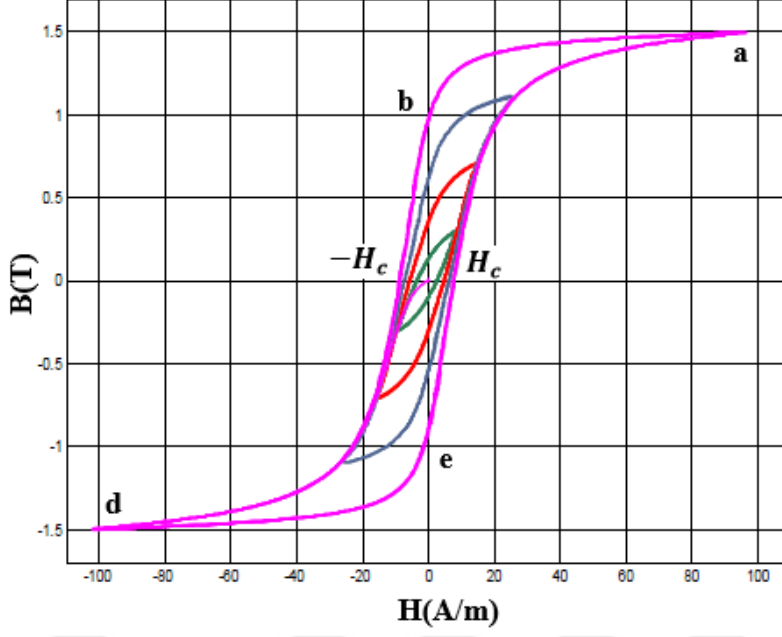
Bir dış manyetik alan olmadığına ferromanyetik malzemeler kalıcı bir manyetik momente sahip olurlar. Ferromanyetik malzemelerdeki manyetik akı yoğunluğu ve mıknatıslanma ilişkisi aşağıda verilmiştir:

$$\mu_0 M \gg \mu_0 H \quad (2.60)$$

$$B = \mu_0 M + \mu_0 H \quad (2.61)$$

Ferromanyetik malzemelerdeki kalıcı manyetik momentler elektron yapısı nedeniyle silinmemiş elektron spinlerinden kaynaklanan atomik manyetik momentlerdir. Bu manyetik momentler rastgele dizilmişlerdir. Harici bir manyetik alan uygulandığında bu momentler alan yönünde sıralanırlar. Bu durum dış manyetik alanın güçlenmesini sağlamaktadır.

Malzemelerin mıknatıslanma özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.19'da verilen B-H eğrisinin incelenip yorumlanması faydalı olacaktır. Histerezis eğrisi elde edilirken bobin akımının pozitif yönde malzeme doyuma gidene kadar artırılıp, negatif yönde ise azaltılarak eğrinin tamamlanmasına dikkat edilmektedir. Histerezis eğrisindeki apsis ve ordinat eksenleri arasında kalan alan, demire verilen ve demirden alınan enerji farkını ortaya koyar [35]. Burada y eksenini manyetik akı yoğunluğunu (B), x eksenini ise manyetik alan şiddetini (H) temsil etmektedir. Ayrıca manyetik malzemenin geçirgenlik katsayısı olan μ_0 , $B = \mu_0 H$ eşitliğinde 1 olarak kabul edilmiştir. Mıknatıs özelliği kazanmamış bir malzemenin manyetik akı ve manyetik alan şiddeti değerleri $B=0$ ve $H=0$ 'dir. Bu yüzden orijin noktası ilk başlangıç noktasıdır. Mıknatıslanmış bir malzeme manyetik alana maruz bırakıldığında malzemenin B-H eğrisi, amper-sarım şiddetine bağlı olarak 0-P grafiğini takip eder. Manyetik alanın etkisi bittiği zaman ise B-H grafiği AB eğrisi bağlı olarak elde edilir.

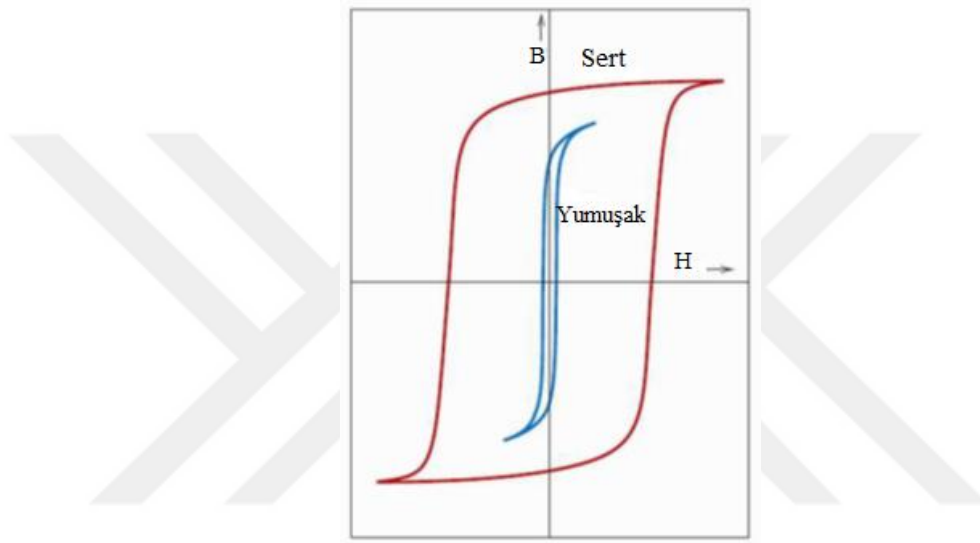


Şekil 2.19: Mıknatıslanmış bir materyale ait B-H eğrisi

Manyetik devrenin özelliğine, manyetik malzemenin yapısına ve kalıcı mıknatıstık özelliğine bağlı olarak çalışma noktası değişir. Kalıcı yüksek mıknatıs özelliği gösteren bir manyetik alanda kalan mıknatıs malzemesinin kutupları kısa devre olmuş demektir. Bu yüzden manyetik alan şiddetinin değeri $H=0$ olur. Buradan elde edilen akı yoğunluğunun B değeri artık mıknatısiyet akı yoğunluğu B_r değerini gösterir [36]. Mıknatısa daha önce uygulanan mmk şiddetinin zıttı yönde bir şiddet uygulandığında ikinci ve üçüncü bölgede bulunan BC noktaları arasında bir eğriyi izler. Daha sonra C noktasında bu mmk şiddeti ortadan kaldırıldığında CD boyunca bir eğri meydana gelir. D ve B noktalarında mıknatısın değerleri $(+B_r$ ve $-B_r)$ olmak üzere $(B=0, H=0)$ olduğu orjin noktasına geri dönmek için ters yönde bir kuvvetin uygulanması gerekmektedir. Ters yönde uygulanan ve H_c ile gösterilen bu kuvvete mıknatıslayıcı kuvvet denir. Orijin noktasına D noktasında iken $+H_c$, B noktasında iken $-H_c$ uygulanarak ulaşılabilir. Manyetik malzemenin karakteristiğinin belirlenebilmesi için önemli bir kısmı olan histerezis eğrisinin ikinci kısmına zıt mıknatıslanma eğrisi denir.

2.15.1 Manyetik malzemeler

Manyetik malzemeler yok edici kuvvet (H_c) özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Yani $H_c < 1000$ A/m olan malzemeler yumuşak malzeme, $50.000 < H_c$ olan malzeme ise sert malzeme olarak tanımlanabilir. Hem ferro hem de ferrimanyetik malzemelerin yumuşak veya sert olarak tanımlanması histerisiz eğrilerinin karakterine göre tayin edilmektedir. Histerisiz eğrisindeki B-H eğrisi malzemenin birim hacminde meydana gelen manyetik enerji kaybını ifade etmektedir. Şekil 2.20’de manyetik malzemenin sert-yumuşak olarak değerlendirildiği eğri verilmiştir.



Şekil 2.20: B-H eğrisine bağlı olarak malzemenin sertliğinin belirlenmesi

2.15.2 Yumuşak manyetik malzemeler

- $H_c < 1000$
- Mıknatıslanma özelliğini kolay kazanırlar.
- Mıknatıslanma özelliklerini kolay da kaybederler.
- Yüksek manyetik geçirgenliğe sahiptirler.
- Kalıcı mıknatıslanma özellikleri azdır.
- Manyetik alan kuvvetlerinin yok edici özelliği küçüktür.
- Transformatör ve elektrik motorlar gibi enerji kayıplarının az olması istenen cihazlarda kullanılır.
- Malzeme bileşenleri tarafından mıknatıslanma ve doygunluk akı yoğunlukları belirlenir.

- Duyarlılık ve koersitive H_c 'den ziyade yapısal değişikliklerden etkilenirler.

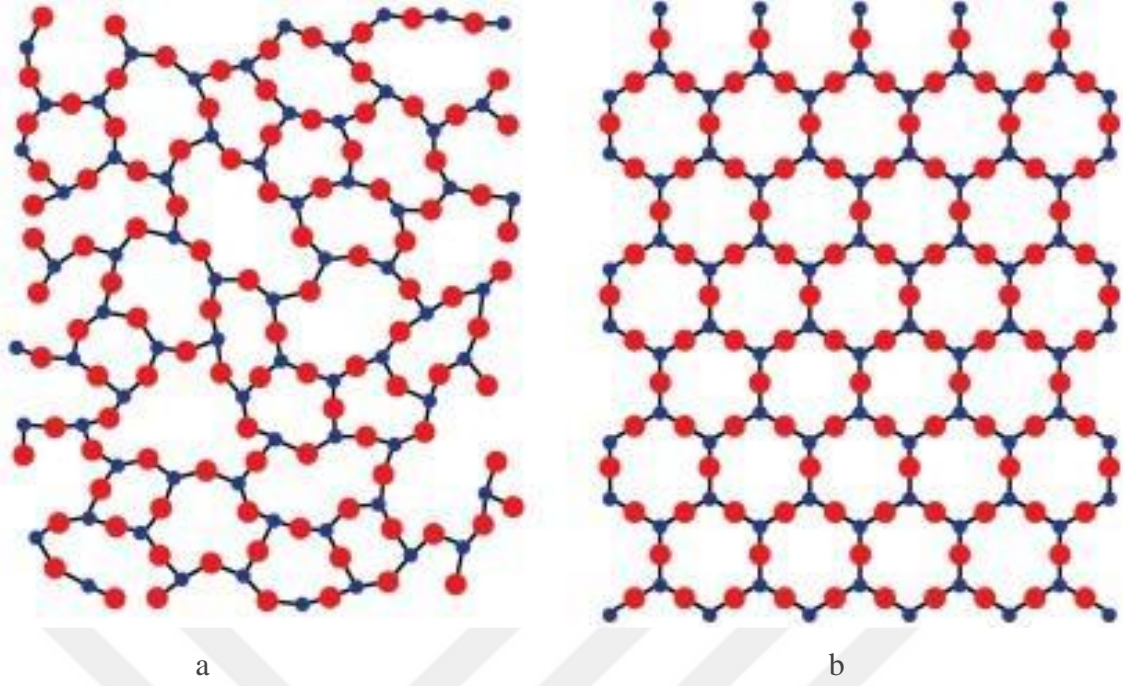
2.15.3 Sert manyetik malzemeler

- $50000 < H_c$
- Bu malzemeler, erken geçirgenlik ve geniş bir histerisize ek olarak yüksek bir remanens, koersivite ve doyunluk akı yoğunluğuna sahip olmalıdır.
- Manyetiklik özelliğinin kalıcılığı yüksektir.
- Manyetik alan kuvvetlerinin yok edici özelliği yüksektir.
- Histerezis eğrileri uzun ve geniştir.
- Malzemenin manyetik özellikleri yönünden sertliği B-H değerinin büyüklüğüne bağlıdır.
- Hoparlör ve TV gibi mıknatıslanma kaybına direnç gösterilmesi yerlerde kullanılmaktadır.

2.16 Elektriksel Çelikler

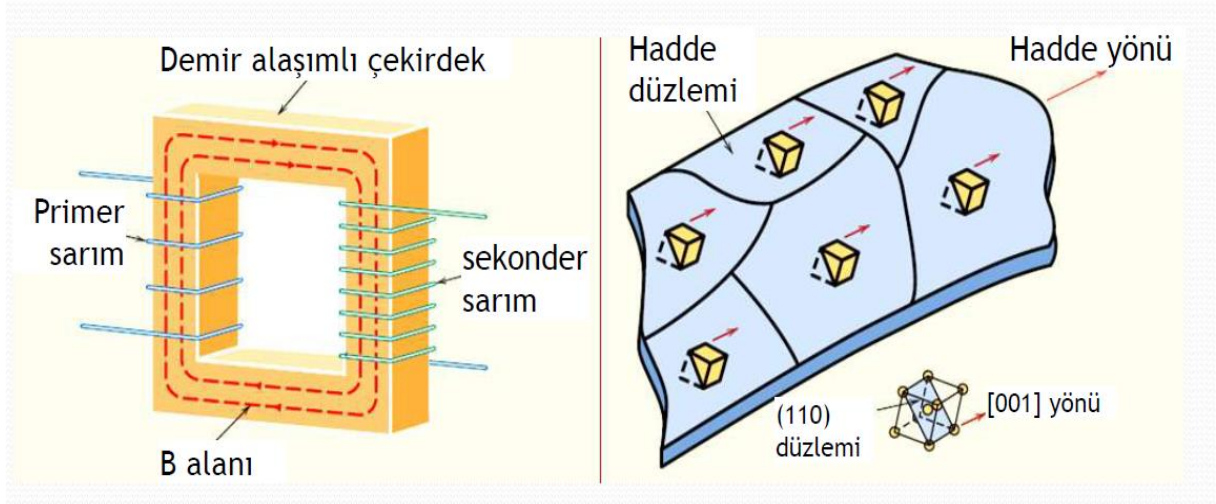
2.16.1 Silikonlu elektriksel çelikler

Yönlendirilmiş elektriksel çeliklerde silikon içeriği yaklaşık olarak %3.2 oranındadır. Elektriksel çeliğin dayanıklılığını arttırmak ve girdap akım kayıplarını azaltmak için elektriksel çeliklere silikon eklenmektedir. Aynı zamanda, bu çeliğe silikon eklenmesi histerezis kayıplarını da azaltır. Bunun yanında silikon elektriksel çeliğin faydalı ömrünün kılmasını önlemektedir. Ancak çeliğin içindeki silikon miktarının artması çeliğin daha kırılabilir hale gelmesine ve montajının zorlaşmasına neden olmaktadır. Atomların yerleşim düzenine bağlı olarak kristal ve amorf malzemeler olmak üzere katı maddeler iki ana kategoride incelenebilir. Kristal malzemelerde atomlar düzenli bir dağılımla meydana gelirken, amorf malzemelerde atomlar rastgele dağılım gösterir. Kristal malzeme ve amorf malzemelerin atom yapıları a Şekil 2.21-a ve Şekil 2.21-b sırasıyla sunulmuştur. Kristal malzemelerde tekrarlanan model mavi bir çizgi ile işaretlenmiştir, amorf malzemelerde ise mavi çizgi ile gösterilen desenler birbirinden farklıdır [37].



Şekil 2.21: a) Amorf malzemeye ait atomik yapı b) Kristal malzemeye ait atomik yapı

Manyetik alana paralel olacak şekilde üretilen ve hadde ile kolay mıknatıslanma yönü uygulanan elektrik saclarının çekirdek kayıpları sınırlıdır. Şekil 2.22’de elektriksel çeliğin hadde düzlemi verilmiştir.



Şekil 2.22: Elektriksel çeliğin hadde düzlemi

Silisli elektriksel çeliklerin tarihçesinin incelenmesi sonucu bu çeliklerin evrimsel aşamaları kısaca aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

- 1900 yıllarda demire silisyum katılmasının faydalı olduğu anlaşılmıştır.
- Demire eklenen %3 kadar Si hem geçirgenliği arttırmıştır hem de koersif kuvvetin azalmasını sağlamıştır.
- Kütle metal nüveler yerine levha sac plakalar kullanılarak girdap akım hatları kesilerek çekirdek kayıpları azaltılmıştır.
- Hidrojen tavlari aracılığıyla karbon oranı düşürülerek histerisiz kayıplari da azaltılmıştır.
- Zamanla nüve kayıplari 8W/kg seviyesinden 0.4W/kg seviyelerine düşürülmüştür.

2.16.2 Elektriksel çeliğin kalınlığı

Faraday Yasasına göre manyetik malzemelerde alternatif mıknatıslanma akımı, alternatif manyetizasyona sebep olur. Aynı zamanda girdap akımına da manyetik malzemede bir elektromotor kuvvetinin indüklenmesi yol açar. Girdap akımlari, Faraday'ın indüksiyon kanununa göre iletken içindeki değişen manyetik alan tarafından iletkenler üzerinde indüklenen elektrik akımı halkalarıdır. Girdap akımlari iletkenler içindeki kapalı halkalarda, manyetik alana dik düzlemlerde akarlar. Bu akımlar malzemenin kesitine göre kapalı bir döngü içinde akarlar. Bununla birlikte manyetik malzemedeki direncin ısınması sonucu güç kayıplarına neden olurlar. Manyetik malzemelerin kesit alanlarının en aza indirilmesi girdap akımlari düşürülür ve güç kaybı en aza indirilir. Kapalı bir halkada akan girdap akımı ana manyetik alana karşı, kendi mıknatıslanma alanını oluşturur. Bu etki-tepki Lenz yasası ile ifade edilmektedir. Manyetik malzemenin merkez kısımlari ana manyetik alanının ters etkisinden dolayı mıknatıslanmaz. Bu durum deri etkisi olarak tanımlanır. Deri etkisi, AC'nin neden olduğu değişen manyetik alanın meydana getirdiği karşılıklı girdap akımlarından kaynaklanmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için, elektriksel çelik aminasyonlari, malzemenin maksimum kullanımına uygun olarak ince bir yapısı olmalıdır. Transformatörlerin nüvesinde kullanılan elektriksel çelik laminasyonlarının kalınlığı genel olarak 0,3 mm civarındadır.

3. TRANSFORMATÖRLERİN NÜMERİK MODELLENMESİ

Transformatörlerin elektromanyetik hesaplanması ve analizi için yıllar boyunca sayısal ve analitik yöntemler geliştirilmiştir [38]. Transformatörün karmaşık yapısı nedeniyle hızlı ve doğru hesaplamalar geliştirilmiş yöntemlerin sahip olduğu önemli avantajlardır. Analitik yöntemlerdeki eksikliklerden dolayı, bilgisayar ve yazılım teknolojisindeki ilerlemeler sayesinde elektromanyetik problemlerin çözümü için sayısal yöntemlere yönelme artmış ve bu yöntemlerin geliştirilmesi sağlanmıştır. Günümüzde birçok sayısal analizi yöntemi mevcuttur. Bunların en önemli şunlardır [39]:

- Sonlu Elemanlar Yöntemi
- Sonlu Fark Yöntemi
- Sınırlı Eleman Yöntemi
- Manyetik Eşdeğer Devre Yöntemi
- Nokta Yansıtma Yöntemi
- Sonlu Hacimler Yöntemi

Manyeto statik-problemlerin çözümü için sayısal yöntemler arasında en popüler yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tercih edilmektedir. SEY, çoklu fizik problemlerinde birçok disiplinde (elektromanyetik, manyeto-statik, ısı iletimi, katı ve yapısal mekanik, akışkan dinamiği ve akustik gibi) diferansiyel denklemlerin çözümü için sayısal bir tekniktir. SEY'in temel amacı diferansiyel denklemlerle çözümü karmaşık olan fiziksel problemin yerine geçen ve denklemleri doğrusal sistemde daha kolay çözülebilen bir dizi alt problemlere bölünmesidir [40].

Son işlem basamağındaki analitik yaklaşımlar ile nümerik yöntemler analizlerden istenilen sonuçları elde etmek için birleştirilmelidir. Transformatörlerin elektromanyetik alan analizleri gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen yöntemlerin çoğu normal çalışma şartları altında kullanılmaktadır. Bu sebeple, normal çalışma koşullarında kabul edilen bazı basitleştirmeler dengesiz yüklerde geçerli olmayacaktır. Dağıtım transformatörlerinde dengesiz bir gerilim durumunda meydana gelebilecek önemli durumlarda biri, nüve üzerinde asimetric aşırı ısınma noktalarının meydana gelmesidir. Bundan dolayı, transformatörlerin çalışma performanslarını detaylı bir şekilde analiz edebilmek için dengesiz gerilim koşullarında trafonun metal kısımlarında meydana gelen nüve kayıpları, sargı kayıpları ve kaçak akıların neden olduğu girdap akım kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Bu

çalışmanın önemli amaçlarından biri bu kayıpların gerçeğe yakın bir doğrulukta hesaplanması amacıyla uygun yöntemlerin geliştirilmesidir. Transformatörlerin termal alan analizinin hesaplanması için bir döngüdeki ortalama güç kaybı gereklidir. Hesaplardan elde edilen sonuçlar trafonun termal alan analizinde kullanılır. Bu sebeple, bu tez çalışmasında dengesiz çalışma koşullarında trafonun nüvesinde oluşan kayıpları tahmin edebilmek için geleneksel kayıp hesaplama yöntemlerini adapte etmek amacıyla bazı yöntemler önerilmektedir. Bunun için 2D (iki boyutlu) ve 3D (üç boyutlu) Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), transformatörlerin modellenmesinde kullanılacaktır. Elektrik makinelerinin tasarımı için kullanılan SEY yazılım paket programlarının kullanılmasının avantajları aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

- Analizlerde; uygulamada görülemeyen fakat teorik olarak bilinen ayrıntıların görülebilir duruma getirilebilmesi.
- Tasarımda; prototipi tasarlamadan önce pratikteki modelleme, pazarlama süresinin ve maliyetlerin azaltılabilmesi.
- Optimizasyonda; tasarlanan cihazların veriminin ve performansının geliştirilebilmesine yardımcı olması.
- Manyetik alan gibi anlaşılması zor olan konuların görsel hale getirilerek eğitimi kolay hale getirmesidir.

Bu bölümde, dengeli çalışma koşullarındaki transformatörlerin bileşenlerini program ortamında modellemek, elektrik ve manyetik devrelerini birleştirmek için genel yaklaşımlar açıklanmıştır. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemini dayanan program kullanılarak transformatörün kayıplarının hesaplanması ve bu kayıpların hesaplanmasındaki zorluklar üzerinde durulmuştur.

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY'in temel mantığı, çözümü gerçekleştirilecek olan yapıyı sonlu sayıda elemana bölerek ve bu elemanları düğümler (mesh) vasıtası ile birbirlerine bağlayarak yaklaşık çözümler elde etmektir. Bu yöntem ile karmaşık mühendislik problemleri basite indirgenerek kontrol edilebilir parçalarla çözüm gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, bu yöntem mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Manyetik alan her sonlu elemanında kolay bir fonksiyon aracılığıyla tahmin edilir. Elektromanyetik alan denklemlerinin çözümü için SEY tercih edilen güçlü bir yöntemdir. Bu yöntem son yıllarda, transformatörlerin

modellemesi ve analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. SEY, nüve kayıpları, mıknatıslanma akımı, kaçak akı kayıpları, kaçak reaktansı, lumped modeli ve elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır [41]. Ancak, bu yöntem ile modelleme, analiz ve çözüm gerçekleştirmek için hem çok iyi bir bilgisayara hem de analizler için uzun bir zamana ihtiyaç var. Bu sebeple, bu yöntem daha çok araştırma ve doğrulama çalışmaları için kullanılmaktadır. Genel olarak transformatörler üç boyutlu ve karmaşık bir geometrik yapıya sahiptir. Bundan dolayı tasarım aşamasındaki transformatör modelinin bazı analizler için basitleştirilmesi kabul edilebilir. İzolasyon parçaları güç transformatörlerinin manyetik modellemesi için hava boşluğu olarak kabul edilebilir. Bu metallere ait manyetik özellikler pratikte kullanılan değerler gibi olmalıdır. Ayrıca, transformatörün istenilen bileşenlerinin detaylı olarak modellenmesi pratikte tasarlandığı gibi olması mümkün değildir. Tasarımda amaçlanan değerler simülasyon şartlarına göre uygun hale getirilmelidir. Aşağıda SEY'in avantajları verilmiştir [42,43]:

- SEY ile kararlı ve doğru çözümlerin gerçekleştirilmesi
- Girdap akımlarını ve nonlinear problemleri doğru bir şekilde hesaplaması ve analiz etmesi.
- Doğal sınır koşullarının fonksiyonel formülasyonlarla örtük olmasıdır.

Bu çalışmada transformatörleri modellemek için Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL programı kullanılmaktadır.

3.2 Bileşenlerin Sınır Şartlarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar yöntemi analiz için kullanıldığında analizi yapılacak olan bileşenin sınır koşullarının doğru belirlenmesi önemli parametrelerden biridir. Bu konuda DIRICHLET ve NEUMAN sınır koşulları problemin boyutunu önemli ölçüde küçültmek için uygun bir biçimde uygulanmalıdır. Bundan dolayı sorunu tanımlamak etkili ve doğru bir çözüme kavuşturmak için sınır şartlarını analize uygun ve doğru bir biçimde belirlenmelidir. Burada iki sınır şartı önem arz etmektedir. Bunlar sırasıyla aşağıda açıklanmıştır.

i. DIRICHLET Sınır Koşulu

Vektör-potansiyelin değeri, tasarlanan modelin sınırında tanımlanır.

$$A = A_0 \quad (3.1)$$

DIRICHLET sınır koşulu homojen değildir. Bu nedenle, çözüm yapılırken z-yönünde akıda herhangi bir varyasyon olmadığı kabul edilmektedir. İki sınır arasında öngörülen bir akı için aşağıda verilen eşitlik kullanılmaktadır.

$$\oint B \cdot ds = \oint A \cdot dl = (A_2 - A_1) \quad (3.2)$$

Burada L iki sınırın birbirine olan mesafesini ifade etmektedir.

ii. NEUMAN Sınır Koşulu

NEUMAN sınır koşulu, A'nın normal türevini sınır boyunca belirtir. En çok kullanılan yöntem aşağıda verilen alanın sınıra dik homojen şeklindedir.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (3.3)$$

iii. Açık Sınır Koşulu

Sınırsız bir çözüm aralığını tahmin etmek amacıyla bu sınır koşulu kullanılabilir [29]. Bu sınır koşulu aşağıda verildiği gibidir.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial n} + \frac{c}{\mu_0 R_0} A = 0 \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte C bir sabittir. (değeri 1'dir genel olarak) R_0 Çözelti bölgesinin dış yarıçapıdır (metre).

3.3 ANSYS@MAXWELL Programı

MAXWELL programı, ANSYS yazılım paket programının bir alt programıdır. ANSYS@MAXWELL, elektromekanik ve elektromanyetik bileşenlerin performansını sanal ortamda tahmin etmek için kullanılan simülasyon ve yazılım programıdır. DC Manyetik, AC manyetik, geçici rejim ve elektrik alan gibi dört tane çözücü tipi içeren yazılım programıdır. Bu çözücü modülleri hem zaman düzleminde hem de frekans düzleminde problemleri çözmek amacıyla tasarlanmışlardır. Tasarlanan her modelin düşük frekanslı bileşenlerin elektromanyetik veya elektrik davranışın hesaplamak için Üç boyutlu-3D ve iki boyutlu-2D SEY'i ve uyarlanabilen otomatik çözüm ağı yöntemleri kullanılmaktadır. ANSYS@MAXWELL-3D yazılım programı ile tork, kondansatör, bobin, direnç ve empedans gibi bütün elektromanyetik alan parametrelerinin çözümü için kullanılabilir. Ayrıca, elektromanyetik alanları 3D olarak görselleştirmek, bunların durum uzay modellerini oluşturmak ve bu modellerin optimize tasarımlarını çözmek için kullanılabilir.

3.3.1 Maxwell denklemlerinin diferansiyel şekli

Maxwell denklemleri, zamanla değışiklik göstere elektromanyetik alanlar için aşağıda verildiği gibi yazılabilir;

Faraday İndüksiyon Kanunu:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

Gauss Alan Kanunu:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3.6)$$

Amper Akım Kanunu:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.7)$$

Gauss Elektrik Alan Kanunu:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3.8)$$

şeklindedir. Burada;

E elektrik alan şiddetini (Volt/metre)

D elektrik akı yoğunluğunu (Coulomb/m²)

H Manyetik alan şiddetini (Amper /metre)

B manyetik akı yoğunluğunu (Weber/m²)

J elektrik akım yoğunluğunu (Amper/m²)

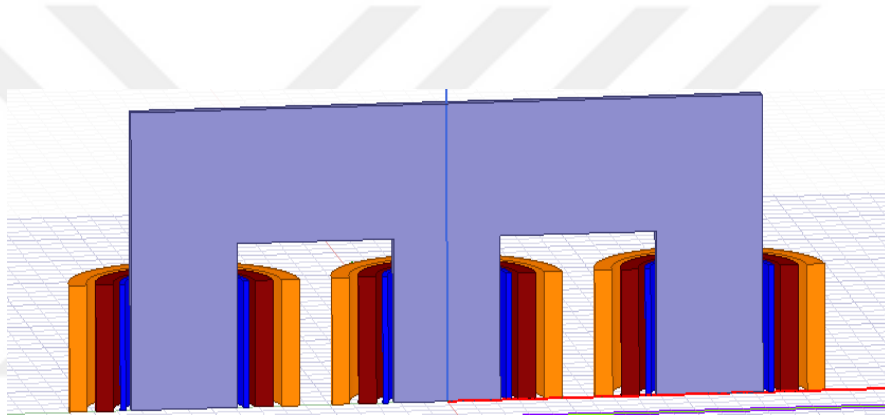
ρ ise hacimsel elektrik yükünü yoğunluğunu ifade etmektedir.

Yukarıda verilen değerler vektörel büyüklüklerdir. Bu eşitlikler ile manyetik alanın zaman bağlı olarak elektrik alan oluşturduğu ve elektrik alanında zamanla bir manyetik alan oluşturdu ifade edilmektedir.

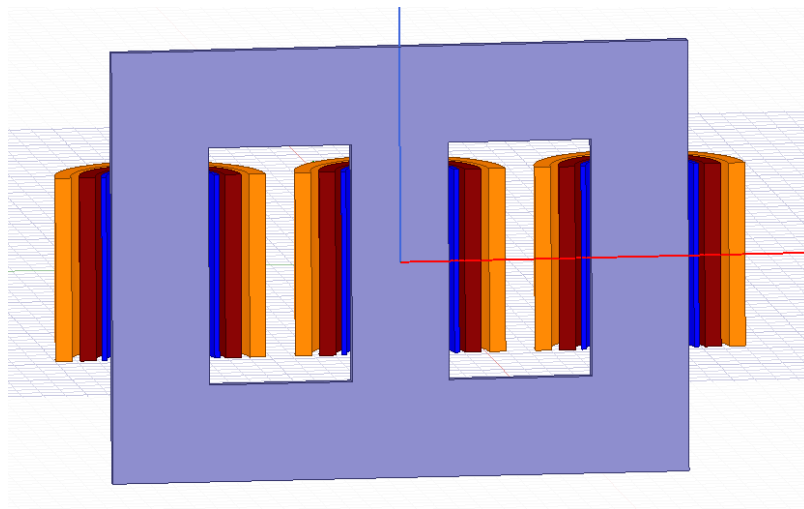
3.4 Transformatörün Geometrisi ve Simetrisi

Transformatörler genel olarak üç boyutlu bir yapıya sahiptirler. Tasarım aşamasında da genel olarak 3D tasarlanırlar. Bu sebeple, doğru ve gerçeğe yakın bir simülasyon ve analiz için transformatörün 3D modeli gerekmektedir. Simülasyonun amacına bağlı olarak tasarlanan modelin parametreleri dikkate alınır. Tasarlanan 3D modelin analiz süresi çok

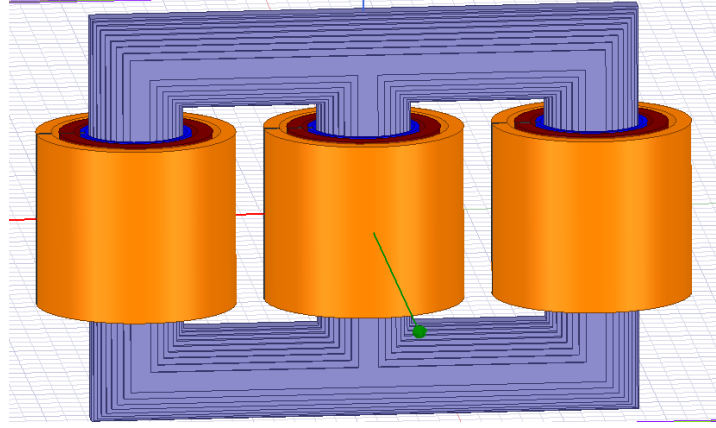
uzun olmaktadır. Bu süreyi azaltmak için transformatör modelinin simülasyon programının izin verdiği simetri özelliğinin kullanılması önemli ve faydalı bir yöntemdir. Modelin simetrisi gerçek model geometrisinin bir kısmını modellemek için normal ve paralel sınır koşulları ayarlanarak uygulanır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de uygulanan simetri özelliğine bağlı olarak farklı transformatör modelleri sunulmuştur. Analiz süresini kısaltmanın diğer bir yöntemi ise transformatör modelinin mesh sayısını önemli ölçüde azaltmak için modeli 2D olarak tasarlayıp analiz etmektir. Bazı uygulamalarda bu yöntem kullanılabilir. 2D model aksiyel düzlemsel simetrisini kullanarak analiz gerçekleştirir. 2D modelleme için uygun doğru sınır şartlarının ayarlanması gereklidir. Fakat bazı durumlarda 3D Model doğru sonuçlar için çok önemlidir. Aksiyel ve düzlemsel olarak 2D model örnekleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’de verilmiştir.



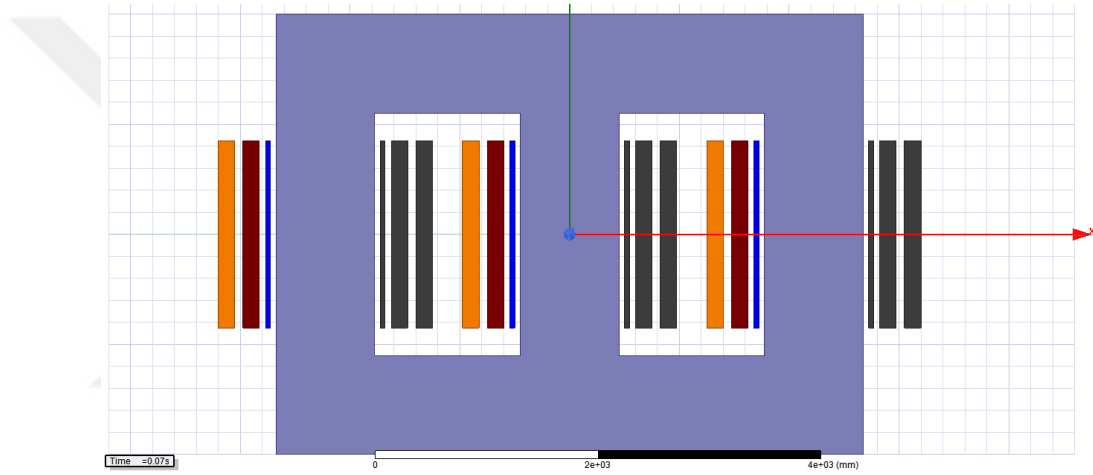
Şekil 3.1: Üç bacaklı ve üç fazlı transformatör modelinin 1/4 simetrisi



Şekil 3.2: Üç bacaklı ve üç fazlı transformatör modelinin 1/2 simetrisi



Şekil 3.3: Transformatörün 3D tam modeli



Şekil 3.4: Transformatörün 2D modeli

3.5 Transformatörlerin Genel Yapısı

Bir güç transformatörü içerdiği farklı bileşenleri ile karmaşık bir yapıdan meydana gelmektedir. Transformatöre ait bu karmaşık bileşenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Transformatör tankı
- Nüve
- Sargılar ve izolasyon düzenekleri
- Kademe değiştirici
- Buşing ve akım trafoları
- Yalıtım yağları

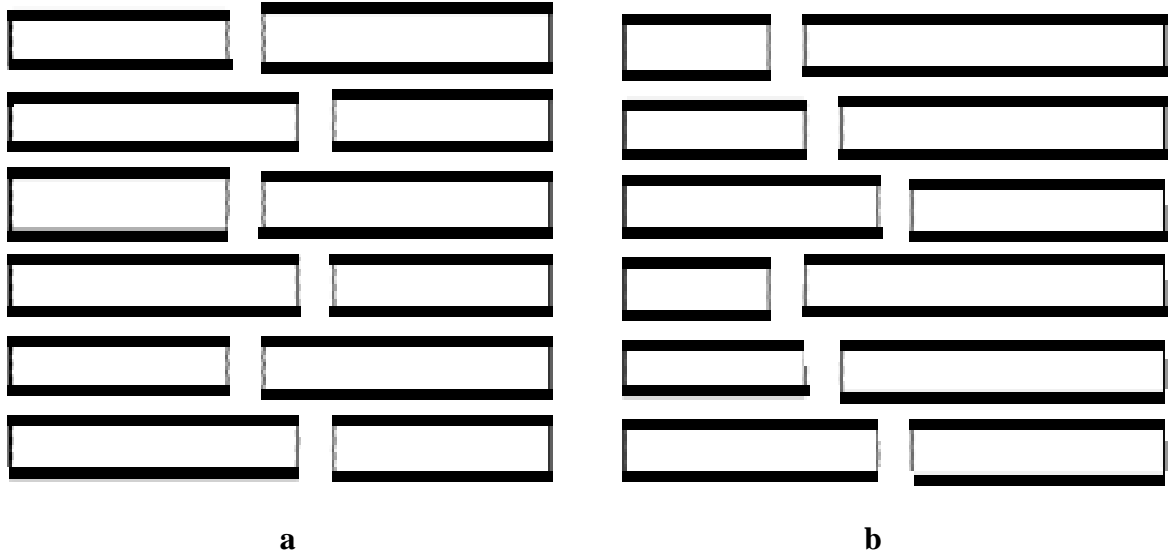
- Soğutma sistemi
- Koruyucu teçhizatlarıdır.

Transformatörlerde genel olarak iki veya daha fazla eş merkezli sargılar, her faz için nüve bacaları üzerinde sarılır. Elektromanyetik analizlerde, nüve, sargılar diğer metal parçaların bileşenleri önemli parametrelerdir. Bu parametreler ve elektromanyetik alan analizleri devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

3.5.1 Transformatörün nüve modeli

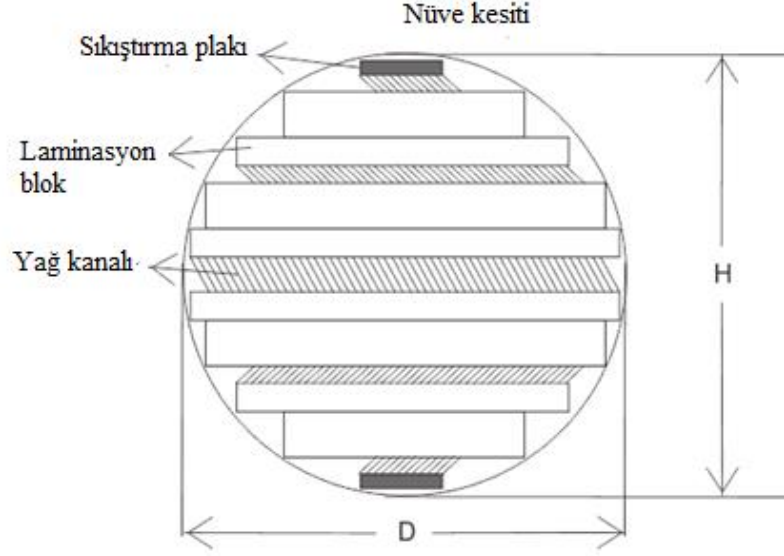
Manyetik nüve transformatörlerin en önemli bileşenlerinden biridir. Sargılar arasında meydana gelen akı bağı nüve tarafından düşük relüktanslı kapalı manyetik bir devre ile iletilmektedir. Nüve laminasyonları yönlendirilmiş silisli saclardan meydana gelmektedir. Bu manyetik laminasyonlar daha önceki bölümlerde anlatılmıştır. Transformatörün nüvesinde kullanılan manyetik materyaller, diyamanyetik malzemeler, paramanyetik malzemeler ve ferromanyetik malzemeler olarak üç farklı gruba ayrılmaktadır. Güç transformatörlerinde nüvesinde yaygın olarak kullanılan ferromanyetik malzemelerin dış manyetik alandaki duyarlılıkları yüksektir. Bu malzemelerin önemli bir manyetik özelliğe de histerezis eğrisidir. Bu eğri mıknatıslanma kuvveti (H) ile indüklenen manyetik akı yoğunluğu (B) arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir. Manyetik bir malzemenin özellikleri, B - H eğrisi (histerezis eğrisi) ve Lambda-I eğrisi (transformatör nüvesindeki toplam akı lambda olarak adlandırılmaktadır) ile belirlenmektedir. Nüve kaybı genel anlamda iki kısımdan ibarettir. Bunların birincisi histerezis eğrisi alanına bağlı olarak değişen histerezis-kayıdır, diğeri ise laminasyon malzemesinin kalınlığına bağlı olan girdap akımı kaybıdır. Ferromanyetik malzemeler, belli bir yönde manyetize- olduğunda ve manyetik-alanın etkisi ortadan kaldırıldığında, malzeme kalıcı bir mıknatıslanma meydana gelir. Meydana gelen bu artık mıknatısiyeti sıfırlamak için zıt yönde bir mıknatıs kaynağı kullanılmalıdır. Nüve oluşturulurken kullanılan malzemenin kalitesi transformatörün ömründe ve çalışma performansında önemli bir rol oynamaktadır. Transformatörün nüvesinin mıknatıslanma akımı ve yüksüz çalışma koşullarındaki kayıpları nüve malzemesi ve yapı kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda, güç transformatörlerinde enerjilendirme akımı gibi geçici durumlar, nüve malzemelerinin nonlinear ve histerezis özelliklerine bağlıdır. Nüve laminasyon sac kalınlığının yaklaşık 0,3 mm veya daha ince silisli sac laminasyonu ile dizildiği daha önceki bölümde açıklanmıştı. Modern güç transformatörlerinde nüve malzemesi olarak yönlendirilmiş silisli saclar kullanıldığından bu transformatörler daha iyi

bir manyetik özelliğe sahiptirler. Transformator geometrisi çok karmaşık olduğundan çok mesh uygulanması gerektirmektedir. Bu durum, bu karmaşık yapıların sonlu elemanlar yöntemiyle analizini zor kılmaktadır. Bu nedenle, modellerin analizinde nüve yapısını basitleştirmek ve analizi kolaylaştırmak için bazı yöntemler mevcuttur. Bunların birincisi, nüvenin deri kalınlığı, laminasyon kalınlığına göre daha büyük olduğundan girdap akımları etkisi akı yoğunluğu dağılımlarına göre ihmal edilebilir. Bir diğeri ise modern güç ve dağıtım transformatörlerinin çoğunlukla birkaç basamakta adım-lap nüve sacları ile yapılmış olmasıdır. Bacakların ve boyundurukların birleştirildiği noktaya bağlantı noktası olarak adlandırılmaktadır. Bindirme (Overlap) boyu, adımlar ve kat başına levha sayısı, bindirme parametreleridir. Nüve eklemleri adım sayısına göre ikiye ayrılmaktadır. Bunların birincisi bindirme ikincisi adım lap olarak adlandırılabilir. Şekil 3.5'te bindirme ve adım-lap nüve eklemi kesitlerini gösteren şekil verilmiştir.



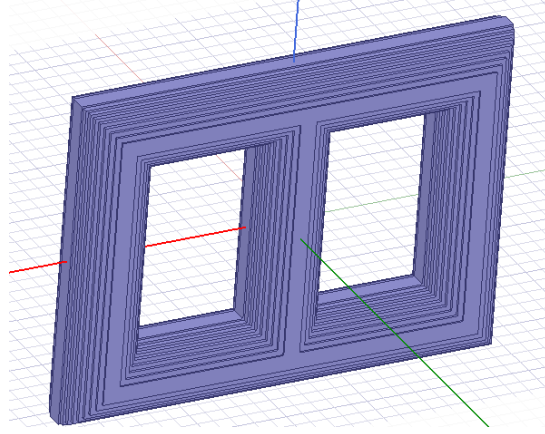
Şekil 3.5: a) Bindirme tipi nüve eklemi, b) Adım lap tipi nüve eklemi

Şekil 3.6'da görüldüğü üzere yaklaşık olarak bir daire şeklinde olan nüve basamaklı bir kesitle yapılmaktadır.



Şekil 3.6: Nüve kesiti

Şekil 3.7’de 3 fazlı ve 3 bacaklı bir transformatör modelinin nüvesi verilmiştir. Bacakların her biri üst ve alt boyunduruklarda birleştirirler. Nüve manyetik devresini bu şekilde tamamlamaktadır. Boyundurukların bacakların kesit alanlarının birbirine eşit olması Bu modelin bir özelliğidir. Bu özellikten dolayı transformatör doğrusal bölgede çalıştığında, boyunduruk ve bacaklardaki akı birbirine eşit olur. Sargılara sinüzoidal gerilim uygulandığı için bacaklardan akan akı da sinüzoidal olmaktadır. Dengeli yük dağılımı durumunda, bacaklardaki akılar eşit olur ve simetriden dolayı faz açıları da 120° olur. Bu durum alt ve üst boyunduruklardaki akıların birbirini elimine etmesine sebep olur. Akının yüksek relüktanslı hava boşluğundan geçip tekrar nüveye gelmesi dengesiz gerilim durumunda olmaktadır. 3 fazlı 5 bacaklı transformatörler dengesiz gerilim koşullarındaki bu problemi yok etmek için tasarlanmalıdır. Bu trafolarla üç bacaklı trafolarla olduğu-gibi, üç faza ait sargılar trafoyun ortadaki bacaklarına sarılır. Yan bacakların kesit alanları ortadaki bacaklara oranla daha küçüktür. 3 bacak transformatörlere oranla 5 bacak transformatörlerin ana boyunduruğun kesit alanları daha küçüktür. 5 bacak transformatörlerdeki iki yan boyunduruk transformatör dengesiz gerilim durumuyla karşılaştığında veya ana boyunduruklar doyuma gitmesin diye akının bir kısmı buradan taşınır. Beş bacaklı transformatörlerdeki akı değişimi sinüzoidal değildir, çünkü orta bacaklardaki akının boyunduruklara akması için iki alternatif yol mevcuttur. Miknatıslanma akımları nüvelerdeki yapısal farklar nedeniyle üç bacaklı ve beş bacaklı nüveler için aynı değildir.



Şekil 3.7: Üç fazlı ve üç bacaklı bir transformatör modelinin nüvesi

Nüve malzemesinin iletkenliği sıfır olarak ayarlanır. Önceden de belirtildiği üzere girdap akımının oluşturduğu etkisi dikkate alınmamaktadır. Nüve tasarımı kullanılan malzemenin geçirgenlik tensörü aşağıdaki gibi olmaktadır:

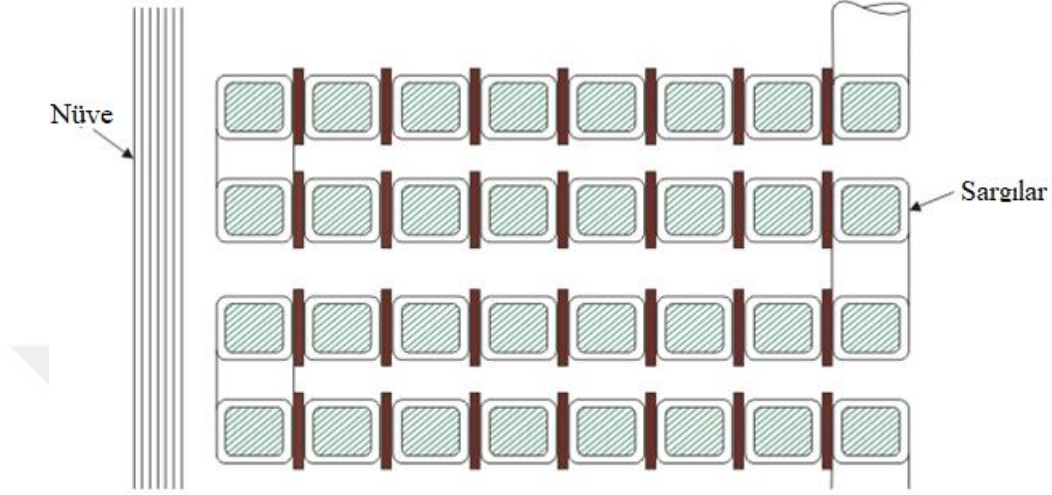
$$\mu_r = \begin{bmatrix} \mu_{r,x} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{r,y} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{r,z} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Her yön için farklı olan bir B-H eğrisi ile geçirgenlik belirlenebilir. Malzemenin aşırı doygunluk durumunda histerezis etkisi de ihmal edilebilir. ANSYS@MAXWELL simülasyon programında nüve kaybının hesaplanması için işlem bittikten sonraki basamakta histerezis etkisi de göz önünde bulundurulurak nüve kayıpları hesaplanır.

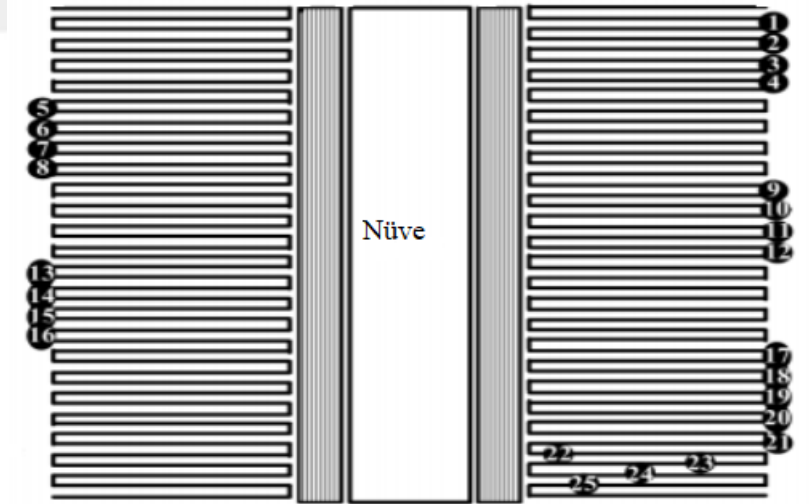
3.5.2 Transformatörün sargı modeli

Uygulamalar için çok dönüşlü iletkenleri barındıran sargılar ile gerçekleştirilmiştir. Bobinler için katmanlı ve disk sargı yöntemi olmak üzere iki çeşit sargı tipi kullanılmaktadır. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9’da verildiği gibi bu sargı tiplerinin ikisinde de bobinler silindirik yapıdadır ve kesitleri dikdörtgen şeklindedir. Uygulama şekline bağlı olarak bobinlerin her birisinin kendine göre avantajları mevcuttur. Bu sargıların tercih edilmesinde bazı önemli faktörler dikkate alınmaktadır. Bunlar kısa devre durumundaki mekanik dayanıklılık, yıldırım darbesi gibi ani aşırı yüksek gerilime karşı dayanma kabiliyeti, soğutma kolaylığı ve ekonomik tasarım gibi faktörlerdir. Sargı iletkeninin kesit alanı, girdap akımlarının neden olduğu düzensiz akım yoğunluğunun dağılımını önlemek amacıyla tasarlanmaktadır. Ancak, bu çalışmada frekans aralığı nedeniyle, sargının bütün kesitinde akım yoğunluğu homojen bir

dağılıma sahiptir ve girdap akımları kaçak akı dağılımını etkilememektedir. Bundan dolayı, ANSYS@MAXWELL programı uygulamalarında sargılar, akım yoğunluğunun homojen bir dağılım göstermesi amacıyla katı silindirik bir nesne olarak tasarlanır. Sargının iletkenliği bir 1, geçirgenliği ise sıfır şeklinde ayarlanır.



Şekil 3.8: Disk tipi bobin



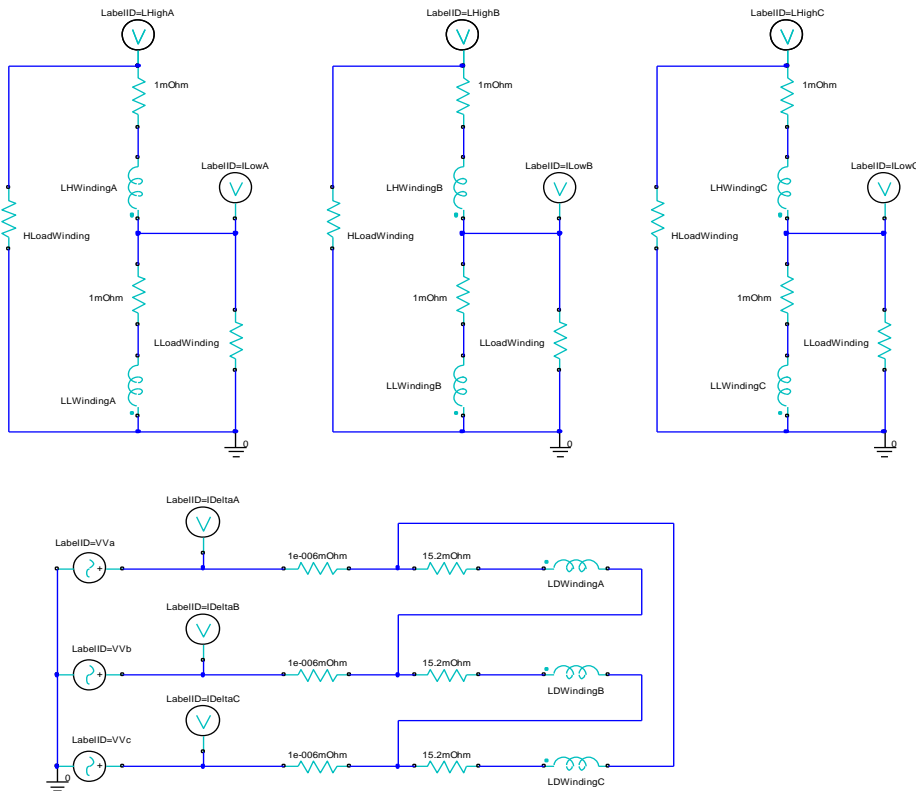
Şekil 3.9: Katman tipi bobin

İzole edilmiş dikdörtgen kesitli bakır iletkenler güç transformatörlerin sargılarında kullanılır. Girdap akım kayıplarını azaltmak için iletkenler genel olarak küçük çaplı iletkenler haline dönüştürülmektedir. Transformatör sargılarında paralel iletken kullanıldığında, meydana gelen kaçak akıdan dolayı indüklenen gerilimi yok etmek

amacıyla sargı boyunca yer alan iletkenler çaprazlama edilmelidir. Eğer iletkenler transpoze edilmezse, indüklenen gerilimler dairesel akımlar oluşturarak ekstra kayıplara neden olurlar.

3.6 Modelin Uyarma Yöntemi

Program ortamında modellenen trafonun yüklenmesi, trafonun primer veya sekonder sargılarından verilen gerilim ile yapılır. Uyarma iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Birincisi sargılara program ortamında önceden tanımlanmış gerilimi uygulamaktır. Bu uyarda, uygun ve kabul edilebilir bir manyetik alan elde edildiğinden bu yöntem daha çok statik veya harmonik analizler için kullanılır. İkincisi, sonlu elemanlardaki alanlar, sargılarla dış bir elektrik devresine bağlanır. Bu yaklaşım, genellik olarak geçici zaman simülasyonları için gereklidir. Uyarmalar aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi yapılabilmektedir.



Şekil 3.10: Üç fazlı trafo modelinin harici uyarma devresi

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

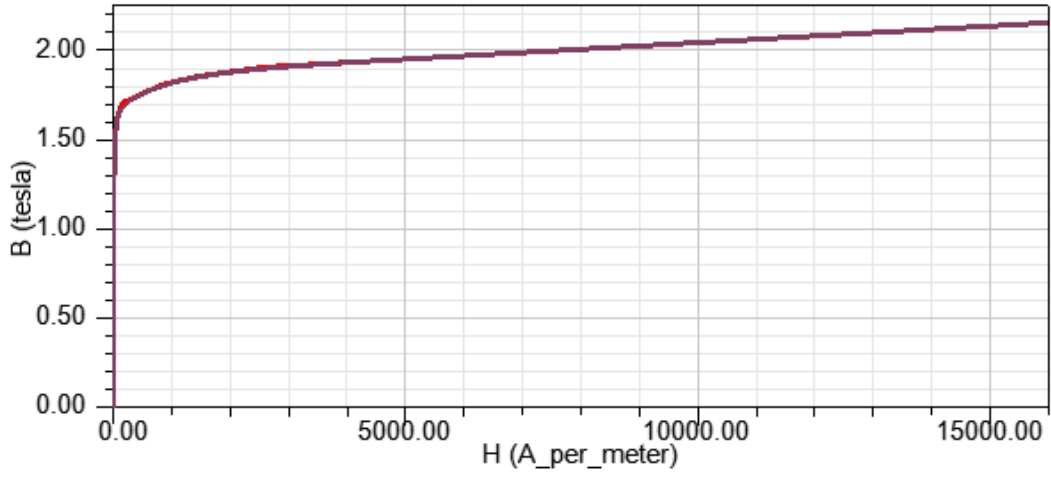
Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name			
V0	0	V	0V
Va	$V_{mx}*(1-\exp(-50*time))*\cos(2*pi*50*time+(4/3*pi))$		*****
VFreq	50		50
Td	0		0
Df	0		0
Phase	-120	deg	-120deg
AF	0		0
Type	TIME		
Status	Active		
Info	VSin		

Şekil 3.11: Üç fazlı trafo modelinin programın ara yüzündeki uyarma devresi

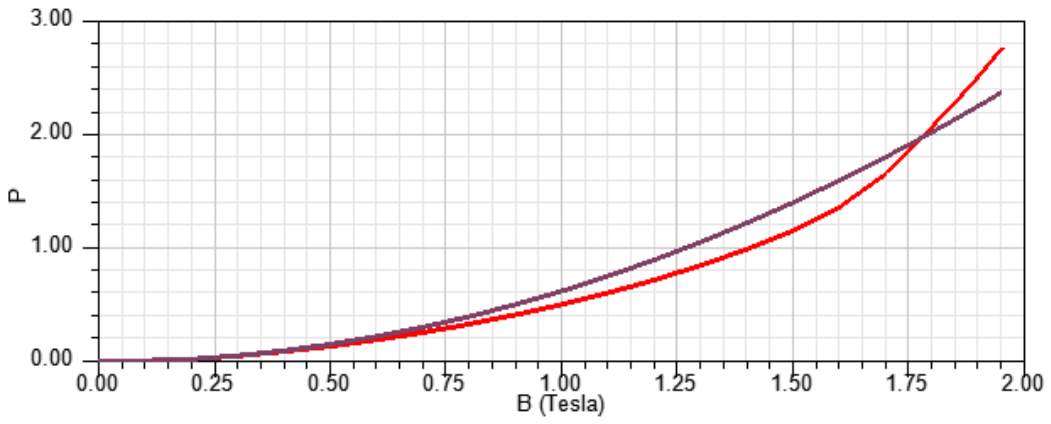
3.7 Modelin Elektromanyetik Hesaplamaları

3.7.1 Nüve kayıpları

Nüve kayıplarının hesaplanması transformatörlerin tasarım sürecinin en zor işlemlerden biridir. Bu durumun birinci sebebi nüve kayıpları ile manyetik akı yoğunluğu arasındaki karmaşık ilişkidir. Başka bir sebebi de manyetik akı yoğunluğunun sabit olmayıp akı dağılımının zamanla değişkenlik göstermesidir. Transformatörün nüvesinde kullanılan malzemenin özellikleri manyetik akı yoğunluğunun dalga formu ile oluşan kayıplar arasındaki bağıntıyı belirler. Nüvenin nonlineer davranışı ve üç boyutlu karmaşık geometrisinden dolayı nüve kayıplarının detaylı hesaplanması için bir sayısal yöntem gereklidir. Bu çalışmada kullandığımız nüvenin 50 Hz frekanstaki B-H ve B-P eğrisi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te sunulmuştur. Modellemede ve tasarımda kullanılan nüve levhalarına ait teknik bilgiler ve değerler Şekil 3.14'te verilmiştir.



Şekil 3.12: Nüve materyaline ait B-H eğrisi



Şekil 3.13: Nüve materyaline ait B-P eğrisi

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de B-P ve B-H asıl eğrileri kırmızı renk ile gösterilmiştir. Diğer eğriler regresyon eğrileridir.

Core Loss Unit:	w/kg			
Mass Density:	7650	kg/m ³	w/m ³	w/kg
Frequency:	50	Hz	Kh:	65.489
				0.00856065
Thickness:	0.27	mm	Kc:	0.599578
				7.83763e-05
Conductivity:	5000000	S/m	Ke:	0
				0

Şekil 3.14: Tasarımda kullanılan nüve levhalarına ait bilgiler

Transformatör imalatçıları nüve kayıplarının hesaplanmasında genel olarak deneysel yöntemleri kullanmaktadır. Normal çalışma şartlarında bu yöntemler uygun yöntemlerdir.

Anormal çalışma koşullarında, dengesiz gerilim durumu gibi, nüve beklenmedik olaylar meydana gelir. Bu sebeple, nüve kayıplarını hesaplamak ve meydana gelebilecek beklenmeyen durumlar için sayısal bir hesaplama yöntemi gerekmektedir. Manyetik malzemelerin kayıp mekanizmaları oldukça karmaşıktır. Bundan dolayı SEY analizi kullanılarak transformatör kayıplarının doğrudan hesaplanması mümkün değildir. Bu sebeple, kayıpların hesaplanması iki adımda gerçekleştirilebilir. Birinci adımda, nonlinear SEY modellemesi kullanılarak nüvedeki manyetik akı yoğunluğunun dalga şekli elde edilir. İkinci adımda ise akı yoğunluğuna bağlı olarak nüvedeki her bir bölüm için kayıplar elde edilir. Toplam kayıplar, nüvenin bütün hacmi boyunca meydana gelen kayıpların birleşimi ile elde edilir. SEY ile nüve kayıpları aşağıdaki adımlar izlenerek hesaplanır:

- Nüvenin tüm hacminde sonlu sayıda nokta tanımlanır. Tanımlanan noktalar düğüm noktaları olarak isimlendirilir.
- Düğümlerin her birisindeki akı yoğunluğu değeri, belirlenmesi gereken bir değişken olarak gösterilir.
- Mevcut bölge, elemanlar olarak isimlendirilen sonlu sayıdaki alt bölgelere ayrılır. Bu elemanlar ortak düğüm noktalarında birbirlerine bağlanır ve birleşerek bölgenin şeklini meydana getirirler.
- Elemanların her birisindeki akı, düğüm akıları kullanılarak tanımlanan bir polinom ile gösterilir. Elemanların her birisi için farklı bir polinom tanımlanır ve elemanlara ait polinomlar eleman sınırlarında süreklilik sağlayacak şekilde seçilir. Düğüm değerleri akı yoğunluğu dağılımını en doğru biçimde sağlayacak şekilde hesaplanır. Oluşan matrise ait çözüm vektörü polinomların katsayılarını içermektedir. Cebirsel denklemlerin çözüm vektörü ise düğüm akı yoğunluğunu belirler.
- Elde edilen tüm veriler aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak, demir kaybının nihai sonucu bulunur.

$$P_{sin} = K_h B_{max}^{a.B_{max}^2 + b.B_{max} + c} f + K_{eddy} B_{max}^2 f^2 + 8.76 * K_{exc} B_{max}^{1.5} f^{1.5} \quad (3.10)$$

P_t olarak tanımlanan laminasyonlu çelik nüve kayıpları, üç bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar, statik histerezis kayıpları (P_h), klasik girdap akım kayıpları (P_e) ve aşırı girdap akımı (P_{exc}) kayıplarıdır.

$$P_t = P_e + P_h + P_{exc} \quad (3.11)$$

Histerezis döngüsünün alanı histerezis kaybını ifade etmektedir. Bu kayıplar, ferromanyetik malzemelerin manyetik yapısının mikroskobik ölçekli davranışlarından kaynaklanmaktadır. Histerezis enerji kaybı (P_h), manyetik akı yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Farklı model ve algoritmalar ile histerezis eğrisi elde edilmekte ve statik histerezis kayıpları hesaplanmaktadır. Bu modeller, bazı kısıtlamalar içerir ve nispeten daha ağır hesaplama işlemlerine ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca, bu yöntemler sonlu elemanların üç boyutlu modelinde kullanıldığında on binlerce nüve elemanı içerir ve çözülmesi neredeyse imkânsızdır. Bundan dolayı, ortalama güç kayıplarının doğru hesaplanması için daha hızlı ve basit yöntemler gereklidir. Simetrik statik histerezis döngüleri için, maksimum akı yoğunluğu ile histerezis kaybı arasındaki ilişki (P_h), aşağıda verilen eşitlikler ile ifade edilebilir:

$$P_h = K_h B_{max}^{a.B_{max}^2 + b.B_{max} + c} f \quad B_{max} < B_{max,major} \quad (3.12)$$

$$P_h = P_{h,major} \quad B_{max} \geq B_{max,major} \quad (3.13)$$

Burada, B_{max} maksimum akı yoğunluğunu, K_h , a, b ve c sabit katsayıları ve f ise frekansı tanımlamaktadır. Ana döngüdeki manyetik akı yoğunluğunun maksimum manyetik akı yoğunluğundan daha yüksek olduğu bölgelerde, histerezis döngü eğrisi ters yönde çevrilebilir. Bu sebeple, döngü alanı o bölge için sıfır kabul edilir. İletkendeki manyetik akı değişimi, akış yönünde girdap akımlarının indüklenmesine neden olur. Bu akımlar lamine çeliklerde omik kayıpları oluşturur. Burada frekans aralığı, anlık klasik girdap akım kaybı için aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$P_e(t) = \frac{1}{\rho} \frac{1}{12} \sigma d^2 \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (3.14)$$

Bu eşitlikte σ iletkenlik, d lamine çelik kalınlığı ve ρ , lamine çeliğin yoğunluğudur. Nüvenin toplam kayıpları, histerezis ve klasik girdap akımları kayıplarının toplamından daha büyüktür. Kayıplardaki bu fark aşırı kayıplardan kaynaklanmaktadır. Bu aşırı kayıplar da değişken manyetik akı nedeniyle meydana gelen girdap akımlarından kaynaklanır. Bu konuda BERTOTTININ kayıplar ile ilgili istatistik teorisine dayanarak ani aşırı güç kaybı aşağıdaki eşitlik ile açıklanabilir [43]:

$$P_{exc}(t) = K_{exc} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} \quad (3.15)$$

Burada K_{exc} aşırı kayıp katsayısıdır. Bu sebeple, rastgele akı yoğunluğunun dalga şekli ile toplam güç kaybı elde edilebilir.

$$p = p_h + \frac{1}{T} \int \frac{1}{\rho} \frac{\sigma d^2}{12} \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt + \frac{1}{T} \int K_{exc} \left| \frac{dB}{dt} \right|^{1.5} dt \quad (3.16)$$

Histerezis ve aşırı kayıpların katsayılarını hesaplamak için gerekli olan veriler genellikle çelik imalatçıları bilgi formunda bulunmaktadır. Ayrıca bu veriler gerektiğinde kolayca ölçülebilir. Sinüzoidal akı yoğunluğu dalga formu için toplam kayıp P_{sin} ifadesi ile elde edilebilmektedir:

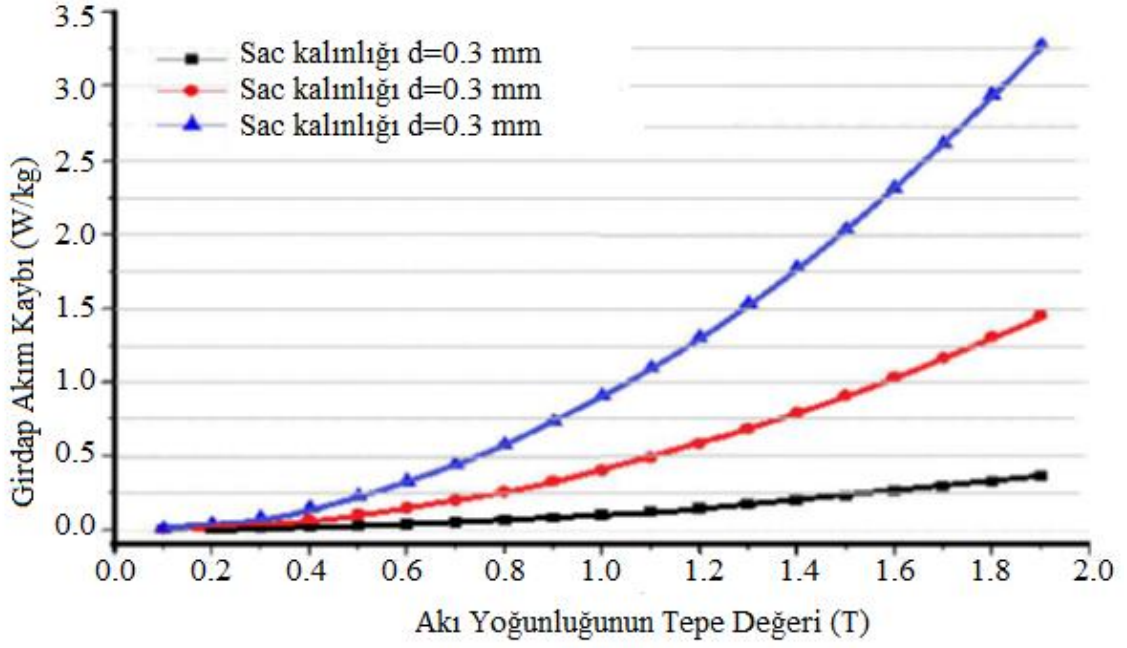
$$P_{sin} = K_h B_{max}^{a.B_{max}^2+b.B_{max}+c} f + K_{eddy} B_{max}^2 f^2 + 8.76 * K_{exc} B_{max}^{1.5} f^{1.5} \quad (3.17)$$

$$k_{eddy} = \frac{\sigma \pi^2 d^2}{6\rho} \quad (3.18)$$

K_{exc} ve K_e katsayılarının değerleri belli olduğu zaman histerezis ve nüve kaybı verilere dayanarak tahmin edilebilir. Histerezis kayıplarının katsayıları, dört ayrı akı yoğunluğu ile elde edilen histerezis kayıplarından aşağıdaki-lineer denklem sistemi çözülerek bulunmaktadır.

$$\log\left(\frac{P_{h,i}}{f}\right) = \log(k_h) + a. B_{max,i}^2 \cdot \log(B_{max,i}) + c. B_{max,i} \cdot \log(B_{max,i}) + b. B_{max,i} \cdot \log(B_{max,i}) \quad (3.19)$$

Şekil 3.15'te laminasyonların farklı kalınlıkları için girdap akım kaybı değerleri verilmiştir. Şekil 3.15'te göre B_{max} değişken bir parametredir ve laminasyon kalınlığı 0,3 mm, 0,6 mm ve 0,9 mm'dir. Nüvede kullanılan malzemenin kütle yoğunluğu 7650 kg/m³ tür.



Şekil 3.15: Girdap akım kayıplarının akı yoğunluğuna ve sac kalınlığına göre değişimi

Şekil 3.15'te nüve laminasyonlarının kalınlığının kontrol edilmesinin önemini gösterilmektedir. Fakat, elektrik çelik laminasyonlarının maliyeti ve kullanım sırasındaki kırılabilirliği nedeniyle laminasyon kalınlığı genel anlamda 0,18 ve 0,5 mm arasında değişmektedir.

3.7.2 Akı yoğunluğu dağılımı

Transformatörün çekirdeğindeki akı yoğunluğu dağılımının hesaplaması için karmaşık bir elektromanyetik analiz gereklidir. Bu hesaplama, doğrusal olmayan bir analiz ve üç boyutlu geçici durum analizi gerektirir. Ayrıca, hesaplama maliyetini düşürmek için bazı çözüm teknikleri kullanılabilir. Analiz süresini doyasıyla da hesaplama süresini kısaltmak için düzlemsel 2D yöntemi kullanılabilir. Bu yöntemde bir geçici durum analizi, 2D düzlemsel bir modelde sadece çekirdeğin temel yapısı dikkate alınarak gerçekleştirilir.

3.7.3 Sargı kayıpları

Transformatörün sargılarında meydana gelen kayıpların iki temel sebebi vardır. Bunlar, sargı direncinden geçen akımın etkisiyle oluşan omik kayıplar ve girdap akımları etkisiyle meydana gelen kayıplardır. Faraday'ın indüksiyon yasasına göre iletkenlerde, manyetik

alanın değişimiyle meydana gelen dönel elektrik akımına girdap akımı denir. Bu akımlar kapalı bir devrede, manyetik alana dik bir şekilde akarlar. Genellikle transformatörün sargılarının kesiti girdap akımlarının kaçak akının dağılımı üzerindeki etkisini azaltmak k olarak tasarlanır. Bundan dolayı, sargı akımlarıyla meydana gelen kaçak akıların faz aılları aynı olmaktadır. Bu nedenle sargı kayıpları iki kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar, DC akımların meydana getirdiği omik kayıplar ve indüklenen girdap akımının neden olduğu girdap akım kayıplarıdır.

i. Transformatörün Dc kayıpları

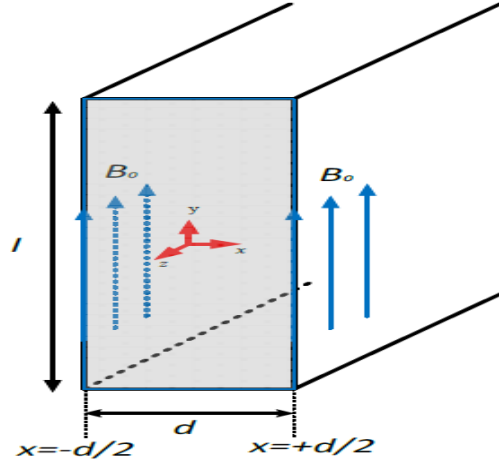
Bu kayıpları hesaplamak için iletken kesitleri üzerinde akım yoğunluğu dağılımının düzenli olduğu varsayılır. Bu nedenle bu kayıplar aşağıdaki denklemden kolayca hesaplanabilir.

$$P_{DC} = R_{DC} \cdot I_{rms}^2 \quad (3.20)$$

Burada R_{DC} sargı direncini, I_{rms} ise sargı akımını ifade etmektedir.

ii. Girdap akım kayıpları

Daha önce bahsedildiği gibi, Faraday'ın indüksiyon yasasına göre akı yoğunluğunun değişken olması değişken elektrik alanının meydana gelmesine sebep olur. Bu elektrik alan, iletkenlerden akan akımın sonucunda, akım yoğunluğunun karesi ile orantılı bir omik kayba neden olmaktadır. Meydana gelen bu kayıplara girdap akım kayıpları denir. Girdap akım kayıpları MAXWELL denklemlerinden faydalanılarak hesaplanabilir. Aslında radyal ve aksiyel akı yoğunluğunun bileşenleri, sargılardaki girdap akımlarının oluşturduğu kayıpların ana faktörleridir. şekil 3.16'da gösterildiği gibi, dikdörtgen bir iletken olduğunu varsayılırsa bu iletken y doğrultusunda dış bir kaçak akıya maruz kalır. Bu iletkenlerde akı yoğunluğunun z ve y doğrultusunda değişmediği kabul edilir. Diğer bir ifade ile akımın sadece x doğrultusunda değiştiği kabul edilir. şekil 3.16'da, B dikdörtgen sargının sağ ve sol sınırlarındaki akı yoğunluğu değeridir.



Şekil 3. 16: Değişen dış kaçak akılara maruz kalan sargı

MAXWELL denkleminde göre;

$$\nabla \times H = J = \sigma E \quad (3.21)$$

Eşitliğin her iki tarafına Burkulum işlemcisi (Curl) ile

$$-\nabla^2 H + \nabla[\nabla \cdot H] = \sigma \nabla \times E = -\sigma \frac{dB}{dt} \quad (3.22)$$

$\nabla \cdot H = 0$ olduğu için

$$\nabla^2 H = \sigma \frac{dB}{dt} \quad (3.23)$$

Manyetik alanın sadece y doğrultusunda olduğu varsayılarak ve $B = \mu H$ olduğu dikkate alınarak denklemler düzenlenirse aşağıda verilen denklem elde edilir.

$$\frac{d^2 B_y(x)}{dx^2} = \sigma \mu \frac{dB_y(x)}{dt} \quad (3.24)$$

Yukarıda verilen (3.24) eşitliği frekans bölgesinde aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilebilir.

$$\frac{d^2 B_y(x)}{dx^2} = j\omega \sigma \mu B_y(x) \quad (3.25)$$

Sargı iletkeninin enindeki akı yoğunluğu dağılımını bu diferansiyel denklemin $x = \pm d/2$ sınır şartları dikkate alınarak çözüldüğünde elde edilmektedir.

$$B_y(x) = \frac{\cosh\left(\frac{1+j}{\delta}x\right)}{\cosh\left(\frac{1+jd}{\delta 2}\right)} B_0 \quad (3.26)$$

Burada δ deri kalınlığıdır. Bu parametre aşağıda verilen denklem ile elde edilmektedir.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{w\mu\sigma}} \quad (3.27)$$

Burada w uygulanan manyetik alanın frekansı, μ malzemenin geçirgenliğidir. Eşitlikten de anlaşılacağı üzere deri kalınlığı malzemenin özelliklerine ve uygulanan alanın frekansına bağlıdır. Eşitlik (3.23) kullanılarak, manyetik alanın da yalnızca x doğrultusunda değiştiği dikkate alarak akım yoğunluğu dağılımı aşağıda verilen eşitlik ile elde edilebilir.

$$J_z(x) = -\frac{1}{\mu} \frac{dB_y(x)}{dx} = -\frac{1+j}{\mu\delta} \frac{\sinh\left(\frac{1+j}{\delta}x\right)}{\cosh\left(\frac{1+jd}{\delta 2}\right)} B_0 \quad (3.28)$$

Girdap akım kaybı da aşağıda verildiği gibi hesaplanabilir.

$$P = \frac{1}{d} \frac{1}{2\sigma} \int_{-d/2}^{d/2} |J_z(x)|^2 dx \quad (3.29)$$

(3.28) ve (3.29) eşitlikleri baz alınarak (3.30) eşitliği elde edilebilir.

$$P = \frac{1}{d} \frac{1}{2\sigma} \frac{B_m^2}{\mu^2} \left[\frac{\sinh\left(\frac{d}{\delta}\right) - \sin\left(\frac{d}{\delta}\right)}{\cosh\left(\frac{d}{\delta}\right) + \cos\left(\frac{d}{\delta}\right)} \right] \quad (3.30)$$

Burada $d \ll \sigma$ olduğu durumlarda denklem yeniden yazılırsa aşağıdaki gibi olur.

$$P = \frac{\sigma w^2 B_m^2 d^2}{24} \quad (3.31)$$

Burada ω açısal frekansı, B_m ise iletkenin sınırlarındaki sinüzoidal maksimum manyeti -akı yoğunluğu değeridir. Transformatorün radyal akıya en fazla maruz kalan kısımları sargılarıdır. Özellikle sargıların alt ve üst noktaları bu akılardan en fazla etkilenen bölgelerdir. Girdap akımlarının oluşturduğu kayıpların hesaplanmasında bu akılar kullanılabilir. Radyal ve aksiyel girdap akım kayıplarını ayrı ayrı hesaplanıp toplanmasıyla girdap kayıpların toplamı hesaplanabilir. Ayrıca aksiyel ve radyal bileşenler olarak yukarıda verilen (3.31) eşitliğini aşağıdaki gibi ifade edebilir [44]:

$$P_a = \frac{B_z^2 w^2 \sigma t^2}{24} \quad (3.32)$$

$$P_r = \frac{B_r^2 w^2 \sigma h^2}{24} \quad (3.33)$$

Burada B_z , aksiyel akı yoğunluğunu B_r ise radyal akı yoğunluğu temsil etmektedir. Aksiyel ve radyal girdap akımları sargının kesitine diktir ve faz açıları aynıdır.

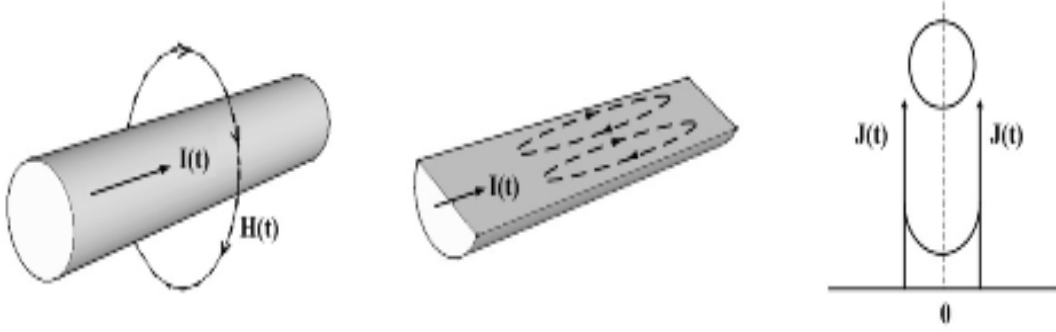
iii. Deri Ekisi

Transformatörlerde deri etkisi girdap akımlarından dolayı meydana gelmektedir. Girdap akımları, ana akımın meydana getirdiği manyetik alana zıt bir manyetik alan oluşturur. Bu yüzden bu ters manyetik alan iletkenin geçen ana akımı azaltır. Aynı zamanda deri etkisi iletkenin telin alanını kısıtlayarak bakır kayıplarına sebep olur. İletkenin geçen akımın genliğinde bir değişiklik meydana gelmez. Ayrıca iletkenin yüzeyinde akım yoğunluğunun artmasına neden olur.

Şekil 3.17.de' verildiği gibi iletkenin üzerinden akan bir AC $i(t)$ akımı iletkenin etrafında bir elektromanyetik alan kuvveti meydana getirir. Meydana gelen bu kuvvet girdap akımlarının indüklenmesine neden olur. Bu akımlar ana akımla, iletkenin yüzeyinde aynı yönde, merkezinde ise zıt yönde akmaktadır. Aşağıda Şekil 3.17'de görüldüğü üzere hacim akımının yoğunluğu iletkenin merkezinde minimum, yüzeyinde ise maksimumdur. Buradan, hacim akımının iletkenin genelinde homojen olmadığı görülmektedir. İletkenin yüzeyinde maksimum olan bu akımın yoğunluğu merkeze doğru deri kalınlığı olarak adlandırılan uzaklıkla üssel bir şekilde azalır. Deri kalınlığı sinüzoidal akımlar için aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir [45]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu\pi f}} \quad (3.34)$$

Transformatörün sargılarında kullanılan iletkenin kesiti deri kalınlığından bariz bir şekilde büyükse, iletkenin geçen akımın çoğu ince bir tabakaya bağlı olarak yüzeyde sınırlanacaktır. Bundan dolayı akım için etkin kesit alanı, iletkenin geometrik kesitine oranla daha 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 [45].



Şekil 3.17: Sargı iletkenlerindeki deri etkisi.

iv. Transformatorün sargılarındaki kayıpların hesaplanması

Daha önceki bölümlerde iletkendeki girdap akımının oluşturduğu kayıpları hesaplamak için analitik yöntemler kullanılmıştır. Genel olarak bu hesaplamalar bir iletkendeki akı yoğunluğu dağılımına dayanmaktadır. Bu sebeple transformatorlerin sargı kayıplarının hesaplanması, sargı alanlarındaki akı yoğunluğu dağılımının hesaplanması ile ilişkilidir. Kaçak akı yoğunluğu, dağıtım transformatorünün manyetik devresine ve iletkenlerden geçen akımlara bağlıdır. RABINS yöntemi gibi bazı analitik yöntemler kaçak akı hesaplaması için kullanılır. Fakat, bu yöntem ve diğer analitik yöntemlerde transformatorün basitleştirilmiş modeli kullanıldığı için hatalı sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada, sargılar SEY ile detaylı olarak modellenerek analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sargılardaki akım yoğunluğunun homojen dağılımı için sargılar blok şeklinde dikkate alınacaktır.

3.7.4 Kayıpların yoğunluk dağılımı

Transformatorlerde kayıp yoğunluğu, POYNTING vektörüne göre, manyetik alan ve elektrik alanın çarpımı şeklinde ifade edilebilir.

$$S = (E \times H) \quad (3.35)$$

Kayıp yoğunluğu yukarıda verilen eşitlik ile elektromanyetik alan miktarlarına bağlı olarak belirlenmektedir. SEY’de, malzemelerin yüzeyleri, yüzey sınır koşulunu ifade eden özel elemanların kapsamındadır. Manyetik denklemler çözülerek kapalı yüzeydeki güç kayıpları aşağıda verilen (3.36) eşitliğindeki gibi elde edilir.

$$P = - \oint (E \times H) \cdot nds \quad (3.36)$$

Matematiksel olarak POYNTING teorisi aşağıda verilen (3.37) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$\oint (ExH).nds + \oint H. \frac{\partial B}{\partial t} dv = - \oint J. E. dv \quad (3.37)$$

Ayrıca, akım yoğunluğu ve manyetik alan kullanılarak yukarıdaki eşitliği integral hacmi olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\oint J. \frac{J}{\sigma} dv + \oint H. \frac{\partial \mu_0 \mu_r H}{\partial t} dv = - \oint (ExH).nds \quad (3.38)$$

Aşağıda verilen (3.39) ile ortalama güç kayıp yoğunluğu elde edilmektedir.

$$S = 1/2 (ExH^*) \quad (3.39)$$

Burada H^* , H 'in karmaşık eşleniği olarak tanımlanmaktadır. Bu durum, aşağıda verilen (3.40) eşitliği ile verilmiştir.

$$H = Re[He^{j\omega t}] = 1/2 (He^{j\omega t} + H^*e^{-j\omega t}) \quad (3.40)$$

3.7.5 Son işlemci (post-processing)

İstenilen elektromanyetik alanı hesaplamak veya kuvvetleri ve diğer mikroskobik miktarları analiz etmek için sonuçların alınmasına son işlemci izin vermektedir. Analizi gerçekleştirilen transformatör modelinin sonuçlarına bu basamakta ulaşılabilir. Bu aşmada incelenen modelin tüm kısımlarında akı yoğunlukları ve akı dağılımı, renkli bir şekilde çizdirilerek görsel hale getirilmektedir. Bu sayede transformatörün doyum süreci etkileri incelenebilir.

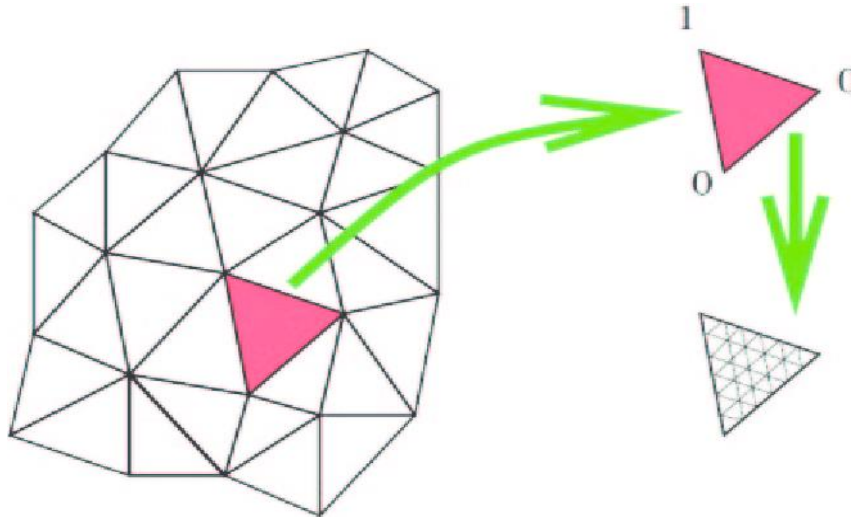
4. TRANSFORMATÖRÜN ANSYS@MAXWELL ORTAMINDA MODELLENMESİ

4.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

SEY kısmi diferansiyel denklemlerle karakterize edilen sınır ve başlangıç-değer problemlerinin sayısal çözümü için bilinen en güçlü yöntemdir. Günümüzde, neredeyse tüm mühendislik ve uygulamalı bilim alanlarında kullanılmaktadır.

Bu yöntemin, yararlı ve başarılı olmasının temelinde iki temel özellik vardır. Birincisi, modeli sınırlı sayıda alana ayırmasıdır. İkincisi, yöntemin uygulandığı sınır ve başlangıç-değer problemleri, parçalı veya bütünleyici bir formda formüle edilmesidir. SEY Karmaşık mühendislik problemlerinin hassas bir şekilde çözülmesinde günümüzde sayısal yöntem olarak etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntemin temel çözüm mantığı, modeli sonlu sayıda elemanlara bölerek, bu elemanları düğümler (mesh) ile birbirlerine entegre edip gerçeğe yakın çözüm yapmaktır.

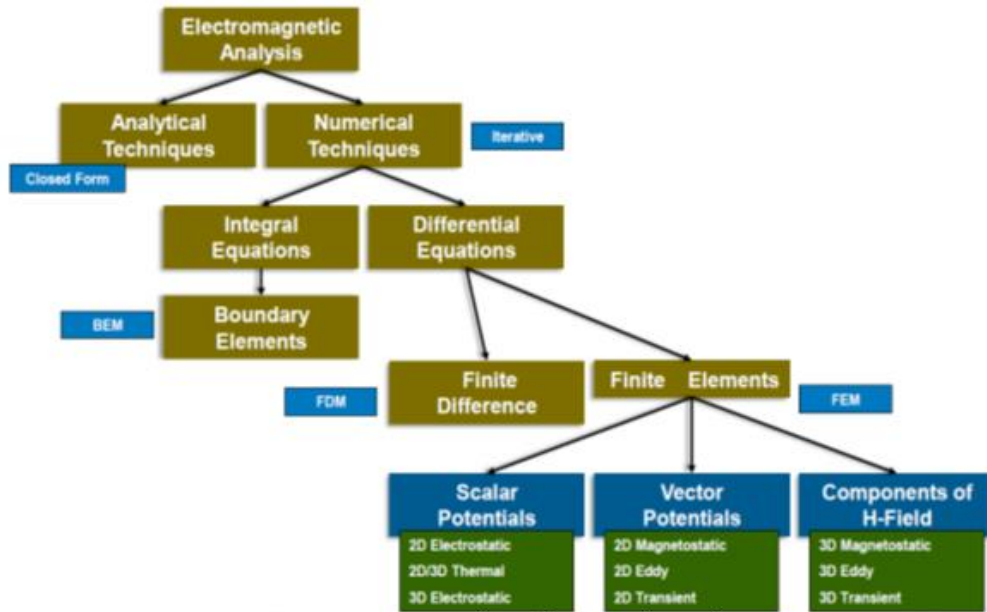
Sonlu Elemanlar Yöntemi ilk olarak 1956 yılında uçak gövdelerinin gerilme analizi için geliştirilmiştir. Daha sonra teknolojik gelişmelerle beraber bu yöntem daha sonraki yıllarda mühendislik ve uygulamalı bilimlerin problemlerinin çözümünde ve kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntem ile analiz edilmek istenen bölge, birden fazla küçük ve birbirine ağ (mesh) gibi bağlı sonlu eleman olarak adlandırılan alt bölgelere ayrılarak çözüm gerçekleştirilmektedir. Ağ örgüsü Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1: Yapılarda oluşturulan ağ örgüsü

4.2 ANSYS Electromagnetic

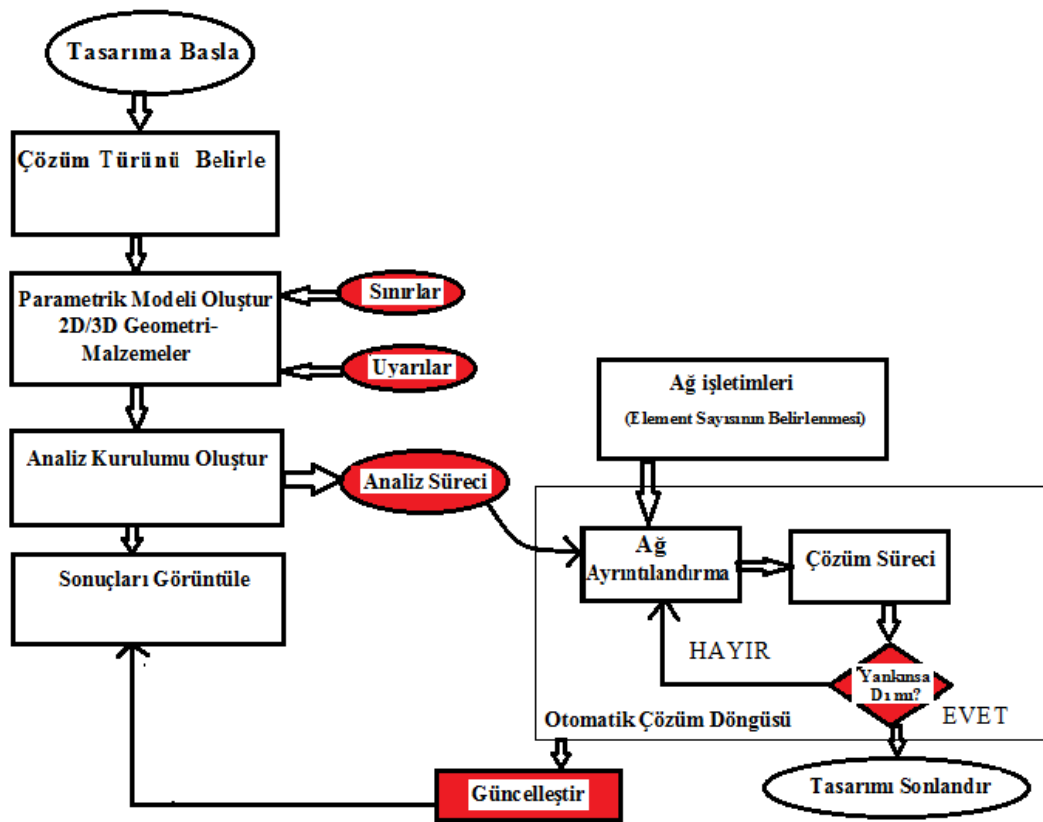
SEY'e dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL ticari bir yazılım programıdır. Tez çalışmasında bu program kullanılmıştır. Bu program ile transformatörlerin, motorların, elektromanyetik akıları, kaçak akıları ve termal hesapları, sensörler ve bobinler dahil 2- D ve 3D cihazların tasarımı ve elektromanyetik ve elektromekanik analizi gerçekleştirilmektedir. ANSYS birçok alt analiz programı içermektedir. Bunlardan biri olan ANSYS@MAXWELL ile statik frekans alanı sabit olmayan elektromanyetik ve elektrik alanları analiz edilmektedir. Bu program, problemi çözmek amacıyla analizi gerçekleştirilecek geometrinin tüm bileşenlerinde uygun, verimli ve doğru bir ağı otomatik olarak oluşturur. Otomatik uyarlanabilir ağ oluşturma(meshing) işlemi, problemin çözüm sürecinden karmaşıklığı kaldırarak verimli bir tasarım akışından yararlanmayı sağlar. ANSYS@MAXWELL ara yüzünde ANSYS-PExpert ve ANSYS-RMxpert tasarım platformları da mevcuttur. ANSYS@MAXWELL programının önemli özelliklerinden biri de ANSYS-Simplorer'da kullanılmak üzere sonlu elemanlar çözümlerinden modeller üretme kabiliyetidir. Bu özellik, karmaşık devreleri Maxwell'in doğru bileşen modelleri ile birleştirmeyi sağlayan güçlü bir elektromanyetik tabanlı tasarım akışı yaratır [46]. ANSYS@MAXWELL ortamındaki tasarım Şekil 4.2'de sunulan blok diyagramındaki gibi olmaktadır.



Şekil 4.2: ANSYS@MAXWELL ortamındaki tasarımın blok diyagramı

4.3 Transformatörün Simülasyon Modelinin Oluşturulma Aşamaları

Bu çalışmada incelenen transformatör modelleri sonlu-elemanlar yöntemine dayanan ANSYS@MAXWELL yazılımı kullanılarak uyarlanmıştır. Bu program ile transformatörlerin, nüve kayıpları, kaçak kayıplar, DC kayıplar ve sargı girdap akım kayıplarını tahmin etmek için analizler gerçekleştirilmiştir. Kayıpların detaylı incelenebilmesi için 2D ve 3D modellerin SEY analizinde çok sayıda mesh(ağ) kullanılmıştır. Şekil 4.3'te program ortamında tasarlanan transformatörün SEY modellemesinin akış diyagramını verilmiştir.

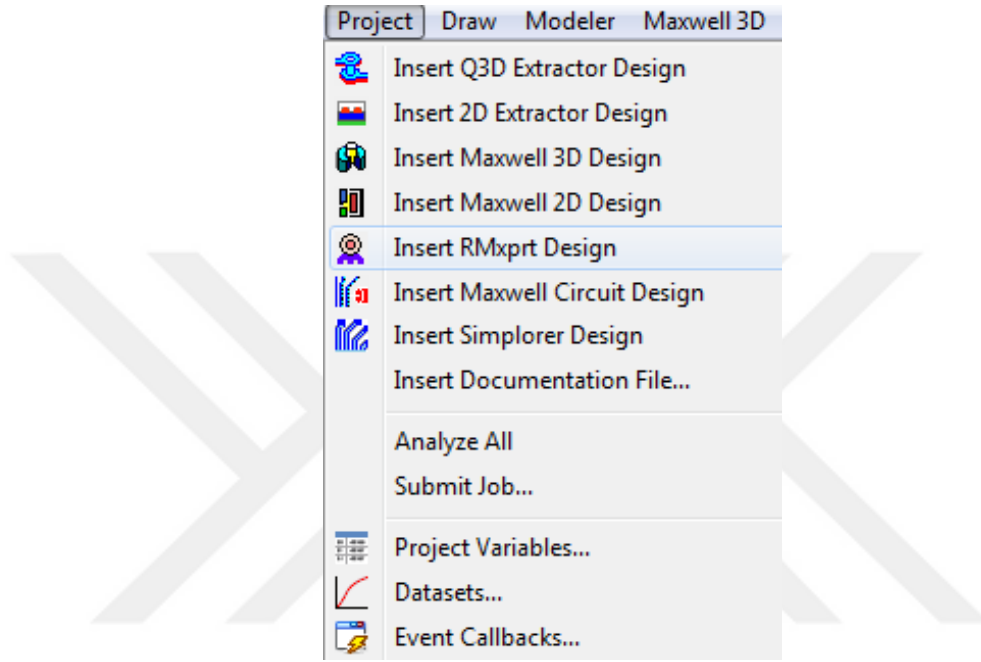


Şekil 4.3: SEY ile modelleme ve analizin adım adım blok diyagramı.

Her tasarım platformunda olduğu gibi ANSYS@MAXWELL programının da kendine özgü bir ara yüzü bulunmaktadır. Bu programın ara yüzünde tasarımlar 2D boyutlu ya da 3D olarak oluşturulabilir. 3D olarak tasarlanan bir model direkt 2D modele dönüştürülüp analiz gerçekleştirilebilmektedir.

4.3.1 Tasarımın boyutlarının 2D veya 3D olarak seçilmesi

ANSYS@MAXWELL ortamında modelleme yapılırken Kartezyen koordinatlar veya asimetrik modelleme kullanılabilir. XY, XZ ve YZ olarak programda 3üç farklı kartezyen koordinat seçeneği mevcuttur. Tasarlanmak istenen modelin 2D veya 3D olarak RMXprt bölümü ile programın Project ara yüzünde Şekil 4.4'te gösterildiği gibi seçilebilmektedir.

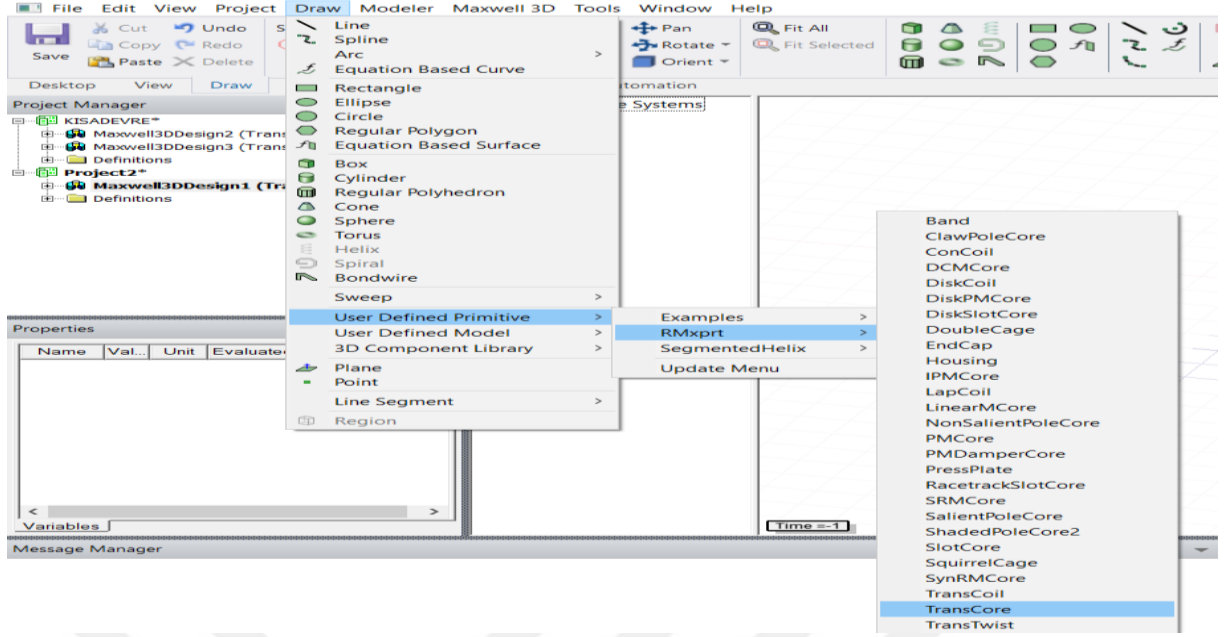


Şekil 4.4: Programın Project ara yüzü

Programın ana menüsünde Draw (çizim) bölümünde aşağıdaki Şekillerde verilen yol takip edilerek tasarlanmak istenen transformatörün sargısı, nüvesi, terminalleri ve tankı oluşturulabilmektedir. Programda kullanılan şablonlar ilgili kütüphanede mevcut bulunan şablonlardır. Transformatörün tasarımında kullanılan sargı veya nüvenin geometrik ve elektriksel değerleri ara yüz üzerinde ayarlanabilmektedir.

4.3.2 Nüvenin tasarlanması

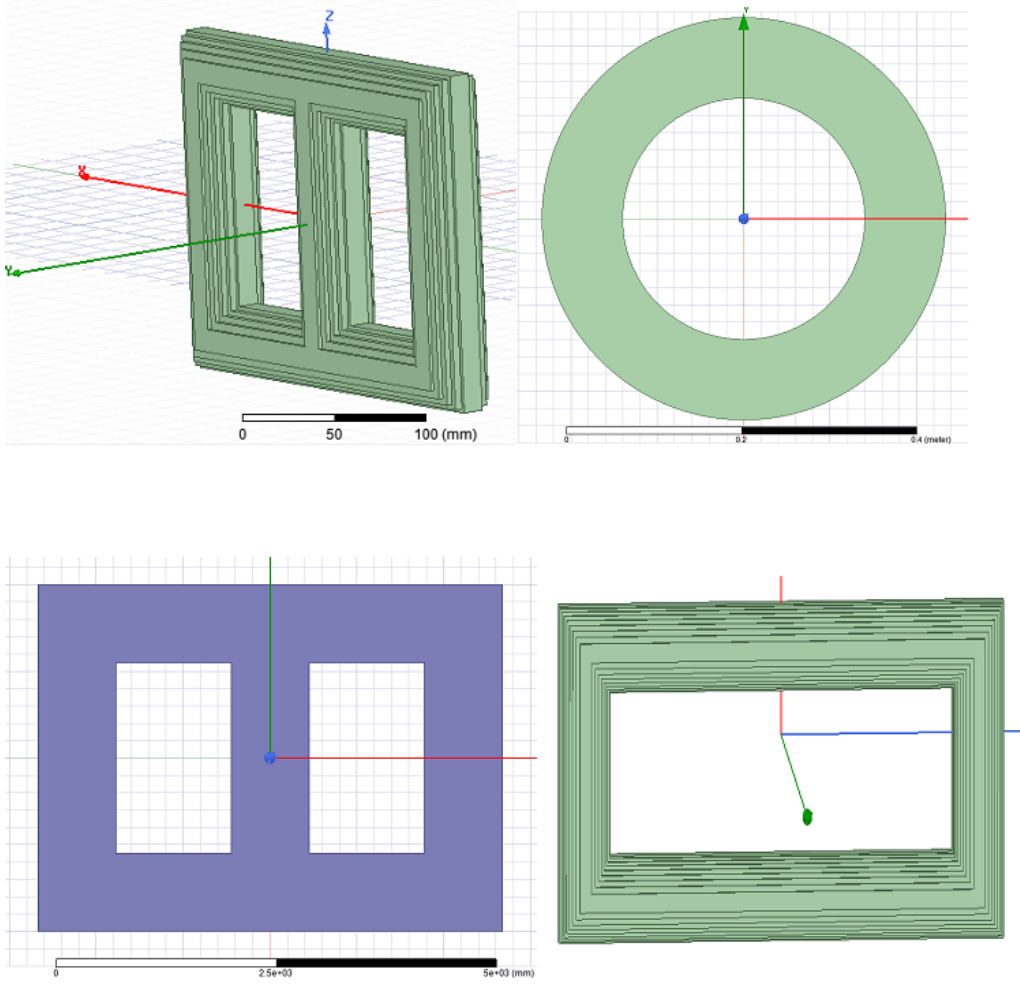
Nüvenin tasarlanması aşağıda verilen sıraya göre yapılmaktadır. İlk olarak kullanılmak istenen nüve seçilir daha sonra açılan pencerede nüveye ait geometrik özellikler belirlenir. Sırasıyla **Draw>User Define Primitive>RmExpert>Transcore** seçilir. Şekil 4.5-7'de modelleme aşamaları ve oluşturulan model örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.5: Tasarım için nüve seçim aşamaları

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.

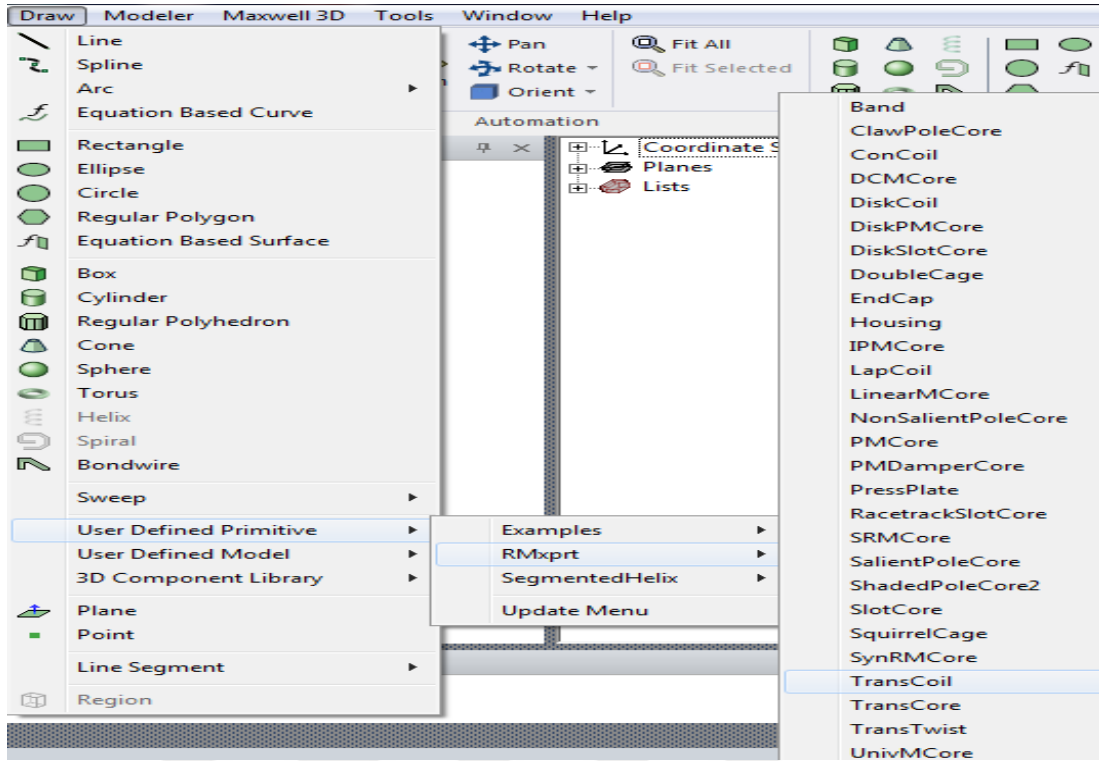
Şekil 4.6: Nüveye ait geometrik özelliklerin yer aldığı pencere



Şekil 4.7: Tasarlanan nüve modelleri

4.3.3 Sargıların tasarlanması

Benzer şekilde sargıların tasarlanması aşağıda verilen sıraya göre yapılmaktadır. İlk olarak menüden sargılar seçilir daha sonra açılan pencerede sargılara ait geometrik özellikler belirlenir. Sırasıyla *Draw>User Define Primitive>RmExpert>Transcoils* seçilir. Şekil 4.8 ve 4.9’da örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.8: Sargıların seçimi

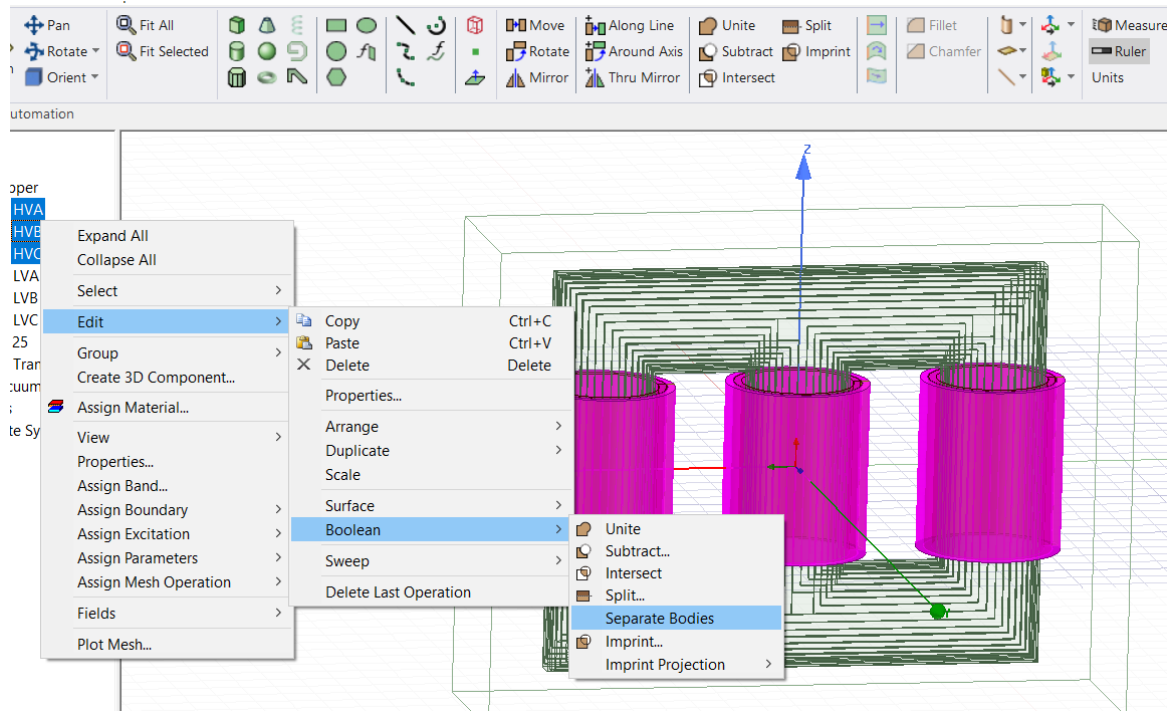
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
Command	CreateUserDefinedPart			
Coordinate Sys...	Global			
Name	RMxpirt/TransCoil.dll			
Location	syslib			
Version	6.0			
DistLeg	100	mm	100mm	Leg center to center distance
Coil Type	2		2	Coil type: 1 for solenoid coil; 2 for pancake coil
WidthIn	42	mm	42mm	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.

Şekil 4.9: Sargıların geometrisine ait değerlerin tanımlandığı pencere

Yukarıda görülen ekranda sargıya ait tüm geometrik değerler belirlenmektedir. Ayrıca, sargıların tipi, kaç katmandan olduğu, kalınlığı ve yarıçapı bu ekrandan tayin edilmektedir.

4.3.4 Trafo terminallerinin belirlenmesi

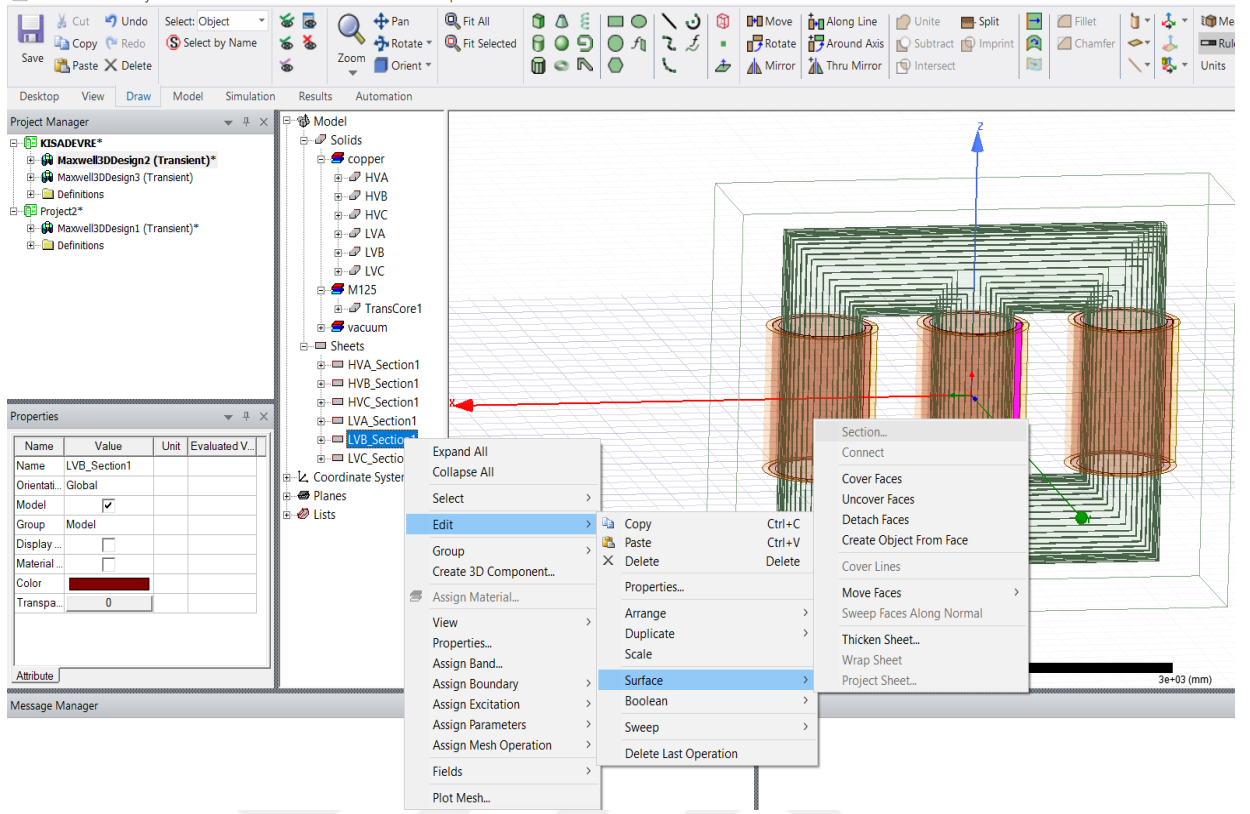
Sargılar tasarlandıktan sonra üç fazlı (örneğin A, B, C) bir trafonun bobin terminallerini oluşturmak için Ctrl tuşu basılı tutularak alçak gerilim (LV_A, LV_B ve LV_C) veya yüksek gerilim (HV_A, HV_B ve HV_C) objeleri seçilir. Sargılar seçildikten ana menüde yer alan *Modeler>Surface Section* seçeneği ile sargıların terminalleri oluşturulur. Daha sonra Şekil 4.10'da verilen şekilde gibi terminaller tanımlanır. İşlem akışı ise bu şekilde olmaktadır; *Modeler>Boolean>Seperate Bodies*.



Şekil 4.10: Sargı terminallerinin atanması

4.3.5 Trafonun uyarılması

Transformatöre uyarma gerilimi veya uyarma akımı verilerek uyarılma işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem hem dahili hem de harici yapılabilmektedir. Yani ya direkt Maxwell ortamında uyarma verilir ya da harici bir uyarma devresi oluşturularak uyarma işlemi gerçekleştirilir. İşlem akışı *Maxwell-3D>Excitations>Assign>Coil Terminal* şeklindedir. Şekil 4.11'de bu işlemin nasıl gerçekleştirildiği gösterilmiştir.



Şekil 4.11: Terminlerin programa tanıtılması ve değer atamasının yapılması

4.3.6 Sargıların oluşturulması

Sargıların oluşturulması ve terminallerin sargıların içine yerleştirilmesi için aşağıdaki işlemler sırasıyla yapılır. İşlem basamakları *Maxwell 3D>Excitation>Winding* şeklinde olmaktadır. Şekil 4.12’de görüldüğü gibi bu işlem program ara yüzünde görsel olarak gerçekleştirilmiştir. Sargı oluşturulurken içine atılan terminallerin sarım sayıları belirlenir. Seçilen sargıya göre de gerilim uyarması tanımlanır.

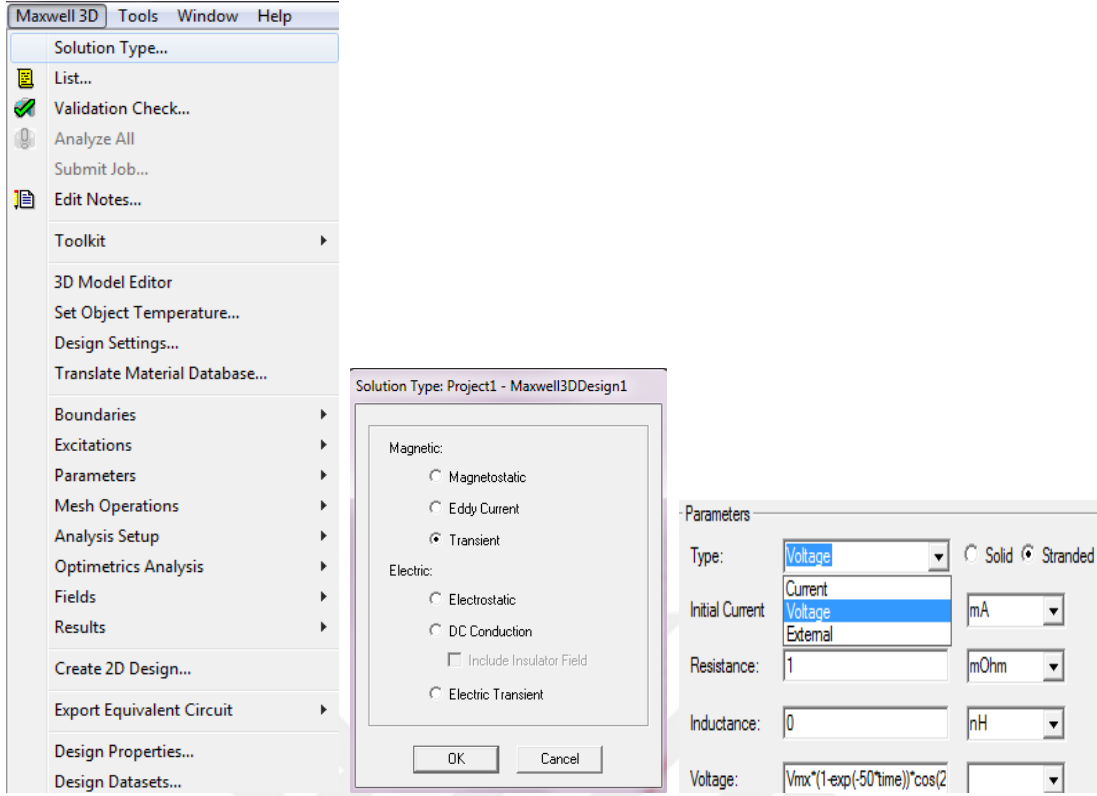
Name	Value	Unit	Evaluated Value	Name	Value	Unit	Evaluated Value
Name				Name			
V0	0	V	0V	V0	0	V	0V
Va	$V_{mx}*(1-\exp(-50*time))*\cos(2*pi*50*time)$		*****	Va	$V_{mx}*(1-\exp(-50*time))*\cos(2*pi*50*time+(2/3*pi))$		*****
VFreq	50		50	VFreq	50		50
Td	0		0	Td	0		0
Df	0		0	Df	0		0
Phase	0	deg	0deg	Phase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

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

Şekil 4.12: Sargıların uyarılma devresi

4.3.7 Çözücünün tipinin belirlenmesi

ANSYS@MAXWELL programında üç çeşit elektrik, üç çeşit de manyetik çözücü olmak üzere toplamda altı farklı analiz tipi mevcuttur. Çalışmalar da manyetik alanın geçici rejim çözücü tipi ile analizler gerçekleştirilmiştir. Programın ara yüzünde bulunan Maxwell-3D bölümünde çözücü tipi ve seçimi Şekil 4.13'te verilmiştir. Transient çözücü tipinde devreye sabit akım veya gerilim içeriden veya dışarıdan bir kaynak yardımıyla ile verilebilmektedir. Bu çalışmada tasarlanan transformatör modellerine uyarım tipi, Şekil 4.13'te de görüldüğü üzere, Voltage olarak ayarlanmıştır.



Şekil 4. 13: Çözücü tipi ve uyarım modeli

Bu çözücü tiplerinin kısaca açıklaması aşağıdaki gibi yapılabilir

Manyetik Sayısal Çözücüler

- Magnetostatic Solver

DC akımlarının ve kalıcı mıknatısların neden olduğu statik manyetik alanları çözer. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan malzemeleri çözebilir.

- Eddy Current Solver

Frekans domeninde sinüzoidal şekilde değişen manyetik alanları çözer. Hem Doğrusal hem de Doğrusal olmayan malzemeleri çözer (enerji eşdeğeri sinüzoidal alanlar oluşturur). Deplasman akımlarını dikkate alır. Cilt ve güncel yakınlık etkileri gibi uyarılmış alanlar da göz önünde bulundurulur.

- Transient Magnetic

Lineer veya Lineer olmayan malzemelerde zamanla değişen veya hareket eden elektrik kaynaklarının ve kalıcı mıknatısların neden olduğu geçici manyetik alanları çözer. Cilt ve güncel yakınlık etkileri gibi uyarılmış alanlar göz önünde bulundurulur.

Elektrik Çözücüler

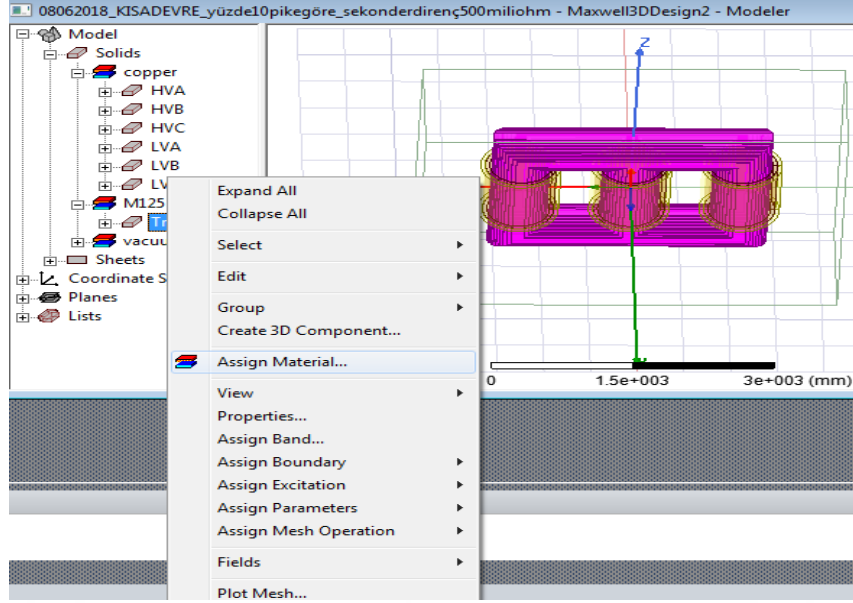
- Electrostatic Solver
Statik Elektrik Alanlarını doğrusal malzemelerde çözer.
- DC Conduction
Potansiyelden voltaj, elektrik alanı ve akım yoğunluğunu çözer. İzolatörlerde elektrik alanlarını da çözebilir.
- AC Conduction (yalnızca 2D)
Frekans domeninde sinüzoidal şekilde değişen elektrik alanlarını çözer. Sadece 2D çözücü ile kullanılabilir.
- Transient Electric
Homojen olmayan malzemelerde zamanla değişen gerilimler, yük dağılımları veya mevcut uyarmaların neden olduğu geçici elektrik alanları. Elektrik potansiyeli çözüm miktarıdır.

4.3.8 Nüve ve sargılar için malzeme belirleme

Tasarlanan modelin nüve ve sargılarını oluşturan malzemeler ile vakum bölgesinin türünü tanımlamak gerekir. Tasarımda kullanılan malzeme ataması yapabilmek için “Assign Material” kullanılmaktadır. Sargılar veya nüve için malzeme ataması programın kütüphanesinden ‘View/Edit Material’ veya ‘Add Material’ seçeneklerine yapılabilir.

Maxwell varsayılan malzeme kitaplığı, Maxwell kurulumu ile yüklenir ve Syslib dizini altında bulunur. Bu malzeme veritabanı kullanıcılar tarafından değiştirilemez. Kullanıcılar kişisel veya kullanıcı kütüphanesi dizinlerine kendi materyal veritabanlarını ekleyebilirler. Dosya eklendikten sonra, kullanıcılar eklenen kütüphaneden malzeme seçip atayabilir.

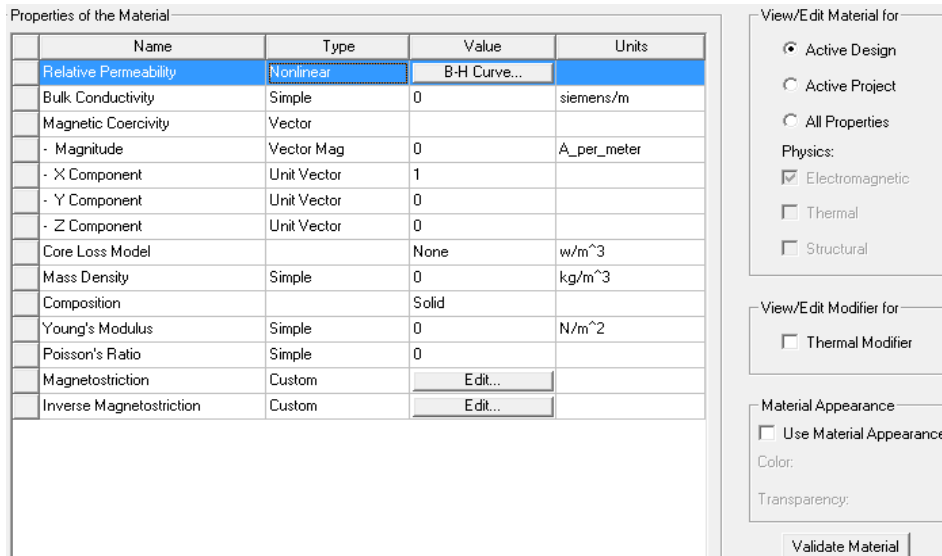
Bu tezde yapılan çalışmalarda iki çeşit nüve malzemesi kişisel kütüphaneden seçilerek kullanılmıştır. Bu malzemeler Şekil 4.14’te gösterildiği gibi programın kütüphanesine eklenerek kullanılmıştır.



Şekil 4.14: Transformatörün nüvesine malzeme tayini

Malzeme ataması yapılırken kütüphanede bulunmayan bir malzemenin kullanılması istendiğinde Şekil 4.15'te verildiği gibi 'View/Edit Material' veya 'Add Material' kısmından malzeme seçimi gerçekleştirilir.

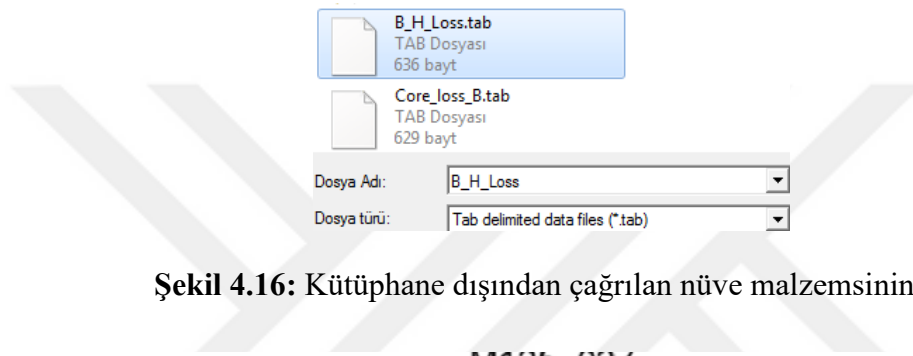
Malzeme özelliklerinin yer aldığı ekranda Şekil 4.15'te gösterildiği gibi, malzeme tipi 'Nonlinear' olarak seçilir. Daha sonra açılan ekrandan B-H eğrisi tıklanırsa açılacak olan pencerede 'Import Dataset' seçeneği ekrana gelir.



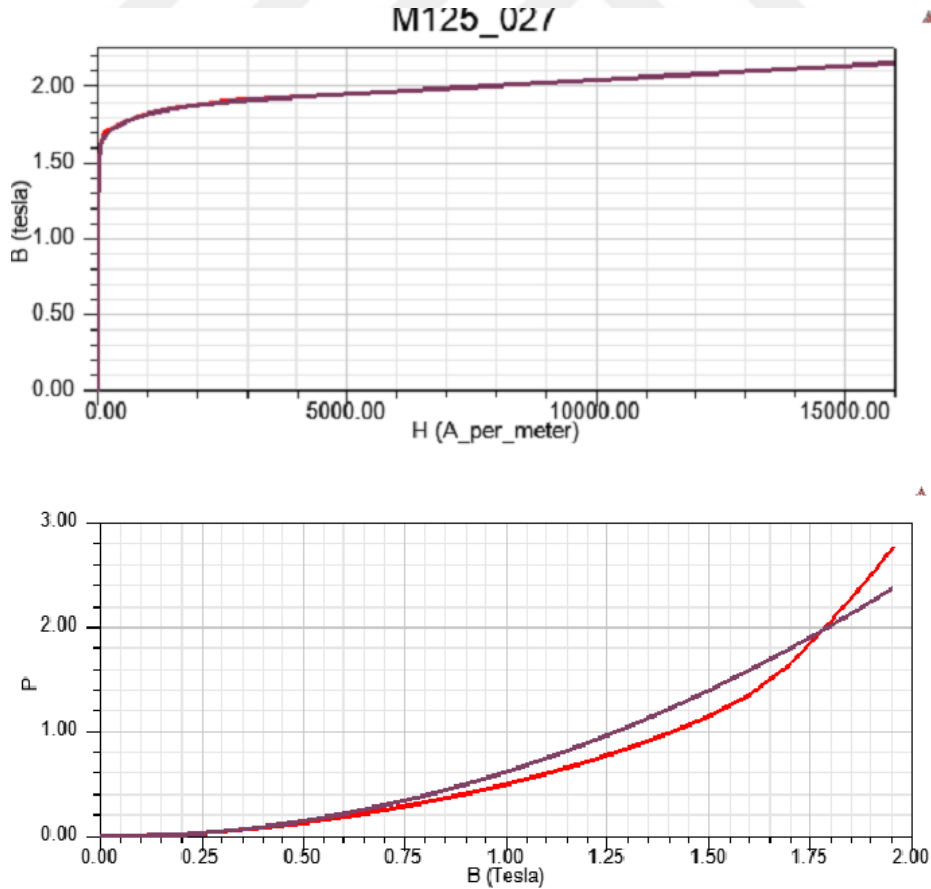
Şekil 4.15: Nüve için malzeme seçiminin yapılması

Bundan sonraki işlemde 'Import Dataset' butunu seçilince Şekil 4.16 program kütüphanesinde mevcut olmayan bir malzeme '*.tab' uzantılı 'B-H_Loss' adlı dosya malzeme seçim ekranına çağırılarak programda kullanılmıştır.

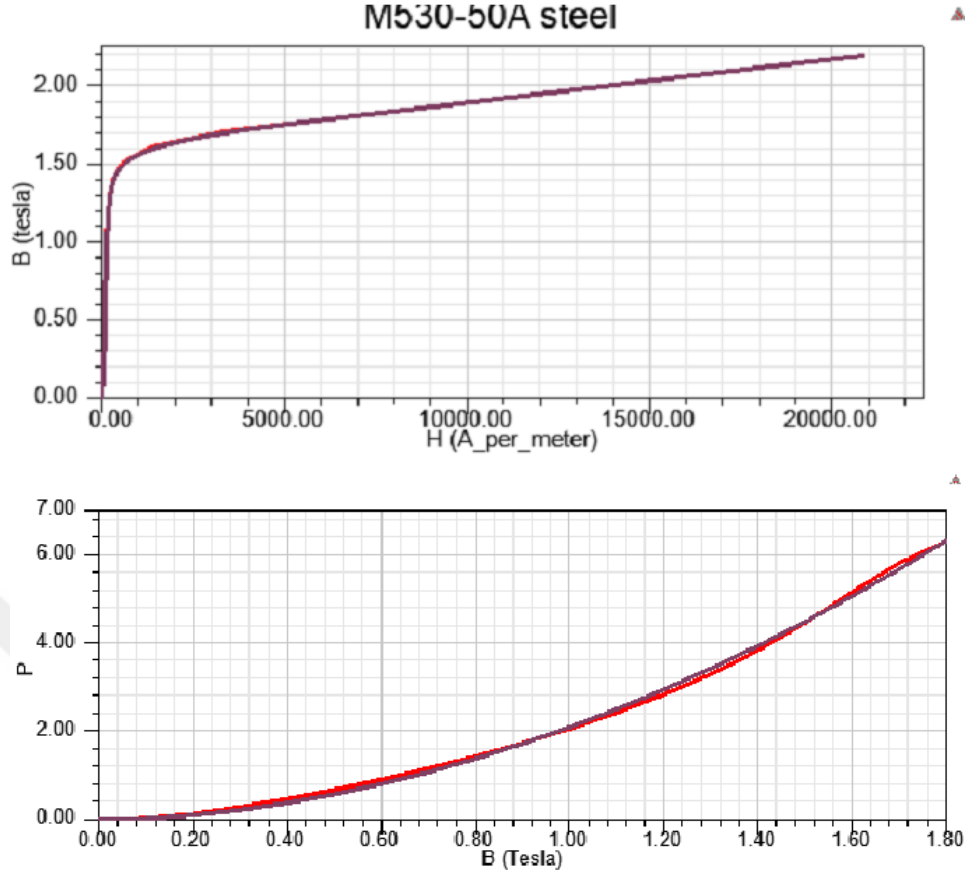
Transformatörlerin nüve malzemesi için iki farklı elektrik çelikleri, M530-50A ve M125-027S, lamineleri kullanılmıştır. Bu malzemeler programın kütüphanesinde yer almadığı için dış bir kütüphaneden programa ortamına aktarılmıştır. Benzer şekilde nüvenin güç kaybı değerinin elde edilmesi için '*.tab' uzantılı 'Core_Loss' adlı dosya çağırılarak programda kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin B-H ve B-P eğrileri Şekil 4.17 ve 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.16: Kütüphane dışından çağırılan nüve malzemesinin dosyaları

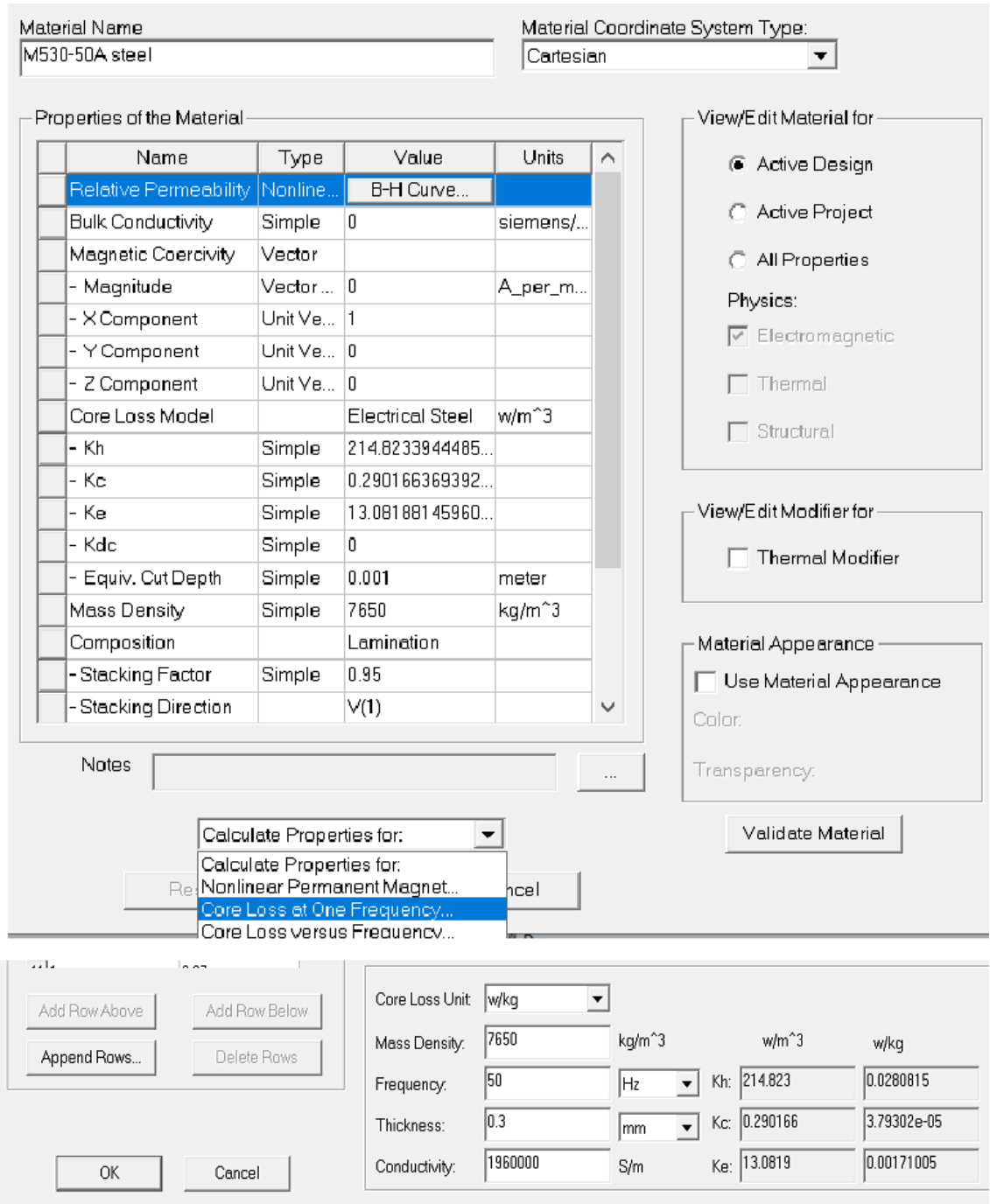


Şekil 4.17: M125-027S malzemesinin B-H ve B-P eğrileri



Şekil 4.18: M530-50A malzemesinin B-H ve B-P eğrileri

ANSYS@MAXWELL programı ile gerçekleştirilen tasarımlarda nüve malzemesi olarak kullanılan materyalin nüve kayıp katsayıları K_h , K_c ve K_e değerleri frekansa ve laminasyon kalınlığına bağlı olarak değişir. 50 Hz frekans için kullanılan materyallerin özgül nüve kayıpları Şekil 4.18 ve 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.18: M530-50A malzemesinin nüve kaybı katsayıları ve 50 Hz frekanstaki özgül nüve kayıpları

Material Name: M125_027 Material Coordinate System Type: Cartesian

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Nonline...	B-H Curve...	
Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/...
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector ...	0	A_per_m...
- X Component	Unit Ve...	1	
- Y Component	Unit Ve...	0	
- Z Component	Unit Ve...	0	
Core Loss Model		Electrical Steel	w/m^3
- Kh	Simple	65.48895037047...	
- Kc	Simple	0.599578467366...	
- Ke	Simple	0	
- Kdc	Simple	0	
- Equiv. Cut Depth	Simple	0.001	meter
Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
Composition		Lamination	
- Stacking Factor	Simple	0.95	
- Stacking Direction		V(1)	

Notes: [] [...]

Calculate Properties for: []

Calculate Properties for:
 Nonlinear Permanent Magnet...
 Core Loss at One Frequency...
 Core Loss versus Frequency...

View/Edit Material for:
 Active Design
 Active Project
 All Properties
 Physics:
 Electromagnetic
 Thermal
 Structural

View/Edit Modifier for:
 Thermal Modifier

Material Appearance:
 Use Material Appearance
 Color:
 Transparency:

[Validate Material]

Core Loss Unit: w/kg

Mass Density: 7650 kg/m^3

Frequency: 50 Hz

Thickness: 0.27 mm

Conductivity: 5000000 S/m

Kh: 65.489

Kc: 0.599578

Ke: 0

w/m^3

w/kg

0.00856065

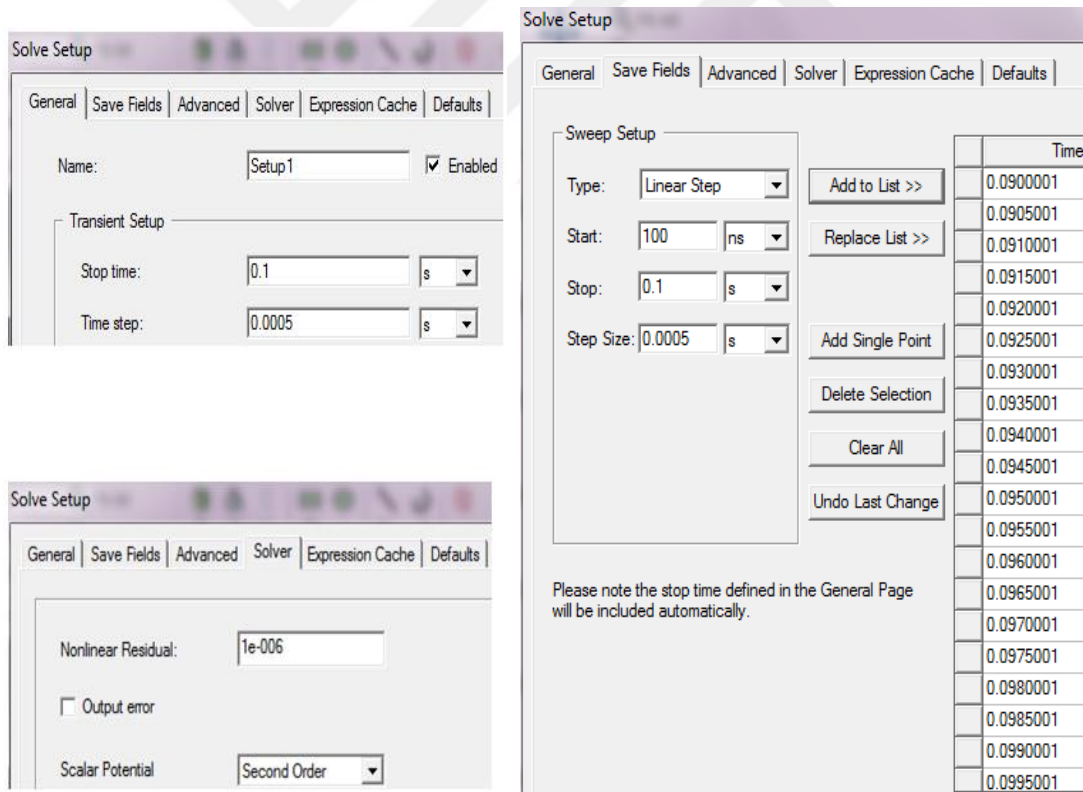
7.83763e-05

0

Şekil 4.19: M125-027S malzemesinin nüve kaybı katsayıları ve 50 Hz frekanstaki özgül nüve kayıpları

4.3.9 Simülasyon için sürenin ayarlanması

ANSYS@MAXWELL programında modelin analizine başlamadan önce çözücü tipine göre analiz süresi ve ayarları yapılmalıdır. Analizi gerçekleştirilen tasarıma ait gerilim ve akım gibi elektriksel büyüklüklerin sinüs dalga şekillerinin düzgün elde edilmesi için “Time Step” (zaman adımı örnekleme) analiz süresini çok uzatmayacak şekilde mümkün olduğunca küçük seçilmelidir. Yani analiz süresinin simülasyon kararlı duruma gelene kadar seçilmesi analiz sonucunun gerçeğe yakınlığı açısından önemlidir. Bu süre seçilirken transformatörün eğrilerinin kararlı duruma gelmesi dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada tasarlanan modeller için aşağıda Şekil 4.20’de görüldüğü gibi örnekleme zaman aralığı 0.0005 s ve simülasyon bitiş süresi 0.1 s olarak ayarlanmıştır. Belirlenen zaman aralığında tüm değerler için görüntüler kaydedilerek simülasyonlar elde edilmektedir. Analiz süresinin belirlenmesinin işlem basamakları programın ara yüzünde *Maxwell 3D>Analysis Setup>Add Solution Setup* şeklinde olmaktadır. Şekil 4.20’de “*Analysis Setup*” ekranı görülmektedir.



Şekil 4.20: Tasarımın Analsis Setup ayarları

Analysis Setup oluşturmak için

- Maxwell 3D > Analysis Setup > Add Solution Setup

Çözüm ekranında,

- General tab
- Stop time: 0.1 s
- Time step: 0.0005 s

Kaydetme alanı

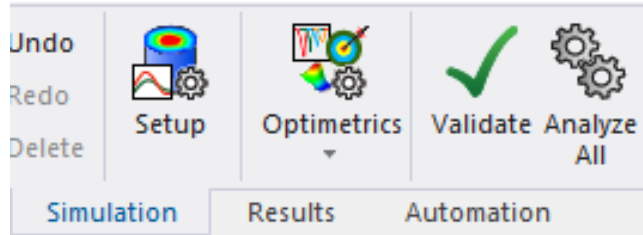
- Linear Step Start: 0.08 s
- Stop: 0.1 s
- Step Size: 0.0005 s

Çözücü sekmesi seçilerek

- Add to List
- Solver tab

Nonlinear Residuals: 1e-6 (Doğrusal olmayan (BH Eğrisi için doğru yakınsama sağlamak)

Tasarlanan modelin analizine başlamak önce doğrulama (*Validate*) işlemi yapılır. Eğer modelde analize engel bir durum mevcut değilse Şekil 4.21’de gösterilen “*Analyze All*” seçilerek modelin analizi başlatılır.

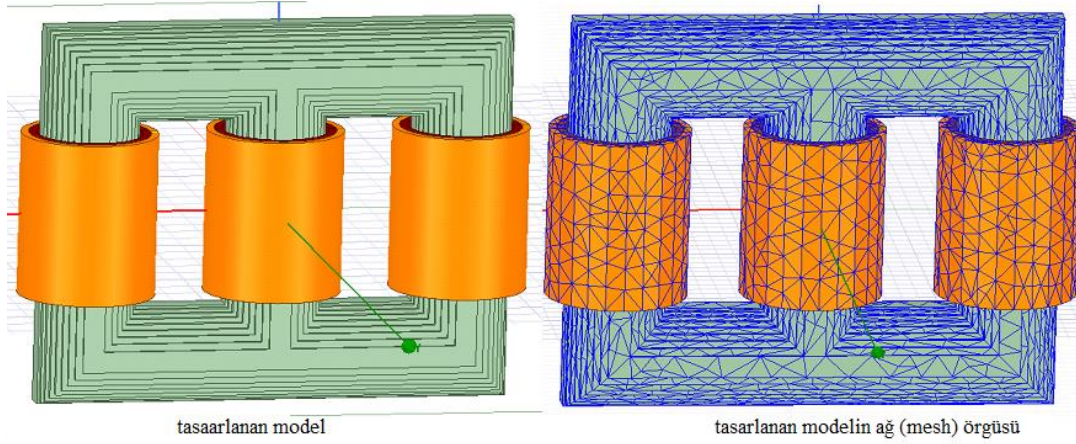


Şekil 4.21: Modeli doğrulama ekranı

4.3.10 Modelin ağ (mesh) ayarları

ANSYS@MAXWELL programında tasarlanan modele göre bir ağ program tarafında otomatik olarak üretilir. Ağ oluşturulduktan sonra her model için bir alan çözümü hesaplanır. Tasarlanan model için otomatik olarak oluşturulan ağ gerçeğe yakın bir analiz sonucu için genelde yeterli olmamaktadır. Gerçek değerlere daha yakın bir analiz için, her eleman küçük bir bölgeye ayrılır ve ağ sayısı arttırılarak doğru çözüme yaklaşılr. Modelin

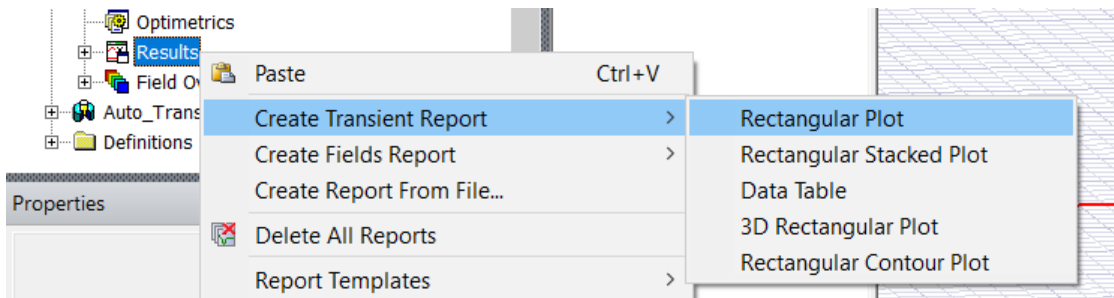
ağ (mesh) sayısı arttıkça analizden elde edilen simülasyonun sonuçları da gerçeğe çok yakın olur. Ağ sayısını arttırmanın dezavantajı ise analiz süresinin uzatmasıdır. Şekil 4.22’de tasarlanan bir modelin normal ve ağ (mesh) yapılmış örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.22: Transformator modelinin ağ (mesh) örgüsü

4.3.11 Analiz raporlarının oluşturulması

ANSYS@MAXWELL programı ile transformatorlerin kayıpları, manyetik akı dağılımları, akımları, gerilimleri, akım yoğunlukları, manyetik alan yoğunluğu ve elektromanyetik alan kuvvetlerinin sonuçları elde edilebilmektedir. Elde edilen değerleri raporlamak için “**Create Transient Report**” seçeneğinin altında tüm sonuçların elde edilmesi mümkündür. Analiz işlemi devam ederken veya analiz bittikten sonra programda projenin adı altında ‘**Result**’ bölümünden ‘**Rectangular Plot**’ seçeneği ile ilgili değişkenlere ait tüm grafikler Şekil 4.23’te verilen menü takip edilerek elde edilebilir. Sonuç raporlarının ara yüzdeki işlem basamakları ise **Result>Create Transient Report>Rectangular Plot** şeklinde olmaktadır.

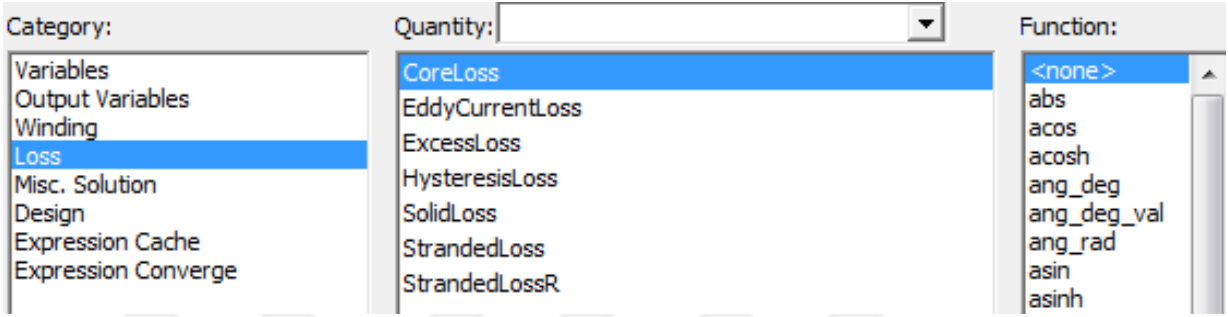


Şekil 4.23: Simülasyon sonucunda sonuç raporlarının oluşturulması

Sonuçlar, iki eksen üzerindeki miktarların uygun bir şekilde seçilebildiği bir XY grafiğinde görüntülenir.

4.3.12 Kayıp eğrileri

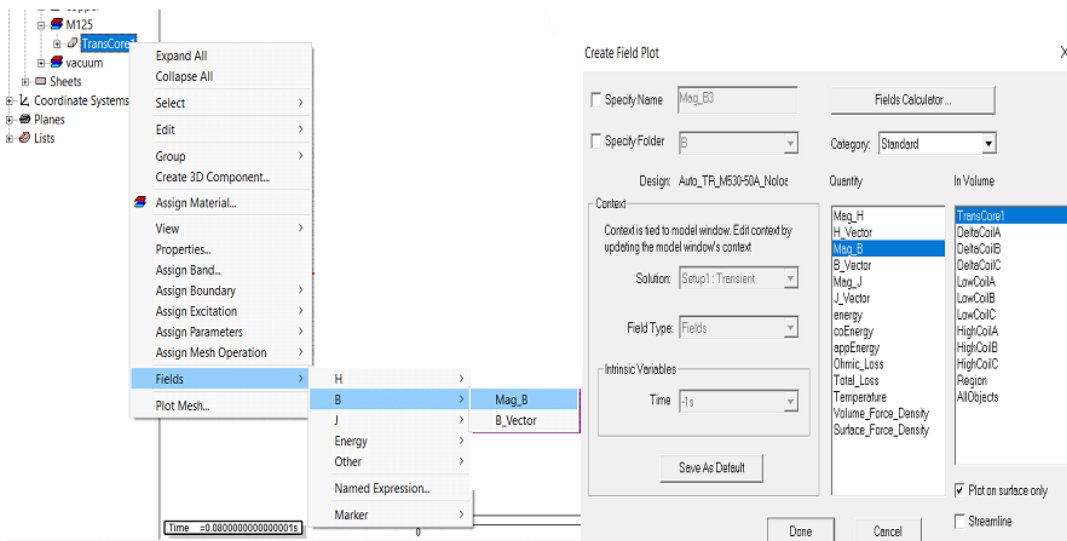
Analiz işleminden sonra '**Result**' bölümünden '**Loss**' seçeneği ile modelin kayıplarına ait tüm grafikler Şekil 4.24'te verildiği gibi elde edilebilir.



Şekil 4.24: Transformatör kayıplarının grafiklerinin görüntülenmesi

4.3.13 Elektromanyetik alanlar

Analiz işlemi gerçekleştikten sonra programda nüve malzemesi seçilerek sonra '**Field**' seçeneği ile model ile ilgili elektromanyetik bütün değerler elde edilebilir. Bu alanların belirlenmesinin işlem basamakları **Maxwell 3D>Fields>B** şeklinde olmaktadır. Şekil 4.25'te bu işlemlere ait görseller sunulmuştur.

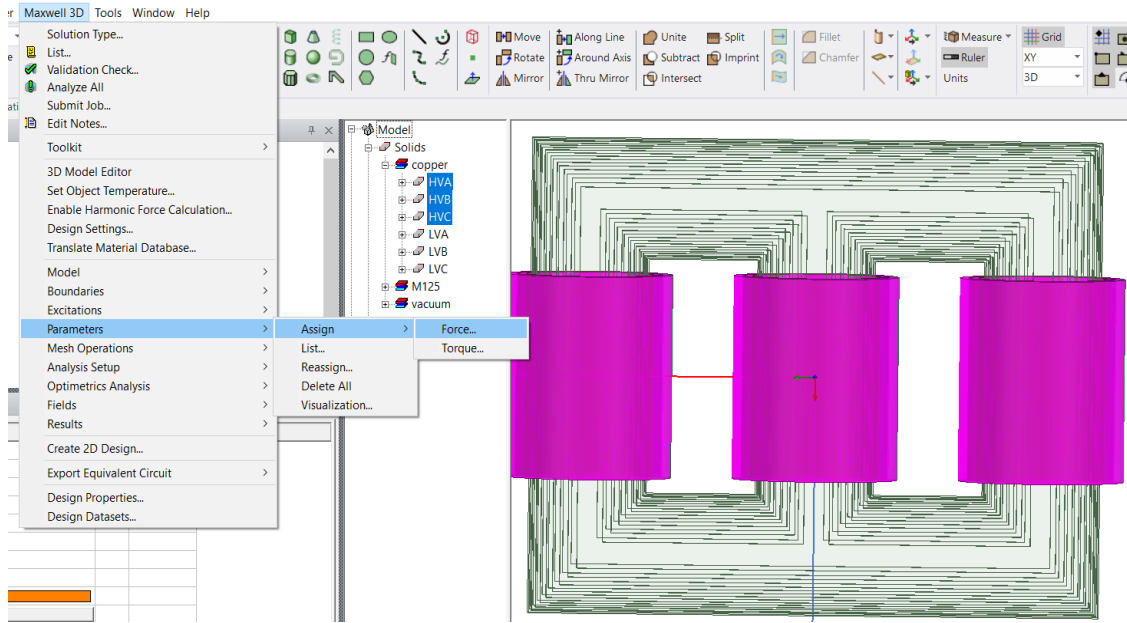


Şekil 4.25: Elektromanyetik alanların belirlenmesine ait görseller

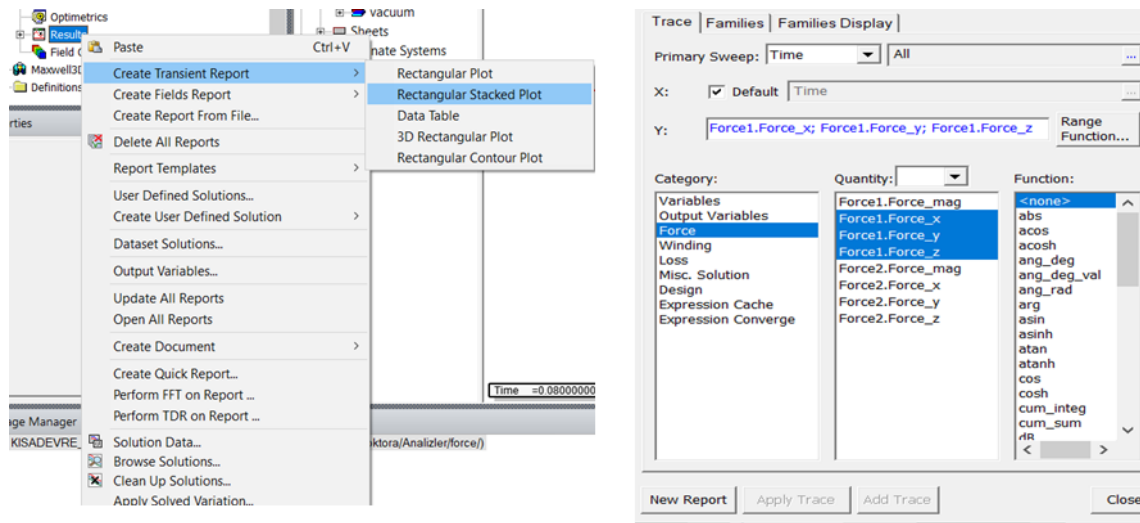
Bu yöntemle modelin birer parçası olan nesnelere seçilerek hesaplanan alan dağılımını ve aynı zamanda mesh'i görüntülemek mümkündür.

4.3.14 Elektromanyetik kuvvetler

Elektromanyetik kuvvetler için modelin analizine başlamadan önce tasarlanan modele ekstra parametre eklemek gerekmektedir. Önce sargılar seçilir daha sonra kuvvet parametresi eklenir. Bu şekilde sargılarda meydana gelen elektromanyetik kuvvetler belirlenmiş olur. Şekil 4.26' ve 4.27de bu işlemin nasıl yapıldığı gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Kuvvet parametresinin analiz sürecine eklenmesi

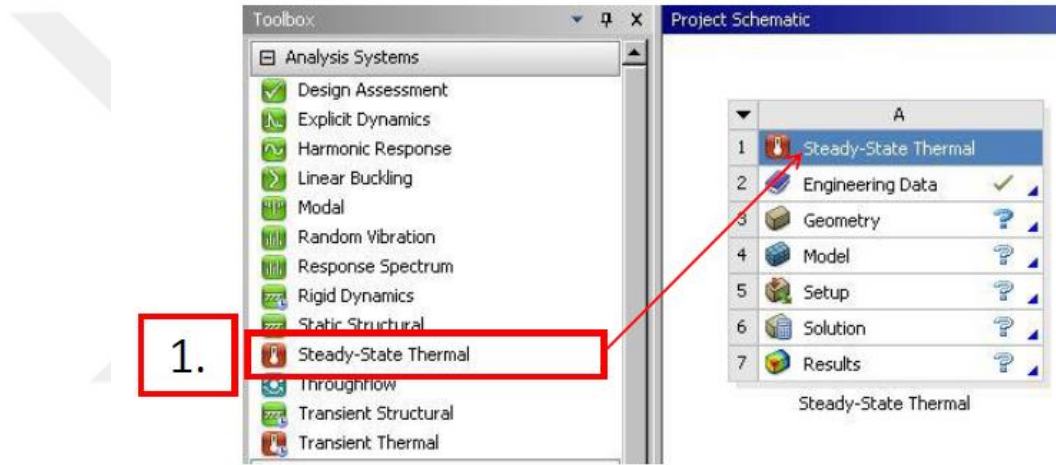


Şekil 4.27: Elektromanyetik kuvvet grafiklerinin elde edildiği ekran.

4.3.15 Termal analizler

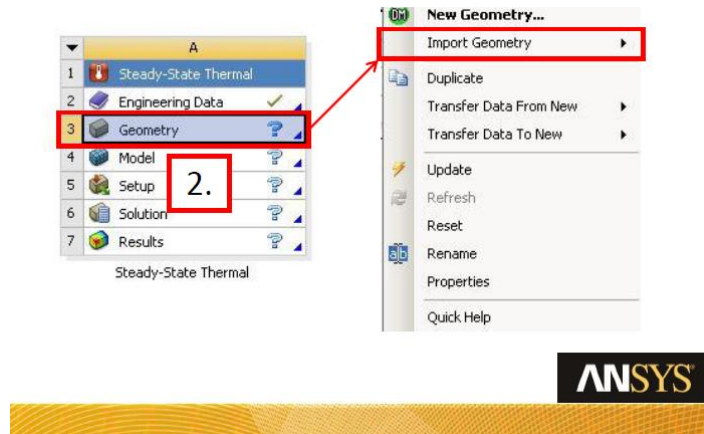
Trafonun termal analizinin yapılabilmesi için tasarlanan trafonun önce ANSYS@Maxwell ortamında elektromanyetik alan analizinin gerçekleştirilmiş olması gerekmektedir. Analizi gerçekleştirilen model ANSYS@Maxwell ile bütünleşik çalışan ANSYS@Workbench ortamına aktarılır. Buradan da ANSYS@Mechanical ortamına aktarılarak termal analiz gerçekleştirilir. Termal analiz ve çözüm aşamaları Şekil 4.28-32’de sırasıyla gösterilmiştir.

- Yeni bir “Steady State Thermal” analiz sistemi oluşturmak için, araç kutusundan, “Steady State Thermal” seçeneği çift tıklayıp seçilir.



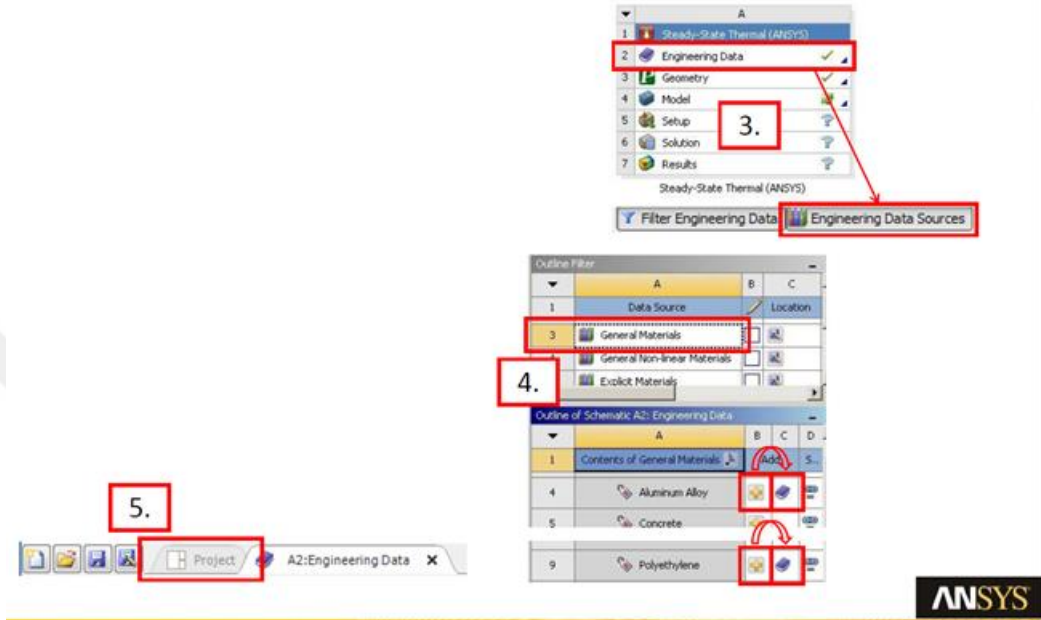
Şekil 4.28: Termal analiz türünün seçilmesi

- Modelin geometri hücresi seçilir, ardından RMB >Import Geometry> Brows>Pump_housing.stp ” geometri program ortamına aktarılır.



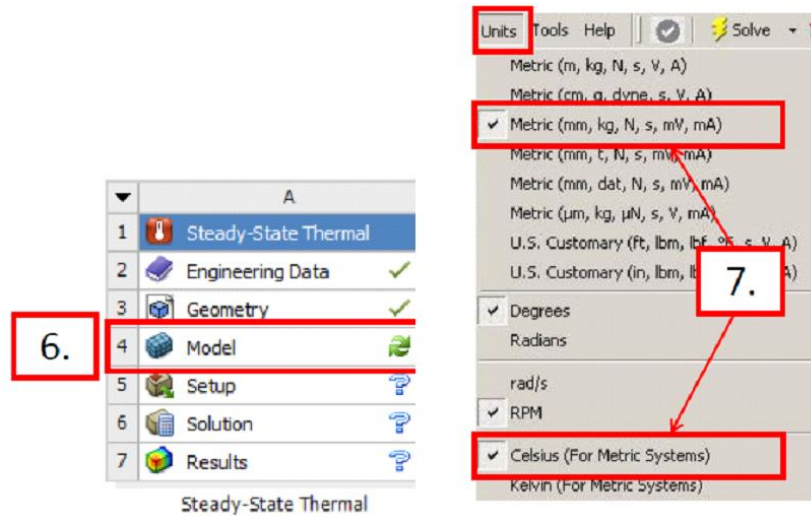
Şekil 4.29: Modelin geometrisinin programa aktarılması

- “Engineering Data” seçeneğinden tasarlanan model ile ilgili bütün malzemelerin yer aldığı mühendislik veri kaynakları araç çubuğu seçeneği etkinleştirilir.
- Daha sonra “General Material” veri kaynağını seçilir.
- Seçim yapıldıktan sonra gelen ekrandan tasarımımıza uygun materyaller seçilir.
- Materyaller seçildikten sonra proje ekranına gelinir.



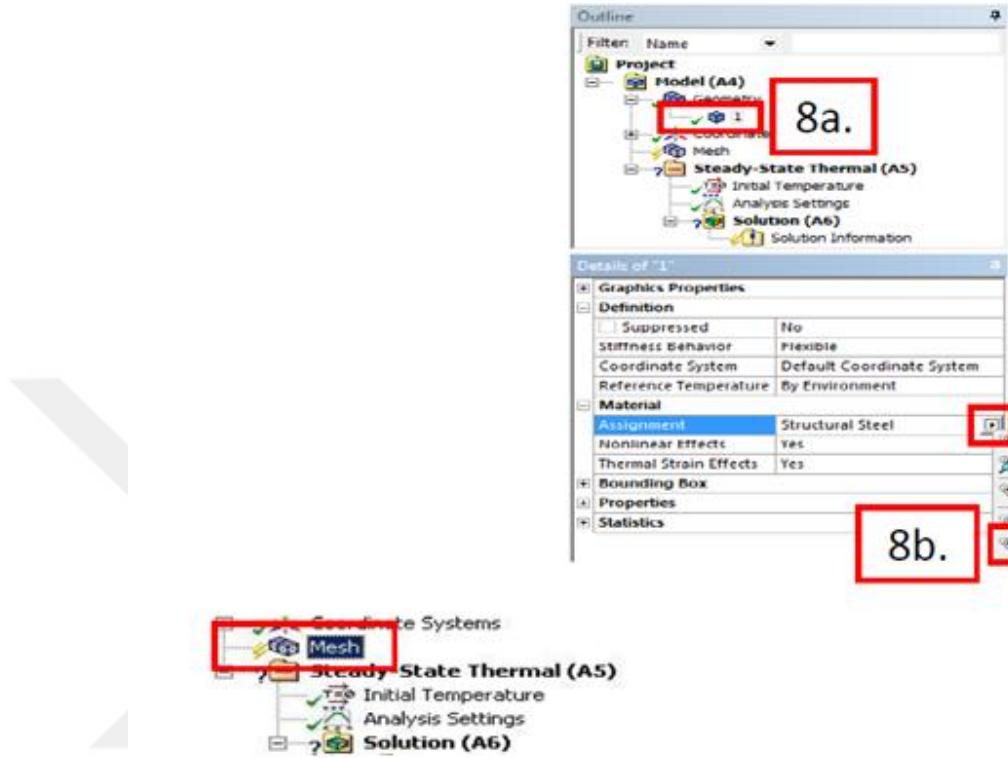
Şekil 4.29: Materyal atamasının yapılması

- Gelen ekranda “Model” seçeneği tıklanarak model ANSYS@Mechanical ortamına aktarılmış olur.
- “Unit Menu” sekmesinden modelin gerekli birimleri belirlenir.

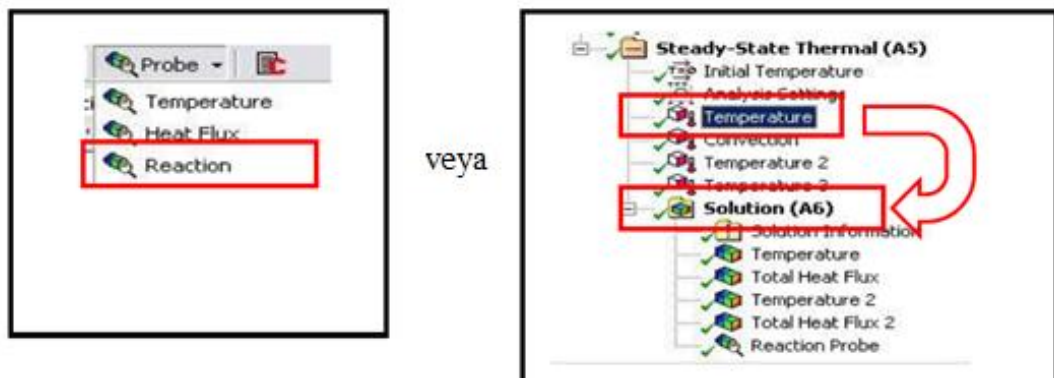


Şekil 4.30: Modelin “Mechanical” ortamına aktarılması

- Transformatör ve sargıların malzeme ataması gerçekleştirilir.
- Model geometrisinin malzeme atanması yapılacak kısmı seçilir.
- Ayrıntılar görünümünde malzeme ataması yapılır
- Mesh ayarlanır.



Şekil 4.31: Modelin malzeme ataması ve mesh (ağ)'in gerçekleştirilmesi



Şekil 4.32: Modelin malzeme ataması ve mesh (ağ)'in gerçekleştirilmesi

Sonuç olarak burada transformatörün termal alan analizinin gerçekleştirilmesi için gerekli adımlar özetlenmiştir. Bu konu uygulama bölümünde daha detaylı incelenecektir.

5. TRANSFORMATÖR MODELLERİNİN ELEKTROMANYETİK VE TERMAL ANALİZLERİNİN SONUÇLARI

5.1 Elektromanyetik Analiz

Transformatörde meydana gelen elektromanyetik alan dağılımlarını belirlemek amacıyla bu analizler gerçekleştirilmektedir. Tasarımın elektromanyetik yönden analizi için gereken parametreler aşağıda verilmiştir.

- Transformator modelinin geometrisi
- Transformatorün manyetik nüve malzemesine ait karakteristik B-H eğrisi
- Kullanılan malzemenin yoğunluğu, elektriksel geçirgenliği ve sac kalınlığı
- Giriş ve çıkış akım oranları
- Nüveye, sargılara ve izolasyona ait malzeme özellikleri

Elektromanyetik analiz için, modelin geometrisi ve modelin tüm bileşenlerinin her açıdan tüm özellikleri programda tanımlanmıştır. Sonraki aşamada nüvenin, sargıların ve transformator modelinin diğer bölümlerinin malzeme özellikleri tasarlanan modele aktarılmış ve tasarım doğrulanmıştır. Modellerin tüm parametrelerinin küçük alanlara ayrılması için mesh yapılmıştır.

5.2 Termal Analiz

Termal analiz için ANSYS programının bir özelliği olan farklı alanların birleşimi ile tasarlanan ve analizi gerçekleştirilen modelin geometrisi Maxwell ortamdan Mechanical ortama aktarılmıştır. Workbench ortamına aktarılan modelin tüm bileşenlerinin sıcaklık dağılımlarını belirlemek için bu ortamda analiz ve simülasyon gerçekleştirilmiştir. Bu program ortamında termal analiz iki farklı şekilde gerçekleştirilebilmektedir;

- Doğrudan birleşim
- Dolaylı birleşim

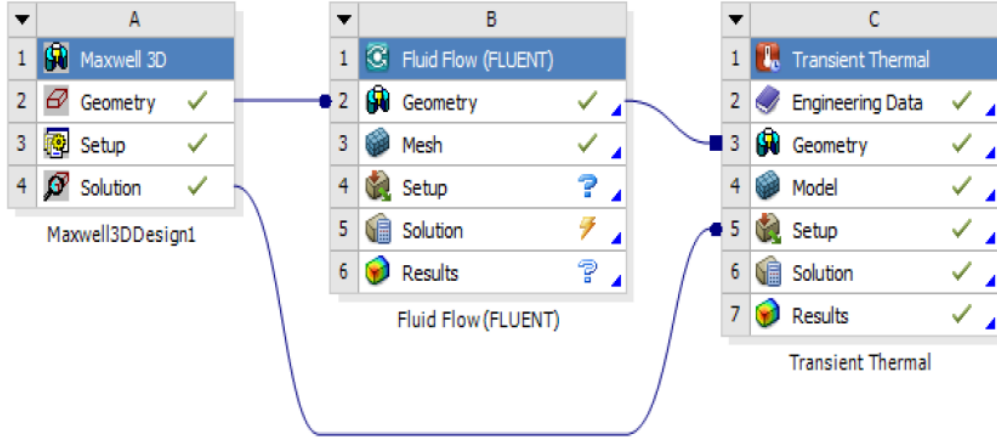
Doğrudan birleşim yönteminde, iki alan (Maxwell ve Mechanical) doğrudan birleştirilir ve birinci alanın sonuçları ikinci alanın yükü veya girişi olarak uygulanır. Dolaylı birleşim yönteminde ise Maxwell ve Mechanical alanları ayrı ayrı analiz edilir. İlk alanın sonuçları bir dosyada saklanır ve ikinci alan analizi sırasında yük veya giriş için kullanılır. Bu çalışmada doğrudan birleşim yöntemi kullanılmıştır. Maxwell ortamındaki analizin sonuçları Mechanical ortamda termal analiz için doğrudan yük olarak kullanılmıştır.

5.3 Elektromanyetik ve Termal Modellerin Birleşimi

Transformatörlerin sıcaklık analizi için bu bölümde sayısal bir yöntem olarak SEY kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda kayıplar ya uluslararası bir standart olan Uluslararası Elektroteknik Komitesi (International Electrotechnical Comitte (IEC)) standartlarına göre hesaplanır ya da çoğunlukla bilinen değerler olarak varsayılır. Hesaplar genelde, sadece sıcaklığın sınır koşulları, geometrik bilgiler ve malzeme bilgisi kullanılarak termal analiz yöntemiyle yapılmaktadır. Elektriksel büyüklüklerin sıcaklığa veya sıcaklığın elektriksel büyüklüklere etkisi göz önüne alınarak sıcaklık hesaplamalarının yapılması zor olduğu için nadiren yapılmaktadır.

Transformatörlerin karmaşık durumlarda daha doğru modellenebilmesi-için kayıp ve ısınma mekanizmalarının eş zamanlı belirlenmesi gerekir. Buna bağlı olarak da akım taşıma kapasitesinin hesaplanması gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmesini sağlayacaktır. Bu bölümde, transformatörlerin ısı transferi ve kapasitesinin belirlenmesi için birleştirilmiş elektromanyetik-termal model önerilmektedir. Öncelikle transformatörlerin elektromanyetik analizi ve kayıp mekanizmaları yukarıdaki bölümlerde detaylı olarak incelenmiş ve bu bölümde bunların sıcaklık ile bağlantıları ortaya konmuştur. Ardından oluşturulan elektromanyetik-termal modelin birleşiminin, SEY çözümü gerçekleştirilecektir. SEY kullanılarak yapılan çoklu fiziksel çözümler, mevcut tekil çözümlerle karşılaştırıldığında, karmaşık ve özel çalışma koşullarında dağıtım transformatörlerinin modellenmesini ve incelenmesini daha doğru şekilde sağlamaktadır.

Bu bölümdeki çalışmanın amacı, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, önerilen elektromanyetik-termal modelin birleşimi ile tasarlanmış üç fazlı dağıtım transformatörünün sıcaklık dağılımının incelemesidir. Analiz için ANSYS yazılımının iki modülü kullanılacaktır. Bunlar. 3D ANSYS@MAXWELL ve ANSYS@Mechanic'dir. Bu modüllerin her ikisi de aynı ortamda (ANSYS Workbench) birleştirilmiştir. Elektromanyetik analizini yaptıktan sonra, transformatörün kayıpları ve bu durumda nüve üzerindeki akı dağılımının detaylı olarak incelenmiştir. Ardından, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi ANSYS Workbench kullanılarak, MAXWELL 3D ile ANSYS@Mechanic modülü birleştirilmiştir.



Şekil 5.1: ANSYS Workbench ortamında, ANSYS Mechanical ile Maxwell 3D'nin birleştirilmesi

Programın mühendislik veri kısmında, transformatörün bakır, nüve ve diğer kısımlarının manyetik ve termal özelliklerinin, pratik özelliklerine göre ayarlanması gerekir. İncelenen transformatörün farklı bölümlerinin ısı özellikleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1: Transformatörde kullanılan malzemelerin termal özellikleri

Özellikler	Nüve	Bakır
Yoğunluk	7650 kg/m ³	8933 kg/m ³
Termal iletkenlik	5 W/m ² .°C	400 W/m ² .°C
Spesifik ısı		385 J/kg.°C

5.4 Ototransformatörlerin Elektromanyetik ve Kayıp Analizleri

Transformatörler tasarlanırken transformatörün kullanılacağı sistem, aktaracağı elektriksel güç, sistemin devamlılığı ve güvenliği dikkate alınmalıdır. Eşleştirilmiş fiziksel ve matematiksel modeller, hem doğru hem de uygulanması kolay bir sistemin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Bu çalışma transformatörün elektromanyetik akı dağılımını kayıplarını belirlemek amacıyla yapılmıştır.

Transformatör tasarımcıları önceden tasarımlarını sadece teorik olarak gerçekleştirdikleri için sadece matematiksel modelleri baz almışlardır. Bunun için için de aşağıda verilen Maxwell denklemleri kullanılmıştır [47].

- Faraday'ın indüksiyon yasası:

$$\nabla \times E = -\dot{B} \quad (5.1)$$

- Gauss'un manyetik yasası:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (5.2)$$

- Ampere'nin akım yasası:

$$\nabla \times H = j + \dot{D} \quad (5.3)$$

- Gauss'un elektrik yasası:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (5.4)$$

Yukarıda verilen denklemlere dayanarak elektromanyetik çözümler gerçekleştirilmiştir.

Nüve kayıpları (P_c) genel olarak iki kısımdan meydana gelmektedir. Bunlar, histerezis kayıpları (P_h) ve girdap akım kayıplarıdır (P_e). Steinmetz denklemine göre, nüve kayıplarının hesaplanması sinüzoidal çalışma frekansına ve sabit olmayan manyetik akı yoğunlu dağılımına (Mag-B) bağlıdır.

Bu çalışmada kullanılan sayısal hesaplama yönteminde, nüve kayıplarının hesaplanması aşağıda verilen denklemlere ve sabit değerlere göre hesaplanmaktadır.

$$P_c = P_h + P_e + P_{excess} = K_1 B_m^2 + K_2 B_m^{1.5} \quad (5.5)$$

- Eddy akım kayıpları:

$$P_e = k_c (f B_m)^2 \quad (5.6)$$

- Histeresis kayıplar:

$$P_h = k_h f B_m^2 \quad (5.7)$$

- Excessive kayıplar:

$$P_{exces} = k_e (f B_m)^{1.5} \quad (5.8)$$

Bu yüzden:

$$K_1 = k_h + k_c f^2 \quad (5.9)$$

$$K_2 = k_e f^{1.5} \quad (5.10)$$

Girdap akımı kayıp katsayısı şu şekilde hesaplanır:

$$k_c = \pi^2 \sigma \frac{d^2}{6} \quad (5.11)$$

Burada σ iletkenlik, d sac kalınlığıdır. Katsayılar K_1 ve K_2 fonksiyonun minimize edilmesiyle elde edilir:

$$f(K_1 K_2) = \sum [P_{vi} - (K_1 B_{mi}^2 + K_2 B_{mi}^{1.5})]^2 = \min \quad (5.12)$$

P_{vi} , B_{mi} - ölçülen kayıp karakteristik eğrisi üzerindeki verilerin i-inci noktası.

Diğer kayıp katsayısı:

$$k_h = (K_1 - k_c f_0^2) / f_0 \quad (5.13)$$

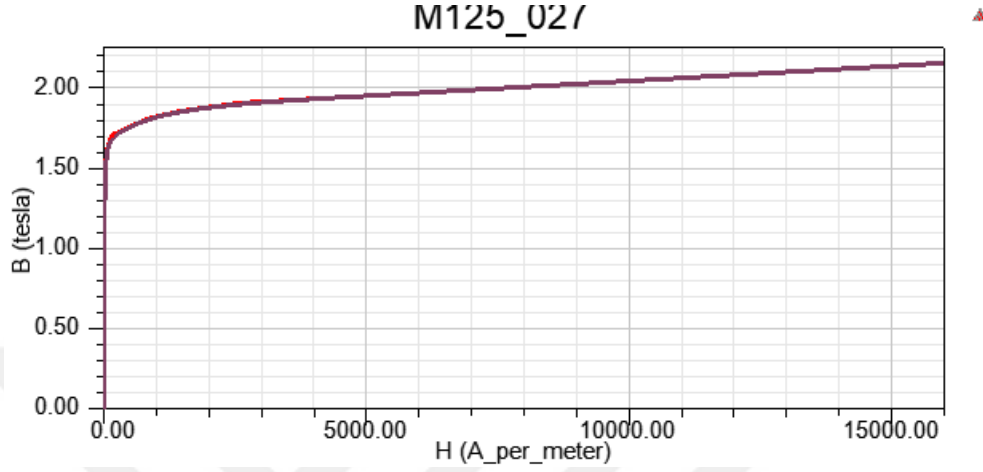
f_0 kayıp eğrisi test frekansı.

Simülasyonda kullanılan transformatör, üç fazlı, manyetik nüveli, lamine çelik, transformatöre ait özellikler Çizelge 5.2'de verilmiştir.

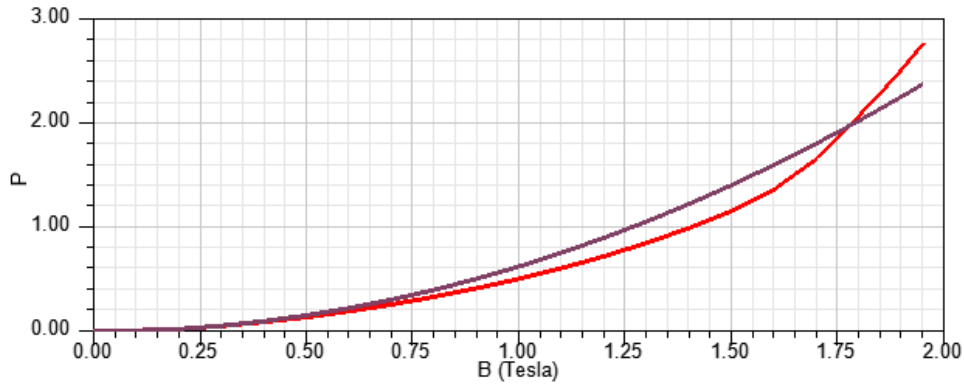
Çizelge 5.2: Transformatörün Değerleri

	Değerler		
	HV Sargısı	LV Sargısı	Delta
Nominal güç		300MVA	
Nominal gerilim	345kV	120kV	13.8kV
Nominal frekans		50Hz	
Sarım sayıları	461.5	246	49
Sargı yüksekliği		1000 mm	
Nüve materyali		M125-027S lamine çelik	
Sac kalınlıkları		0.27 mm	
Dolgu faktörü		0.95	
Boyunduruk		5370 mm	
Bacak		4020 mm	
yüksekliği			
Nüve Stages		60	
Materyal		7650 kg/m ³	
yoğunluğu			

Transformatörün tasarımında ve simülasyonunda sargılar için bakır, nüve için kullanılan laminasyon malzemesinin doğrusal olmayan manyetik karakteristik B-H ve BP eğrisi Şekil 5.2 ve 5.3'te verilen lamine çelik kullanılmıştır.



Şekil 5.2: Transformatörün nüvesinde kullanılan materyalin doğrusal olmayan B-H eğrisi

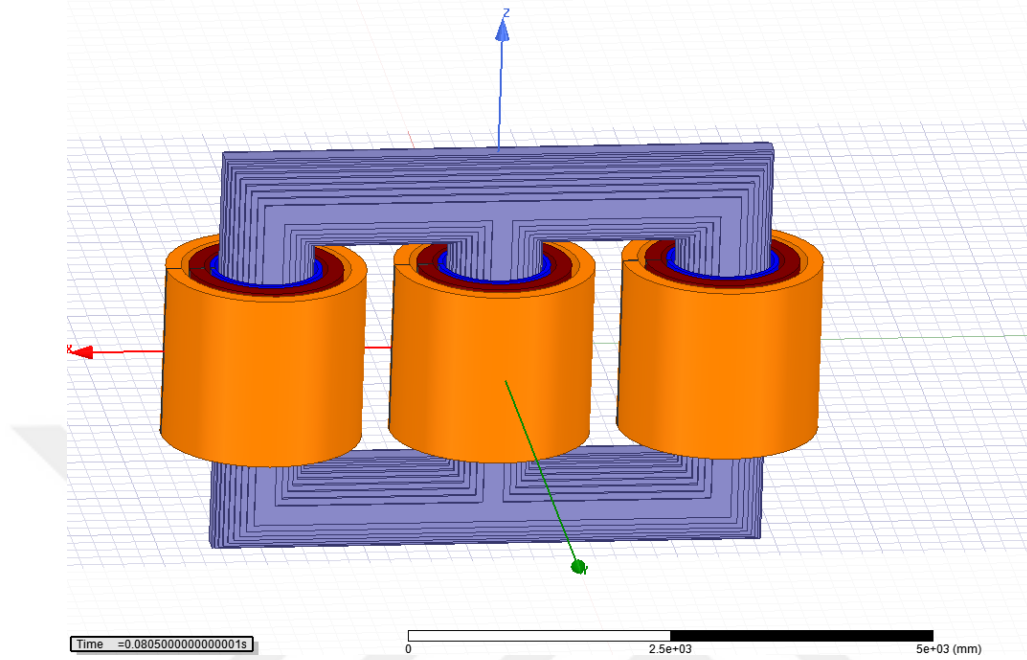


Şekil 5.3: Transformatörün nüvesinde kullanılan materyalin doğrusal olmayan B-P eğrisi

Burada asıl B-P ve B-H eğrisi kırmızı renk ile gösterilmiştir. Diğer eğriler regresyon eğrileridir.

ANSYS@MAWXELL-3D ile tasarlanan transformatör modelinin analiz aşamalarının daha iyi izlenebilmesi için (toplam çekirdek kayıpları ve elektromanyetik davranış) bağlantı çubukları, trafo tankı ve diğer parçalar program ortamında saklanarak basitleştirilmiş bir fiziksel model geometrisi kullanılmıştır. Tasarlanan transformatörün başka bir özelliği ise

her adım için aşağıdaki ve yukarıdaki yoke kesiklerdir. Burada, nüvede kullanılan malzemenin miktarını azaltma, çekirdek kayıplarını düşürme ve taşımayı daha kolay hale getirme amaçlanmıştır. Tasarlanan transformatörün modeli Şekil 5.4'te sunulmuştur.



Şekil 5.4: Tasarlanan transformatörün modeli

5.4.1 Transformatörün uyarılması ve analizi

Transformatörün 3D analizi için, tasarlanan modellerde bazı sadeleştirmeler yapılmıştır. Bu sadeleştirmeler, izole edilmiş manyetik nüve, sargı dizilişi ve diziliş basamakları arasındaki mesafe dikkate alınarak yapılmıştır. Bu çalışmada tüm simülasyonlar zaman domeninde (Transient) gerçekleştirilmiştir. Her sargı için uyarma bölümleri oluşturularak uyarma için “Terminal Coil” seçilip sarım sayıları programda tanımlanmıştır. Trafonun nüvesi için “Coreloss” set edilip sargılar için “Edd current effect” ihmal edilmiştir.

Bu işlemlerden sonra tüm terminaller ait oldukları sargılara atanmıştır. Uyarma gerilimi verilerek, sarımlar ve dirençlerin hesabı için “stranded” yapı seçilmiştir.

$$R = \frac{\rho \cdot l}{s} \Omega \quad (5.14)$$

Yüksüz durumda direnç değerleri;

$$R_{HV} = 1m\Omega$$

$$R_{LV} = 1m\Omega$$

$$R_D = 15.2M\Omega$$

olarak seçilmiştir.

Fazlardaki açı farkından dolayı uyarma gerilim değerleri;

$$V_a = V_p (1 - e^{1-50.t}) \cdot \cos(2.\pi.t.50) \quad (5.15)$$

$$V_b = V_p (1 - e^{1-50.t}) \cdot \cos\left(2.\pi.t.50 + \frac{2}{3}.\pi\right) \quad (5.16)$$

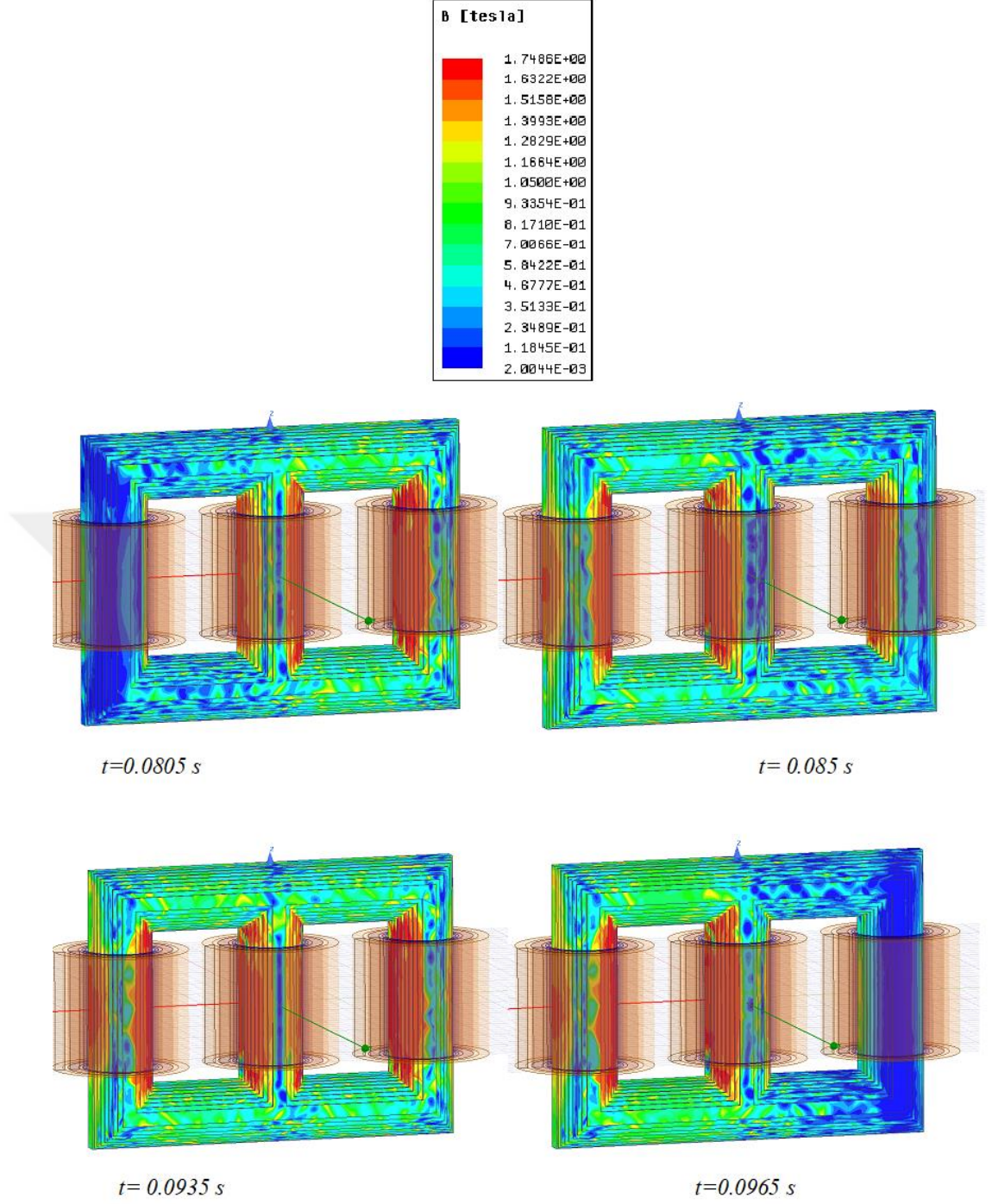
$$V_c = V_p (1 - e^{1-50.t}) \cdot \cos\left(2.\pi.t.50 + \frac{4}{3}.\pi\right) \quad (5.17)$$

olarak tanımlanmıştır. Burada gerilimin üssel olarak verilmesinin sebebi, ani olarak meydana gelebilecek akımları önlemek ve simülasyon süresini kısaltmaktır.

Burada V_p değeri gerilim seviyesine bağlı olarak değiştirilebilir.

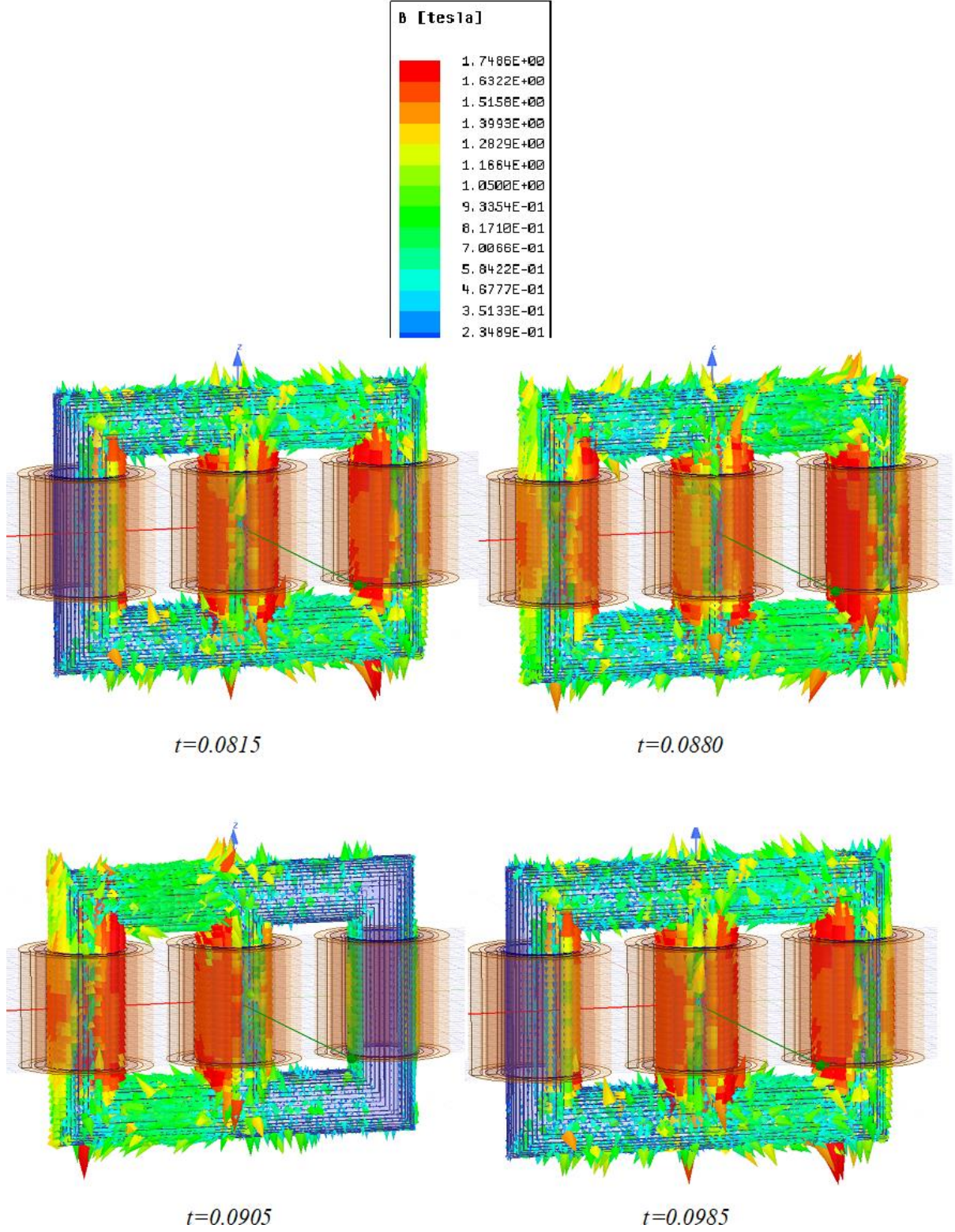
Geometrinin tüm paraçaları ve parçaların iç kısımları için mesh yapılmış, uzunluğa bağlı olarak “tetrahedron” sayısına sahip bir uzunluk ayarlanmıştır.

Analiz Setup için 0.0005 s’lik adımlarla 0-0.1s zaman aralığı seçilmiştir. Gerilimin nonlineer bir şekilde en tepe noktaya ulaştığı ve en önemli periyot süresi olan 0.08 s ile 0.1 s arası zaman aralığı “Analiz Setup” için kayıt aralığı olarak seçilmiştir. Tüm bu işlemlerden sonra analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarından transformatöre ait elektromanyetik değerler ve kayıplar elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 5.5-7’de görsel olarak sunulmuştur.



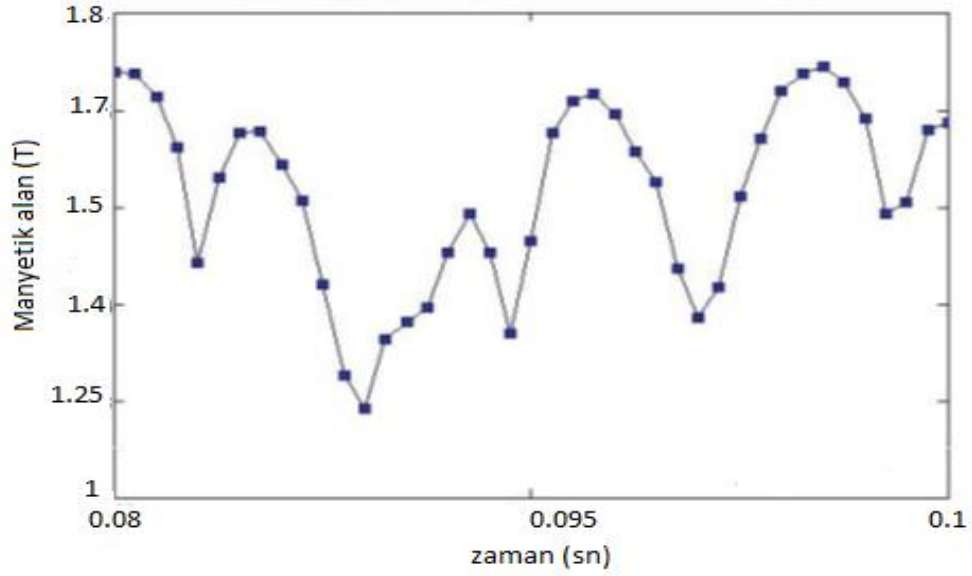
Şekil 5.5: Farklı zaman aralıkları için manyetik akı dağılımı

Nüvede meydana gelen manyetik akının vektörel dağılımının ve yönlerinin farklı zaman aşamalarının görseli Şekil 5.6'da verilmiştir.



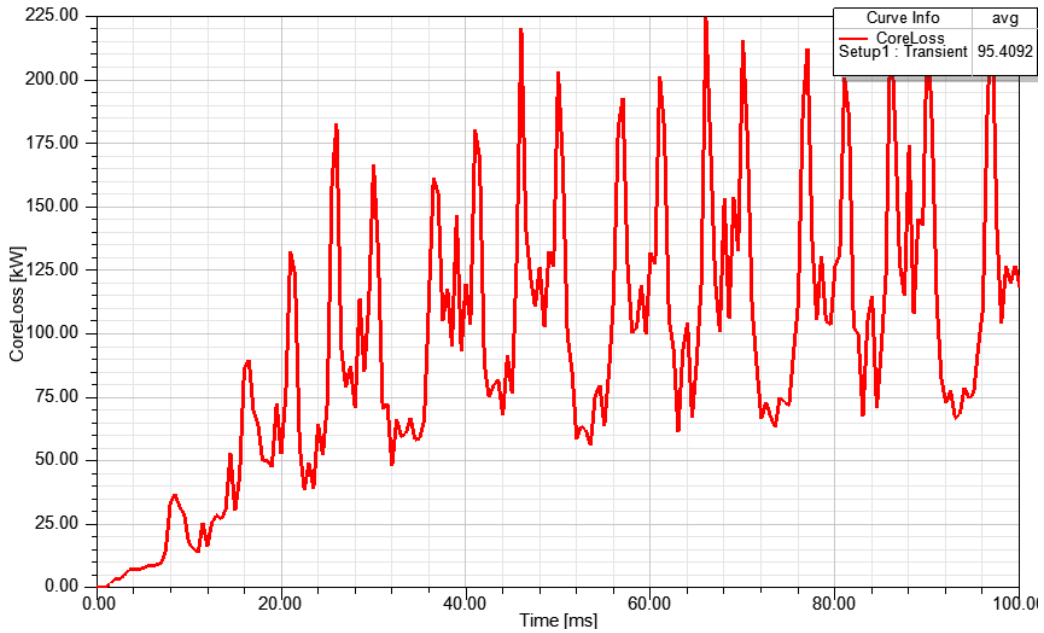
Şekil 5.6: Farklı zaman aralıkları için manyetik akının vektörel dağılımı

Zamana bağlı olarak değişen manyetik akı dağılımının grafiksel gösterimi Şekil 5.7’de sunulmuştur.

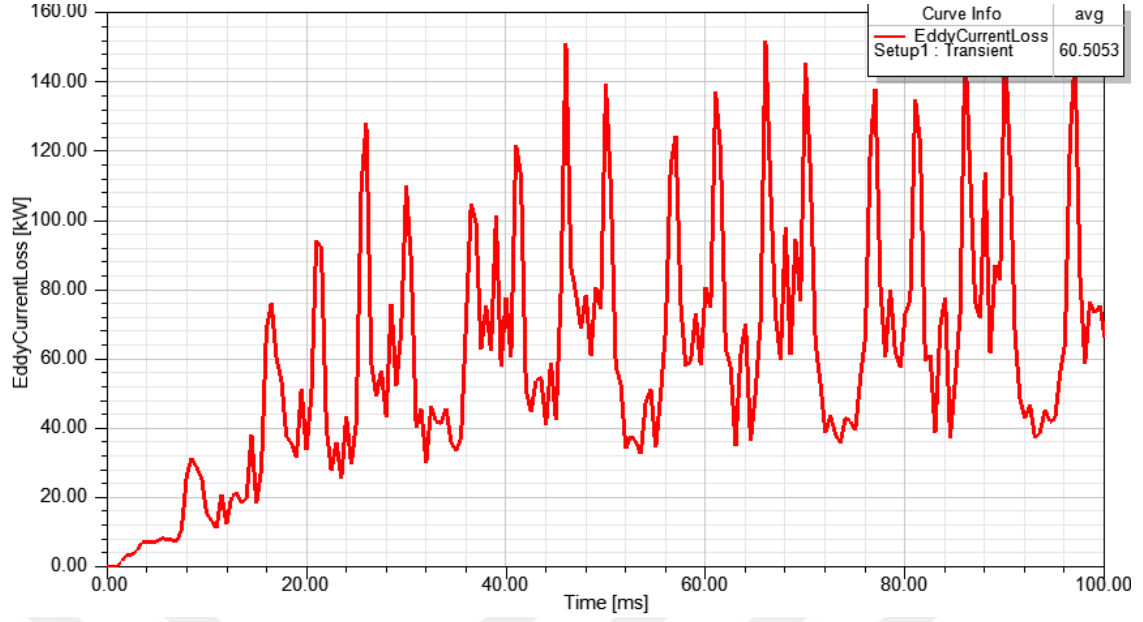


Şekil 5.7: Manyetik akı dağılımının grafiksel gösterimi

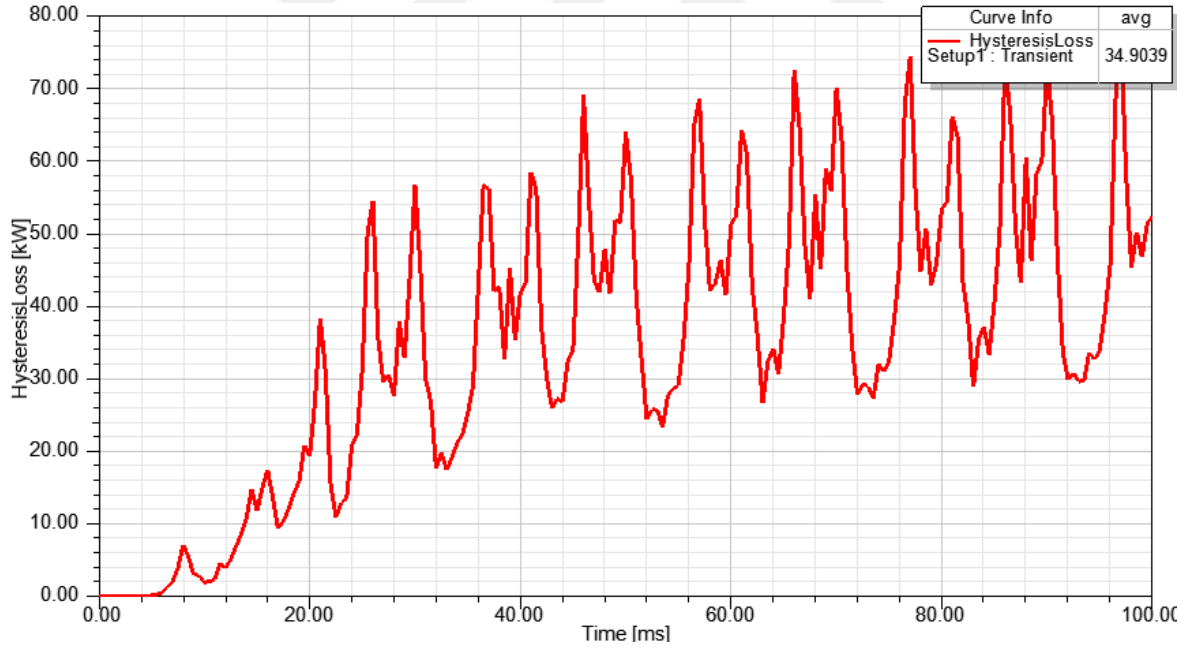
Nüve kaybı, histerezis kaybının ve girdap akımı kaybının toplamı olan alternatif mıknatıslanma nedeniyle manyetik bir nüvede meydana gelen kayıptır. Yüksek frekanslı harmonik akımlar, girdap akımları ve histerezise bağlı olarak nüve kaybının artmasına neden olurlar. Bu kayıplar transformatörün ısınmasına neden olurlar. Bu çalışmada transformatörün nüvesinde meydana gelen düzensiz manyetik akı dağılımının neden olduğu kayıplar elde edilmiş ve bu kayıpların grafikleri Şekil 5.8-10'da sunulmuştur.



Şekil 5.8: Trafonun nüvesinde meydana gelen toplam kayıp.



Şekil 5.9: Trafonun girdap (eddy) akım kayıpları.



Şekil 5.10: Trafonun hysteresis kayıpları.

Tasarlanan modelin performansı deneysel ve teorik olarak belirlenen transformatör performansı ile karşılaştırılmış ve sonuçlar doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında tasarlanan modelin daha optimum sonuçlar verdiği görülmüştür. Bunun nedeni nüvenin optimize edilmesidir. Sonuçlar Çizelge 5.3'te sunulmuştur.

Çizelge 5.3: Modellenen transformatörün densesel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Değer	Fabrika Sonuçları	Simülasyon Sonuçları	Teorik Sonuçlar
Nüve kaybı (kW)	101.3	95.4	98.3
Eddy akım kayıpları (kW)	64.2	60.5	62.7
Histeresiz kayıplar (kW)	37.1	34.9	35,6
Maksimum manyetik akı genliği (T)	1.81	1.79	1.76

Tez çalışmasının bu bölümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi dayalı ANSYS@MAXWELL ile transformatörlerin tasarımı ve transformatörlerin tüm bölgelerindeki kayıp hesaplaması, nüve üzerinden akan akı dağılımı, kaçak akıların hesaplanması ve görüntülenmesi açıklanmıştır.

Ayrıca bu çalışma ve elde edilen sonuçlar tasarlanan ürünü doğrulamaktadır. Tasarlanan model ve elde edilen sonuçlar, modelin elektromanyetik ve kayıp yönünden üretime hazır olduğunu göstermektedir. Elde edilen önemli değerler;

- Maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.74 T.
- Minimum manyetik akı yoğunluğu 1.2 T.
- Toplam nüve kaybı 95.34 kW olmuştur.

Tasarımcılar, nüve ve sargılar arasındaki mesafeyi azaltarak veya arttırarak, uygun manyetik nüve malzemesi kullanarak optimum tasarımlar elde edebilirler. Bu tezde kullanılan analiz ve simülasyon yöntemi, pahalı laboratuvar deneylerini, ölçümleri, atıl malzemeyi ve onarımları azalttığından hem ekonomik hem de pratiktir.

5.5 Farklı Malzemeler Kullanılarak Tasarlanan Transformatörlerin Analizi

Günümüzde enerji tüketiminin hızla artması buna karşılık enerji kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle transformatör kayıplarının ele alınması konularını önemli hale getirmiştir. Kayıpları en aza indirmek ve imalat maliyetini düşürmek tasarımcıların öncelikli hedefidir. Güç transformatörlerinin nüvesinde meydana gelen kayıplar güç sistemlerinde çalıştırılan transformatörlerin kayıplarının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Güç transformatörlerinde doğru simülasyon ve kayıpların tahmini, transformatörün hem tasarım aşaması hem de ömrü için çok önemlidir. Bu sebeple transformatör kayıplarını incelemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu analizlerde ağırlıklı olarak sonlu elemanlar

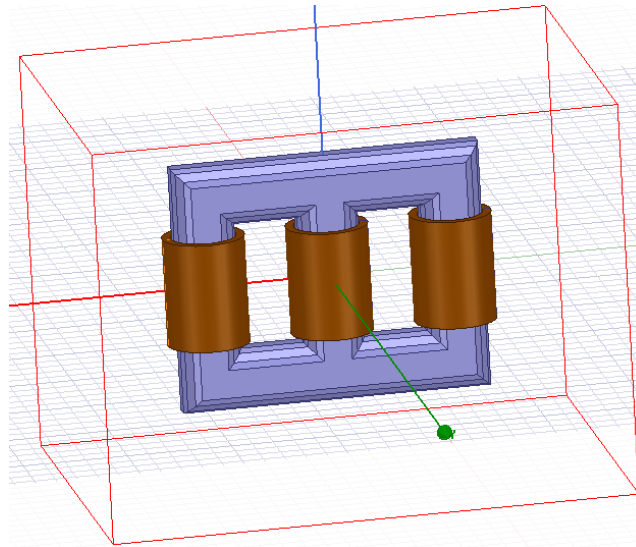
temeline dayanan algoritmalarından veya bu algoritmaları temel alan paket yazılımlardan faydalanılmaktadır.

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) dayanan ANSYS@MAXWELL ile elektromekanik bileşenlerin doğrusal olmayan geçici hareketi, bunların sürücü devresi ve kontrol sistemi tasarımı üzerindeki etkileri tam olarak karakterize edilebilmektedir. Bu programın gelişmiş elektromanyetik alan çözücülerinden faydalanılarak elektromekanik sistemlerin performansı anlaşılabilir. Bu sanal elektromanyetik laboratuvar sayesinde düşük maliyet ve gelişmiş sistem performansı ile önemli bir avantaj elde edilebilmektedir. ANSYS@MAXWELL ortamında transformatörün giriş gerilimi/çıkış gerilimi, transformatör tasarımının elektriksel alan dağılımı 2D veya 3D modellenerek analiz edilebilir. Trafo çevrim oranının yükte değişimi incelenerek doymanın etkisi analiz edilebilir, eşdeğer devre parametreleri çıkarılabilir ve sargı bakır kayıpları belirlenebilir.

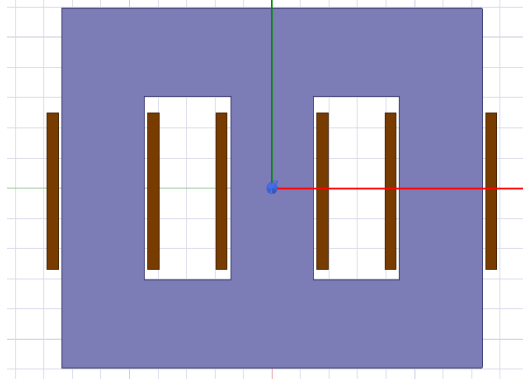
Çalışmanın bu bölümünde, nüvesinde farklı materyaller kullanılarak tasarlanan transformatörün kayıplarını ve manyetik akı yoğunluğunu hesaplamak için 2D ve 3D güç modeller oluşturulmuştur. Nüve kayıpları ve manyetik alan analizleri, 50 Hz’de, M125-27S ve M530-50A nüve laminasyon materyalleri kullanılarak hesaplanmıştır.

5.5.1 Transformatörün 2/3D SEY modelleri

Gerçek trafo boyutlarına ve geometrisine dayanan SEY modelleri, düşük frekanslı geçici elektromanyetik alanların 3D ve 2D simülasyonları için oluşturulmuştur. Bu modeller Şekil 5.11 ve 5.12’de sırasıyla sunulmuştur. “Transient” simülasyonun temel süreci, fiziksel denklemlerin geometrik ve zamansal ayrılmasını içerir.



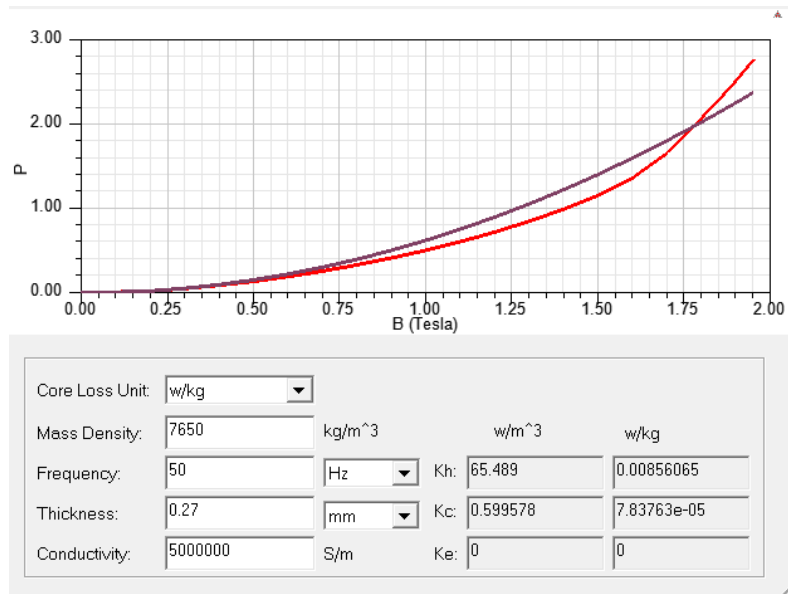
Şekil 5.11: Transformatörün 3D Modeli



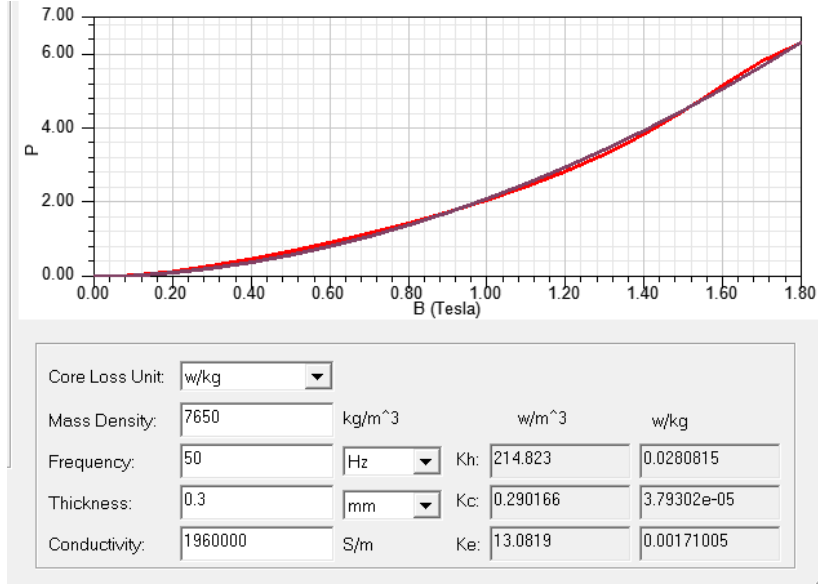
Şekil 5.12. Transformatörün 2D Modeli

SEY ile karmaşık, homojen olmayan ve anizotropik materyaller modellenabilir ve düzensiz ağlar (mesh) kullanılarak karmaşık geometriler analiz edilebilir.

SEY verilen bir uyarma ve frekans değerine bağlı olarak Maxwell denklemlerini çözer. Geçici simülasyon, tüm zaman aşamalarını eşzamanlı olarak çözmek için zaman eksenini boyunca alan ayrıştırması yapılarak gerçekleştirilir. Her iki transformator modeli için de sınır koşulları, dış geometri ve materyallerin tüm özellikleri program ortamında tanımlanmaktadır. Manyetik nüve, manyetizasyonun B-H eğrisi ve ince laminasyonlarla karakterize edilir. Bu karakteristik özellikler her iki trafo modelinin simülasyonunda kullanılmıştır. Şekil 5.13 ve 5.14'te transformatörün nüvesinde kullanılan farklı malzemelere ait özellikler verilmiştir.

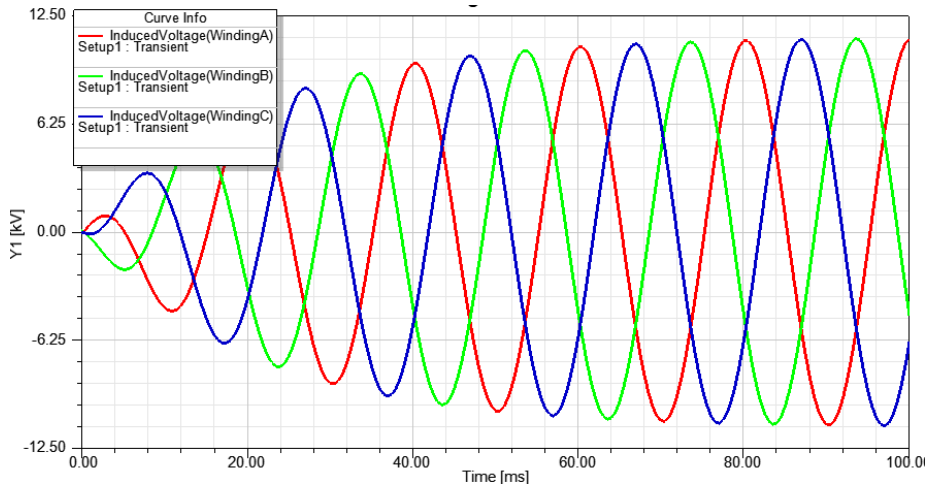


Şekil 5.13: M125-27S Materyaline ait özellikler ve B-P eğrisi



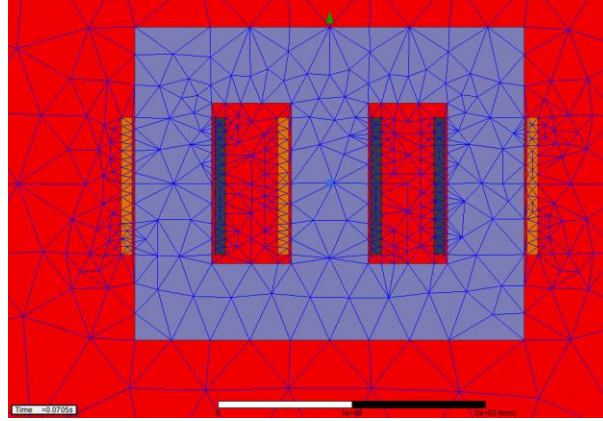
Şekil 5.14: M530-50A Materyaline ait özellikler ve B-P eğrisi

Önceki bölümde de anlatıldığı üzere, nüve kaybı (P_c) iki bileşene ayrılmıştır: histerezis kayıpları (P_h) ve eddy akım kayıpları (P_e). Steinmetz denklemine göre, nüve kayıplarının ölçümü ve hesaplanması normal olarak değişen Mag-B ve frekansın sinüzoidal akı yoğunluğu ile yapılır. Kayıpları etkileyen bir diğer etken de özgül değerlerdir. Bu değerlere bağlı olan k_h ve k_c laminasyona, malzeme kalınlığına ve iletkenliğe bağlı olan katsayılarıdır. Bu durumda transformatör modellerindeki nüve kayıpları, 50 Hz frekans için toplam kayıp olarak tanımlanır. Nüve kayıpları için, sadece tek bir enerjili sargı dikkate alınmalıdır. Ani akımları elimine etmek ve simülasyon süresini kısaltmak için modele Şekil 5.15'te verildiği gibi üssel olarak artan bir voltaj kaynağı uygulanır.

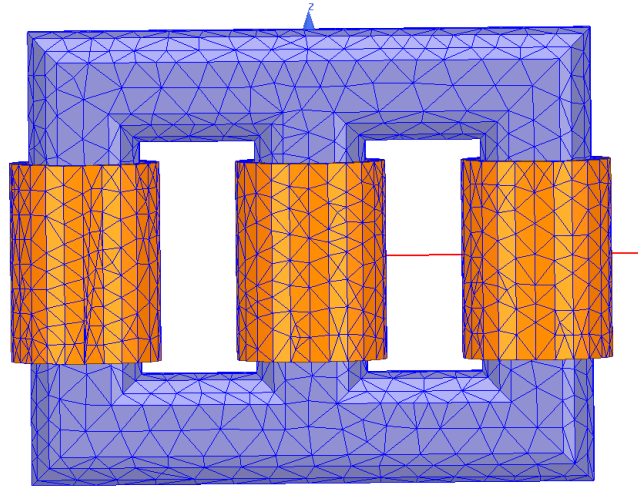


Şekil 5.15: Transformatör Giriş Voltajı

Manyetik akı yoğunluğu B'nin hesaplanması için manyetik vektör potansiyeli A bulunmalıdır. Bu amaçla, tüm model geometrisi, A'nın basit bir işlevle yaklaşık olarak eşleştirildiği, genellikle üçgenler olmak üzere birçok ögeye ayrılır. 2D ve 3D modelinde sonlu elemanların oluşturduğu mesh (ağ) Şekil 5.16 ve 5.17'de sunulmuştur.



Şekil 5.16: Trafo modelinin 2D mesh'i (ağ).



Şekil 5.17: Trafo modelinin 3D mesh'i (ağ).

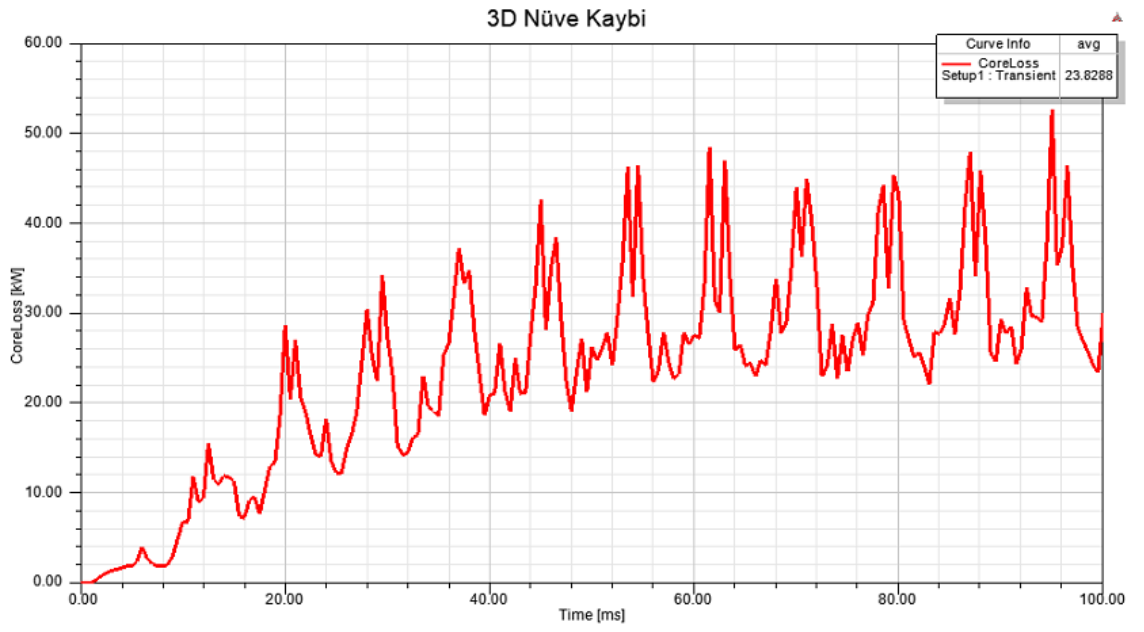
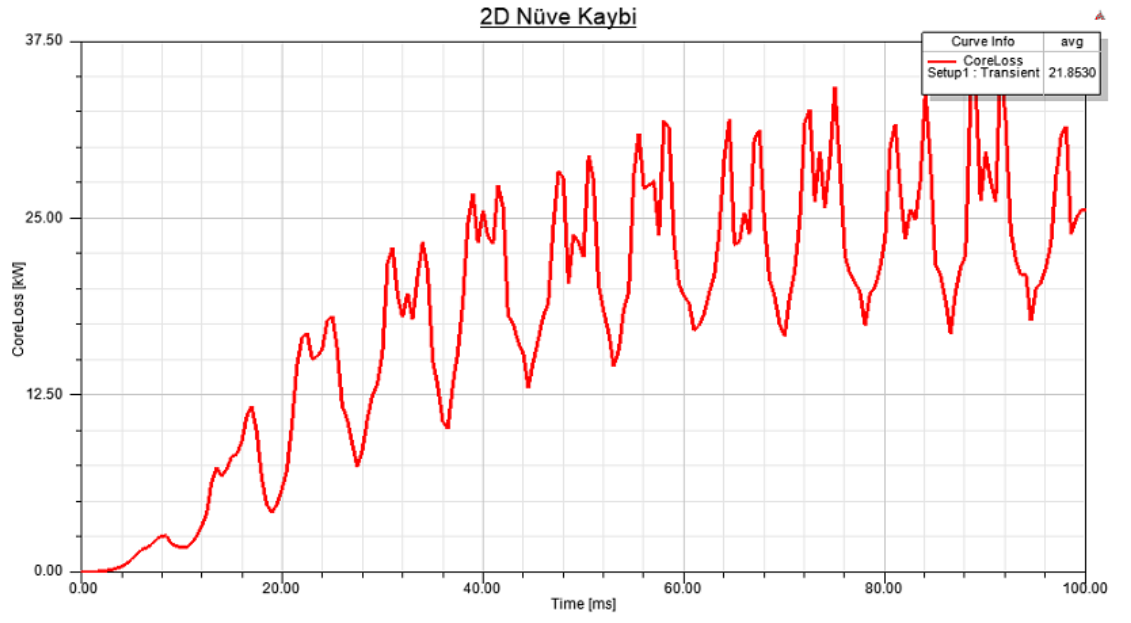
5.5.2 Simülasyon sonuçları

Transient simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. Simülasyonda kullanılan trafoya ait elektriksel, mekaniksel ve geometrik karakteristik özellikler Çizelge 5. 4'te sunulmuştur.

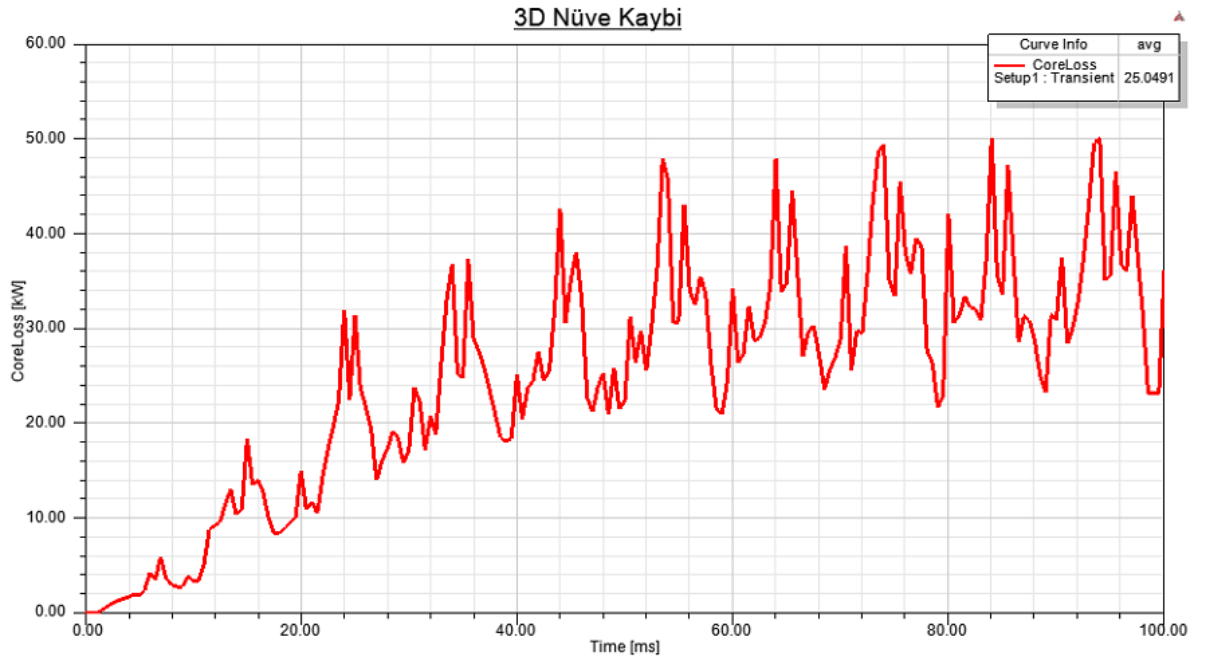
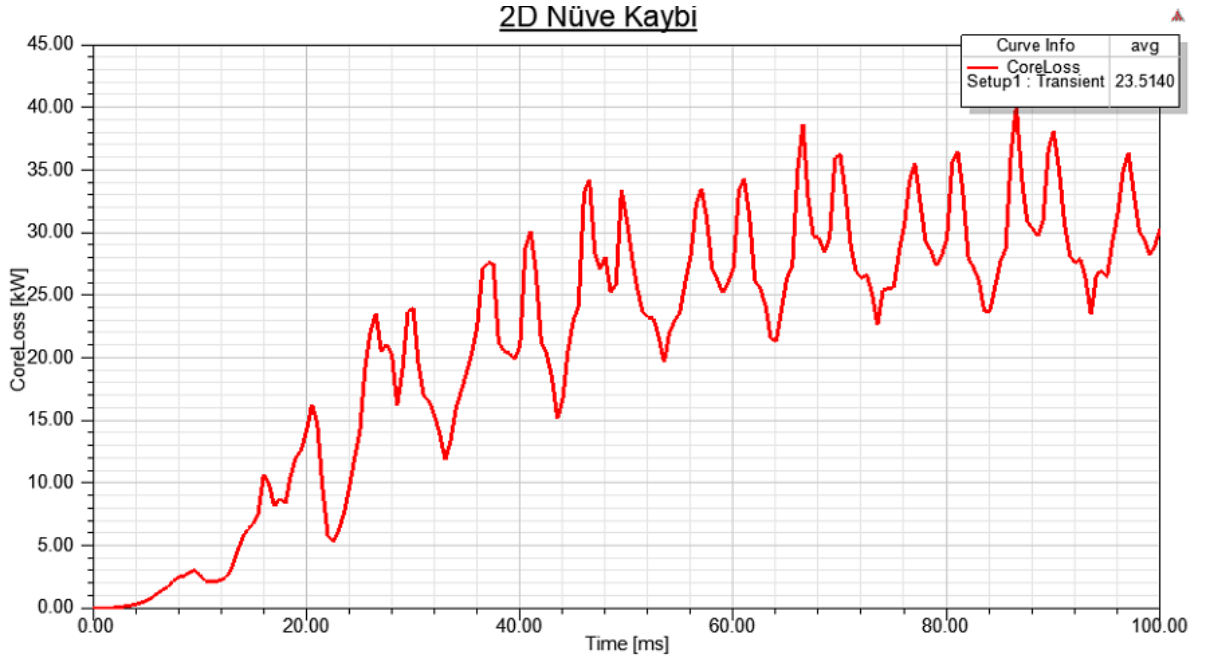
Çizelge 5.4: Trafoya ait tasarım bilgileri

Parametre	Değer
Nominal güç	30 MVA
Nominal Frekans	50 Hz
Gerilim oranı (Primer/Sekonder)	115/13.8 kV
Yoke uzunluğu	2950 mm
Bacak yüksekliği	2380 mm
İki bacak arası uzaklık	1185 mm
Sargı yüksekliği	1040 mm
Sac kalınlığı (M530-50A)	0.3 mm
Sac kalınlığı (M125-27S)	0.27 mm
İletkenlik (M530-50A)	1960000 S/m
İletkenlik(M125-27S)	5000000 S/m
Yığma faktörü	0.95

2D ve 3D modellerin simülasyonundan, 50 Hz frekansta, M530-50A ve M125-27S materyalleri için nüve kayıpları elde edilmiştir. Nüve kayıpları, verilen zaman aralığında elde edilen toplam kayıpların zamana göre ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Yukarıda belirtilen tüm değişkenler için nüve kayıpları Şekil 5.18 ve 5.19'da verilmiştir.



Şekil 5.18: M125-027S materyali için nüve kayıp eğrileri



Şekil 5.19: M530-50A materyali için nüve kayıp eğrileri

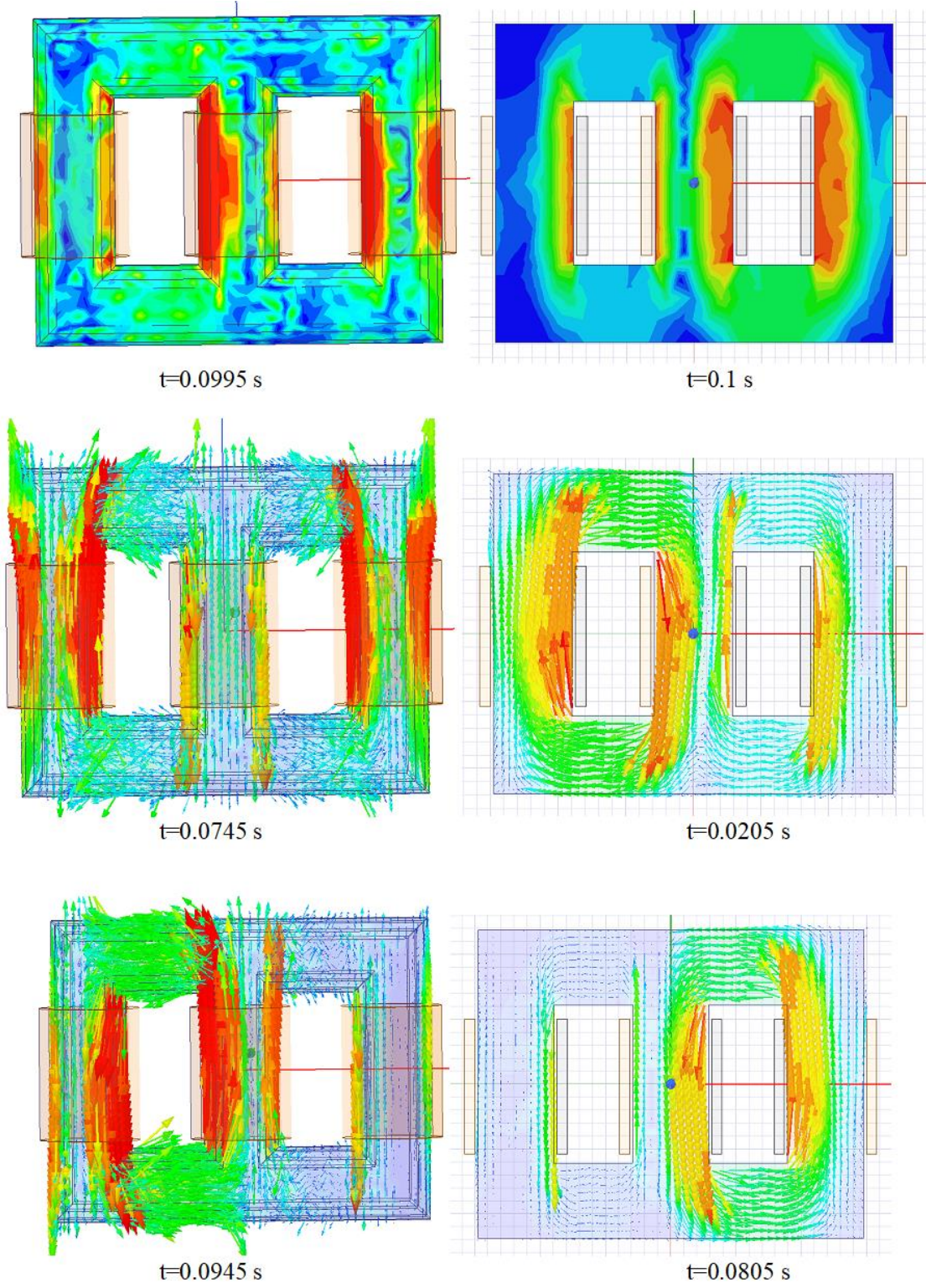
Nüve kayıpları, 80 ile 100 ms kararlı zaman aralığında meydana gelen kayıpların ortalaması alınarak elde edilmiştir. Farklı model ve farklı nüve materyalleri için nüve kayıp değerleri Çizelge 5.5'te görülmektedir.

Çizelge 5.5: Farklı model ve farklı nüve materyalleri için kayıp değerlerinin karşılaştırılması.

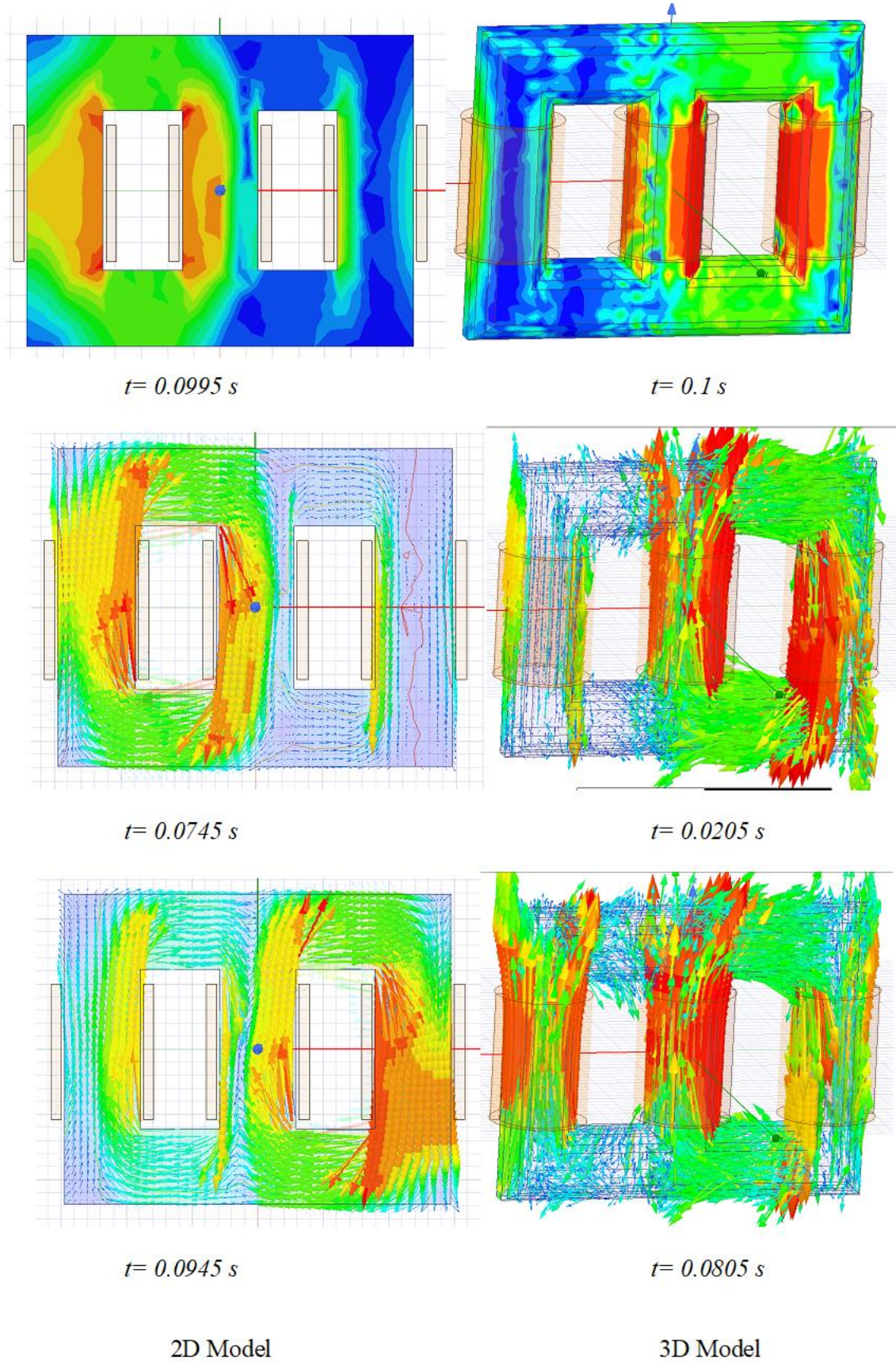
	Simülasyon sonuçları				Teorik sonuçlar
	3D model		2D model		
	M530-50A	M125-27S	M53050A	M125-27S	
Nüve Kaybı (kW)	25.04	23.82	23.51	21.85	23.7

Çizelge 5.5'teki sonuçlar karşılaştırıldığında transformatörün 2D ve 3D modellerinde elde edilen nüve kayıp değerleri arasında küçük bir fark olduğunu göstermektedir. 50 Hz'de test edilen nüve kayıpları 23,7 kW'dır. Her iki trafo modelinden elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için 50 Hz'de ölçülen 23.7 kW'lık sonuç ile karşılaştırıldığında sunulan modellerin sonuçlarının doğru olduğunu ortaya çıkmaktadır. 2D ve 3D modeller, 50 Hz'lik frekansta, M530-50A ve M125-27S materyallerinin her ikisi içinde simüle edilmiştir. Nüve kayıpları, M530-50A materyali için daha yüksek olmuştur. SEY modeli ile tüm fiziksel nüve kaybı etkileri hesaplanamaz. Hesaplanamayan etkiler, laminasyonlar üzerindeki mekanik baskı, kenar pürüz kaybı, kademeli boşluklu akı, sirkülasyon akımı ve tabaka kaybı gibi varyasyonları içermektedir.

SEY'in farklı elektromanyetik alanların sayısal hesaplanmasında yararlı bir araç olduğunu kanıtlanmıştır. Ampirik formüllere dayanan manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması, transformatörün farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun sadece yaklaşık değerlerini vermektedir. Transformatörün farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun doğru tahmini için, transformatörün zayıf parçası olarak adlandırılan ve nüve malzemesinin doyma noktasına (B-H) yakın olan kısımlarını doğru tahmin etmek tasarım sürecinde önemlidir. Transformatörün nüve malzemesinin doyma noktasına yakın çalışması, kayıpları ve ısı yayılımını artırır verimi de düşürür. Bu nedenle, akı yoğunluğu, her iki model ve her iki materyal için farklı zaman aralıklarında analiz edilmiştir. Transformatörün 2D ve 3D modellerinin manyetik akı yoğunlukları, manyetik alan şiddetleri ve manyetik akının vektörel dağılımları Şekil 5.20 ve 5.21'de görsel olarak verilmiştir.



Şekil 5.20: M125-027S nüve malzemesinin farklı zaman aralıklarındaki transformatörün 2D ve 3D modellerinin manyetik akı dağılımları



Şekil 5.21: M530-50A nüve malzemesinin farklı zaman aralıklarındaki transformatörün 2D ve 3D modellerinin manyetik akı dağılımları

Yukarıdaki şekillerde sunulan sonuçlardan, her iki modelin, 50 Hz frekansta, transformatörün M125-27S ve M530-50A materyallerine ait nüve enine kesitindeki akı yoğunluğu dağılımının doyma noktasını iyi bir şekilde belirlediği açıkça görülmektedir. Nüve malzemelerinin doyuma gittiği maksimum noktalar belirlenmiştir. Ayrıca her iki malzemenin manyetik akı dağılımlarının değerleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6: Farklı nüve materyallerinin manyetik akı değerlerinin karşılaştırılması.

Lamine malzemeler	Manyetik Akı (T)	
	Teorik Sonuçlar	Simülasyon Sonuçları
M530-50A	1.93	1.97
M125-27S	1.87	1.92

Bu çalışmada, M125-27S ve M530-50A laminasyon materyalleri ile tasarlanan güç transformatörünün, nüve kaybının ve manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması için Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne (SEY) dayanan ANSYS@Maxwell ile transformatörün 2D ve 3D simülasyon modelleri incelenmiştir. Simülasyon için transformatörün 2D ve 3D modelleri oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre nüve malzemesinin ferromanyetik özellikleri, transformatörün kayıplarının hesabında önemli olduğu ve çalışma noktasını belirlediği görülmüştür.

Nüve laminasyon materyalinin ferromanyetik ve elektriksel özellikleri kayıpların meydana gelmesinde büyük etkiye sahip olduğu için, M530-50A materyali ile oluşturulan nüvede meydana gelen kayıplar M125-027S materyali ile oluşturulan nüvedeki kayıplara oranla daha yüksek olmuştur. Tasarlanan modellerden elde edilen ile transformatörün, nüvenin doyma noktasının çok üstünde çalıştığı kanıtlanmıştır.

5.6 Farklı Malzemelerin Sac Kombinasyonlarının Elektromanyetik Analizleri

Transformatörlerde, sıcaklığı, ısı olarak açığa çıkan enerjiyi, tasarım maliyetlerini ve kayıpları azaltmak için elektriksel çelik laminasyon kombinasyonları kullanılmaktadır. Avrupa ülkelerinde ve Amerika da transformatör üreticileri, transformatörlerin manyetik nüvesinde elektrik çeliklerini ve geçirgenliği yüksek alaşımları birleştirmektedirler [48].

Son yıllarda, ferromanyetik malzemelerin birleşimleri ve elektriksel çelikler dağıtım ve güç transformatörlerinin nüvesinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu elektriksel çeliklerin transformatörlerin nüve malzemesinde birleştirilmesi için yeni manyetik nüve topolojileri önerilmiştir. Transformatörlerin kayıplarını, sıcaklığını, atıl malzeme ve üretim maliyetlerini

azaltmak amacıyla dağıtım transformatörlerinin manyetik nüvelerinde tanecik konumlu çelik malzemelerin bileşiminin kullanılması analiz edilmiştir [49]. Güç transformatörlerinin farklı sac kombinasyonları ile modellenmesi oldukça zordur. Bundan dolayı transformatör modelinin tasarımı ve tasarlanan modelin doğru bir biçimde analizi ve simülasyonu mühendisler için her zaman zorluk teşkil etmiştir. Enerji iletim-dağıtım sistemlerinin en pahalı unsuru güç transformatörleridir. Bundan dolayı, tasarımcılar için transformatörlerin düzgün ve verimli çalışmasının tahmini ve meydana gelebilecek arızalar tasarımcılar için önem teşkil etmektedir. Bu zorluklara çözüm bulmak amacıyla son yıllarda SEY'e dayalı çözüm gerçekleştiren programlar ile non-lineer materyaller ve bu materyallerin kalıcı mıknatıslanmaları modellenmektedir [50]. Transformatörün hem nüvesinin hem sargılarının parametrelerini hesaplamak için SEY kullanılmıştır [51]. Meydana gelen kayıplar analiz edilebilir ve farklı kalite malzemelerin karşılaştırılması yapılabilmektedir. SEY'e dayanan ANSYS@MAXWELL ile malzemelerin elektromanyetik parametreleri baz alınarak gerçek transformatör modellerine çok yakın tasarımlar yapılabilmektedir.

Bu kapsamda, transformatörlerde meydana gelen nüve ve bakır kayıplarını azaltmak ve model tasarımında kullanılan atıl malzeme maliyetlerini düşürmek için amorf çelikler ve tanecik konumlu çelikler transformatörlerin nüvelerinde birleştirilmektedir. Tez çalışmasının bu bölümünde, manyetik karakteristikleri farklı olan, farklı nüve kaybına (W/kg) ve sac kalınlıklarına sahip M125-027S ve M530-50A nüve malzemeleri kullanılarak tasarlanan bir dağıtım transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne dayanan ANSYS@MAXWELL programı ile elektromanyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda nominal gücü 15 MVA olan 3-fazlı bir dağıtım transformatörünün malzeme bileşiminden meydana gelen manyetik nüvesindeki manyetik akı dağılımı incelenmiştir. Burada transformatörün manyetik nüvesinde meydana gelen kayıplar ve oluşan manyetik akı dağılımları 3D tasarım modeli ile hesaplanmıştır.

5.6.1 Güç transformatörünün modellenmesi ve analizi

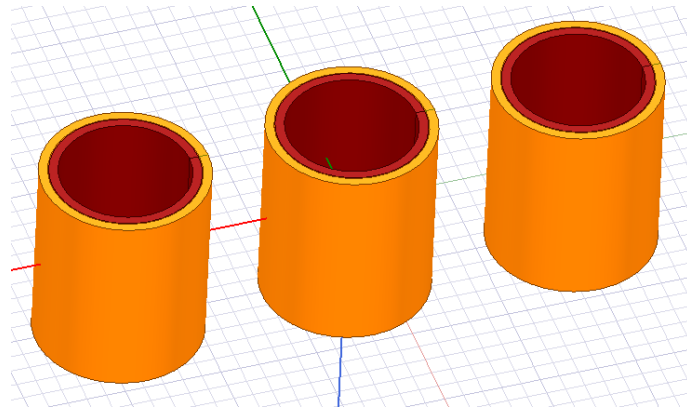
3-fazlı güç transformatörü, Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanan ANSYS@MAXWELL-3D platformunda 3D olarak modellenmiştir. Modellenen transformatöre ait özellikler Çizelge 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.7: Üç Fazlı 15 MVA Transformatör Tasarım Öncesi Bilgileri

Parametre	Değer
Görünür güç	15 MVA
Yüksek gerilim (yg)	33.000 V
Alçak gerilim (ag)	11.000 V
Deneysel nüve kaybı	12.500 W
Teorik nüve kaybı	12.360 W
Deneysel bakır kaybı	97.000 W
Teorik bakır kaybı	96.848 W
Frekans	50 Hz
Nüve materyali	M125-027S
Yg sargı direnci	1.7 Ω
Ag sargı direnci	40 m Ω
Yg bağlantı	Delta
Ag bağlantı	Yıldız
Yg spir sayısı	128
Ag spir sayısı	665
Yg faz akımı	784 A
Ag faz akımı	156 A
Akım yoğunluğu	1.8 A/m ²

i. Sargıların Modellenmesi

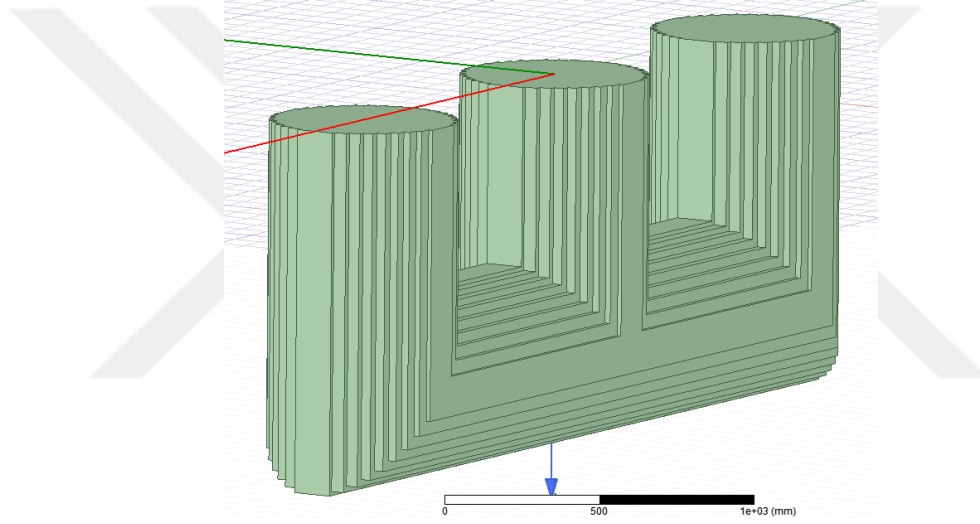
Nominal güç değeri 15 MVA olan 3-fazlı dağıtım transformatörünün nüvesini mıknatıslamak etmek için alçak gerilim (AG) sargılarına uyarma gerilimi verilmiştir. Açık devre test şartlarını sağlamak amacıyla yüksek gerilim (YG) sargılarına çok büyük dirençler eklenmiştir. Şekil 5.22’de transformatörün sargılarının 3D modeli sunulmuştur.



Şekil 5.22: 15 MVA dağıtım transformatörünün sargı modeli.

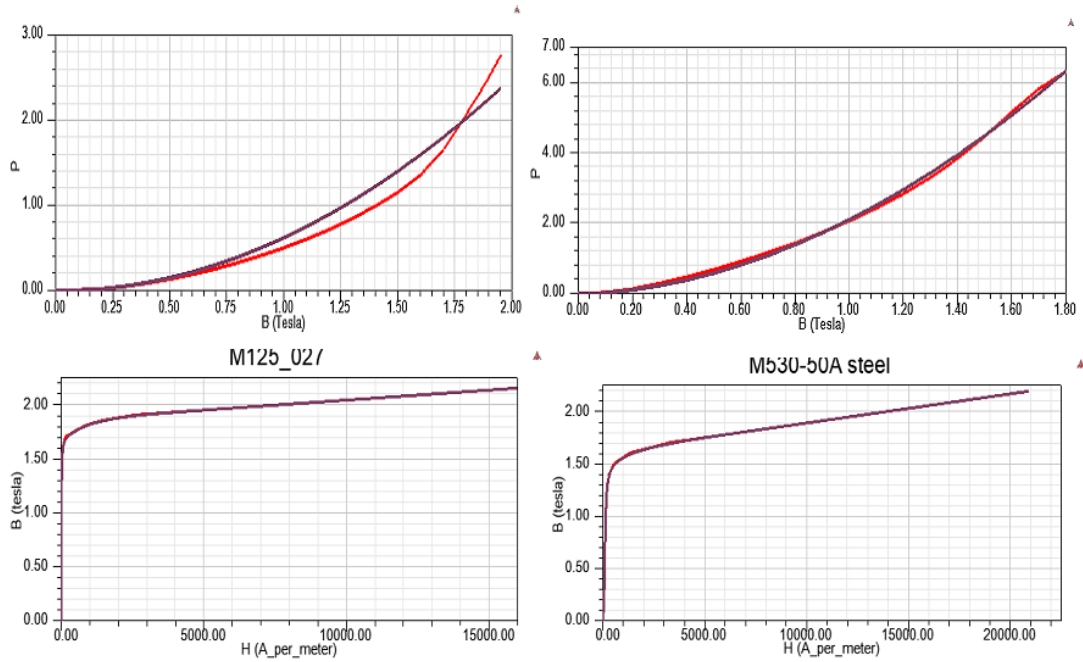
ii. Manyetik Nüvenin Modellenmesi

Transformatörün nüvesi tasarlanırken 45°'lik nüve derzleri dikkate alınmamıştır. Hesap karmaşasından kaçınmak amacıyla sadece katı saclar dikkate alınarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan transformatörün nüvesinde, tanecik konumlu M530-50A malzemesi ve M125-027S malzemesi olmak üzere iki farklı malzeme kullanılmıştır. Dağıtım transformatörlerinin üretim sürecinde kullanılan konveksiyonel M530-50A çeliğinin, kalınlığı: 0.3mm, kütle yoğunluğu 7650 kg/m^3 ve elektriksel iletkenliği 1960000 S/m şeklindedir. M125-027 çeliğinin, kalınlığı 0.27, kütle yoğunluğu 7650 kg/m^3 ve elektriksel iletkenliği 5000000 S/m 'dir. Şekil 2'de dağıtım transformatörünün nüvesinin adımlarının bir görünümünü sunulmuştur.



Şekil 5.23: Transformatörün manyetik nüvesinin kesit görünümü ve laminasyon temel adımları.

M530-50A ve M125-027S çeliklerinin 50 Hz'deki deneysel B-H eğrileri ve özgül demir kayıp eğrileri simülasyonlarda kullanılmıştır. Bu çalışmada, sac kombinasyonu yapılarak tasarlanan transformatörün manyetik nüvesinin manyetik akı değerinin düşürülmesi ve buna bağlı olarak transformatörün kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır. Sac kombinasyonlarında kullanılan materyallerin doğrusal olmayan nüve malzemelerinin B-H ve B-P eğrileri Şekil 5.24'te verilmiştir.



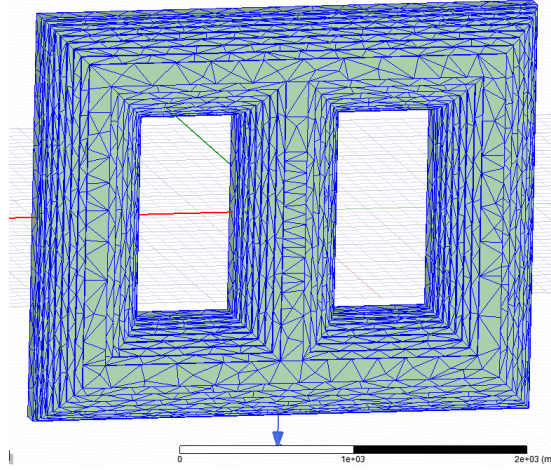
Şekil 5.24: Nüve malzemelerinin doğrusal olmayan B-H ve B-P eğrileri

ANSYS@MAXWELL programında transformatörlerin nüve kayıplarının hesaplanması için nüvenin manyetik akı dağılımı ve kayıp katsayıları kullanılmaktadır. SEY'e dayanan yazılım programı ile elektriksel çeliklerin nüve kayıp eğrileri ve bu çeliklerin özellikleri kullanılarak, transformatörün manyetik nüvesindeki elektriksel çeliklerin k_h ve k_c kayıp katsayıları hesaplanmıştır. Çizelge 5.8'de, M125-027S ve M530-50A malzemelerinin program ortamında 50 Hz frekansta hesaplanan girdap kayıp katsayıları verilmiştir.

Çizelge 5.8: İki Farklı Materyalin Manyetik Nüvesindeki Kayıp Katsayıları

Kayıp katsayıları	M125-027S (W/m^3)	M53050A (W/m^3)
K_c	0.28	0.59

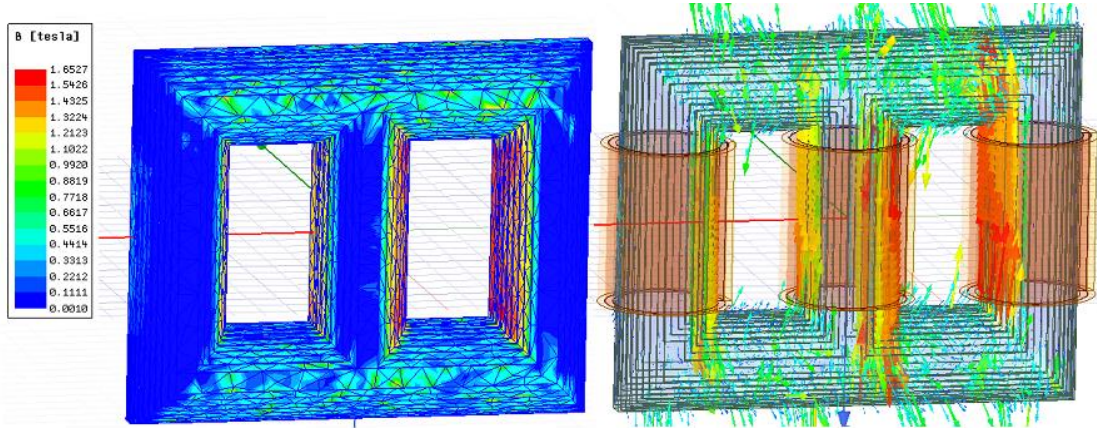
Transformatör tasarlanırken 84974 adet sonlu eleman kullanılmıştır. Şekil 5.25'de dağıtım transformatörünün manyetik nüvesinin SEY ağı (mesh) sunulmuştur.



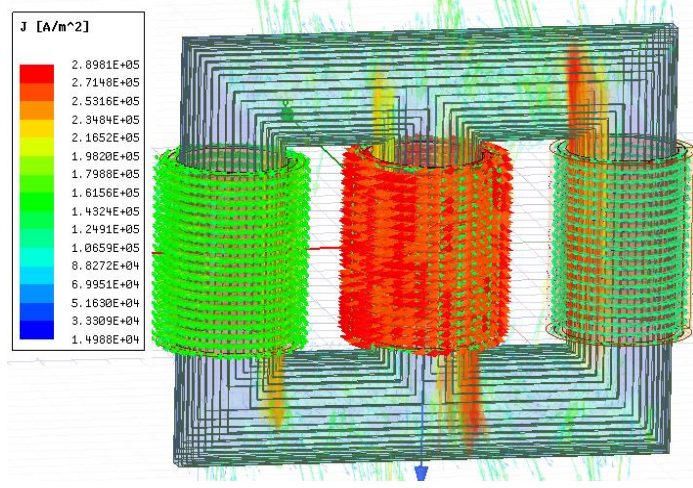
Şekil 5.25: Transformatörünün ağı (mesh).

5.6.2 Farklı materyallerin kombinasyonu ile modellenen transformatörlerin analizleri.

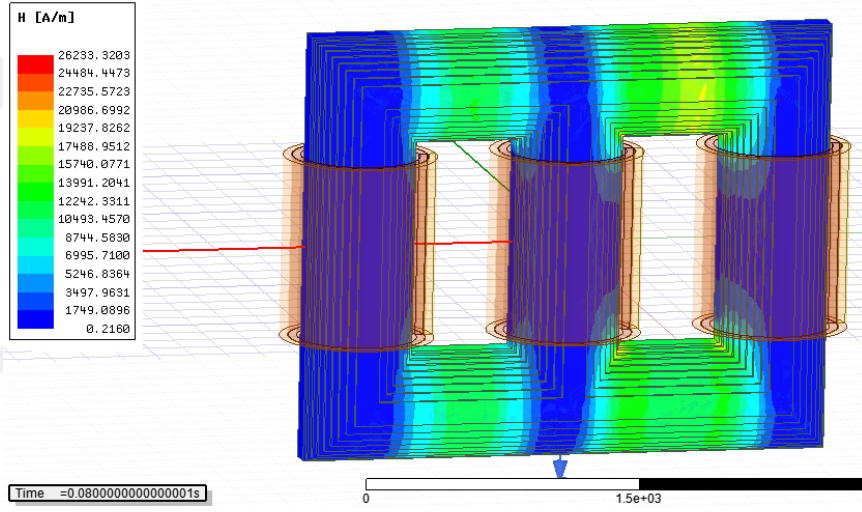
Nüvede kayıplar nüve yapısındaki çelik oranıyla orantılı bir şekilde meydana gelmektedir. Bu sebeple, transformatörlerin nüvesi tasarlanırken dayanıklı ve kalınlığı az olan malzemeler tercih edilmektedir. Şekil 5.26-33'de farklı çeliklerin ve bu çeliklerin kombinasyonunun dağıtım transformatörünün nüvesindeki manyetik akı yoğunlukları, akı şiddetleri, akım yoğunlukları, manyetik akının vektörel dağılımı ve nüve kaybı dağılımları sunulmuştur.



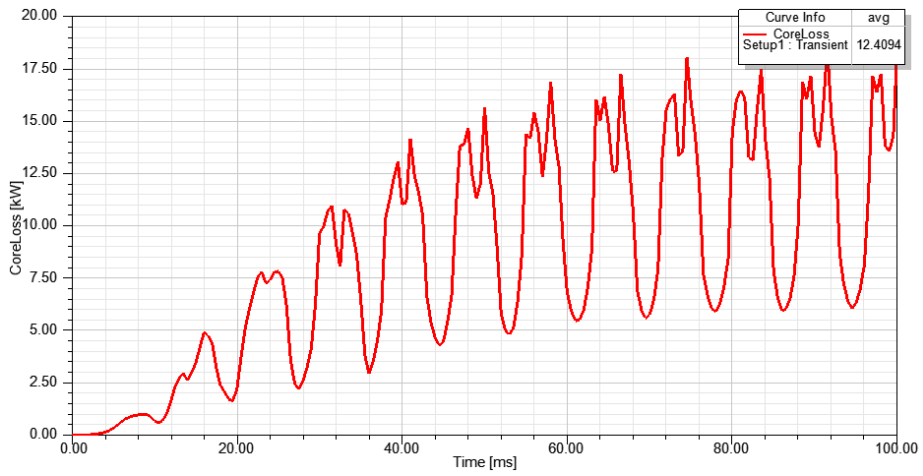
Şekil 5.26: Farklı sac kombinasyonlarının manyetik akı dağılımı



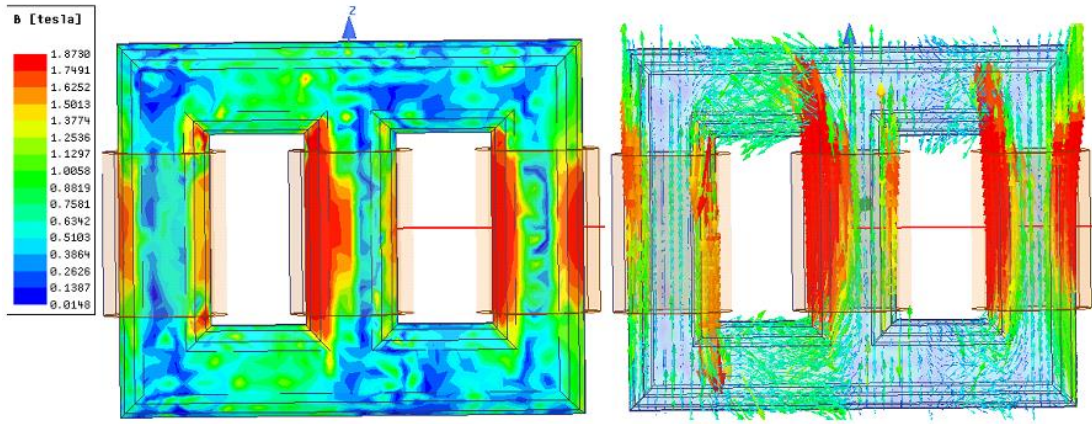
Şekil 5.27: Sargılardaki akı yoğunluğu dağılımı



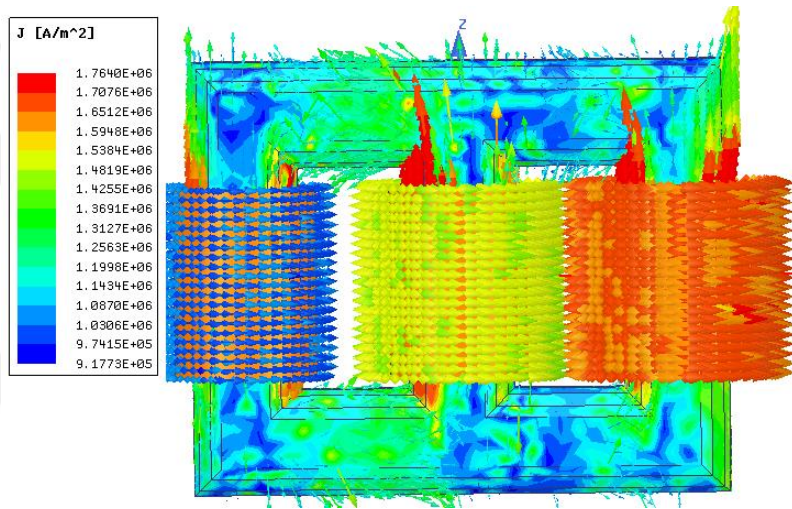
Şekil 5.28: Farklı sac kombinasyonları ile tasarlanan nüvedeki manyetik alan şiddeti



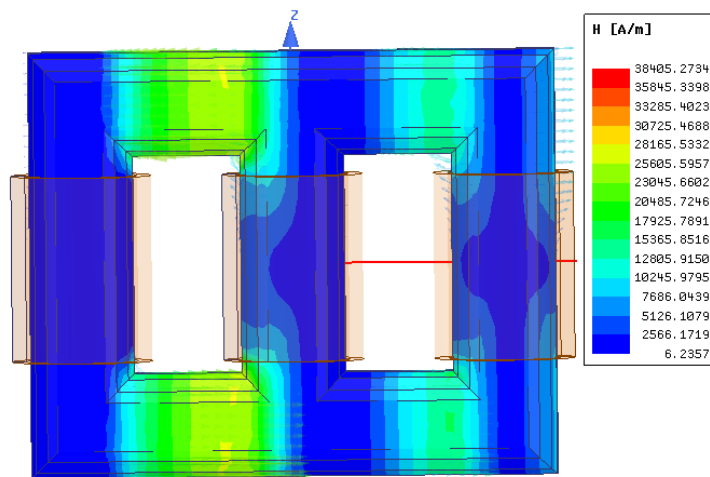
Şekil 5.29: Sac kombinasyonu için nüve kayıp eğrisi



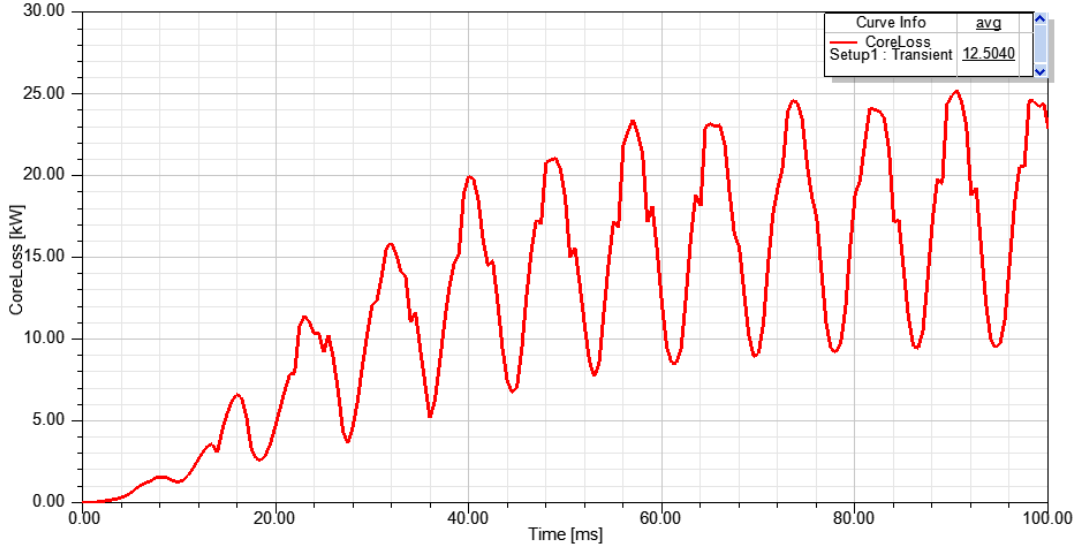
Şekil 5.30: Ferromanyetik normal malzemenin manyetik akı dağılımı



Şekil 5.31: Sargılardaki akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 5.32: Ferromanyetik nüvedeki manyetik alan şiddeti



Şekil 5.33: Ferromanyetik malzemin nüve kayıp eğrisi

Yukarıda verilen kayıp eğrilerinden nüvenin kütlesinin artmasına bağlı olarak oluşan manyetik akının ve meydana gelen kayıp dağılımlarının değiştiği görülebilmektedir. Manyetik akının bir bölümü, nüvenin iç kısımlarında kayıpların az olduğu, geçirgenliğin de yüksek olduğu bölgelerde dolaşmaktadır. Manyetik akının diğer bölümü ise, kayıpların biraz daha fazla ve geçirgenliğin daha az olduğu nüveni dış kısmında akmaktadır. Elektromanyetik akının düzensizliği transformatörün manyetik nüvesindeki toplam kayıpların artmasına neden olmaktadır.

Transformatörün, sac kombinasyonu ile tasarlanan nüvesindeki kayıplar ve kombinasyon yapılmadan tasarlanan nüvedeki kayıpları Çizelge 5.8’de karşılaştırılmıştır. Kombinasyon yapılarak elde edilen nüve kaybı kombinasyon yapılmadan elde edilen nüve kaybın az olmuştur. Çizelgede verilen 12.36 kW teorik değer hesaplanarak, 12.5 kW deneysel sonuç değeri ELTAŞ.A.Ş transformatör üretim fabrikasından alınmıştır.

Çizelge 5.9: Nüve kayıplarının karşılaştırılması

	Deneysel sonuçlar	Simülasyon sonuçları	Teorik sonuçlar
	Sadece M125-027 materyali	M530-50A, M125-027S kombinasyonu	
Nüve Kaybı	12.5 kW	12.4 kW	12.36 kW

Çizelge 5.10’da transformatörün manyetik nüvesinde kullanılan malzemelerin elektromanyetik akı yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 5.10: Nüve malzemelerinin manyetik akı yoğunluklarının karşılaştırılması

Materyal	M530-50A	M127-027S	Kombinasyon Materyali
Akı yoğunluğu	1.9 T	1.84 T	1.87 T

Sonuç olarak, 3-fazlı 15 MVA gücünde gerçek bir dağıtım transformatörünün modeli program ortamında oluşturularak nüvede oluşan manyetik akı dağılımları ve meydana gelen kayıplar SEY'e dayanan ANSYS@MAXWELL ortamında analiz edilmiştir.

Kullanılan elektriksel çeliklerle tasarlanan transformatörün manyetik nüvesinin T-bağlantı biçiminin ortalama manyetik akı yoğunlukları hesaplanmıştır. M125-027S malzemesinin akı yoğunluğu maksimum $B = 1.84$ T, M530-50A malzemesinin akı yoğunluğu $B = 1.91$ T, bileşim malzemesinin manyetik akı yoğunluğu $B = 1.87$ T olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem, dağıtım, güç ve ölçü transformatörlerinde manyetik nüveler için uygulanabilmektedir. Ayrıca sayısal sonuçlar, nüve laminasyon adımlarındaki elektriksel çeliklerin kombinasyonunun, istiflenmiş manyetik nüveli nüve kayıplarının % 5'ini azaltabildiği göstermiştir.

5.7 Transformatörlerde Meydana Gelen Elektromanyetik Kuvvetler

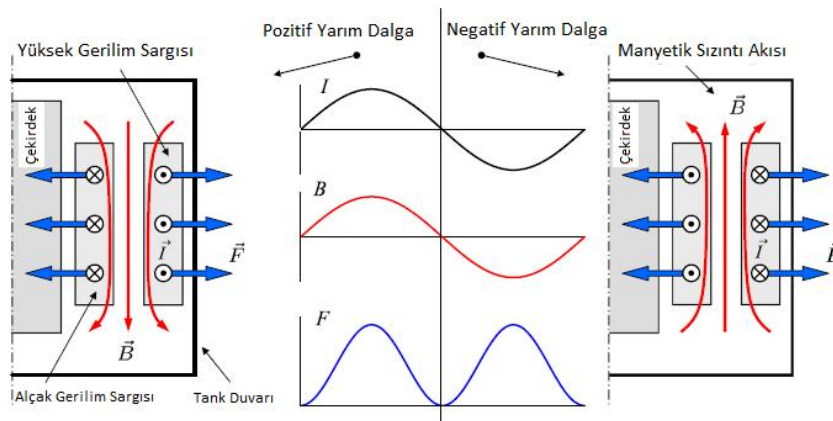
Geçici elektromanyetik kuvvetler, transformatörlerin parametreleri üzerinde mekanik baskıya neden olurlar. Bu çalışmada, bir güç transformatörünün kısa devre durumunda sargılarında meydana gelen elektromanyetik kuvvetler incelenmiştir. Bir transformatörün kısa devre testi gerçekleştirildiğinde transformatörde meydana gelen elektromanyetik kuvvetler transformatörün sargılarına elektromanyetik kuvvetler uygular. Bu kuvvetler, transformatörde tahribatlara ciddi mekanik hasarlara ve transformatörün patlamasına dahi neden olabilirler. Bu nedenle, transformatörün kısa devre durumlarındaki dayanıklılığı güç transformatörlerinin temel özelliklerinden biri olarak kabul edilmektedir. Bir elektrik tesisine güç/dağıtım transformatörü tesis edilmeden önce, transformatöre ait kısa devre akımlarından kaynaklanan elektromanyetik kuvvetlerin tahmin edilebilmesi, güvenli çalışma şartları ve trafonun ömrü için tasarım aşamasında büyük önem taşımaktadır. Transformatörlerin kısa devre testlerini gerçekleştirmek için özel tesisler, özel cihazlar ve bu testleri gerçekleştirebilen uzmanlar gerekmektedir. Transformatörün nominal güç değeri

arttıkça kısa devre testini gerçekleştirmek daha zorlaşmaktadır. Bu nedenle, güç transformatörünün kısa devre durumlarında meydana gelen geçici elektromanyetik kuvvetleri tahmin edebilmek için sayısal bir modeller kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL simülasyon programı, bir transformatörün sargılarını etkileyen geçici elektromanyetik kuvvetleri tahmin etmek için kullanılmıştır. Bunun için bir transformatör terminaline uygulanan tek faz-toprak kısa devre koşulu göz önünde bulundurulmuştur. Transformatörün geçici elektromanyetik kuvvetlerini hesaplamak için ANSYS@Maxwell ortamında tasarlanan transformatörün 3D modeli kullanılmıştır. Güç transformatörüne uygulanan kısa devre geçici akımlarına bağlı olarak manyetik vektör potansiyeli, elektromanyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetlerin analizi Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve tasarlanan modelin gerçek modelle iyi bir uyum içinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ele alınan sayısal modelleme tekniğinin güç transformatörünün ve diğer transformatör modellerinin tasarımında faydalı olması beklenmektedir.

5.7.1 Elektromekanik alan analizi

Güç transformatörlerindeki elektromanyetik kuvvetler, yerel manyetik akı yoğunluğundan hesaplanmaktadır. Sargılardaki kaçak akıyı hesaplamak için 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Transformatörün sargılardan akan geçici kısa devre akımları elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanmasında önemli bir parametredir. Kısa devre durumu, sistemden çok büyük akımların aktığı arıza durumlarıdır. Kısa devre durumunda sistemden akan akım nominal akımdan çok büyük olmaktadır. Aşağıdaki Şekilde bir transformatörde meydana gelen elektromanyetik kuvvet ve kaçak akı dağılımının nasıl olduğu gösterilmektedir.



Şekil 5.34: Bir güç transformatörünün eş merkezli sargısındaki elektromanyetik kuvvet ve kaçak akı dağılım yoğunluğu [52]

Bu çalışmada, güç trafosunun sargılarında meydana gelen geçici elektromanyetik kuvvetler, kısa devre akımı ve manyetik akı yoğunluğu parametreleri ile tahmin edilmiştir. Transformatörün sargılarındaki elektromanyetik kuvvetler, geçici akımlar ve sargılardaki kaçak akı arasında kalan bölgedeki kombinasyonun bir sonucu olarak meydana gelir [53].

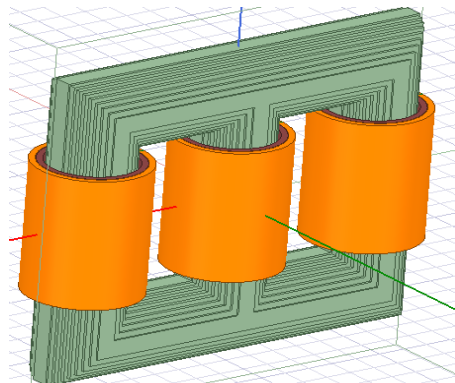
Daha önce belirtildiği gibi elektromanyetik kuvvetlerin değerlendirilmesinde önemli bir parametre olan manyetik vektör potansiyeli, manyetik alan analizinden hesaplanmaktadır.

Manyetik akı yoğunluğu radyal ve eksenel bileşenlerine ayrıştırıldığında, elektromanyetik kuvvetlerin radyal ve eksenel bileşenleri birleştirilebilir.

Güç transformatörünün sargı modeli Şekil 5.35'te sunulmuştur. Bu sargı konfigürasyonunda, sargının iç yüzeyine uygulanan radyal kuvvetler, nüve yönündeki baskı kuvveti olarak kabul edilir. Sargının dışındaki radyal kuvvetler, trafo tankının yönüne doğru çekme kuvveti görevi görür. Ayrıca, elektromanyetik kuvvetlerin radyal bileşeni, trafodaki sıcaklığın yükselmesine ve nüve ile sargı arasındaki veya sargı katmanları arasındaki yalıtkan materyalinin tahrip olmasına neden olabilir [54]. Öte yandan, sargılardaki iç ve dış eksenel kuvvetler merkez tarafın eksenel yönde sıkıştırmaya neden olmaktadır. Elektromanyetik kuvvetlerin eksenel bileşeni, sargı yapısının bükülmesine neden olabilir.

5.7.2 Transformatörün elektromanyetik kuvvet analizi için modellenmesi

Gerçek trafo boyutlarına ve geometrisine dayanan SEY modelleri, düşük frekanslı geçici elektromanyetik alanın 3D simülasyonu için oluşturulmuştur. Transient simülasyonun temel süreci, fiziksel denklemlerin mekansal ve zamansal ayrılmasını içermektedir. Şekil 5.35'te SEY'e dayanan ANSYS@Maxwell ortamında tasarlanan trafo modeli sunulmuştur.



Şekil 5.35: Transformatorün 3D Modeli

SEY, verilen bir uyarma ve frekans değerine bağlı olarak Maxwell denklemlerini çözmektedir. Geçici simülasyon, tüm zaman aşamalarını eşzamanlı olarak çözmek için zaman eksenini boyunca alan ayrıştırması yapılarak gerçekleştirilir. Transformator modelinde, sınır koşulları, dış geometri ve tüm materyallerin özellikleri üzerinde tanımlanmaktadır. Tasarlanan transformatöre ait elektriksel ve mekaniksel veriler Çizelge 5.6'da daha önce verilmiştir.

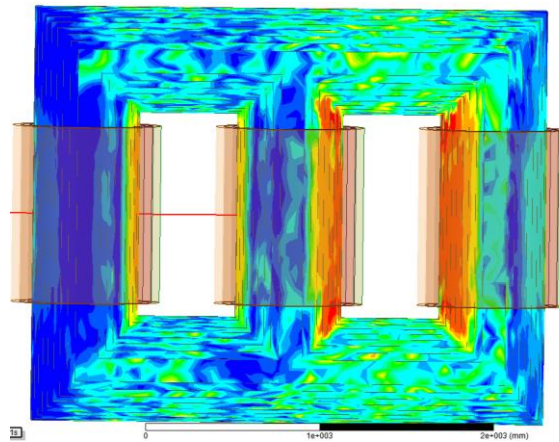
5.7.3 Modelin simülasyonu ve sonuçları

i. Kısa devre testinin uygulanması

Kısa devre akımı, transformatorlerde ciddi hasarlar meydana getirebilir. Elektromanyetik analiz için, yüksek gerilim tarafına gerilim uygulanarak alçak gerilim tarafı kısa devre edilerek kısa devre testi gerçekleştirilmiştir. Kısa devre testi için geçici rejim çözücüye bağlı simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilmiştir. Trafonun 3D modelinin simülasyonundan manyetik akı yoğunluğu, manyetik alan şiddeti ve elektromanyetik kuvvetler elde edilmiştir. Analizler, 0.08-0.1 s zaman aralığında 0.005 s adımlarla gerçekleştirilmiştir.

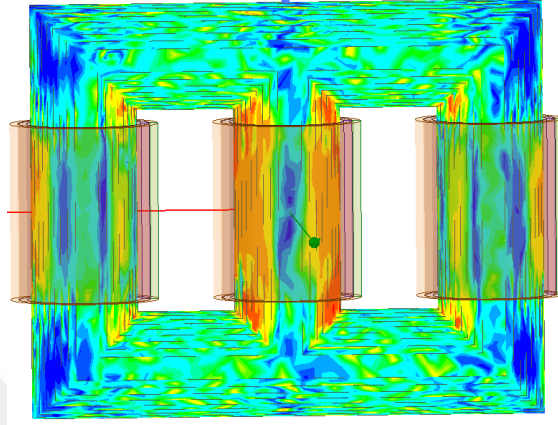
ii. Kaçak akı yoğunluğu

Alan analizinden elde edilen manyetik vektör potansiyeli, sargı bölgesindeki manyetik akı yoğunluğunun ve elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanmasında kullanılmıştır. Manyetik akı yoğunluğunun normal şartlardaki dağılımı, Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



Şekil 5.36: Normal durumda manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

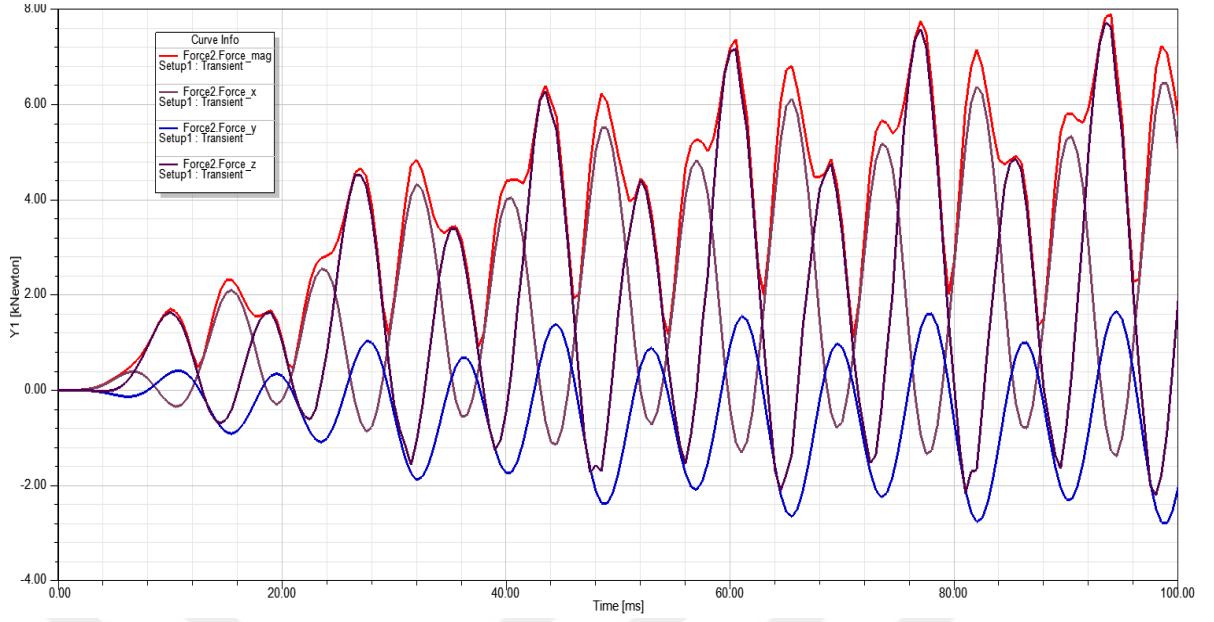
Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi, manyetik akı yoğunluğu nüve üzerinde düzgün bir şekilde dağılmıştır. Şekil 5.37’de geçici durumda hesaplanan manyetik akı dağılımı sunulmuştur. Sargı etrafındaki kaçak akı gösterilmiş ve nüvedeki manyetik akı yoğunluğunun bazı bölgelerde doyum noktasına ulaştığı görülmüştür. Bu kaçak akı, geçici elektromanyetik kuvvetin yanı sıra trafoda sıcaklık artışına da neden olmaktadır.



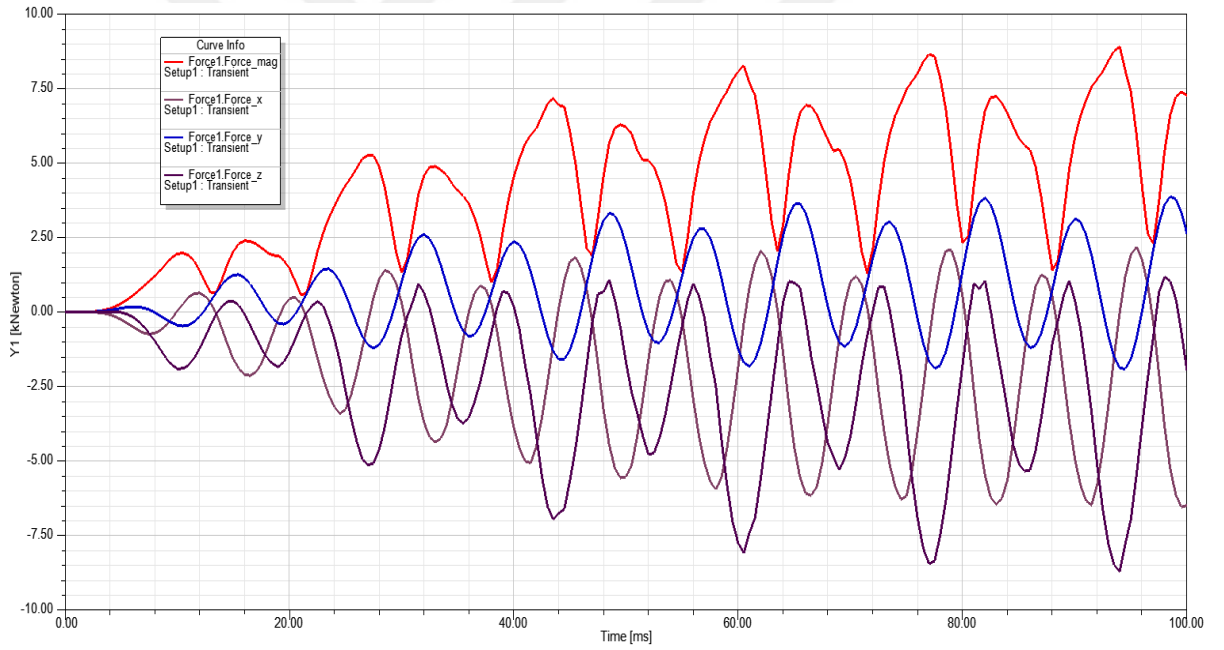
Şekil 5.37: Geçici bir durumda manyetik akı yoğunluğu dağılımı.

iii. Elektromanyetik kuvvet

Transformatörün sargılarında meydana gelen elektromanyetik kuvvetler, kaçak akı ve geçici akımlarla hesaplanmaktadır. Alçak gerilim (AG) ve yüksek gerilim (YG) sargı bölgelerinde her iletken hücrenin radyal kuvvetleri Şekil 5.38 ve 5.39’da sunulmuştur. Radyal kuvvetler, her iletken hücrenin kaçak akısının aksenal bileşeni kullanılarak hesaplanmaktadır. YG sargısındaki her bir iletken hücrenin radyal kuvvetleri Şekil 5.38’de verilmiştir; kuvvetler, radyal pozitif bir yönü göstermektedir. Sargının dışındaki elektromanyetik kuvvetler, transformatör tankına doğru etki göstermektedir. Öte yandan, AG sargısındaki iç radyal kuvvetler, radyal doğrultuda nüveye doğru bir yöne sahiptir. AG sargısındaki radyal kuvvetler ise nüvenin yan tarafına doğru yönelmiştir.



Şekil 5.38: YG sargısında radyal kuvvetler.



Şekil 5.39: AG sargısında radyal kuvvetler.

Kısa devre durumunda yüksek gerilim (YG) sargısında meydana gelen eksenel elektromanyetik kuvvetlerin farklı zaman aralıklarındaki değerleri Çizelge 5.11’de sunulmuştur. YG sargısında meydana gelen elektromanyetik kuvvetin radyal değerleri 6432.1 N ve 7877.3 N arasında değişmiştir.

Çizelge 5.11: YG sarılarının eksenel elektromanyetik kuvvetleri

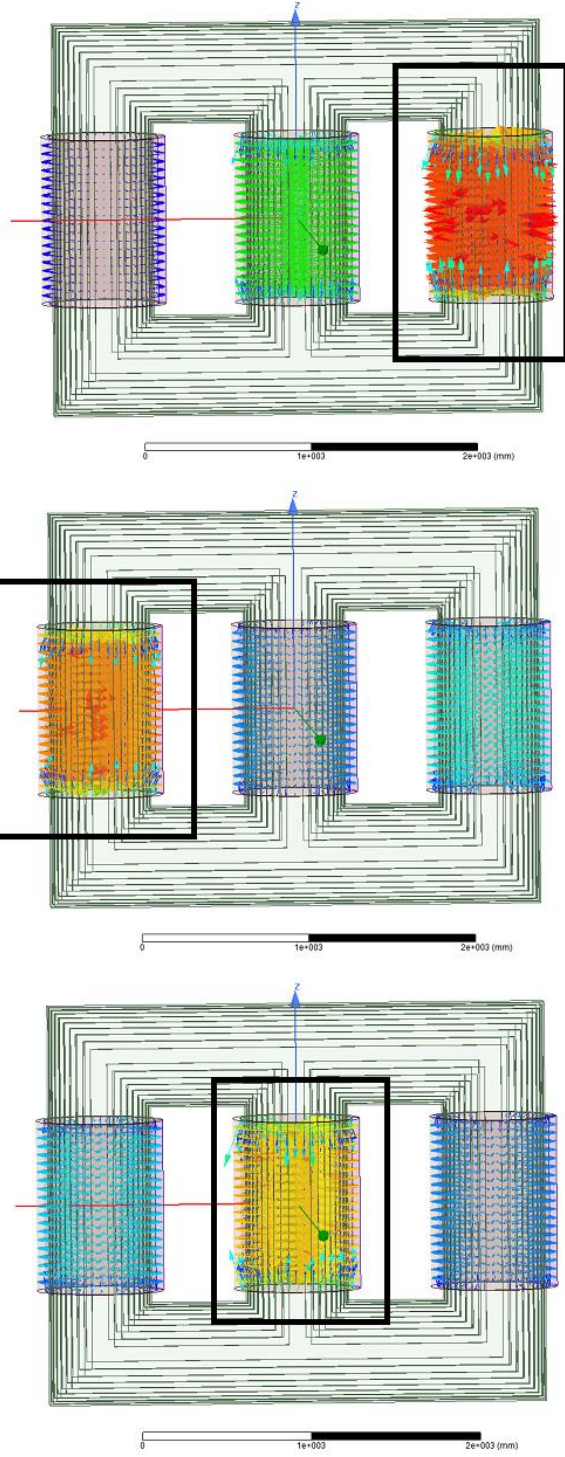
Zaman (ms)	F _{YG(mag)}	F(x)	F(y)	F(z)	Zaman (ms)	F _{YG(mag)}	F(x)	F(y)	F(z)
1	1.714.992	1.479.716	-0.598390	-0.627351	45	5.730.014	-1.140.037	1.390.012	5.440.703
2	2.100.946	1.826.487	-0.771649	-0.694606	46	4.534.528	-0.799541	1.232.314	4.289.997
2	2.309.140	2.043.041	-0.882171	-0.616352	47	3.185.323	-0.081083	0.851808	3.068.246
4	2.320.933	2.095.993	-0.912844	-0.400326	48	1.925.323	0.895045	0.294374	1.679.020
5	2.169.435	1.992.757	-0.857214	-0.023519	49	2.011.147	1.956.683	-0.368167	0.283823
6	3.154.150	1.744.026	-0.506855	2.578.786	50	3.344.945	3.011.920	-1.048.367	-1.008.921
7	3.577.727	1.057.274	-0.132494	3.415.369	51	4.734.053	4.082.606	-1.656.577	-1.731.860
8	4.092.071	0.348095	0.261250	4.068.861	52	5.672.425	5.022.451	-2.118.405	-1.569.636
9	4.559.481	-0.254400	0.619509	4.510.029	53	6.221.204	5.490.992	-2.370.652	-1.712.424
10	4.650.891	-0.672217	0.890659	4.515.046	54	6.043.047	5.493.334	-2.384.989	-0.808408
11	4.483.328	-0.869768	1.029.304	4.276.010	55	5.517.781	5.065.937	-2.164.151	0.314072
13	2.906.125	-0.393509	0.815715	2.761.399	57	4.429.192	3.354.427	-1.188.257	2.636.969
15	1.162.956	1.008.758	0.012732	0.578544	59	5.880.270	1.815.813	-0.308524	5.584.372
17	2.955.470	2.651.459	-1.010.048	-0.827268	61	7.172.845	-0.422727	0.943371	7.097.962
19	4.711.313	4.085.093	-1.743.603	-1.571.093	63	6.534.343	-1.318.600	1.551.958	6.208.893
20	4.830.024	4.322.195	-1.877.147	-1.060.228	64	5.420.524	4.811.360	-2.094.347	-1.358.902
22	4.138.057	3.781.459	-1.595.502	0.527692	66	7.394.235	-0.088674	0.775253	7.352.948
24	3.385.885	2.307.467	-0.764697	2.356.916	68	7.147.165	6.374.521	-2.764.113	-1.675.450
26	3.407.435	0.428314	0.165090	3.376.375	70	6.127.948	5.581.326	-2.349.641	0.937946
27	3.435.457	-0.224238	0.500648	3.391.376	71	5.800.084	5.319.185	-2.285.976	0.348652
29	2.549.353	-0.533107	0.675933	2.399.607	73	5.606.199	4.258.341	-1.530.545	3.309.597
32	1.194.716	1.153.383	-0.308233	-0.045229	76	7.320.075	0.286612	0.563923	7.292.691
34	3.413.099	2.924.618	-1.235.876	-1.252.382	78	7.877.318	-1.281.225	1.540.402	7.618.251
36	4.381.818	3.995.571	-1.743.452	-0.442850	80	5.634.190	-0.986165	1.487.054	5.344.178
37	4.412.658	4.039.078	-1.719.511	0.447968	81	3.833.613	-0.169153	1.042.643	3.685.223
41	5.366.148	1.112.460	-0.002993	5.249.568	91	5.521.143	4.775.548	-1.927.959	-1.990.007
42	6.092.662	0.105885	0.555801	6.066.334	95	6.733.557	5.859.644	-2.473.713	-2.210.453
43	6.067.494	-1.096.600	1.311.049	5.821.778	99	7.225.935	6.432.110	-2.775.486	-1.771.658
44	6.470.549	5.937.938	-2.530.539	0.453071	100	7.065.793	6.428.908	-2.791.266	-0.896327

Kısa devre durumunda alçak gerilim sargısında meydana gelen eksenel elektromanyetik kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişen değerleri aşağıda Çizelge 5.12’de verilmiştir. AG sargılarında meydana gelen radyal kuvvetler -9186.9 N ile -8609.6 N aralığında değişmiştir.

Çizelge 5. 12: AG sargılarının eksenel elektromanyetik kuvvetleri

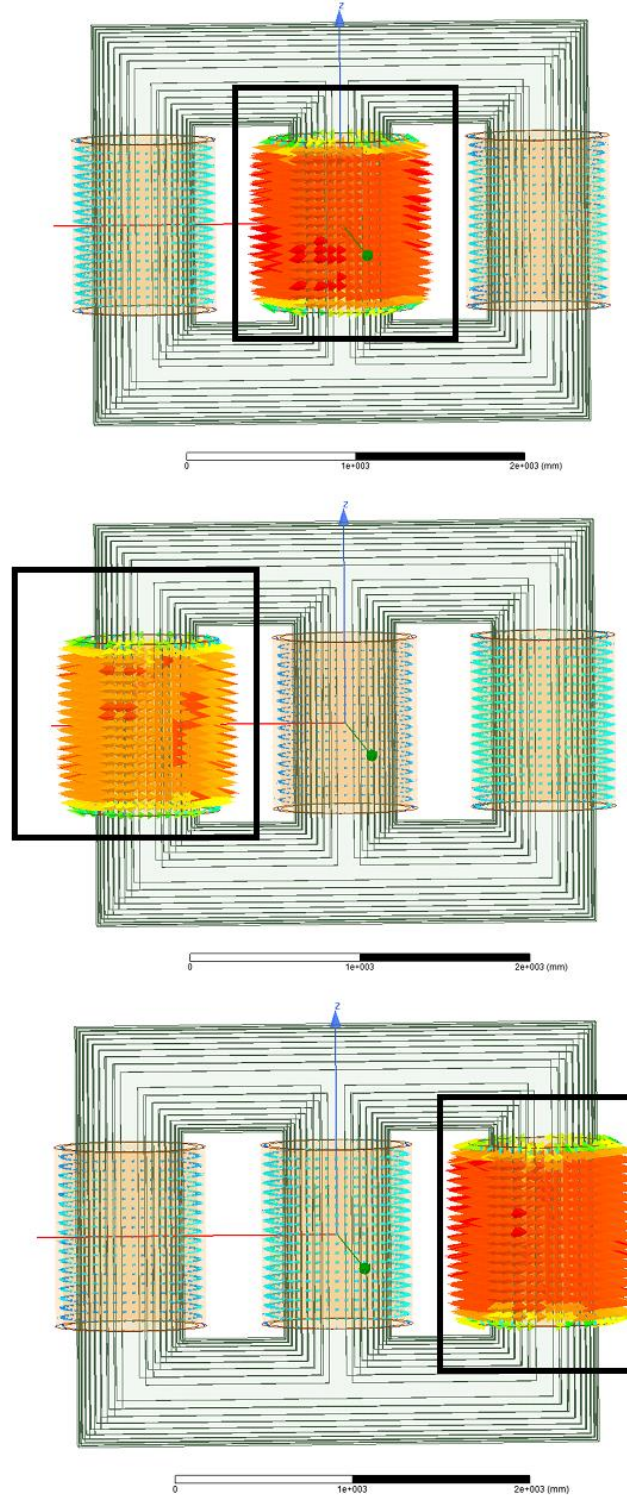
Zaman (ms)	F _{AG} (mag)	F(x)	F(y)	F(z)	Zaman (ms)	F _{AG} (mag)	F(x)	F(y)	F(z)
1	2.035.578	-1.572.832	1.243.088	0.352864	51	8.262.592	-0.364638	-1.691.810	-8.079.309
2	2.288.505	-1.903.513	1.250.005	0.226673	52	7.672.049	0.828215	-1.818.692	-7.407.210
3	2.389.350	-2.096.008	1.144.715	-0.073275	53	7.258.539	1.635.494	-1.603.235	-6.887.756
4	2.369.033	-2.129.783	0.938355	-0.442528	54	6.067.681	2.045.479	-1.062.333	-5.612.862
5	2.286.022	-2.022.667	0.657608	-0.838013	55	4.541.222	1.820.935	-0.263818	-4.151.782
7	2.001.961	-1.269.761	0.032685	-1.547.413	57	5.766.061	-3.697.767	0.149035	-4.421.738
9	3.543.138	-3.176.815	1.307.483	-0.867275	59	6.590.866	-5.868.277	2.820.768	-1.022.796
11	4.245.275	-3.265.636	0.593140	-2.646.916	62	7.467.307	-6.170.569	1.543.616	-3.911.777
14	5.146.772	-1.201.057	-0.812657	-4.938.250	69	8.392.649	-2.521.942	-1.065.918	-7.933.486
16	5.237.799	0.489897	-1.210.825	-5.072.321	72	8.570.312	0.430168	-1.897.945	-8.346.437
19	3.129.593	1.320.981	-0.286734	-2.822.614	76	5.280.893	2.073.093	-0.590541	-4.820.931
22	5.935.057	-5.068.224	1.351.378	-2.777.009	77	6.760.958	-5.477.690	3.821.501	1.049.572
23	6.149.922	-4.517.978	0.651024	-4.121.358	78	7.191.222	-6.218.160	3.612.022	0.038071
26	7.167.711	-1.104.933	-1.303.047	-6.961.126	81	6.655.813	-5.621.519	1.370.315	-3.289.470
27	6.933.608	0.130950	-1.589.126	-6.747.774	82	6.234.055	-4.346.964	0.442072	-4.446.562
30	4.973.175	1.833.928	-0.707049	-4.568.288	83	5.445.204	-0.105482	-1.202.567	-5.309.704
32	6.276.904	-5.562.852	2.861.509	-0.515721	85	6.564.857	-5.800.165	3.023.279	-0.561437
33	6.197.291	-5.523.565	2.241.969	-1.694.174	86	7.104.581	-6.328.782	2.592.505	-1.923.669
34	5.980.089	-5.132.497	1.467.650	-2.695.357	87	7.545.359	-6.476.795	1.886.948	-3.379.791
40	5.027.420	-4.155.504	2.780.324	0.525869	89	7.808.896	-5.777.751	0.999229	-5.157.324
42	5.789.538	-5.072.092	2.783.570	-0.210662	90	8.066.410	-4.583.719	0.053141	-6.637.293
45	6.374.199	-5.679.412	2.480.670	-1.490.291	93	8.427.500	-3.112.117	-0.820393	-7.788.738
47	7.092.444	-5.560.314	1.137.396	-4.253.469	95	8.892.242	-0.019407	-1.882.757	-8.690.617
50	8.063.567	-1.839.751	-1.248.320	-7.751.008	100	6.602.012	-5.242.820	3.876.349	1.036.010

YG ve AG sargılarının her bir iletkeninin üzerindeki eksenel kuvvetler Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'da verilmiştir. Eksenel elektromanyetik kuvvetlerin her bir sargı üzerindeki etkisi ayrı ayrı aşağıda Şekil 5.40'ta sunulmuştur. YG sargısının üst ve alt bölgelerindeki eksenel kuvvetler sırasıyla $z = 0$ eksenine doğru gitmektedir. AG sargısının üst yarı kısmındaki eksenel kuvvet (+ z) yönlüdür ve alt yarı kısmındaki eksenel kuvvet (-z) yönlüdür. Net kuvvetin dikey olarak çekme kuvveti gibi davrandığı düşünülmektedir.



Şekil 5.40: YG sargısındaki aksel elektromanyetik kuvvetler.

AG sargısının üst ve alt kısımlarının kuvvet yönleri YG sargılarının tam tersidir. Sargısının üst kısımdaki aksel kuvvet (+ z) yönlüdür ve alt kısımdaki aksel kuvvet (-z) yönlüdür.



Şekil 5.41: AG sargılarında meydana gelen aksel elektromanyetik kuvvetlerin zamana bağlı olarak değişimi.

Her iletken hücrenin aksel kuvvetleri, kaçak akı nedeniyle sargının alt kısmında daha fazla olmuştur. Aksel kuvvetler, YG sargısının orta bölgesinde ve AG sargısının uç noktalarında en yüksek değere ulaşmıştır. Ayrıca, sargılara etki eden aksel kuvvetlerin,

radyal kuvvetlere oranla daha fazla olduğu görülmüştür. Güç transformatörü modelindeki elektromanyetik kuvvetler, Çizelge 5.13'te gösterildiği gibi analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Teorik sonuçlar (2.34) eşitliğinden elde edilmiştir.

Çizelge 5.13: Transformatörün Kısa Devre Durumundaki Toplam Radyal Elektromanyetik Kuvvetlerin Analitik sonuçlarla Karşılaştırılması

Kuvvetler	Simülasyon Sonuçları	Teorik Sonuçlar
YG Sargısı F_{YG} (N)	7877.3	7734.6
AG Sargısı F_{AG} (N)	-9186.9	-9058.7

Bu çalışmada, bir transformatörün sargılarına kısa devre durumunda etki eden geçici elektromanyetik kuvvetlerin tahmini için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Geçici elektromanyetik kuvvetleri hesaplamak için transformatörün ANSYS@Maxwell 3D ortamında tasarlanan model kullanılmıştır. Güç transformatörüne uygulanan kısa devre geçici akımlarından kaynaklanan manyetik vektör potansiyeli, manyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetler Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir. Transformatör modelinin aksenal ve radyal elektromanyetik kuvvetleri hesaplanmış ve analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile kullanılan nümerik modelleme tekniğinin transformatörlerin tasarım aşamasında kolaylık sağlaması amaçlanmıştır.

5.8 Transformatörlerin Termal Analizleri

5.8.1 Giriş

Transformatörlerde meydana gelen esas kayıplar, indüklenen manyetik alanın nüve ve sargılarda ısı olarak açığa çıkardığı kayıplardır. Transformatörlerde meydana gelen ısının esas kaynağı da bu kayıplardır. Bundan dolayı, transformatörlerin izolasyon malzemesinin bozulmasını önlemek ve aktif parçalarını aşırı ısınmalara karşı korumak için sıcaklığın optimum değerlerde tutulması gerekmektedir. Transformatörün tasarımı, dış ortam şartları, transformatörün yük değeri, soğutma sistemi ve soğutma yağının özellikleri gibi etkenler transformatörün maksimum sıcaklık noktasının belirlenmesinde etkilidirler. Transformatörün dayanabileceği maksimum sıcaklık değeri transformatör tasarımında önemli bir kriterdir. Daha önce de bahsedildiği üzere Uluslararası Standartta sıcaklık artışının sınır aralığı açıkça belirtilmiştir. Transformatörün tüm bileşenlerinin sıcaklık dağılımları SEY ve bu yöntem benzer sayısal yöntemlere dayanan programlarla termal alan analizleri gerçekleştirilerek tahmin edilmektedir. Bu yöntemler, ısıl teste ve deneysel

yöntemlere uyumlu bir hesaplama aracı olarak kabul edilmektedir. SEY'e dayanan analiz ve simülasyon programları kullanılarak, karmaşık geometriler termal yönden analizler edilebilmektedir. Bu yöntemler kullanılarak elde edilen soğutma yağı ve sargıların sıcaklık değerlerinin deney ortamında elde edilen sıcaklık değerlerine yakın olduğu belirlenmiştir.

Daha önceki çalışmalarda, düzensiz akıların neden olduğu elektromanyetik alanların ısı alanlar üzerindeki etkisini araştırmak için çeşitli algoritmalar uygulanmıştır. Ayrıca yağ soğutmalı transformatörler için elektromanyetik alanın ısı alan üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sıcaklık dağılımının varsayımsal tahmini transformatör tasarımının ilk basamağı olarak kabul edilebilir. Güç dağıtımında önemli ve pahalı cihazlara zarar verebilen veya düşük performansa neden olabilen sıcaklık derecesinin tasarım sınırından daha fazla olmaması gerekmektedir. Bundan dolayı, üretim sürecinden önce kritik sıcaklık değerlerini elde etmek amacıyla termal modeller oluşturulur.

Tez çalışmasının bu kısmında, transformatörlerdeki sıcaklık dağılımını elde etmek amacıyla bir ısı model önerilmiştir. Bu model, Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne dayanarak termal alan analizi gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL programı ile formülize edilmiştir. Transformatörün aktif bileşenlerinde meydana gelen kayıplar, üretici firma tarafından deneysel olarak elde edilmiştir. Bu kayıplar, ısı analiz prosedüründe açığa çıkan ısı olarak ifade edilmiştir. Tasarlanan model ile transformatörün temel bileşenlerinin sıcaklık dağılımlarını ve transformatörün en sıcak noktasını belirleme amaçlanmıştır.

Transformatör tasarımı için sıcaklık dağılımının ve termal sınırların bilinmesi önceden tahmin edilmesi doğru ve verimli bir tasarım için çok önemlidir. Uluslararası Standartlarda belirtilen ve izin verilen termal sınırların üzerindeki sıcaklık değeri, transformatörün bileşenlerine büyük hasar vermektedir. Çalışmanın bu bölümünde transformatörün ısı analizleri için bir model sunulmuştur. Bu sayede, dış ortamın sıcaklığından transformatörün tüm bileşenlerinde açığa çıkan ısıya kadar tüm şartlar baz alınarak birleştirilmiş elektromekanik SEY yöntemine dayanan ANSYS@MMAXWELL ve ANSYS@Mechanical birleşimi ile 3-fazlı bir transformatörün termal alan analizi gerçekleştirilmiştir. Tasarımı ve sonuçları doğrulamak amacıyla 15 MVA 33/11 kV nominal değerlerine sahip bir transformatör seçilmiştir. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak model doğrulanmıştır. Tasarlanan model ile transformatörün sargılarındaki ve nüvesindeki sıcaklık dağılımı ve transformatörün sıcaklığı ölçülemeyen bölgelerindeki beleşenlerinin spesifik noktalarının sıcaklığı belirlenmiştir.

5.8.2 Termal alanın matematiksel modelinin analizi

Dağıtım transformatörünün termal alanı, SEY'e dayanan ANSYS@Workbench ortamında enerji denklemleri sayısal yöntemlerle çözülerek elde edilmiştir. Bu sebeple, transformatör modeli tasarlanırken sonlu elemanlar yönteminin gereksinimleri dikkate alınmıştır. Transformatörlerde açığa çıkan ısı, alternatif akımın bir sonucu olarak ortaya çıkan elektromotor kuvvetinin elektriksel dirençte meydana getirdiği ısıdır. Toplam kayıplar (bakır ve nüve kayıpları), program ortamında termal alan analizi için üretilen ısı olarak daha sonra kullanılmak üzere, üretici firma tarafından sargılarda ve nüve denysel olarak ölçülmüştür. Tasarlanan model, bu veriler dikkate alınarak tasarlanmış ve termal yönden analiz edilmiştir. Dağıtım transformatörünün bileşenlerindeki ısı transferi süreci için aşağıdaki adımlar takip edilmektedir [48]. Transformatörün nüvesinde ve sargılarda açığa çıkan ısı, nüvenin dış yüzeyine ve iletim kanallarından sargılara yetişene kadar malzemelerden geçirilir.

Termal ve elektromanyetik alanların ana kaynakları, transformatörün sargılarından akan akımlardır. Dğer bir ifade ile iletkenler vasıtasıyla akan akımın ortaya çıkan joule kayıplarıdır.

Diferansiyel denklemlerin belirtilen başlangıç ve bitiş şartlarındaki çözümü için SEY kullanılmıştır. Bu yöntem uygulanarak, ısı transferinin kısmi diferansiyel denklemini çözme problemi, eşzamanlı lineer denklemler sisteminin çözümüne indirgenmektedir. Burada tüm geometri sınırlı sayıda sonlu elemana bölünerek çözüm gerçekleştirilir. Eleman düğümlerinin sıcaklıkları çözüm olarak elde edilirken, elemanların içerisindeki sıcaklıklar eleman düğümlerinin değerleri kullanılarak yaklaşık olarak hesaplanmaktadır.

Transformatörün sıcaklık farkının bir sonucu olarak, ısı transferinin radyasyon modu, ortam ve transformatör bileşenleri arasında gerçekleşmektedir. Fakat, transformatör bileşenleri emisyonu düşük olan malzemelerden üretildiği için radyasyon etkisi çok az olmaktadır. Az olan bu etki dikkate alınmamaktadır. Bu durum, hesaplama sonuçlarının doğruluğunda çok az da olsa bir etki yaratmaktadır. Termal modellemenin geliştirilmesinde ve transformatörün termal alan analizinin gerçekleştirilmesinde birçok varsayım dikkate alınmıştır:

- Transformatör, simetriye bağlı olarak, paralel düzlemde bir yapı olarak düşünülebilir. Bu sebeple, SEY kullanılarak elektromanyetik ve termal alan yönünden analiz gerçekleştirildiğinde 2D olarak (bir düzlemde) simüle edilebilir.
- Günlük dış ortam sıcaklığının maksimum değeri dikkate alınır.
- Sıcaklık artışından çok etkilenen izolasyon yağı özellikleri hariç, transformatör malzemelerinin ısıl özelliklerinin sıcaklıkları sabit kabul edilir.

- Nüve ve sargı gibi aktif malzemelerin içinde açığa çıkan ısı, birim hacimde ve birim zamanda düzgün bir şekilde dağıldığı kabul edilir.
- Bakır ve nüve kayıplarına oranla dielektrik izolasyon kayıpları çok küçük olduğu için ihmal edilir.
- Konveksiyon yöntemi ile ısı transferi tabii bir konveksiyon şeklinde kabul edilir.

5.8.3 Transformatörün ANSYS@MAXWELL ile modellenmesi

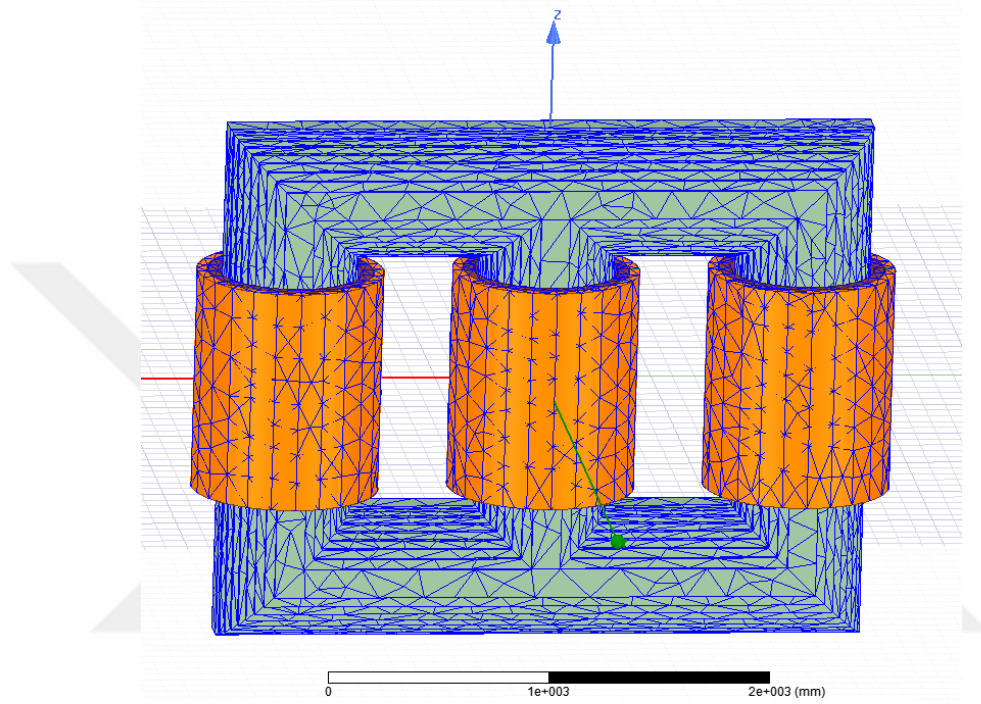
Transformatörü ANSYS@MAXWELL ortamında modellemek için, densesel ortamda analizleri yapılmış gerçek bir transformatörün geometrinin detayları kullanılmıştır. Tez çalışmasının bu kısmında 15 MVA 33/11 kV nominal değere sahip kuru tip 3-fazlı bir transformatör incelenmiştir. ANSYS@MAXWELL ortamında transformatörün manyetik ve termal analiz için transformatörün 3D ve 2D modelleri tasarlanmıştır. Maxwell ortamındaki elektromanyetik alan analizleri gerçekleştirildikten sonra, termal analizlerin gerçekleştirilmesi için modelin geometrisi Mechanical ortama aktarılmıştır. Modellenen transformatörün özellikleri Çizelge 5.6'da daha önce verilmiştir.

Transformatörün 3D ve 2D modellerinin analizi için ticari bir yazılım ve simülasyon programı olan ANSYS@MAXWELL ve ANSYS@Mechanical programlarının birleşimi kullanılmıştır. Transformatörün modellenmesi için sonlu elemanlar kullanılmıştır. Bunun için tüm geometri alt geometrilere bölünerek birbirine bağlanmıştır. Daha sonra tüm ana bileşenlerin gerçek boyutlarına bağlı olarak analiz amacıyla alanlar oluşturulmuştur. Diğer bir ifade ile, çözüm bölgesi veya tüm modelin geometrisi, öğelere veya alt bölümlere ayrıştırılarak gerçeğe yakın bir çözüm elde etmek amacıyla tüm öğeler düğümlerle birbirlerine bağlanarak çözüm gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple, sonlu elemanların tertibi, çözüm tütü, eleman boyutları ve sayısı belirlenmelidir. Ağ oluşturulabilmesi için eleman tipi ve elemanlara ait malzemelerin özellikleri program ortamında tanımlanmalıdır. Kullanılan malzemelerin termal özellikleri program ortamında tanımlanmış ve Çizelge 5.14'te sunulmuştur.

Çizelge 5.14: Transformatörün materyallerinin özellikleri

	Yoğunluk	Isotropic termal iletkenlik	Özel sıcaklık değeri
Sargılar	8933 kg/m^3	$400 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$385 \text{ j/kg}^2\text{°C}$
Nüve	7650 kg/m^3	$5 \text{ W/m}^2\text{°C}$	
İzolasyon		$4.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$	

Modelin analizine başlamadan önce tasarım aşamasındaki bir sonraki adım ise, transformatörün bileşenleri için uygun bir ağ oluşturulmasıdır. Ağ gerçekleştirilirken iki hususa dikkat edilmektedir. Transformatörün boyutları ve şekilleri için uygun olan yeterli sayıda ve uygun eleman bulunmalıdır. Transformatörün tüm parçaları için oluşturulan ağ, farklı şekillerdeki düğüm noktalarından ve sonlu elemandan meydana gelmektedir. Tasarlanan transformatörün geometrisi ve oluşturulan ağ aşağıda Şekil 5.43'te sunulmuştur.



Şekil 5.43: 3-fazlı transformatörün ağ örgüsü

Tasarlanan transformatör modelinin çözümüne geçmeden önceki son aşama ise, ısı transfer sürecini parçalarıyla test etmek için transformatörün bileşenlerinin sınır şartları belirlenmelidir. Burada nüve ve sargılarda meydana gelen kayıplar açığa çıkan ısı olarak tanımlanmıştır. Transformatörün elektriksel kayıpları, ısı kayıplarının miktarı olarak pratikte ölçülmüştür. Çizelge 5.15'te transformatörün ölçülen kayıpları sunulmuştur.

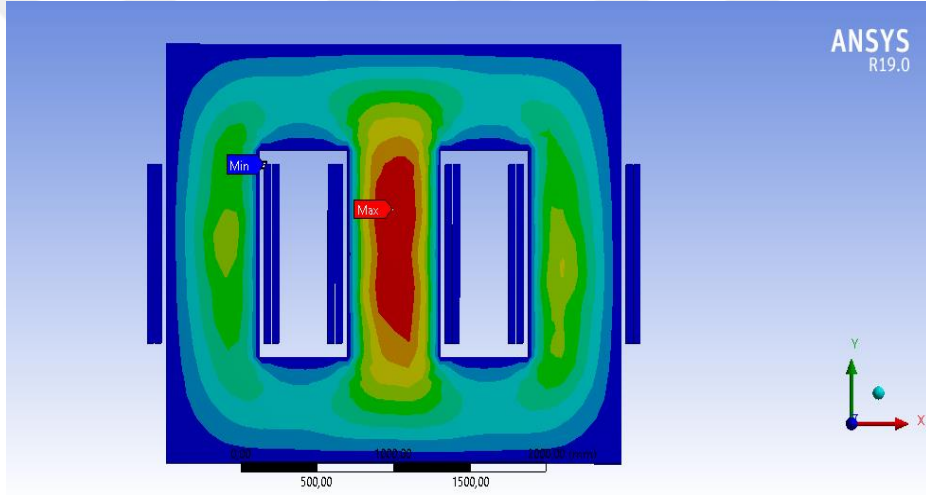
Çizelge 5.15: Transformatörde meydana gelen nüve ve bakır kayıpları

Teorik sonuç	Bakır kayıpları		Teorik sonuç	Nüve kaybı	
	Simülasyon sonucu	Deneysel sonuç		Simülasyon sonucu	Deneysel sonuç
96.49 kW	97.2 kW	97 kW	12.36 kW	12.41 kW	12.5 kW

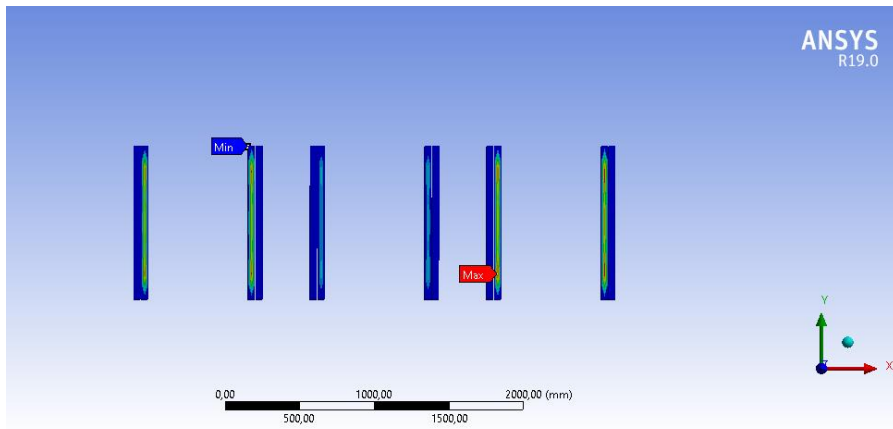
Nüve ve sargılar arasında iletim sınırı uygulanır. İletim için, malzemelerin termal iletkenlik katsayıları sınır şartlarında istenen termal özelliklerdir.

5.8.4 Modelin simülasyonu ve sonuçları

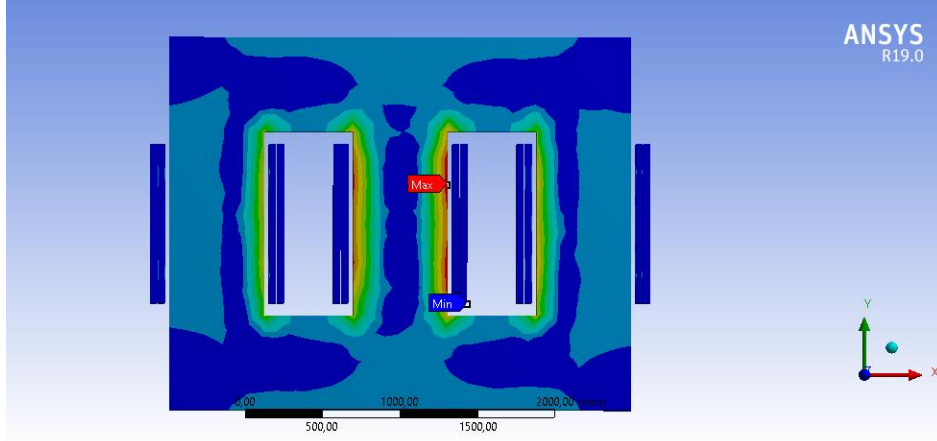
SEY'e dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL kullanılarak transformatördeki ısı transfer yolunu belirlemek için, transformatörün geometrisi, transformatör bileşenlerinin malzemelerinin termal özellikleri, oluşan ısıların değerleri ve yerleri ve uygun ağ seçilmesi gibi önemli basamaklar belirlenmiştir. Daha sonra, transformatörün yapısının tüm bileşenlerinde sıcaklık dağılımlarını 2D ve 3D olarak elde etmek için enerji eşitlikleri çözülmüştür. Transformatörün nüve, AG ve YG sargıları gibi bileşenlerinin sıcaklık dağılımlarının ayrıntıları 2D ve 3D olarak verilen değerler Şekil 5.44-5.50'de görsel olarak sunulmuştur.



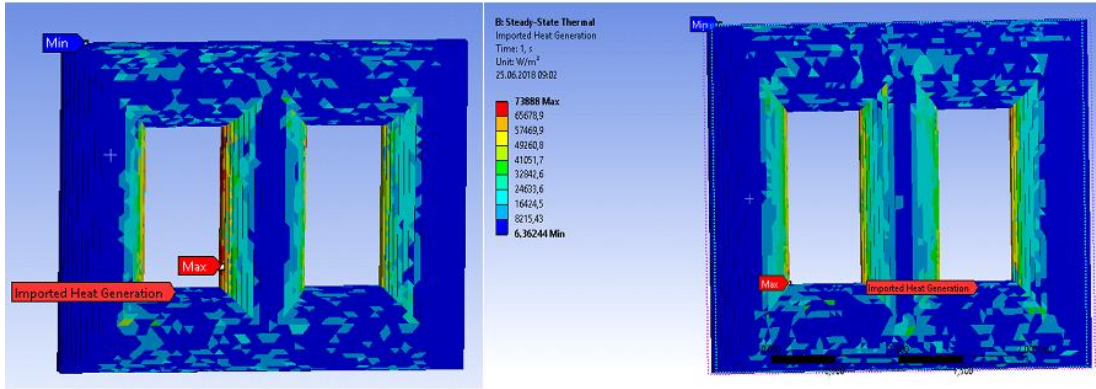
Şekil 5.44: Transformatörün nüvesindeki 2D sıcaklık dağılımı



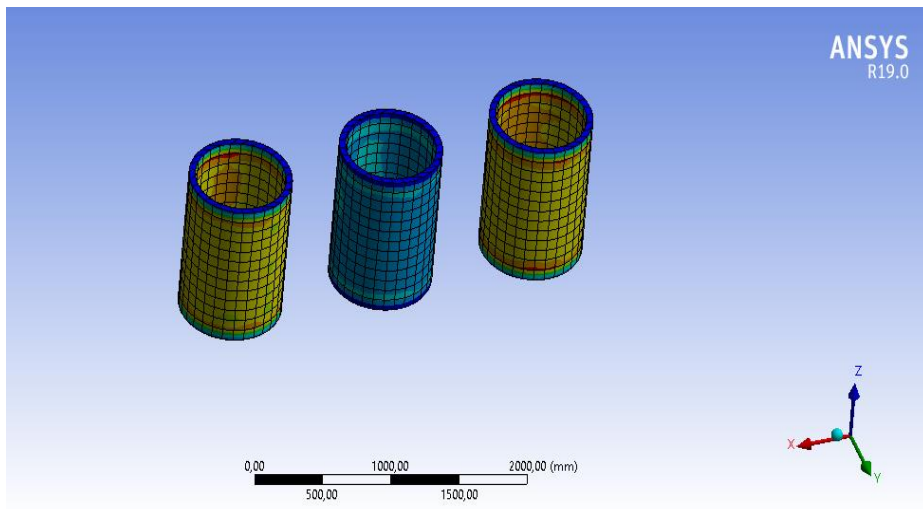
Şekil 5.45: Trafo sargılarının en yüksek ve en düşük sıcak noktalarının 2D gösterimi



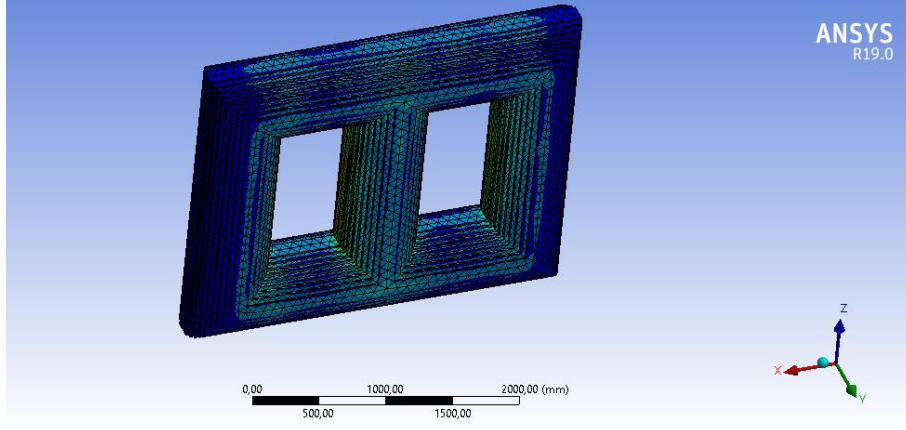
Şekil 5.46: Transformatörün 2D ısı akış dağılımı



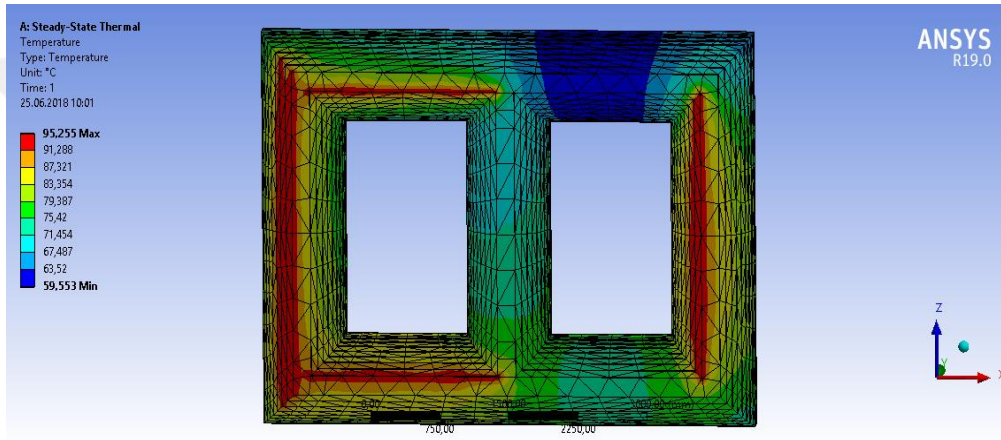
Şekil 5.47: Transformatörün farklı zaman dilimlerindeki kritik noktadaki ısı akışının 3D gösterimi



Şekil 5.48: Sargıların 3D ısı akışı



Şekil 5.49: Nüvenin 3D toplam ısı akışı



Şekil 5.50: Nüvedeki 3D sıcaklık dağılımı.

Analiz bittikten sonra meydana gelen sıcaklıklar, nüvede 88.3 °C ve 84.78 °C, YG sargısında 92.4 °C ve 91.01 °C ve AG sargısında 89.32 °C ve 88.71 °C olarak ölçülmüştür. Yukarıda sunulan şekillerde görüldüğü üzere, transformatördeki maksimum sıcaklık değerinin 92.4 °C olduğu ve YG sargısında meydana geldiği belirlenmiştir. Transformatörün deneysel termal testinde maksimum sıcaklık değeri 89.31°C olarak hesaplanmıştır. Transformatör modelinin simülasyonundan elde edilen sonuç, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında yaklaşık 3,09 °C bir fark olmuştur. Bu değer, hem tasarlanan modeli doğrulamakta hem de analiz sonuçlarını doğrulamaktadır. Sargıların bulunduğu bölgeler trafonun aktif parçalarını barındırdığı için genel olarak transformatörün en sıcak kısımlarıdır. Bu sebeple ısıya dönüşen toplam kayıpların büyük bir bölümü bu aktif kısımlarda meydana gelmektedir.

Transformatör nüvesinin maksimum sıcaklığı sargılardan daha düşük olmuştur. Nüvedeki maksimum sıcaklık değeri nüvenin orta bacağına meydana gelmiştir. Bu nedenle

nüvede meydana gelen kayıplar, açığa çıkan ısıya bağlı olarak sargılarda meydana gelen kayıplardan daha düşük olmuştur.

Tasarlanan termal model ile transformatörün simülasyonu ve analizi başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Standart sıcaklık değerleri kıyaslandığında sargıların ve nüvenin maksimum sıcaklık değerlerinde yaklaşık % 2'lik bir fark olduğu belirlenmiştir. Bu değer, transformatörün termal alanının simülasyonunun gerçeğe çok yakın olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, transformatör için modifikasyon ve performans iyileştirmede bir tasarım aracı olarak SEY'e dayanan ANSYS programının kullanılabilceği anlamına gelmektedir.

Elektrik-termal eşdeğer devreye dayalı transformatörün nüvesinde ve diğer metal parçalarındaki sıcaklık artışı ve ömür kaybı incelenmiştir. Bu çalışmadaki modellerin literatürde sunulan modellere göre avantajları, sargılar ve nüvedeki sıcaklıkların en zor şartlarda dahi hesaplanabiliyor olmasıdır. Transformatörlerin doğru modellenip analiz edilmesi için kayıp ve ısınma mekanizmalarının eş zamanlı belirlenmesi gerçeğe daha yakın sonuçlar vermiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan modeller ve bu modellerin elektromanyetik ve termal yönden analizleri bu bölümde detaylı olarak işlenmiştir.

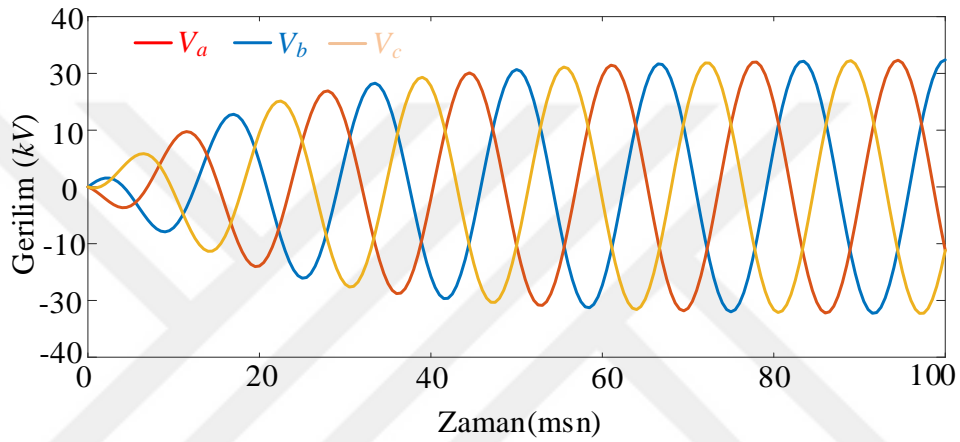
5.9 Güç Transformatörlerinde Yıldırım Darbe Analizlerinin İncelenmesi

Transformatörlerde ani olarak meydana gelen yüksek gerilim ve akımlara karşı transformatörün mekanik dayanımının tahmini, transformatörün hem tasarım aşaması hem de ömrü için çok önemlidir. Transformatörlerin dayanımının yıldırım darbelerine karşı sağlanabilmesi için tasarım aşamasında aşırı gerilimlere maruz kalan bölgelerinin bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada, tasarlanan güç transformatörünün, hem normal çalışma koşullarında hem de yıldırım darbesi durumundaki elektromanyetik akı değerleri ve transformatörün sargılarında meydana gelen elektromanyetik kuvvetler analiz edilmiştir. Ayrıca, her iki çalışma koşulu için elektromanyetik akı ve elektromanyetik kuvvetler hesaplanmıştır. Bu sayede, nüvedeki manyetik akı yoğunluğunun dağılımı, sorunlu ve mekanik dayanımın düşük olduğu bölgeler tespit edilmiştir. Hem yıldırım darbesi uygulanarak gerçekleştirilen analizler için hem de normal şartlarda gerçekleştirilen analizler için transformatör modelinde, sınır koşulları, dış geometri ve tüm materyallerin özellikleri üzerinde tanımlanmaktadır. Manyetik nüve, manyetizasyonun B-H eğrisi ve ince laminasyonlarla karakterize edilmektedir. Bu karakteristik özellikler trafo modelinin her iki

simülasyonunda da kullanılmıştır. Manyetik nüve materyaline ait B-H eğrisi ve Spesifik nüve kayıpları B-P eğrisi daha önceki çalışmada verilmiştir.

5.9.1 Transformatörün normal çalışma koşullarındaki analizi

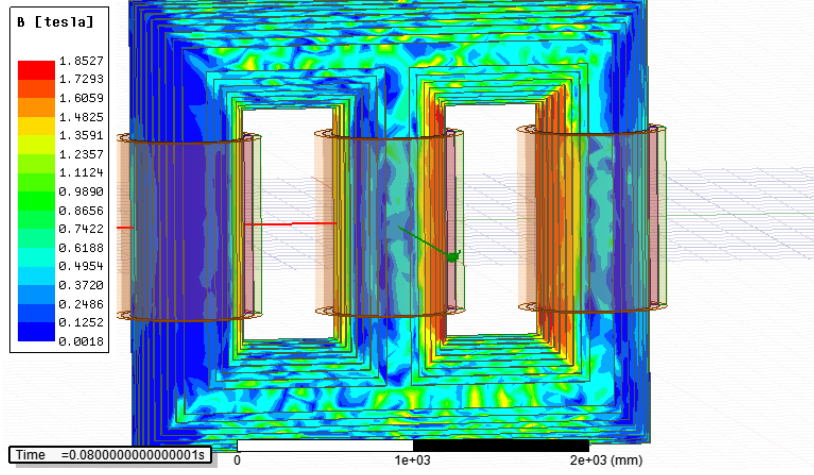
Bu çalışma koşulunda transformatör modellerindeki tasarımların analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde transformatörün, manyetik alan analizi ve elektromanyetik kuvvetleri kalıcı rejim durumu için hesaplanmıştır. Ani akımları elimine etmek ve simülasyon süresini kısaltmak için Şekil 5.51’de sunulan ve üssel olarak artan bir gerilim uygulanmıştır.



Şekil 5.51: Transformatörün giriş gerilimi

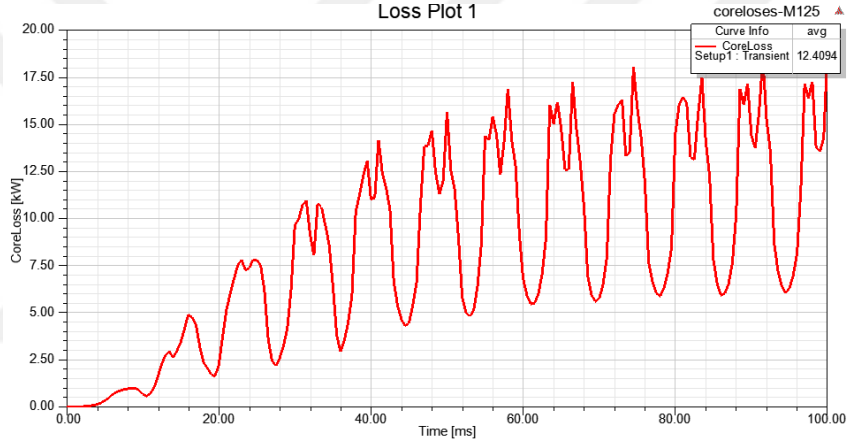
5.9.2 Elektromanyetik alan ve kayıp analizi

Transformatörün çalışması koşulları nüve doyma noktasına yakın olursa transformatörde kayıplar artar, açığa çıkan ısı artar ve transformatörün verimi düşer. Bu nedenle, simülasyonu gerçekleştirilen modelin akı yoğunluğu farklı zaman dilimleri için analiz edilmiştir. Tasarlanan transformatör modelinin elektromanyetik akı yoğunluğunun dağılımı Şekil 5.52’de 3D olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlardan, transformatörün nüvesinin akı yoğunluğu dağılımının doyuma gittiği bölgeler görülebilmektedir.



Şekil 5.52: 3D Akı Yoğunluğu Dağılımı

Tasarlanan transformatör modelinin nüve kayıp eğrisi aŞekil 5.53’te verilmiştir.



Şekil 5.53: Manyetik nüvenin kayıp eğrisi

Trasnformatörün normal çalışma koşullarındaki simülasyonundan elde edilen değerler aşağıda Çizelge 5.16’da sunulmuştur.

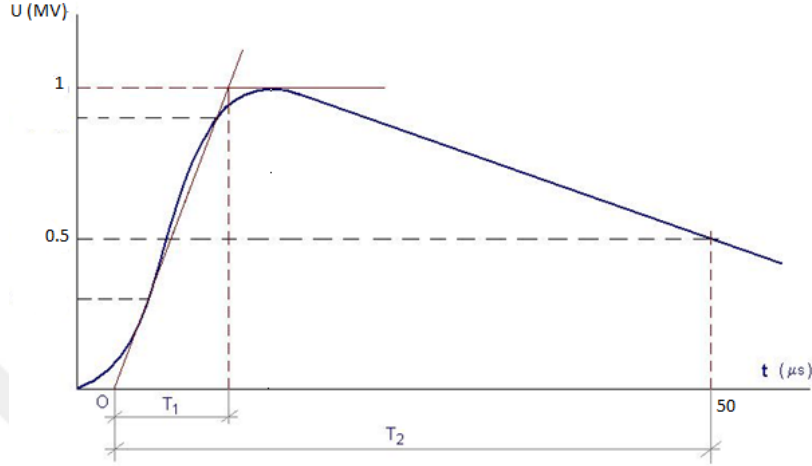
Çizelge 5.16: Modelin Normal Çalışma Koşullarındaki Elektromanyetik akı ve Kayıp değerleri

Maksimum Elektromanyetik akı (T)	Nüve kaybı (kW)	Eddy akım kayıpları (kW)	Histeresiz kayıplar (kW)
1.84	12.41	8.65	3.76

5.9.3 Yıldırım darbesinin tasarlanan modele uygulanması

Yıldırım darbesini uygulamak için “Transient” çözücü tipi kullanılmıştır. Burada uyarma AG sargılarına verilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yıldırım darbesini uygulamak için

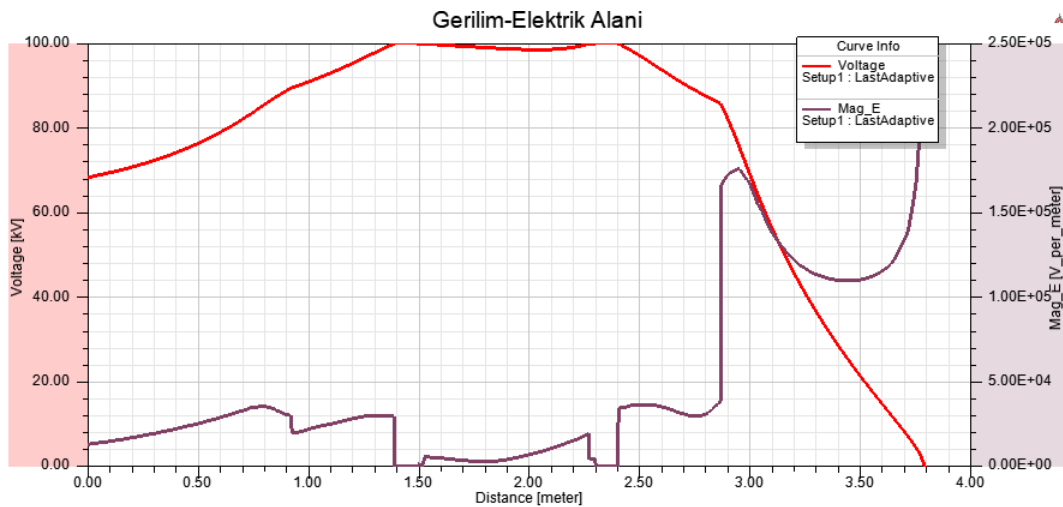
“SheetScan” yöntemi kullanılmıştır. Yeni bir koordinat sistemi ve eğri oluşturulmuştur. Analiz, 0-50 μ saniye aralığında birer mikro-saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yıldırım darbe geriliminin maksimum değeri 1 MV’dir. Şekil 5.54’te uygulanan yıldırım darbesinin şekli ve elde edilen koordinat sistemine ait eğrinin grafikleri sırasıyla sunulmuştur.



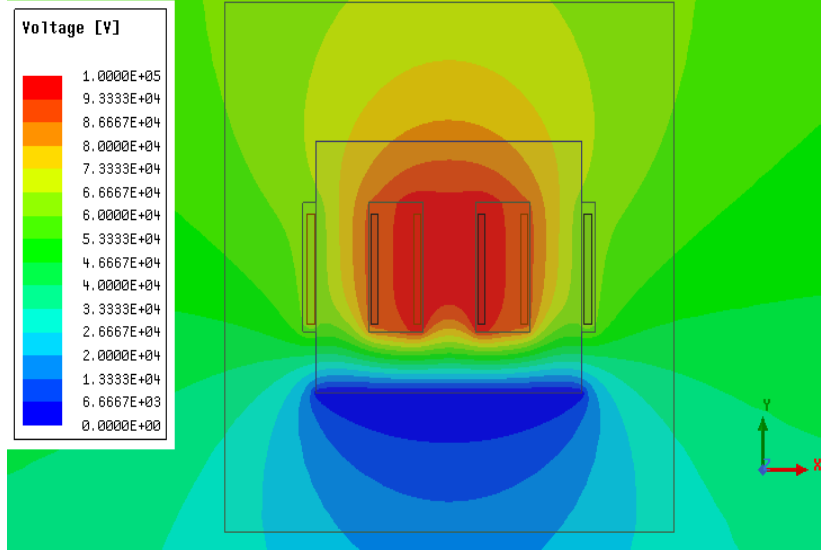
Şekil 5.54: Uygulanan yıldırım darbesine ait grafik.

5.9.3.1 Yıldırım darbesi uygulanan modelin analizi

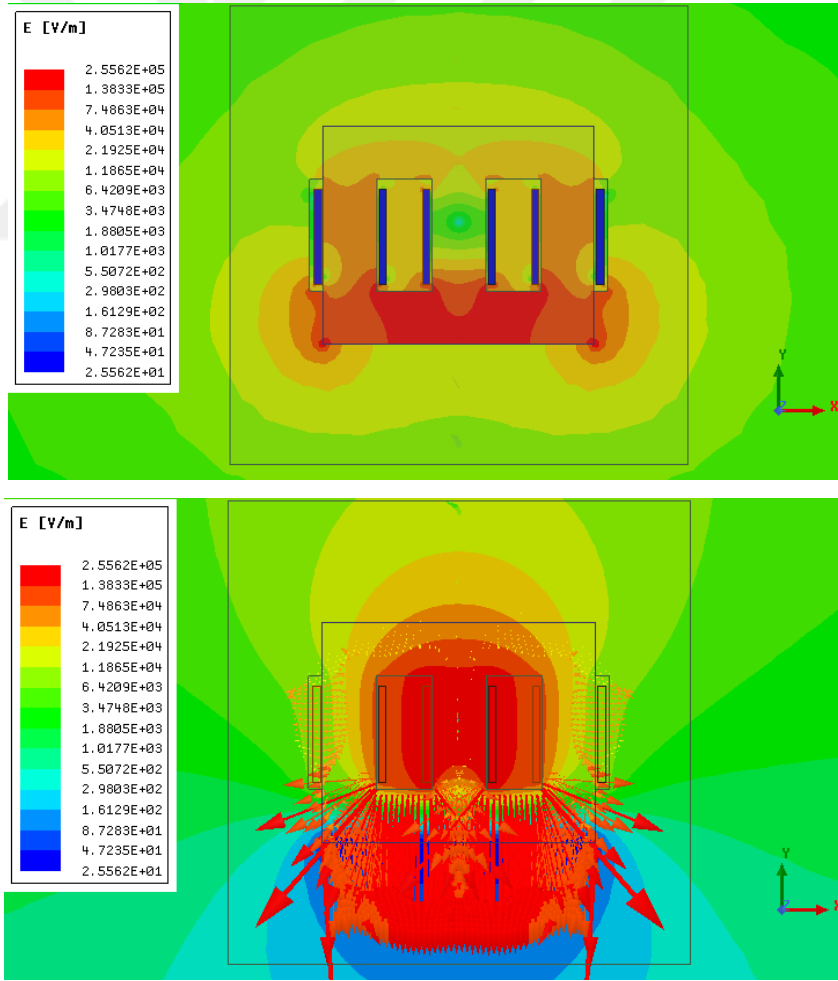
Tasarlanan modele SheetScan metoduyla yıldırım darbesi uygulanmıştır. Gerilim seviyesi 1 MV ve analiz süresi için 0-50 μ s aralığı için 1 μ s'lik adımlar seçilmiştir. Simülasyondan sonra elde edilen gerilim-elektrik alanı, meydana gelen elektrik alanının büyüklüğü ve yıldırım darbesinin meydana geldiği yerdeki gerilimin izolasyon malzemelerinde meydana getirdiği zorlanma aşağıdaki şekillerde sunulmuştur.



Şekil 5. 55: Yıldırım darbesindeki gerilim-elektrik alanı ilişkisi



Şekil 5.56: 2D transformatör modelinde yıldırım darbesi durumunda meydana gelen zorlanma ve gerilim dağılımı



Şekil 5.57: Transformatör modelinin yıldırım darbesi durumunda elektrik alanın dağılımları

Ampirik formüllere dayanan elektrik alan yoğunluğunun hesaplanması, makinenin farklı kısımlarındaki alan yoğunluğunun sadece yaklaşık değerlerini vermektedir. Makinenin farklı kısımlarındaki alan yoğunluğunun doğru tahmini için, nüve malzemesinin doyma noktasına (B-H) yakın olduğu makinenin zayıf parça olarak adlandırılan kısımlarını doğru tahmin etmek tasarım sürecinde önemlidir. Makinenin nüve doyma noktasına yakın çalışması, kayıpları ve ısı yayılımını artırır, verimi düşürür. Bu nedenle, akı yoğunluğu, her iki test durumu için farklı zaman aralıklarında analiz edilmiştir.

Yıldırım darbe analizi gerçekleştirilen modelde nüve malzemesinde meydana gelen elektrik alanının değerinin normal çalışma koşullarındaki değerinden çok yüksek olmuştur. Bu durumun da nüve malzemesinin doyma noktasına gitmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca nüvedeki zayıf noktalar ve sıkıntılı bölgeler tespit edilmiştir.

Yıldırım Darbesine bağlı olarak yapılan analizde kayıplar, elektrik alan şiddeti ve elektromanyetik akı dağılımı çok yüksek olmuştur. Tüm modellerden elde edilen sonuçlardan yıldırım darbesi altında çalışan transformatörün, nüvenin doyma noktasının çok üstünde çalıştığı kanıtlanmıştır.

5.10 Ölçü Transformatörlerinin Analizlerinin Gerçekleştirilmesi

5.10.1 Akım transformatörlerinin elektromanyetik alan analizi

Modern koruyucu sistemler, primer kısa devre akımının güvenilir reproduksiyonunu gerektirmektedir. Genel olarak, özellikle yüksek gerilim elektrik dağıtım tesislerinde, işletme şartlarına uygun seçilmeyen akım transformatörleri kullanıldığında akımın önemli bir bölümü trafonun doyma noktasına ulaşmasına sebep olmaktadır. Güç sistemlerinin güvenilirliklerinin sağlanması, bu sistemlerin ölçüm ve koruma devrelerinin hızlı ve zamanında cevap vermesi için güç tesislerine kurulacak akım trafolarının iyi analiz edilmesi gerekmektedir.

Bir akım trafosuna primer akım uygulandığı zaman akım transformatörün (AT) belirli bir doğruluk aralığındaki davranışını belirleyebilmek önemlidir. Bu durum, elektrik güç sistemlerinde koruma elemanı olarak kullanılan ekipmanların davranışlarının tahmin edilebilmesinde kolaylık sağlamaktadır.

Bu transformatörlerin davranışını önceden tahmin etmek için literatürde birçok analiz yöntemi bulunmaktadır. Ancak bu yöntemlerin sadece bazıları geçici rejim altındaki analizleri gerçekleştirmek için uygundur. Bu amaç için en iyi ve uygun sayısal çözüm

araçlarından biri SEY'dir [49]. Teknik kısıtlamalardan dolayı, jeneratörlerin çıkış gerilimi 25 kV'yi geçemediği için çıkış akımları yükseltilmelidir. Bu yüksek akımlar akım trafoları aracılığı ile ölçülür. AT'lerin doğruluğu, AT'lerin birbirine yakın yerleştirildiği santrallerde bitişik baraların meydana getirdiği kaçak akıdan etkilenmektedir.

Manyetik ve termal özellikleri, yapılarının karmaşıklığı, malzemelerin farklı ferromanyetik özellikleri ve nüve malzemesinin doğrusal olmaması B-H eğrisi nedeniyle akım trafolarının (AT) tasarım parametrelerinin belirlenmesi çok karmaşıktır. Bu trafoların sekonder çıkışı hem ölçü hem de koruma devreleri için kullanılmaktadır. Bu yüzden AT'nin doğruluk derecesi çok iyi ve hassas olmalıdır. Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak bu çalışmada trafo 2D olarak modellenmiştir. Akım transformatörünün manyetik ve termal analizlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@Maxwell programı kullanılmıştır. Trafonun analizleri, açık ve kısa devre koşullarında 2D olarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerden sonuçlarından, akım trafosunun nüvesinde dağınık elektromanyetik akı dağılımının meydana geldiği görülmüştür. Bu durum, AT'nin sekonder akımının hatalı olmasına ve koruma devrelerinde istenmeyen çalışma koşullarının meydana gelmesine sebep olmuştur.

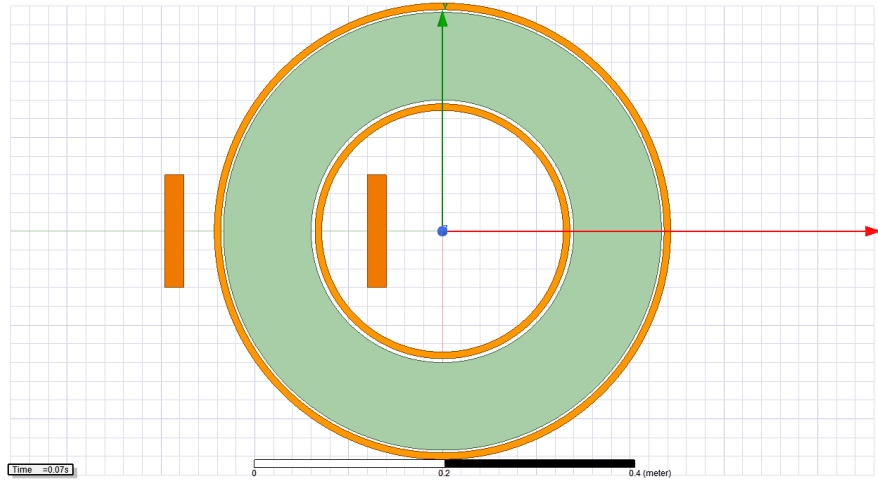
i. Akım transformatörünün modellenmesi

ANSYS@MAXWELL programının parametrik tasarım bölümü kullanılarak elektromanyetik ve termal analiz için gereken parametreler, modelin geometrik boyutları ve nominal değerler program ortamında tanımlanmıştır. Çizelge 5.17'de tasarlanan modele ait nominal değerler verilmiştir.

Çizelge 5.17: Akım trafosunun tasarım parametreleri

Parametre	Değer
İzasyon seviyesi	0.7 – 3.2 kv
Sıcaklık aralığı	-20 – 55 °C
Anma primer akımı	8000 A
Anma sekonder akımı	5 A
Rf	1.25
Anma frekans	50 Hz

ANSYS@MAXWELL ortamında tasarlanan akım transformatörünün 2D modeli Şekil 5.58'de sunulmuştur.



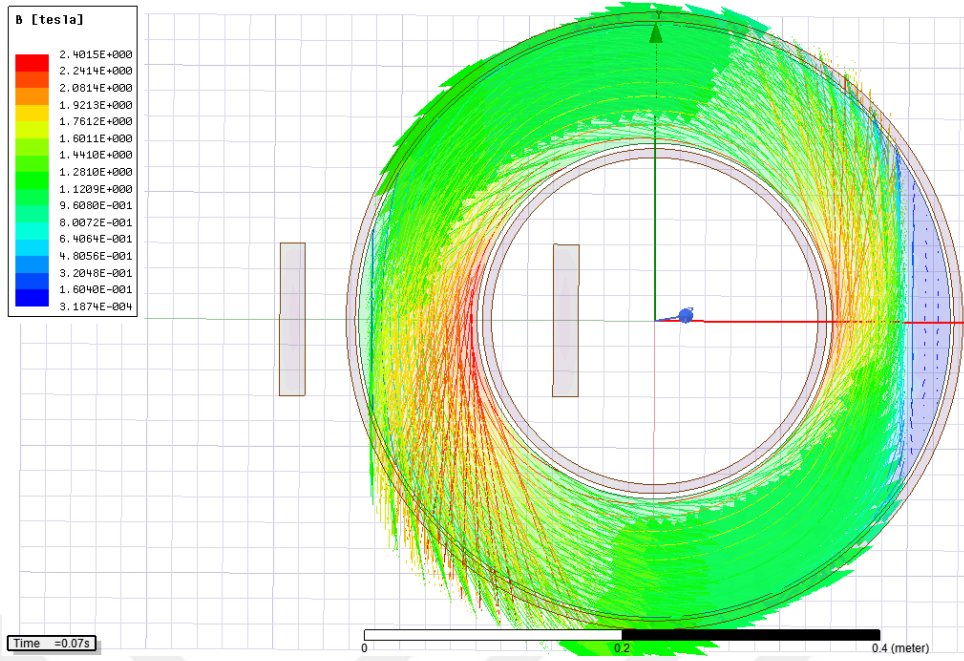
Şekil 5.58: Akım trafosunun geometrik modeli.

ii. Modelin simülasyonunu ve analizi

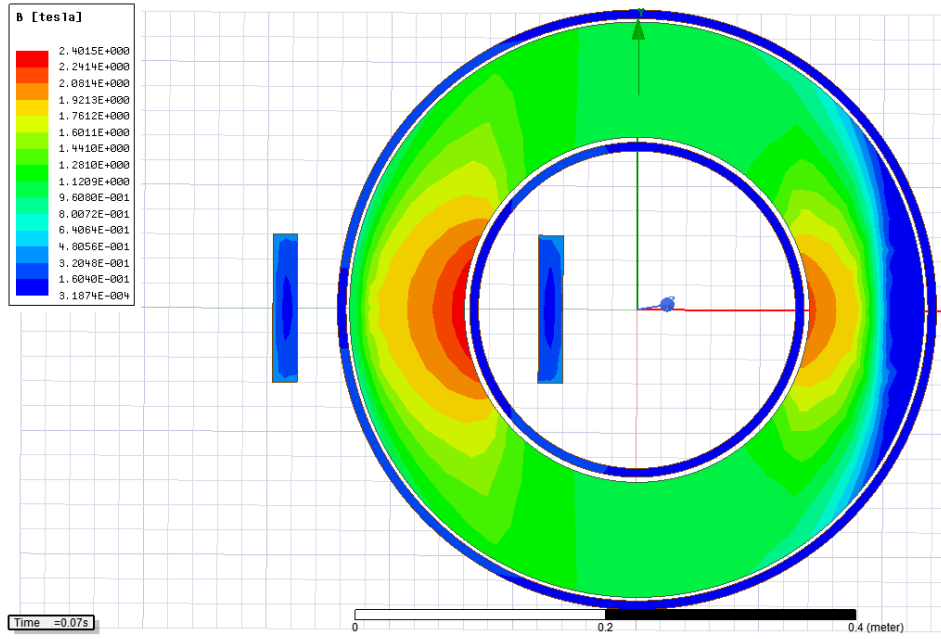
Çalışmanın bu bölümünde akım trafosunun kayıplarını, akı dağılımını, sıcaklık dağılımını ve manyetik alan yoğunluğunu analiz etmek için manyetik ve termal analizler gerçekleştirilmiştir.

iii. Açık Devre Durumundaki Manyetik Analiz

Nüvedeki akı yoğunluğu dağılımı saturasyon sebebiyle çok yüksek olmuştur. Nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri 2.04 T olarak belirlenmiştir. Açık devre durumundaki 2D modelin akı dağılımı ve akı yoğunluğu aşağıda Şekil 5.59 ve 5.60'ta verilmiştir.

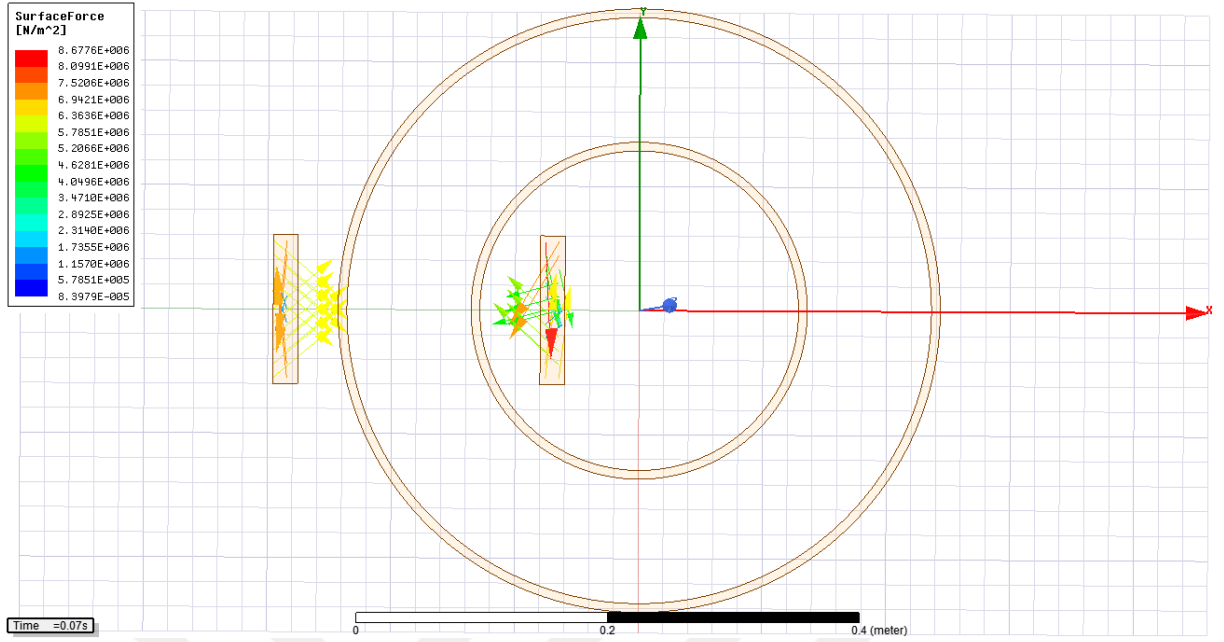


Şekil 5.59: Açık devre durumunda 2D modelin manyetik akısının vektörel dağılımı



Şekil 5.60: 2D Modelin açık devre durumundaki akı dağılımı

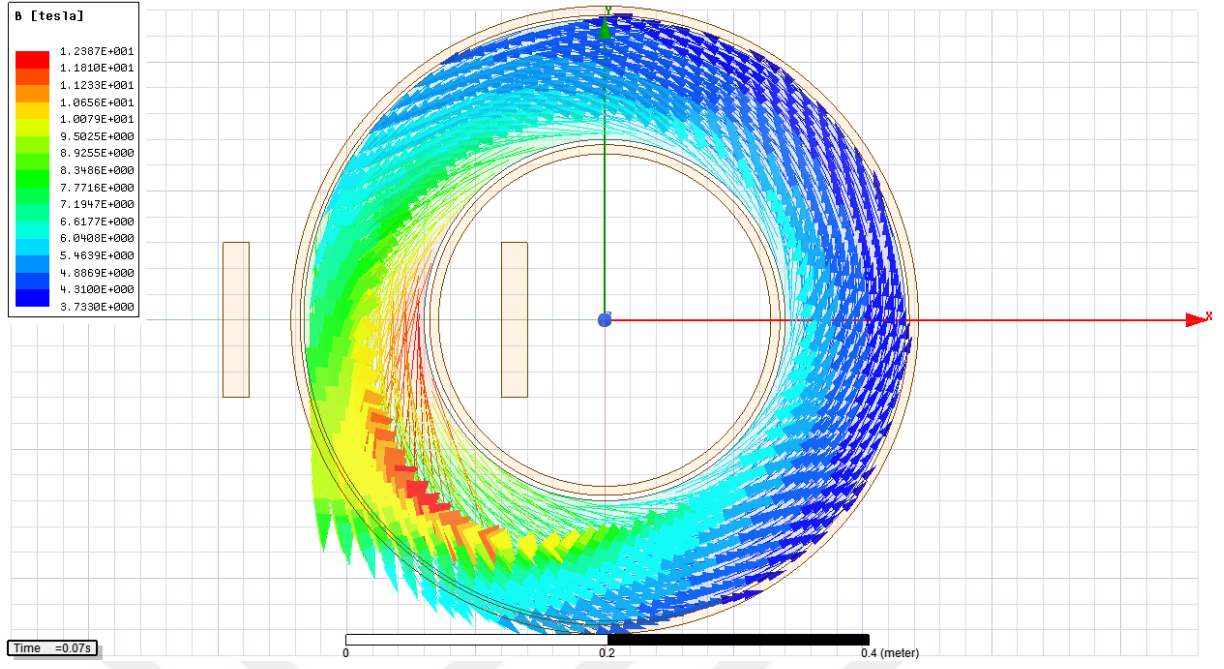
2D modelin açık devre durumundaki analizinden elde edilen elektromanyetik kuvvetlerin dağılımı Şekil 5.61’de verilmiştir. Bu kuvvetlerin en yüksek değeri 1.398 N oolmuştur primer sargı etrafında meydana gelmiştir.



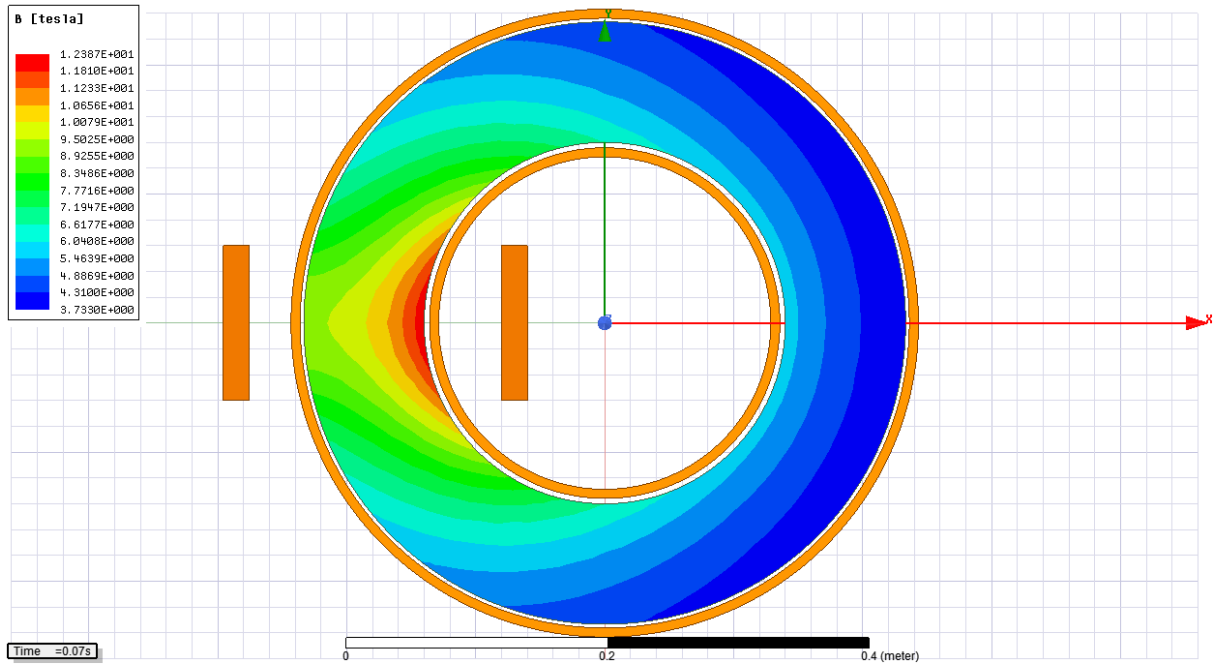
Şekil 5.61: Modelin elektromanyetik kuvvet dağılımı

iv. Kısa Devre Durumundaki Manyetik Analiz

Bu analiz için akım transformatörünün kısa devre durumundaki çalışması incelenmiş ve transformatörün bu şartlar altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Kısa devre durumunda akım trafosu normal şartlarda olmadığı için farklı gerilimlerden etkilenebilmektedir. AT'yi etkileyen bu gerilimler doğru bir biçimde analiz edilmelidir. Kısa devre akımı, sistemin kısa devre seviyesine göre nominal değerin çok çok üstüne çıkabilmektedir. Şekil 5.62 ve 5.63'de modelin kısa devre durumundaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Maksimum akı değeri yaklaşık 1.23 T olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.62: Kısa devre şartlarında trafonun 2D modeline ait akının vektörel dağılımı.

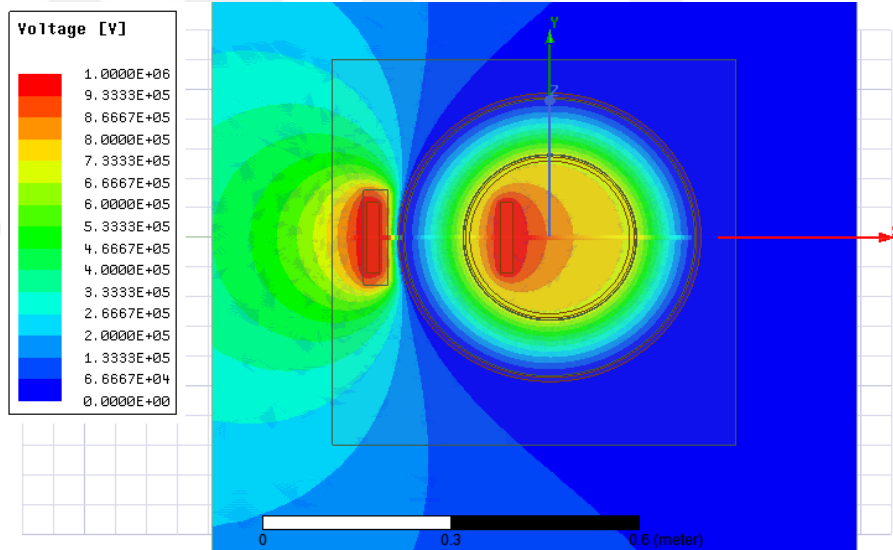


Şekil 5.63: Kısa devre şartlarında trasfonun 2D modeline ait akının dağılımı.

Şekil 5.64'te de görüldüğü üzere, tasarlanan 2D modelin elektromanyetik kuvvetlerinin dağılımı, primer sargı etrafında yaklaşık 539.9 N olmuş maksimum değere ulaşmıştır. Bu

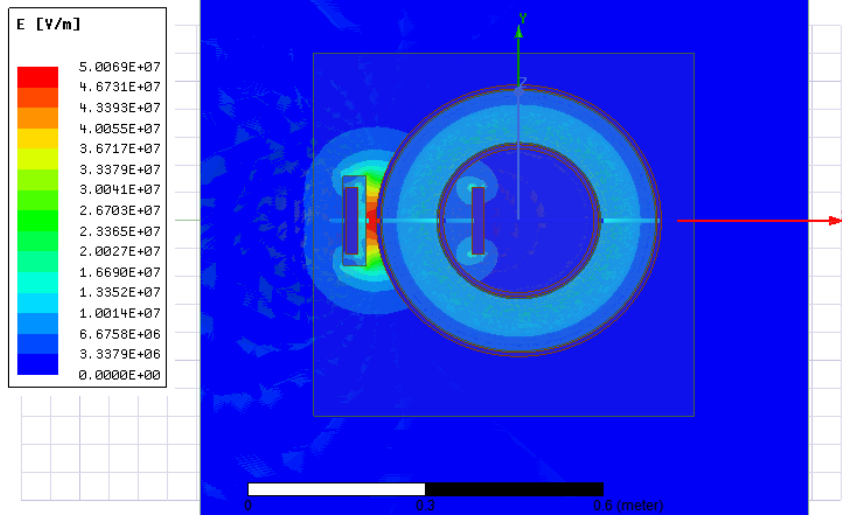
elektromanyetik kuvvetlerin sebep olduğu mekanik zorlanmaların yoğun olduğu bölgeler ve transformatördeki sorunlu alanlar belirlenmiştir.

Normal çalışma koşullarındaki bir gerilim transformatörünün yıldırım darbesine karşı tepkisini analiz etmek için bu test gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, ani gerilim dalgalanmalarında trafodaki elektrik alan dağılımını ve yalıtım malzemesindeki kuvvet etkilerini belirlemektir. Buna bağlı olarak trafoda meydana gelebilecek hasarı tasarım aşamasından önce belirlemektir. Yıldırım darbesini uygulamak için tasarlanan modelin AG sargılarına gerilim uyarması verilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yıldırım darbesini uygulamak için “SheetScan” yöntemi kullanılmıştır. Yeni bir koordinat sistemi ve eğri oluşturulmuştur. Analiz, 0-100 μ saniye aralığında birer mikro-saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yıldırım darbe geriliminin maksimum değeri 1 MV'dir. Aşağıda Şekil 5.65'de uygulanan yıldırım darbesinin gerilim uyarmasının transformatör üzerindeki dağılımı sunulmuştur.

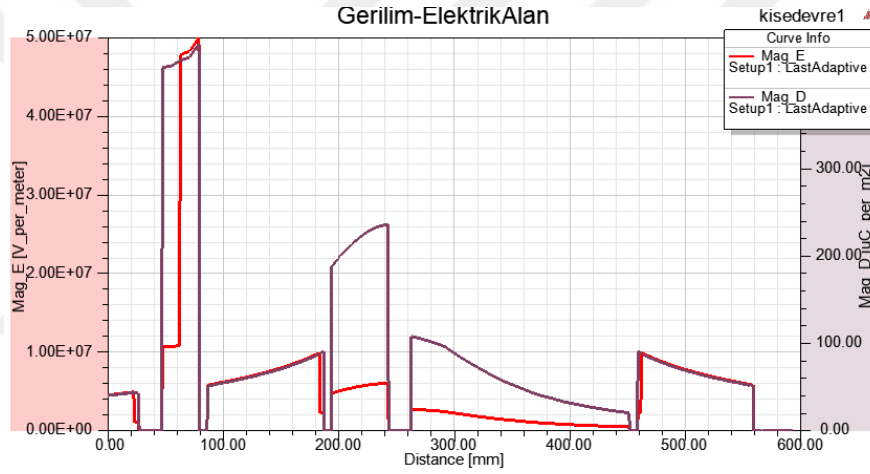


Şekil 5.65: Uygulanan gerilimin dağılımı.

Gerilim seviyesi 1 MV ve analiz süresi için 0-50 μ saniye aralığı için 1 μ saniyelik adımlar seçilmiştir. Test gerçekleştirildikten sonra trafoda meydana gelen elektrik alan ve gerilim-elektrik alan dağılımı Şekil 5.66'da ve Şekil 5.67'de sunulmuştur.



Şekil 5.66: 2D transformatör modelinin yıldırım darbesi için elektrik alanı



Şekil 5.67: Yıldırım darbesi durumunda gerilim-elektrik alan dağılımı

Tez çalışmasının bu kısmında akım transformatörünün elektrik alan analizleri ANSYS@MAXWELL ortamında 2D olarak gerçekleştirilmiştir. Termal alan analizleri için çoklu fizik analizlerini birlikte gerçekleştirebilen ANSYS@MAXWELL ve ANSYS@Mechanical birleştirilerek analiz gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan modelin geçici rejim çalışma koşullarındaki elektrik alan ve transformatörde meydana gelen kuvvet incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Normal çalışma koşullarında akım transformatörünün primer ve sekonder sargıları nominal akımları taşımaktadırlar. Yıldırım darbesi durumu analizi gerçekleştirilen akım transformatörünün elektrik alanı 5 V/m, maksimum alan şiddeti 7893 A/m ve sargılarda meydana gelen maksimum kuvvet 1.398 N olmuştur.

Geçici rejimlerde normal çalışma koşullarındaki akımın yaklaşık 20 katı büyüklüğünde bir akım ve büyük elektromanyetik kuvvetler meydana gelmektedir. Meydana gelen

elektromanyetik kuvvetler daha büyük elektrodinamik gerilimlere neden olabilir. Bu gerilimler akım trafosunda büyük tahribatlara sebebiyet verebilirler. Mekanik ve manyetik alan birleştirilmi kullanılarak, mekanik dayanaklılık bakımından AT'nin zayıf ve güçlü noktaları belirlenmiştir.

5.10.3 Gerilim transformatörlerinin analizi

Bu çalışmada SEY ile gerilim trafosu 3D olarak modellenmiştir. Gerilim transformatörünün manyetik ve termal analizlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@Maxwell programı kullanılmıştır. Trafonun analizleri, açık ve kısa devre koşullarında 3D olarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlardan gerilim trafonun nüvesinde dağılık elektromanyetik akı dağılımının meydana geldiği, bu durumun gerilim trafosunun hatalı çalıştığı ve koruma devrelerinde istenmeyen çalışma koşullarının oluştuğu görülmüştür.

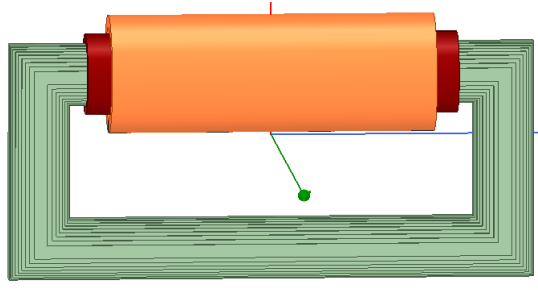
i. Gerilim transformatörünün modellenmesi

ANSYS@MAXWELL programının parametrik tasarım bölümü kullanılarak eletromanyetik ve termal analiz için gereken parametreler, modelin geometrik boyutları ve nominal değerler program ortamında tanımlanmıştır. Çizelge 5.18'de bu modelin nominal değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.18: Gerilim trafosunun tasarım parametreleri

Parametre	Değer
Dönüşüm oranı	10000/100
Nüve materyali	M125-027S
Primer gerilimi	380 kV
Sekonder gerilimi	3.8 kV
Anma frekans	50 Hz

Tasarlanan gerilim transformatörünün 3D modeli Şekil 5.68'de sunulmuştur.



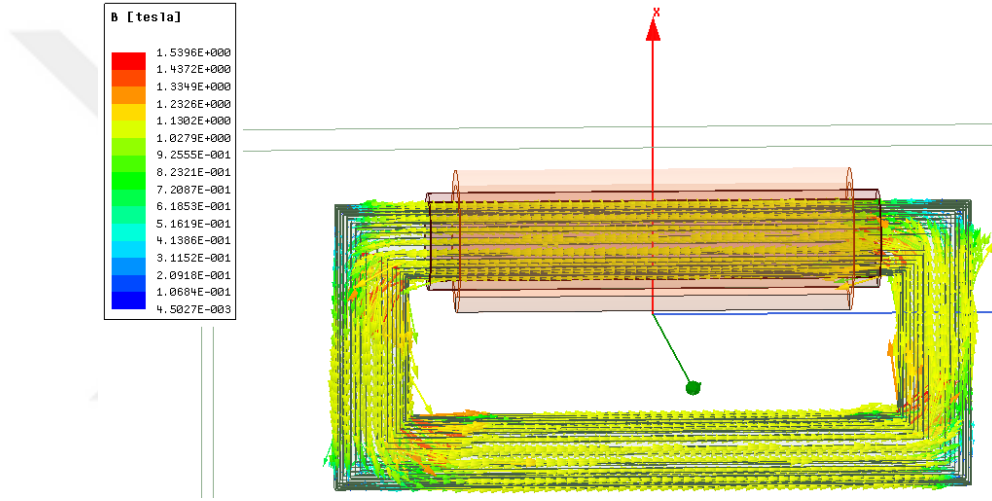
Şekil 5.71: Gerilim trafosunun geometrik modeli.

ii. Gerilim trafosunun modelinin simülasyonu ve analizi

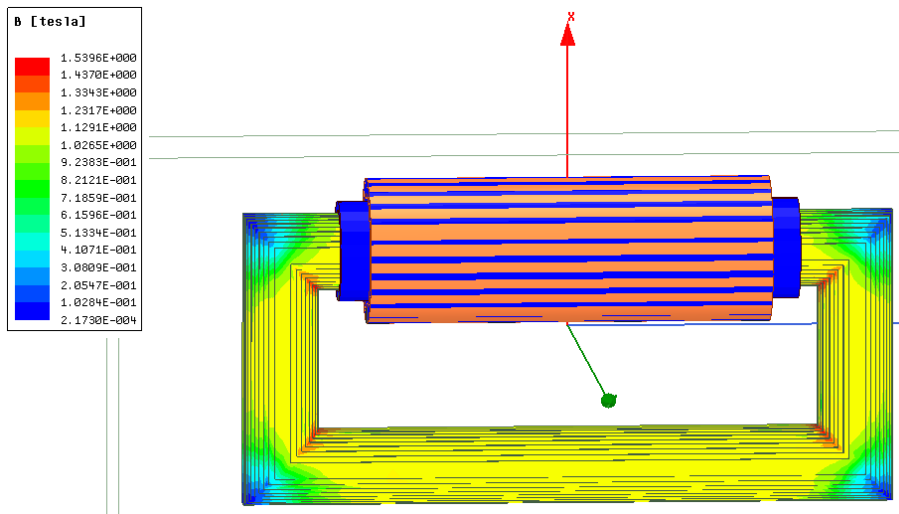
Çalışmanın bu bölümünde gerilim trafosunun kayıplarını, akı dağılımını, sıcaklık dağılımını ve manyetik alan yoğunluğunu analiz etmek için manyetik ve termal analizler gerçekleştirilmiştir.

iii. Açık Devre Durumundaki Manyetik Analiz

Nüvedeki akı yoğunluğu dağılımı saturasyon sebebiyle çok yüksek olmuştur. Nüvede oluşan manyetik akı yoğunluğunun maksimum değeri 1.53 T olarak belirlenmiştir. Açık devre durumundaki 3D modelin akı dağılımı ve akı yoğunluğu Şekil 5.69 ve 5.70’de verilmiştir.

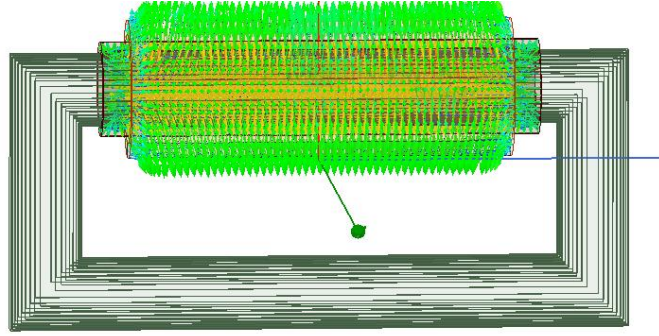


Şekil 5.69: Açık devre durumunda akının vektörel dağılımı

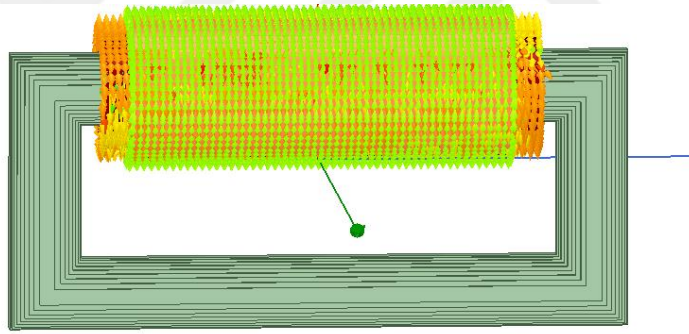


Şekil 5.70: Açık devre durumunda akı yoğunluğu dağılımı

Açık devre çalışma koşullarındaki modelin akım yoğunluğu aşağıda Şekil 5.72’te verilmiştir. 3D modelin açık devre durumunda manyetik alan analizinden elde edilen elektromanyetik kuvvetlerin dağılımı Şekil 5.71’te verilmiştir. En fazla elektromanyetik kuvvet primer sargı etrafında meydana gelmiştir.



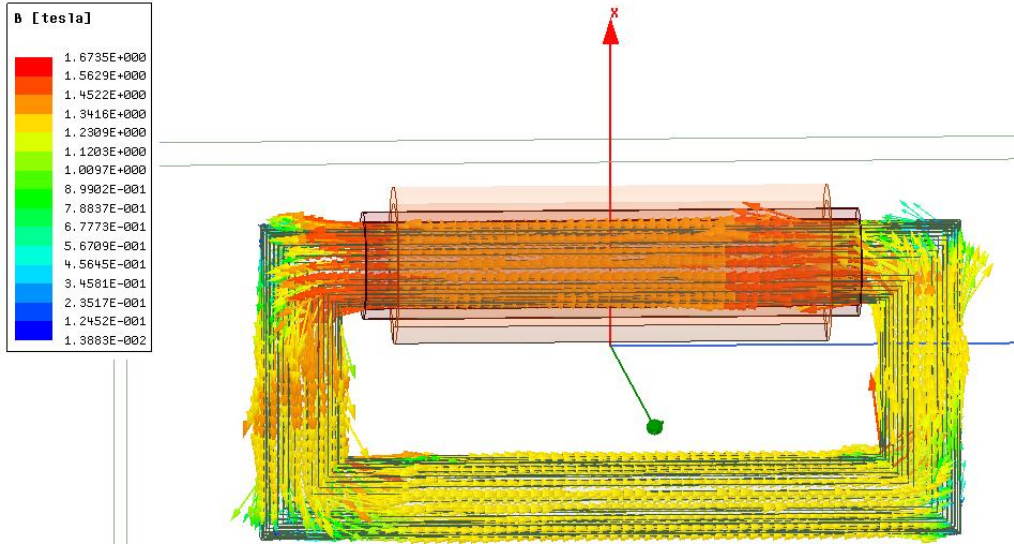
Şekil 5.71: Açık devre durumunda elektromanyetik kuvvet dağılımı



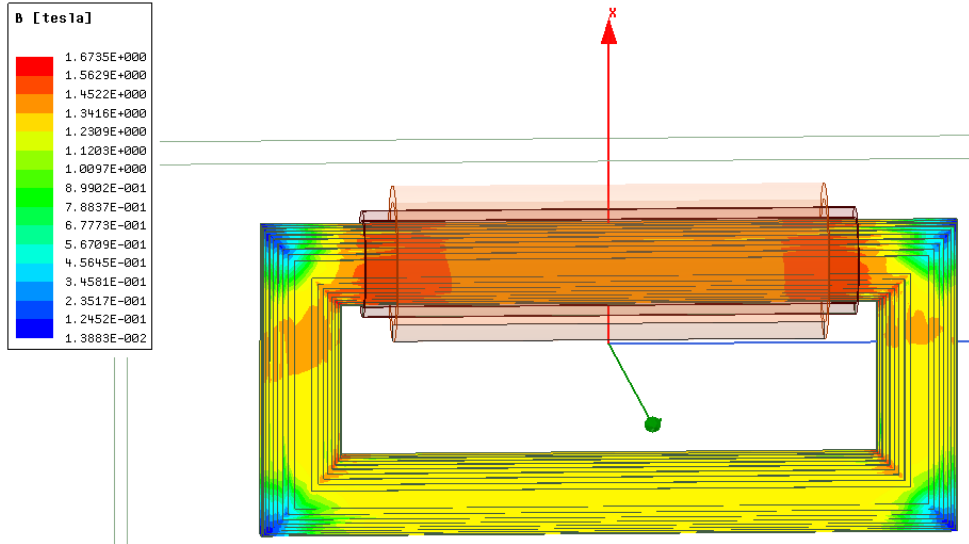
Şekil 5.72: Açık devre durumunda akım yoğunluğu dağılımı

iv. Kısa Devre Durumundaki Manyetik Analiz

Bu analiz için gerilim transformatörünün kısa devre durumundaki çalışması incelenmiş ve transformatörün bu şartlar altındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Kısa devre durumunda gerilim trafosu normal şartlarda olmadığı için farklı gerilimlerden etkilenebilmektedir. Gerilim trafosunu etkileyen bu gerilimler doğru bir biçimde analiz edilmelidir. Kısa devre akımı, sistemin kısa devre seviyesine göre nominal değerinin çok çok üstüne çıkabilmektedir. Şekil 5.73 ve 5.74’de modelin kısa devre durumundaki akı dağılımı ve akı yoğunluğu verilmiştir. Maksimum akı değeri yaklaşık 1.67 T olarak belirlenmiştir.

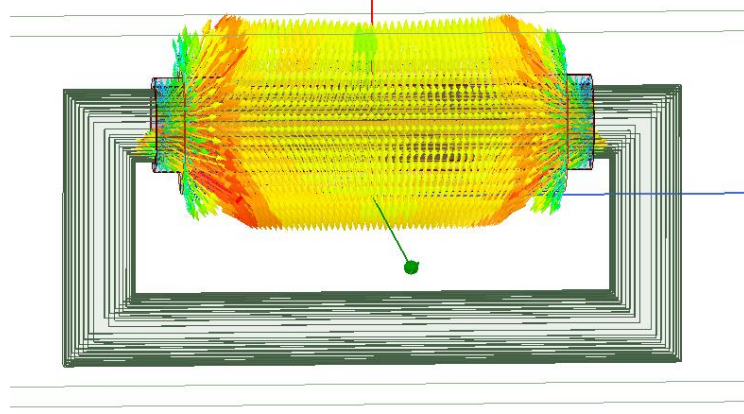


Şekil 5.73: Kısa devre koşullarında akının vektörel dağılımı.

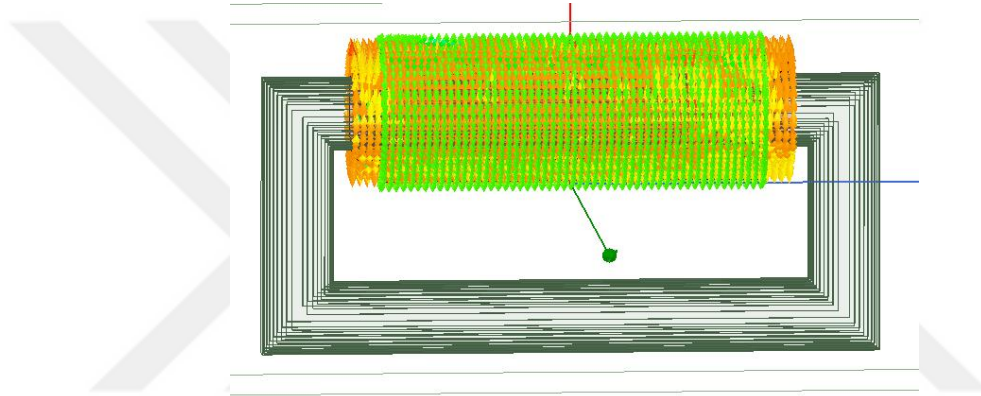


Şekil 5.74: Kısa devre koşullarında 2D modelin akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 5.75'de görüldüğü üzere, tasarlanan 3D modelin elektromanyetik kuvvetlerinin dağılımı, primer sargı etrafında maksimum değere ulaşmıştır. Bu şartlarda bu kuvvetler çok yüksektir ve üretilen elektrodinamik ve mekanik gerilimler nedeniyle gerilim trafosunu tahrip edebilir.



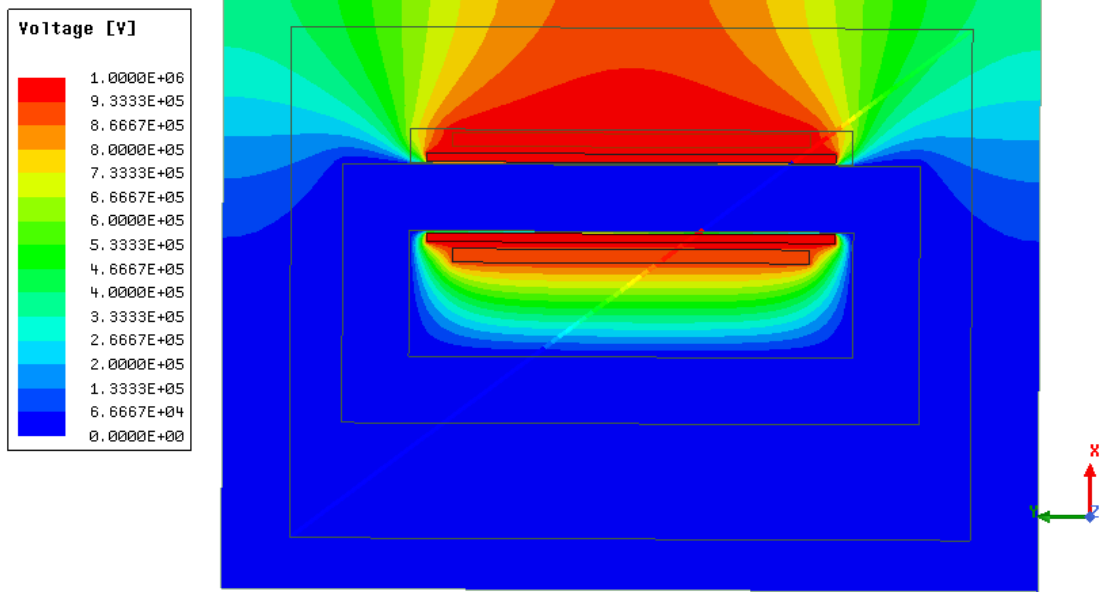
Şekil 5.75: Kısa devre durumunda elektromanyetik kuvvet dağılımı



Şekil 5.76 Kısa devre durumunda akı şiddeti dağılımı

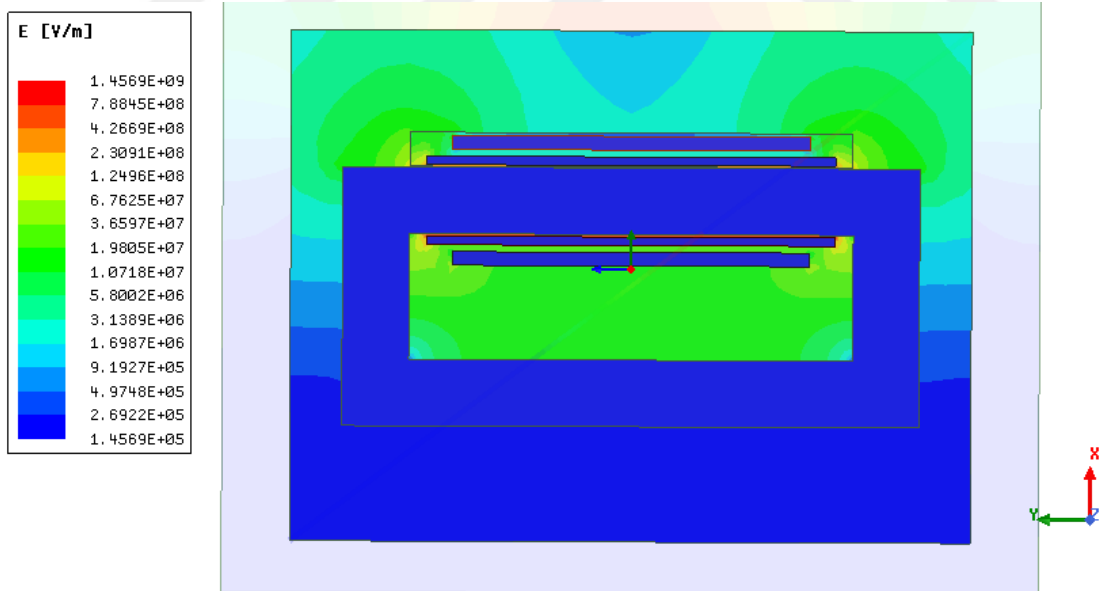
5.10.4 Gerilim transformatörünün yıldırım darbesi analizi

Normal çalışma koşullarındaki bir gerilim transformatörünün yıldırım darbesine karşı tepkisini analiz etmek için bu test gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, ani gerilim yükselmelerinde trafodaki elektrik alan dağılımını ve sargılardaki kuvvet etkilerini belirlemektir. Buna bağlı olarak trafoda meydana gelebilecek hasarı tasarım aşamasından önce belirlemektir. Yıldırım darbesini uygulamak için tasarlanan modelin AG sargılarına gerilim uyarması verilerek simülasyon gerçekleştirilmiştir. Analiz, 0-100 μ saniye aralığında birer mikro-saniyelik aralıklarla gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yıldırım darbe geriliminin maksimum değeri 1 MV'dir. Şekil 5.77'de, uygulanan yıldırım darbe geriliminin trafodaki dağılımı ve değeri sunulmuştur.

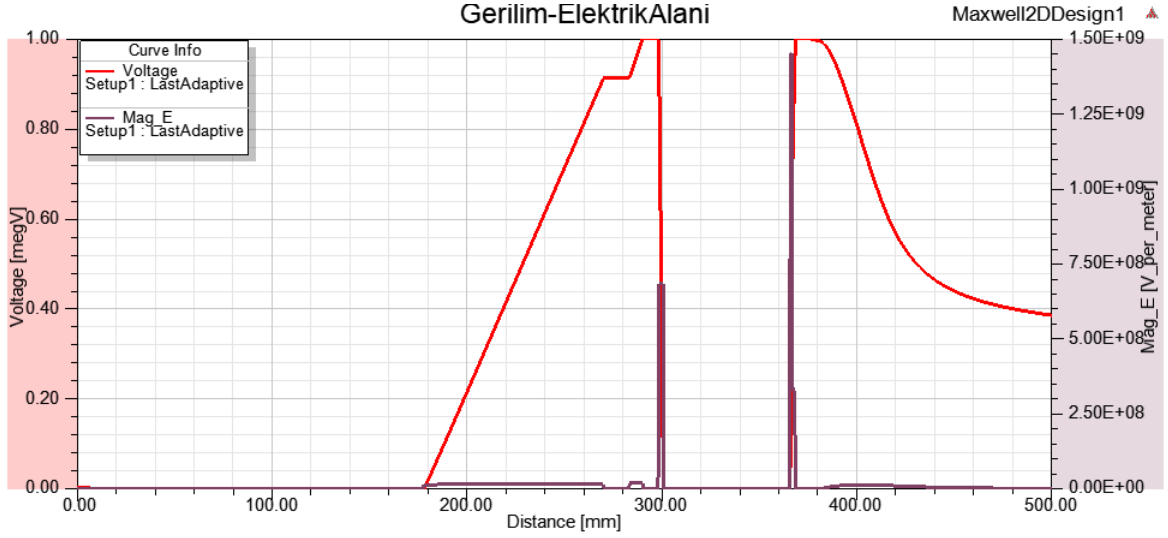


Şekil 5.77: Uygulanan gerilimin dağılımı.

Gerilim seviyesi 1 MV ve analiz süresi için 0-100 μ saniye aralığı için 1 μ saniyelik adımlar seçilmiştir. Test gerçekleştirildikten sonra trafoda meydana gelen elektrik alan dağılımı ve elektrik alanının gerilim değerine bağlı olarak değişimi Şekil 5.78’de ve Şekil 5.79’da sunulmuştur.



Şekil 5.78: 2D transformatör modelinin yıldırım darbesi için elektrik alan dağılımı



Şekil 5.79: Yıldırım darbesi durumunda gerilim-elektrik alan ilişkisi

Tezin bu bölümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) dayanarak çözüm gerçekletiren ANSYS@Maxwell-2D ile gerilim trafosunun elektrik alan, elektromanyetik alan, termal alan, elektromanyetik kuvvet ve yıldırım darbe analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal alan analizleri için çoklu fizik analizlerini birlikte gerçekleştirebilen ANSYS@Maxwell ve ANSYS@Mecanical birleştirilerek kullanılmıştır.

Normal şartlarda gerilim trafosunun primer ve sekonder sargıları nominal gerilimleri taşımaktadır.

- B=1.53 T
- H=7903 A/m
- Meydana gelen elektromanyetik kuvvetin maksimum değeri 1.401 N olmuştur.

Kısa devre durumunda, büyük elektromanyetik kuvvetler meydana gelmektedir. Bu büyük elektromanyetik kuvvetler daha büyük elektrodinamik gerilimler meydana getirebilirler ve ölçü trafolarına ciddi zararlar verebilirler. Birleştirilmiş manyetik ve mekanik alan kullanılarak, mekanik dayanıklılık bakımından gerilim trafosunun zayıf ve güçlü noktaları belirlenmiştir.

Gerilim trafosu geçici rejim olayındaki elektrik alan ve sargılardaki kuvvet değerleri aşağıda verilmiştir.

- Elektrik alan $1.45 \cdot 10^5$ V/m
- Maksimum elektromanyetik kuvvet 3411 N

Geçici rejim çalışma koşulunda nüvedeki manyetik akı yoğunluğu normal çalışma koşullarındaki akı yoğunluğundan çok daha büyük olmuştur ve nüve doyuma gitmiştir. Geçici rejim durumundaki akım normal çalışma şartlarındaki akımdan çok yüksek olmuştur. Oluşan bu yüksek akımda büyük elektromanyetik kuvvetler meydana getirmiştir. Meydana gelen bu büyük elektromanyetik kuvvetler daha büyük elektrodinamik gerilimler meydana getirebilirler ve ölçü trafolarına ciddi zararlar verebilirler. Birleştirilmiş manyetik ve mekanik alan kullanılarak, mekanik dayanıklılık bakımından gerilim trafosunun zayıf ve güçlü noktaları belirlenmiştir.



5.11 Güç Transformatörlerinin Nüve Boyutlarının Değiştirilerek Analizi

Çalışmanın bu bölümünde daha önce tasarlanan güç transformatörlerinin nüve kesitleri, bacak boyları ve nüvenin iki bacağının merkez noktaları arasındaki uzaklıklar değiştirilerek yeniden tasarlanan modellerin elektromanyetik alan ve kayıp analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada amaç, nüve boyutları değiştirilerek artan veya azalan nüve kütlelerinin manyetik akı dağılımı ve kayıplar üzerindeki etkisini incelemektir. Bunun için transformatörün açık devre durumundaki analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar teorik, deneysel ve transformatörlerin daha önceki bölümlerde gerçekleştirilmiş olan simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma için güç transformatörü yeniden boyutlandırılıp, modellenip analiz edilmiştir.

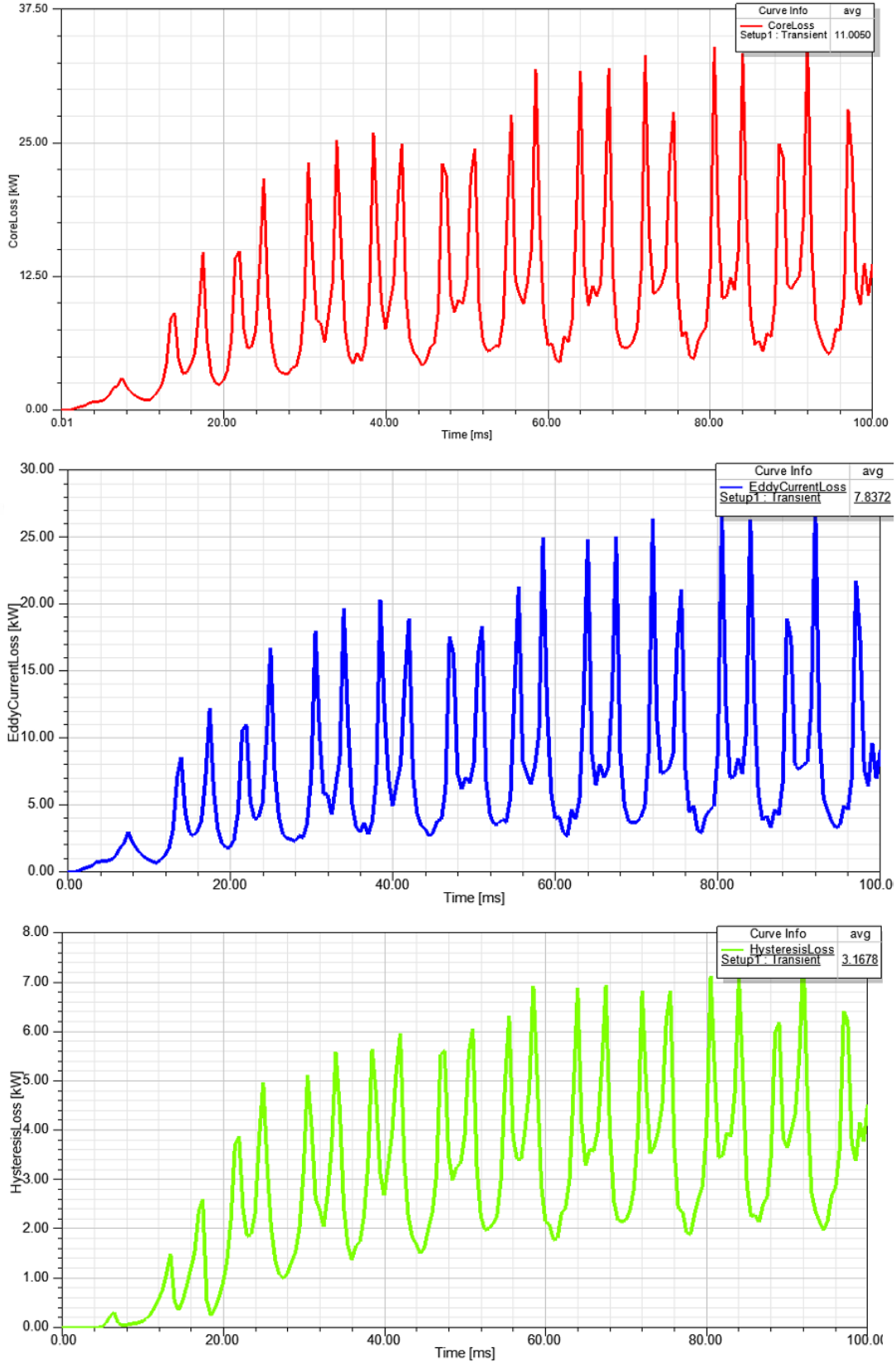
5.11.1 Nüve boyutları küçültülen transformatörlerin elektromanyetik ve kayıp analizleri

Bu analiz için transformatörlerin ebatları yeniden hesaplanmış ve transformatörün tasarımını ve geometrisini bozmayacak şekilde nüvenin kesiti, iki bacak arası mesafe ve bacak yüksekliği belli oranlarda küçültülmüştür. Eski tasarım verileri ile yeni tasarım verileri Çizelge 5.19’da verilmiştir.

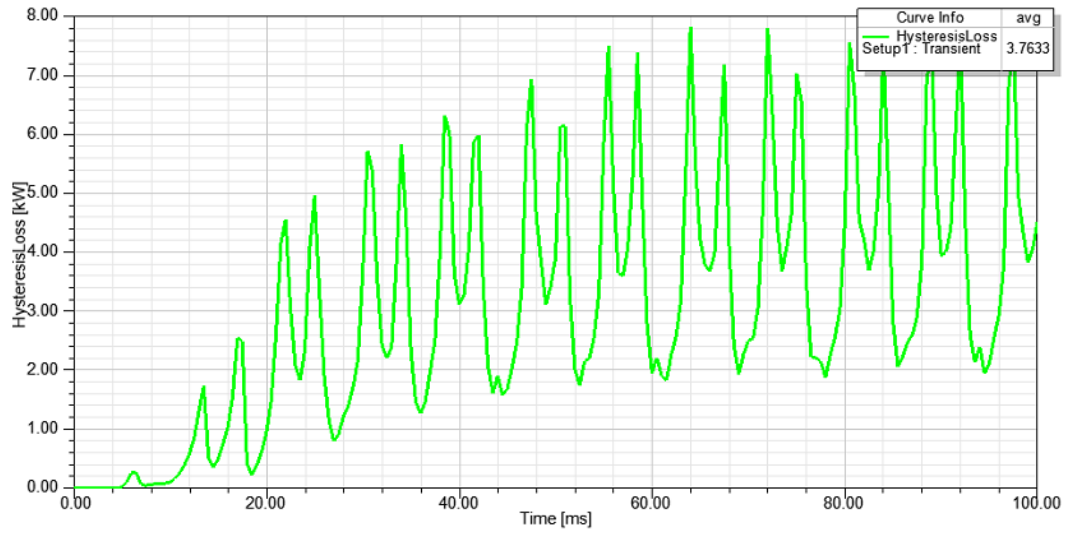
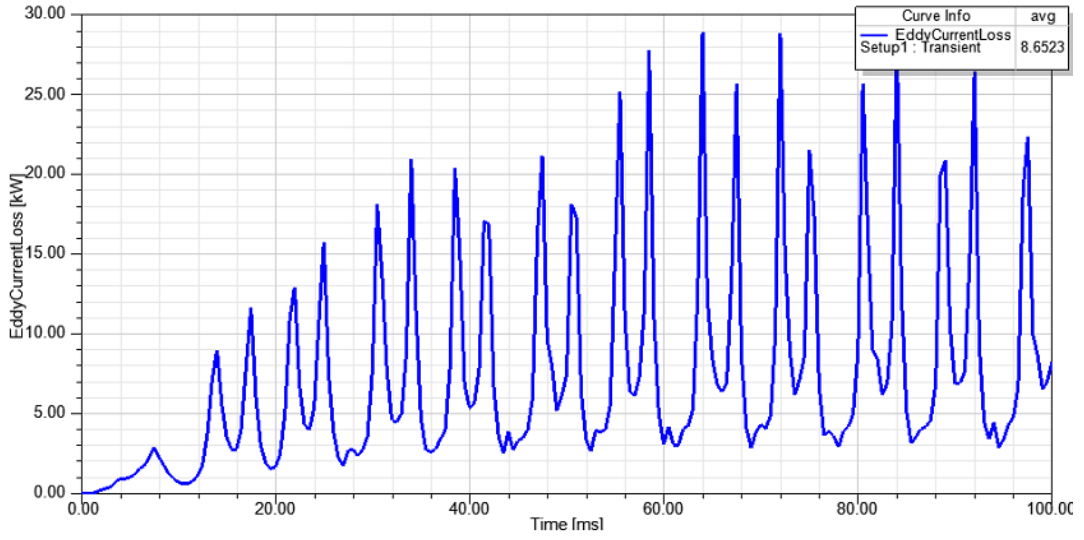
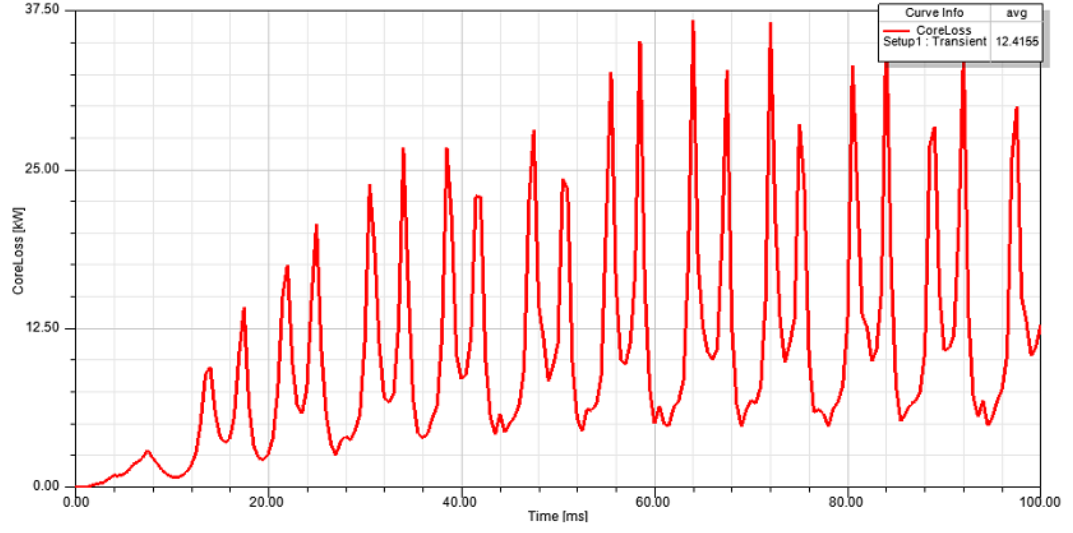
Çizelge 5.19: Trafoya ait tasarım verileri

Parametre	Eski Değer	Yeni Değer
Görünür Güç	15 MVA	15 MVA
Frekans	50 Hz	50 Hz
YG	33.000 V	33.000 V
AG	11.000 V	11.000 V
Nüve Kesiti	624 mm	576 mm
İki Bacağın Merkezleri arası Uzaklık	1185 mm	1109 mm
Bacak Yüksekliği	1800 mm	1638 mm

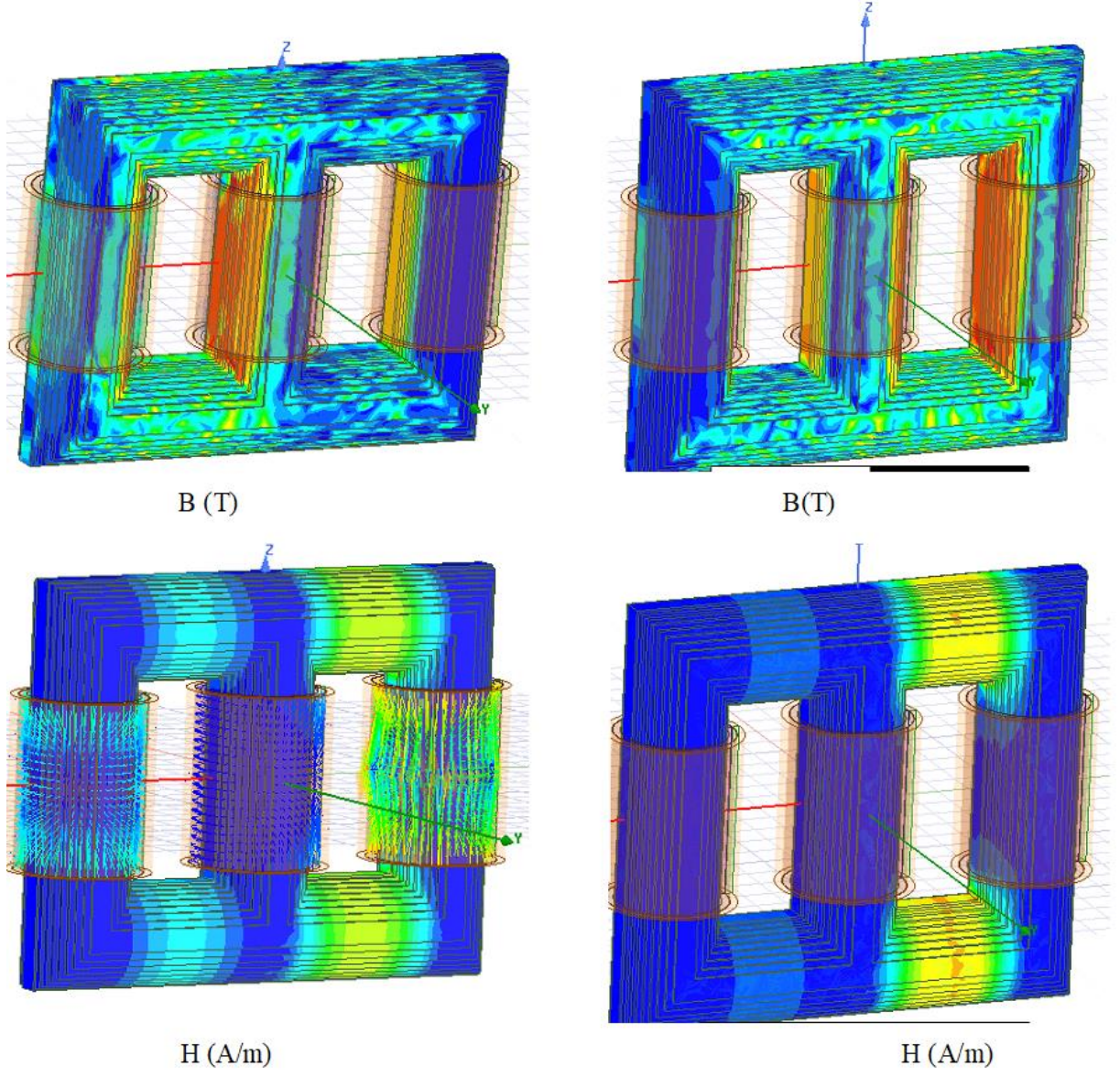
Yeni boyutları yukarıda verilen 15 MVA nominal güç değerine sahip transformatörün elektromanyetik alan ve kayıp yönünden analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar transformatörün önceki analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elektromanyetik alan dağılımları ve kayıp eğrileri Şekil 5.80-5.82’de sunulmuştur.



Şekil 5. 80: Nüve boyutlarının küçültülmesi ile elde edilen kayıp eğrileri



Şekil 5. 81: Nüve boyutları değiştirilmeden önce elde edilen kayıp eğrileri



Nüve boyutu değiştirildikten sonraki manyetik akı dağılımı ve alan yoğunluğu

Normal şartlardaki akı dağılımı ve alan yoğunluğu

Şekil 5.82: Nüve boyutlarının küçültülmesiyle elektromanyetik alan dağılımları

Nüve boyutları küçültülerek yeniden tasarlanan modelin analiz sonuçları daha önceki çalışmalarda elde edilen teorik, deneysel ve simülasyon sonuçları ile karşılatılmış ve Çizelge 5.20’de sunulmuştur.

Çizelge 5.20: Sonuçların Karşılaştırılması

Değişkenler	Deneysel Sonuçlar	Teorik Sonuçlar	Simülasyon Sonuçları	Nüve Boyutlarının Küçültülmesinin Sonuçları
Nüve Kaybı (kW)	12.5	12.36	12.41	11.01
Girdap akım Kaybı (kW)	8.71	8.68	8.65	7.83
Histeresiz Kaybı (kW)	3.79	3.68	3.76	3.17
Manyetik Akı (T)	1.82	1.87	1.84	1.81

Nüve kayıpları ANSYS@MAXWELL ortamında W/kg olarak hesaplanmaktadır. Nüve boyutlarının küçültülmesi ile yeniden modellenen transformatörün analizinden elde edilen elektromanyetik alan dağılımı ve kayıp eğrileri yukraki şekillerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yeniden boyutlandırma ile transformatörün nüve kayıpları düşmüştür. Nüve malzemesi değiştirilmediği için manyetik akı dağılımında ve alan yoğunluğunda kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Nüve boyutlarının küçültülmesi ile kayıplar ve nüve malzeme miktarı azalmıştır. Fakat, sargı yapıları değiştirilmediğinden nüve boyutlarının küçültülmesi transformatörde mekanik dayanım bakımından bir zayıflık meydana getirebilir.

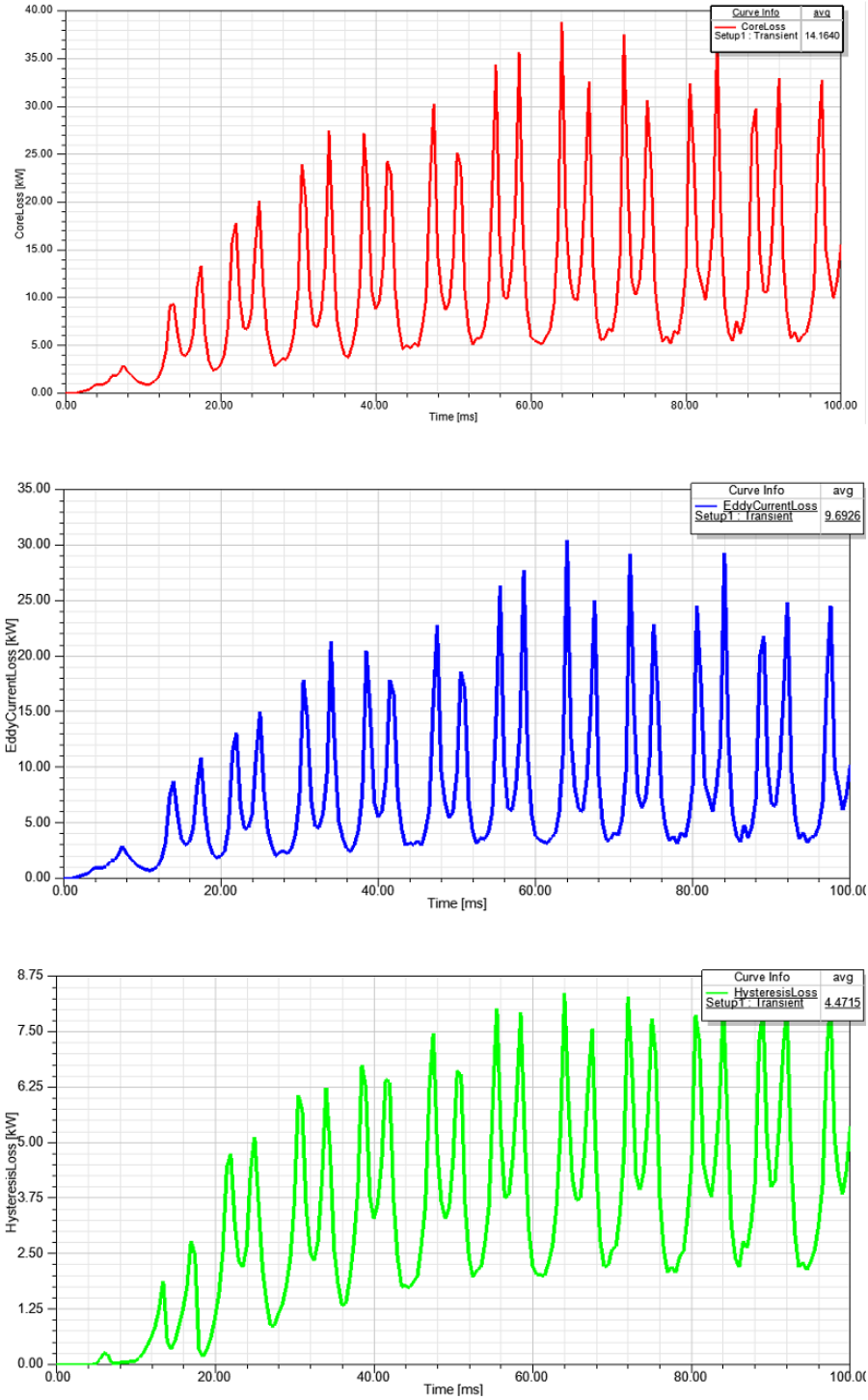
5.11.1 Nüve boyutları arttırılan transformatörlerin elektromanyetik ve kayıp analizleri

Bu analiz için transformatörlerin ebatları yeniden hesaplanmış ve transformatörün tasarımını ve geometrisini bozmayacak şekilde nüvenin kesiti, iki bacak arası mesafe ve bacak yüksekliği belli oranlarda büyütülmüştür. Eski tasarım verileri ile yeni tasarım verileri Çizelge 5.21’de verilmiştir.

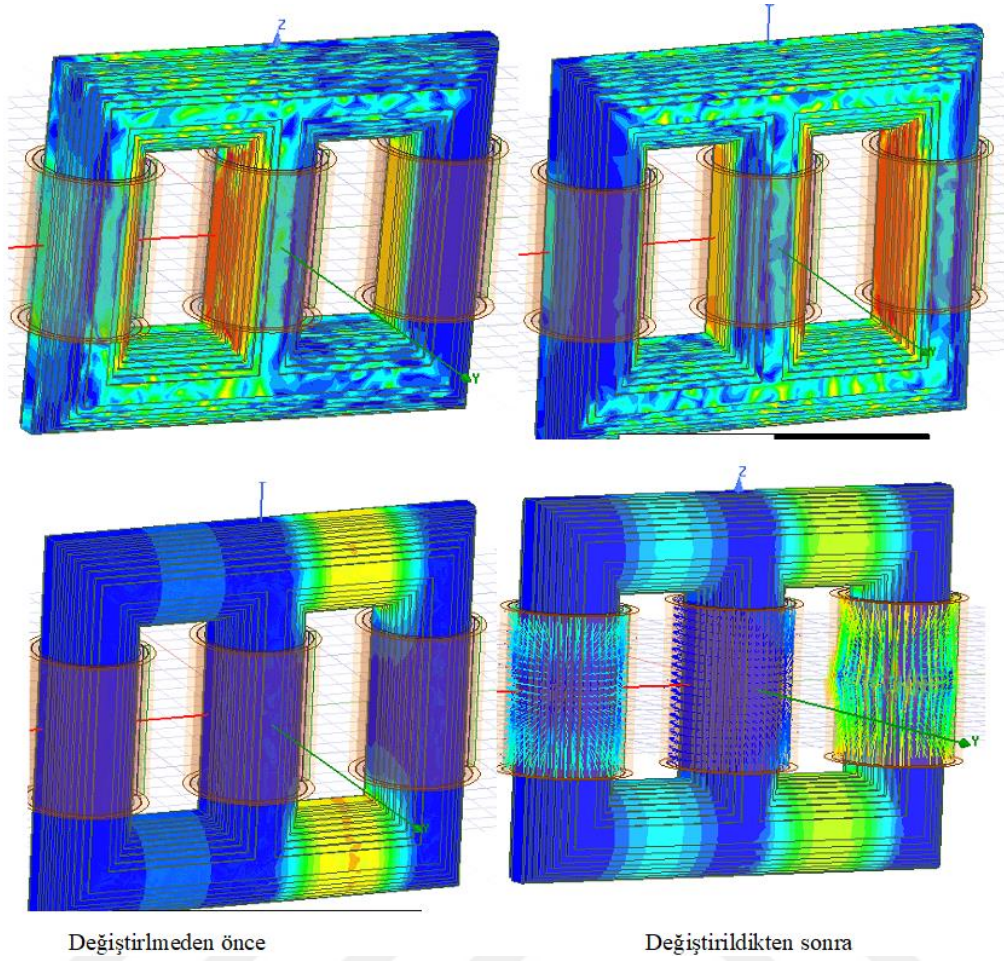
Çizelge 5.21: Trafoya ait tasarım verileri

Parametre	Eski Değer	Yeni Değer
Görünür Güç	15 MVA	15 MVA
YG	33.000 V	33.000 V
AG	11.000 V	11.000 V
Nüve Kesiti	624 mm	651 mm
İki Bacağın Merkezleri arası Uzaklık	1185 mm	1243 mm
Bacak Yüksekliği	1800 mm	1902 mm

Yeni boyutları yukarıda verilen 15 MVA nominal güç değerine sahip transformatörün elektromanyetik alan ve kayıp yönünden analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar transformatörün önceki analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Elektromanyetik alan dağılımları ve kayıp eğrileri Şekil 5.83 ve 5.84'te sunulmuştur.



Şekil 5.83: Nüve boyutlarının artırılmasıyla elde edilen kayıp eğrileri



Şekil 5.84: Nüve boyutlarının büyütülmesi ile elde edilen elektromanyetik alan dağılımları

Nüve boyutları büyütülerek yeniden tasarlanan modelin analiz sonuçları daha önceki çalışmalarda elde edilen teorik, deneysel ve simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmış ve Çizelge 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5.22: Sonuçların Karşılaştırılması

Değişkenler	Deneysel Sonuçlar	Teorik Sonuçlar	Normal Simülasyon Sonuçları	Nüve Boyutlarının arttırılmasının Sonuçları
Nüve Kaybı (kW)	12.5	12.36	12.41	14.15
Girdap akım Kaybı (kW)	8.71	8.68	8.65	9.69
Histeresiz Kaybı (kW)	3.79	3.68	3.76	4.47
Manyetik Akı (T)	1.82	1.87	1.79	1.86

Nüve kayıpları ANSYS@MAXWELL ortamında W/kg olarak hesaplanmaktadır. Nüve boyutlarının büyütülmesi ile yeniden modellenen transformatörün analizinden elde edilen elektromanyetik alan dağılımı ve kayıp eğrileri yukarıdaki şekillerde karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Yeniden boyutlandırma ile transformatörün nüve kayıpları artmıştır. Nüve malzemesi değiştirilmediği için manyetik akı dağılımında ve alan yoğunluğunda kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Nüve boyutlarının büyütülmesi mekanik dayanımı arttırmıştır. Fakat bu durum, kayıpların ve nüve malzeme miktarının artmasına da neden olmuştur.

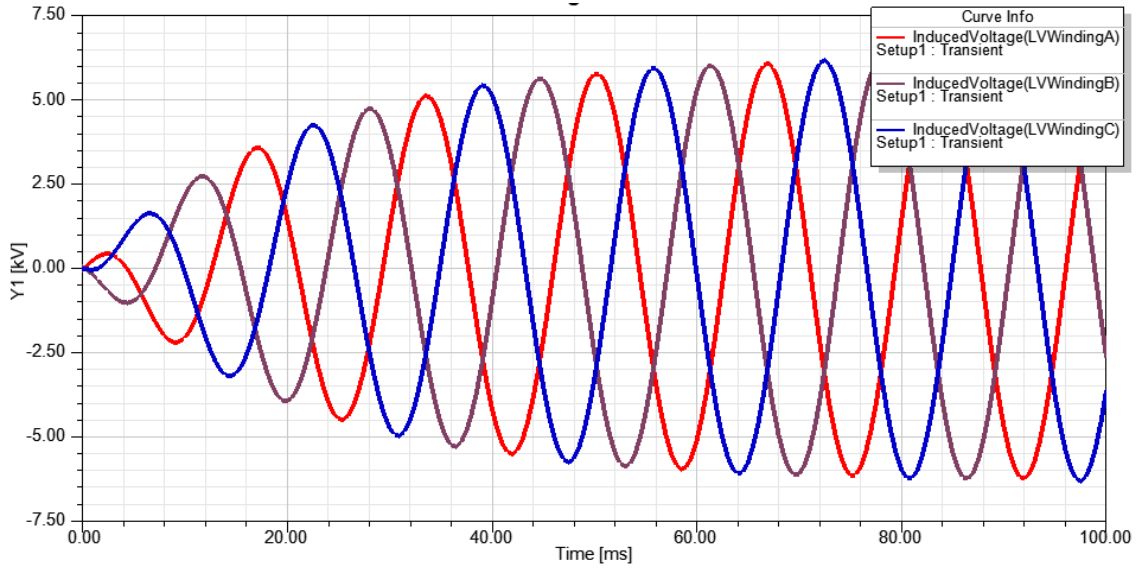
5.12 Farklı Frekans Değerleri İçin Transformatörün Analizi

Bu çalışmada, güç transformatörünün nüve kaybının ve manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması için transformatörün 3D simülasyon modeli incelenmiştir. 50 Hz ve 60 Hz frekansta akı yoğunluğu dağılımı ve nüve kayıpları hesaplanmış, sonuçlar farklı zaman aşamaları için sunulmuştur.

Akı yoğunluğu farklı zaman aralıklarında hesaplanmaktadır. Akı yoğunluğu bilgisi, nüvenin doyma noktasına yakın kısımlarının belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Akı yoğunluğu bilgisine bağlı olarak nüvenin doyma karakteristiği, karakteristiğe bağlı olarak nüvedeki kayıplar belirlenmekte ve bunları optimize etmek için trafo tasarımında değişiklik yapılabilmektedir.

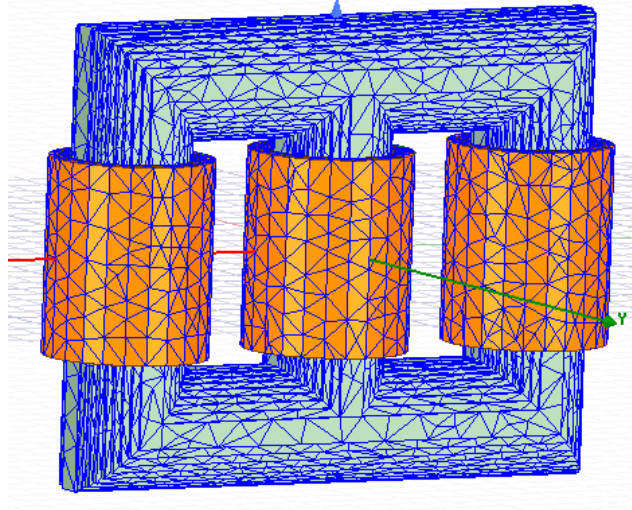
Genel olarak, nüve kaybı (P_c) iki bileşene ayrılmaktadır. Bunlar histerezis kayıpları (P_h) ve eddy akım kayıpları (P_e). Steinmetz denklemine göre, nüve kayıplarının ölçümü ve hesaplanması normal olarak değişen Mag-B ve frekansın sinüzoidal akı yoğunluğu ile yapılır.

Bu durumda transformatör modellerindeki nüve kayıpları, 50 Hz veya 60 Hz (P-B eğrisi) gibi bir spesifik frekans için toplam kayıp olarak tanımlanır. Trafo modelinin tasarımına 60 Hz başlangıç frekansı ile başlandığında ve model frekansı 50 Hz olarak değiştirildiğinde hem giriş fazı geriliminin genliği 5/6 oranında azalır hem de transformatörün çarpanı azalır. Bu durum, transformatörün çalışma frekansı 60 Hz'den 50 Hz'e değiştirildiğinde transformatörün aşırı ısınmasını önler. Çünkü frekans değiştirildiğinde sargılardan geçen akımlar değişmez. Her iki çalışma frekansında da güç kayıpları hesaplanır. Burada ani akımları elimine etmek ve simülasyon süresini kısaltmak için Şekil 5.85'de verildiği gibi üssel olarak artan bir gerilim kaynağı uygulanır.



Şekil 5.85: Giriş gerilimi

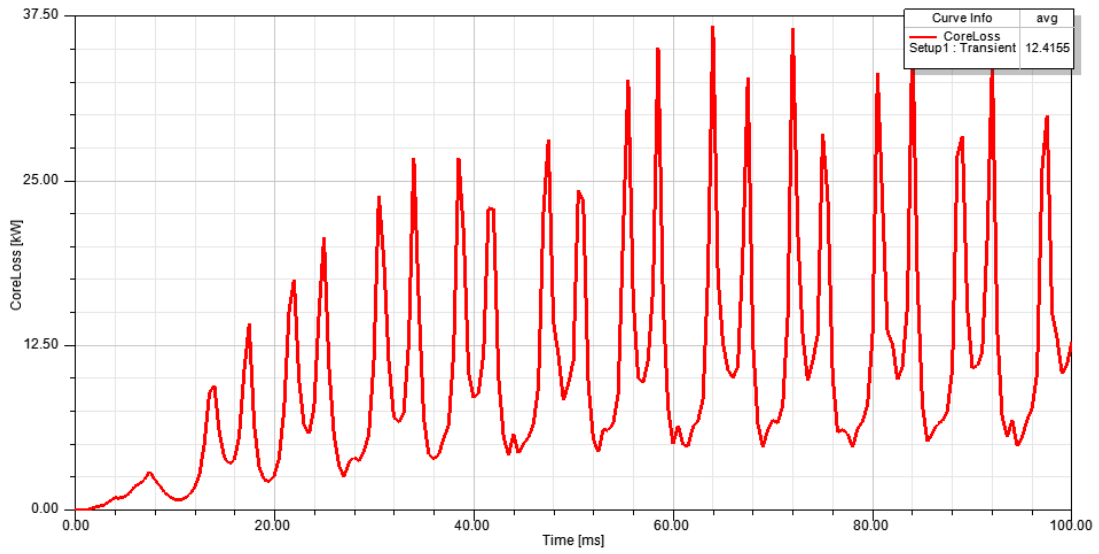
Manyetik akı yoğunluğu B'nin hesaplanması için manyetik vektör potansiyeli A bulunmalıdır. Bu amaçla, tüm model geometrisi, A'nın basit bir işlevle yaklaşık olarak eşleştirildiği, genellikle üçgenler olmak üzere birçok öğeye ayrılır. Modelin ağ şeması Şekil 5.86'da verilmiştir.



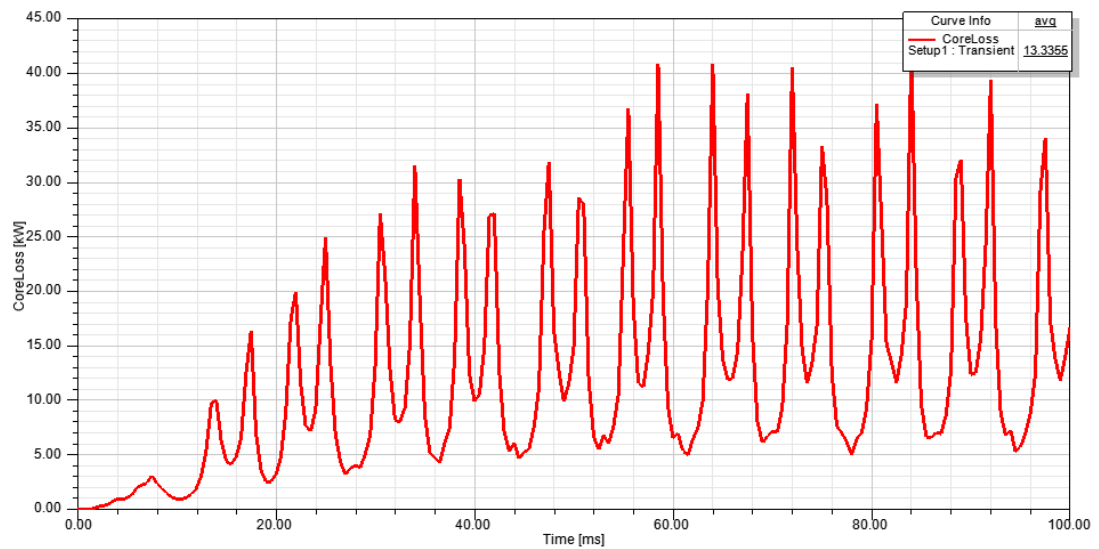
Şekil 5.86: 3D modelde mesh

5.12.1 Kayıpların analizi

Transient simülasyonda önceden tanımlanmış zaman aralığı ve zaman adımı için analiz gerçekleştirilir. 3D modelin simülasyonundan 50 Hz ve 60 Hz'lik iki farklı frekans için nüve kayıpları ve manyetik akı dağılımı elde edilmiştir. Nüve kayıpları, verilen zaman aralığında elde edilen toplam kayıpların zamana göre ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Belirtilen değişkenlere bağlı olarak elde edilen nüve kayıp eğrileri Şekil 5.87 ve Şekil 5.88'de sunulmuştur.



Şekil 5.87: 3D modelin 50 Hz frekanstaki nüve kaybı



Şekil 5.88: 3D modelin 60 Hz frekanstaki nüve kaybı

Transformatörün farklı frekanslardaki kayıp değerleri, teorik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.23'te görülmektedir.

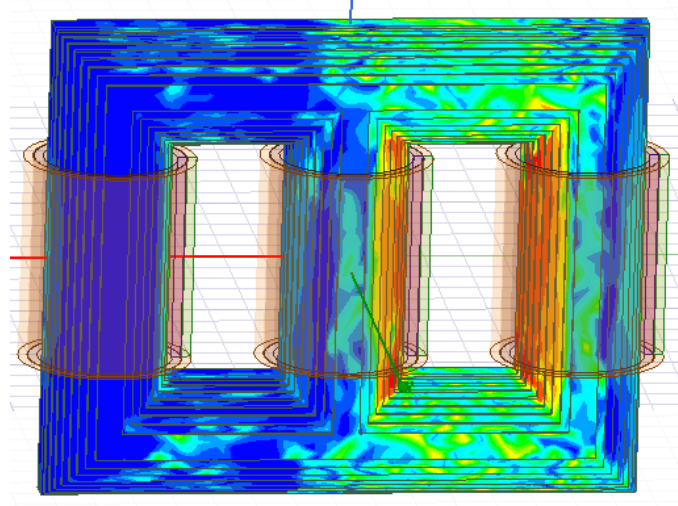
Çizelge 5.23: Farklı frekanstaki kayıp değerleri.

	Simülasyon sonuçları		Teorik Sonuçlar	Deneysel Sonuçlar
	50Hz	60Hz		
Nüve Kaybı(kW)	12.41	13.34	12.36	12.5

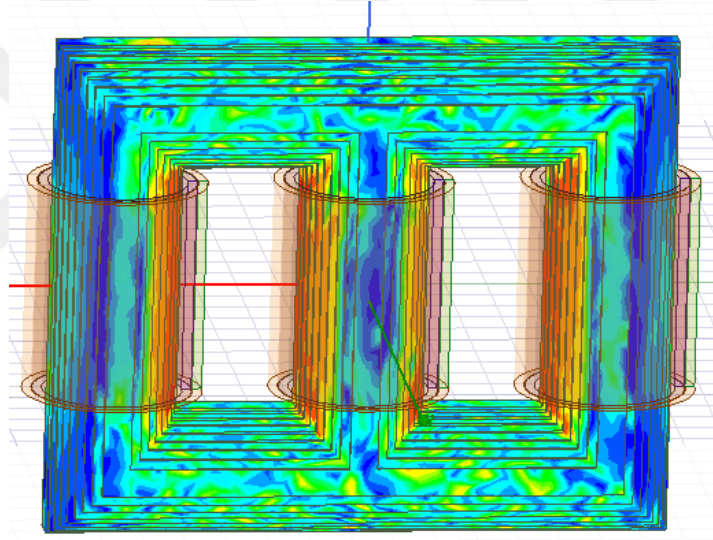
Çizelge 5.21'deki sonuçlar karşılaştırıldığında transformatörün 50 Hz ve 60 Hz nüve ve bakır kayıp değerleri arasında bir fark olduğu görülmektedir. 50 Hz'de test edilen nüve kayıpları 12.5 kW'dır. Tasarlanan model 50 Hz ve 60 Hz'lik frekansların her ikisi içinde simüle edilmiştir. Beklendiği gibi nüve kayıpları 50 Hz frekansında yaklaşık olarak 5/6 oranında daha düşük olmuştur. SEY modeli ile tüm fiziksel çekirdek kaybı etkileri hesaplanmaz. Hesaplanamayan etkiler, laminasyonlar üzerindeki mekanik baskı, kenar pürüz kaybı, kademeli boşluklu akı, sirkülasyon akımı ve tabaka kaybı gibi varyasyonları içerir.

5.12.2 Farklı frekanslardaki modellerin elektromanyetik alan analizleri

Ampirik formüllere dayanan manyetik akı yoğunluğunun hesaplanması, makinenin farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun sadece yaklaşık değerlerini verir. Makinenin farklı kısımlarındaki akı yoğunluğunun doğru tahmini için, nüve malzemesinin doyma noktasına (B-H) yakın olduğu transformatörün zayıf parça olarak adlandırılan kısımlarını doğru tahmin etmek tasarım sürecinde önemlidir. Transformatörün nüvesinin doyma noktasına yakın çalışması, kayıpları ve ısı yayılımını artırır, verimi düşürür. Bu nedenle, akı yoğunluğu, her iki frekans için farklı zaman aralıklarında analiz edilmiştir. Transformatörün 3D manyetik akı yoğunluğunu Şekil 5.89 ve Şekil 5.90'da sunulmuştur.



Şekil 5.89: 50 Hz'lik 3D transformatör modelinde akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 5.90: 60 Hz'lik 3D transformatör modelinde akı yoğunluğu dağılımı

Yukarıdaki şekillerde sunulan sonuçlardan, 50 Hz ve 60 Hz frekansta yüksüz çalışan transformatörün nüve enine kesitindeki akı yoğunluğu dağılımının doyma noktasını iyi bir şekilde belirlediği açıktır. Beklendiği gibi nüve kaybı 60 Hz'de çalışan modelde daha fazla meydana geldiği için akı yoğunluğu da 60 Hz frekansta 50 Hz frekanstan daha yüksek olmuştur. Tasarlanan model 50 Hz ve 60 Hz frekanslı güç kaynakları ile beslenmiştir. Düşük frekansta kayıpların düşmesi nedeniyle 50 Hz'de meydana gelen kayıplar 60 Hz'de meydana gelen kayıplara oranla daha düşük olmuştur.

5.13 Transformatörün Harmonik Analizleri

Güç transformatörleri genel olarak gerilim ve akımın sinüzoidal olduğu şartlarda kullanılmak üzere tasarlanırlar. Ancak, doğrusal olmayan yükler, gelişen teknoloji ile birlikte modern güç sistemlerinde giderek artmaktadır. Bu nedenle, hat gerilimleri ve akımları genellikle harmonik olarak bozuk veya sinüzoidal olmayan dalga şekillerine sahiptirler. Bu çalışmada gerilim uyarması ile transformatörün yüksüz kaybının çeşitli alt harmonik içerikli parametrik analizine odaklanılmıştır. Bu amaçla, transformatörün nüvesinin ve sargılarının Sonlu Eleman Yöntemi (SEY) tabanlı modellenmesi geliştirilmiştir. SEY'e dayanarak çözüm gerçekleştiren ANSYS@MAXWELL ile gerçekleştirilen analiz sonuçlarından, harmonik gerilimlerin transformatörün nüve kaybı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir. Ancak, harmonik gerilimlerin yüksüz durumda büyük ölçüde sargı kaybını arttırdığı da görülmüştür. Bu durum, güç transformatörlerinin kayıplarının hesaplanmasında harmoniklerin dikkate alınmasının gerekliliğinin önemini ortaya koymaktadır.

Transformatörler, AC güç şebekelerinde elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımının en önemli ekipmanlardan biridir. Elektrik mühendisliği literatüründe, nüve ve sargı kayıplarının ölçümü ve hesaplanması sinüzoidal gerilim ve doğrusal yük (sinüzoidal akım) koşulları için iyi bilinmektedir. Bir transformatörün yüksüz kaybı, bir yük sağlamadığı zaman çekirdeği ve enerjili sargısı tarafından tüketilen aktif güçlerin toplamıdır. Yüksüz kayıp, yüksüz durumda nominal frekansta sinüzoidal uyarma gerilimi altında sargı kaybının oldukça küçük olması nedeniyle pratik olarak çekirdek kayıp olarak kabul edilir. Ek olarak, bir güç transformatörünün sargı kaybı, nominal yükleme durumu için temel kayıptan önemli ölçüde daha büyük olduğundan, sargı kaybı genellikle yük kaybı olarak adlandırılır.

Bu çalışmada alt harmonikli besleme gerilimleri altında yüksüz durumunda güç transformatörlerinin uyarma akımları, sargı kaybı ve çekirdek kaybı üzerindeki parametrik analiz sonuçları sunulmuştur. SEY'e dayanan ANSYS@MAXWELL analiz yazılımı, yukarıda belirtilen harmonik-alan eşdeğeri elektrik devresine ve gerilimin alt harmoniklerine bağlı çekirdek kaybına dahil edilen harmonik mıknatıslanma akımlarını belirlemek için kullanılmıştır.

5.13.1 Transformatörün modellenmesi ve analizi

Analiz için, yüksüz ve kısa devre testlerinden elde edilen nüve ve bakır kayıpları sırasıyla 12.5 kW ve 97 kW olarak ölçülen 15 MVA, 33 kV/11 kV üç fazlı güç transformatörü örnek

analiz için dikkate alınmıştır. Bu modele ait özellikler Çizelge 5.6'da verilmiştir. Transformatörlerin yüksüz kayıp analizi için, Maxwell ortamında tasarlanan transformatörün SEY modeli yeterlidir. Nüve malzemenin manyetik akı yoğunluğu-manyetik alan kuvveti (BH) ve kayıp manyetik akı yoğunluğu (PB) eğrileri program ortamında tanımlanmıştır. Burada, sarım sayısı, sargılardaki akım yoğunluğu ve sızıntı akısının bir fonksiyonu olan sargı kaçak endüktanslarını hesapladığı için üç sargının kaçak endüktans değerinin yazılıma girilmesine gerek yoktur. İncelenen transformatörün ana malzemesinin (M125-027S) B-H ve P-B eğrileri daha önceki bölümlerde verilmiştir.

Modellenmiş transformatörün sargı ve nüve kayıpları bir alt harmonik ile üst üste getirilen birincil faz-nötr anma sinüzoidal gerilimleri altında yüksüz durum için analiz edilir. Verilen uyarma gerilimleri aşağıda verilmiştir.

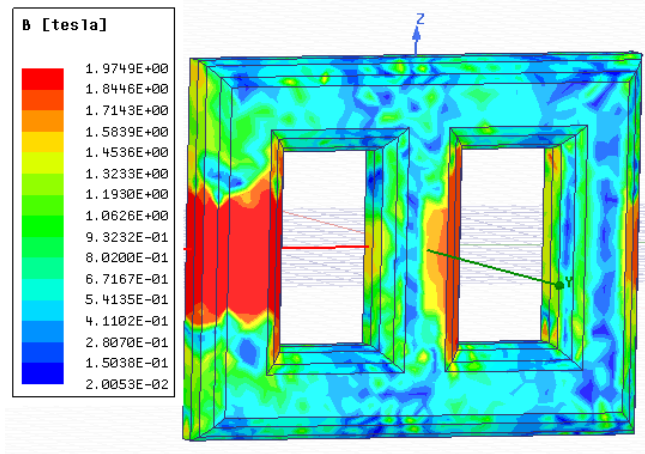
$$V_a = \sqrt{2}V_s \cos(2\pi f_s t) + \sqrt{2}/2 V_R \cos(100\pi t) \quad (5.18)$$

$$V_b = \sqrt{2}V_s \cos\left(2\pi f_s t + \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}V_R \cos\left(100\pi t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.19)$$

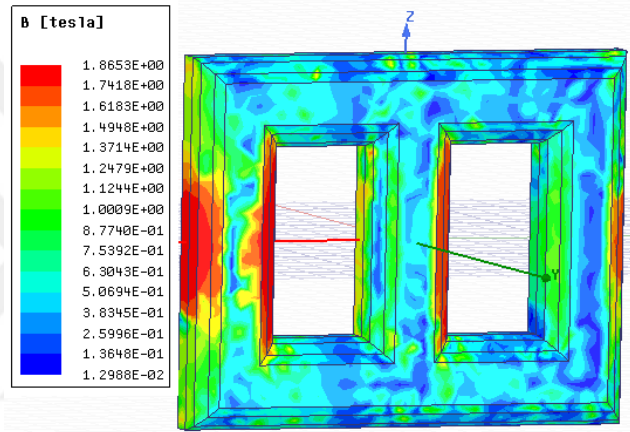
$$V_c = \sqrt{2}V_s \cos\left(2\pi f_s t - \frac{2\pi}{3}\right) + \sqrt{2}V_R \cos\left(100\pi t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5.20)$$

Burada, V_R temel bileşen, yani incelenen transformatörün faz-nötr geriliminin nominal değeridir. V_s harmonikli gerilimin rms değeri, f_s harmonik frekansıdır. Burada üçüncü, beşinci ve yedinci harmonikler incelenmiştir.

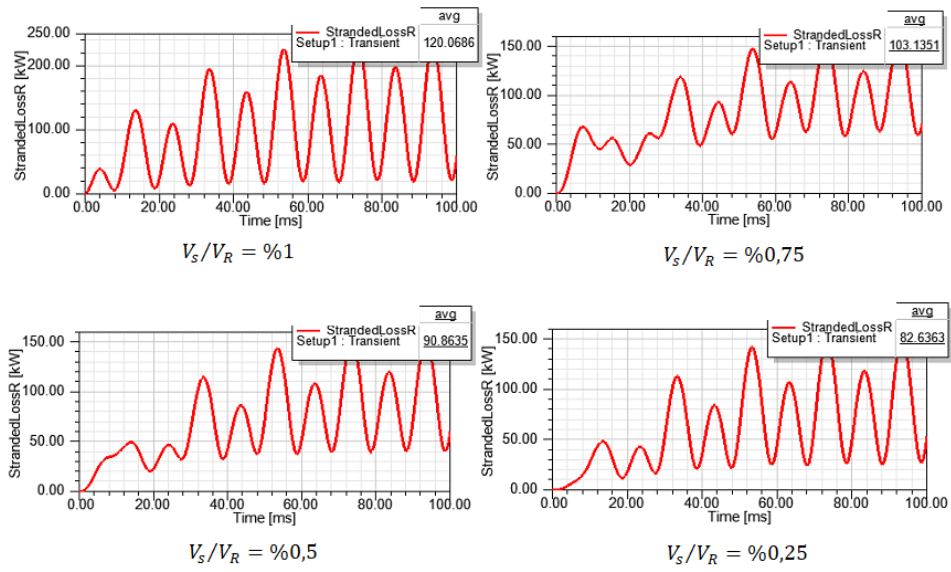
Bu analiz için V_s/V_R oranı %0.25 ile %1 arasında değiştirilmektedir. $V_s/V_R = %1$ için, nüvenin maksimum akı yoğunluğunun 1,97 T civarında olduğunu göstermektedir. Gözlenen maksimum akı yoğunluğu değeri nominal maksimum akı yoğunluğundan (1,84 T) büyük olduğundan, transformatörün çekirdeği doyuma yaklaşmıştır. Tüm durumlar için analizlerden elde edilen sonuçlar Şekil 5.91-5.93'de sunulmuştur. Çizelge 5.22'de harmonik analizlerden elde edilen sonuçların normal çalışma koşullarındaki sonuçlarla ve teorik sonuçlarla karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 5.91: Transformatörün harmonic altındaki akı dağılımı



Şekil 5.92: Transformatörün normal koşullardaki altındaki akı dağılımı



Şekil 5.93: Transformatörün harmonikler için kayıp eğrileri

Belirtilen her durum için modelin analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 5.24'te verilmiştir. Çizelgede verilen teorik ve deneysel sonuçların nasıl elde edildiği daha önceki bölümlerde açıklanmıştır.

Çizelge 5.24: Sonuçların karşılaştırılması

	V_S/V_R (Simülasyon sonuçları)				Deneysel sonuçlar	Teorik sonuçlar
	%1	%0,75	%0,5	%0,25		
Nüve kaybı (kW)	12.44	12.432	12.42	12.418	12.5	12.36
Harmonic analiz bakır kaybı (kW)	120.01	103.14	90.86	82.63		
Yük altındaki bakır kaybı (kW)					97	96.3

V_S/V_R % 0.25'ten % 1'e kadar çıkarılmasıyla, sargı kayıpları artmış, çekirdek kayıpları ise neredeyse hiç değişmemiştir. Burada, birim başına, nominal güç ve akım değerlerinin, sırasıyla sinüzoidal uyarım altında transformatörün nominal yük kaybı ve transformatörün primer tarafının nominal akımı olarak seçildiğine dikkat edilmelidir.

Bu çalışmada elde edilen sayısal sonuçlardan, gerilim alt harmoniklerinin, görünüşte önemsiz büyüklüklerde olsalar bile, transformatör çekirdeğinin maksimum akı yoğunluğuna ve bakır kayıplarına büyük ölçüde etki ettiği görülmüştür. Böylece, aynı gerilim koşulları için, sargı kayıplarının yüksek seviyelere ulaşabileceği ortaya çıkmıştır. Ancak, harmonik gerilimlerin transformatörün çekirdek kaybı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum, transformatör yüksüz kayıplarının hesaplanması ve güç transformatörlerinin değer kaybı için gerilim alt harmoniklerinin dikkate alınması gerektiği anlamına gelir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Manyetik akı düzensizliği, yüksek kayıplar bakımından transformatörün performansını etkileyen önemli bir sorundur. Bu kayıplar, çekirdek ve sargı sıcaklıklarının artmasına neden olduğu için transformatörün verimliliğini düşürmektedir. Artan sıcaklıklar transformatörün yalıtım malzemelerinde daha fazla termal strese neden olur. Bu durum transformatörün anma ömür süresini azaltabilir. Akının asimetrik dağılımı, özellikle transformatörün nüvesinde homojen olmayan bir ısınmaya yol açabilir. Transformatörlerin nüvesinde ve diğer parçalarındaki akı yoğunluğunun asimetrik dağılımını 3D/2D olarak göstermek için MAXWELL denklemleri kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, dağıtım, güç ve ölçü transformatörlerinin nüvesinden akan akı yoğunluğu dağılımı, nüve kayıpları, elektromanyetik kuvvet dağılımları, termal analizleri ve yıldırım darbe analizleri Sonlu Elemanlar Yöntemi dayalı ANSYS@MAXWELL ile etraflıca incelenmiştir. Dağıtım ve güç transformatörleri üç bacaklı olarak seçilmiştir. Üç bacaklı transformatörlerde, dengesiz durumlardan kaynaklanan sıfır bileşen akının geçmesi için düşük relüktanslı dönüş yolu mevcuttur. Böylece kaçak akıları modellemek için ekstra bacakların oluşturulmasına gerek yoktur. Farklı yapılar nedeniyle, Simülasyon sonuçlarına göre üç bacaklı ve beş bacaklı çekirdek için mıknatıslanma akımları farklıdır. Beş bacaklı transformatörde mıknatıslanma akımının tepe değeri, üç bacaklı transformatör ile karşılaştığında daha yüksektir. Ancak beş bacaklı ve üç bacaklı transformatörlerin her fazdaki mıknatıslanma akımlarının faz açıları aynıdır. Daha önce de ifade edildiği gibi dengesiz akı dağılımları, transformatörün farklı bölümlerinde ve özellikle transformatörün nüvesinde kayıpların artmasına ve dolayısıyla daha fazla ısınmasına neden olur. Transformatörün bu durumda güvenli bir şekilde çalışması için temel ve faydalı bir yöntem, transformatör deratasyonu yapılmasıdır. Termal-elektrik modelde lineer olmayan dirençler radyasyon ve konveksiyon ısı transferini temsil etmektedir. Sıcak nokta sıcaklığını ve transformatörün ömür kaybını hesaplamak için, ortam sıcaklığı ve transformatörün yükü bilinmeyen parametreler olarak kabul edilir. Bu modelin önemli avantajı, sargılar ve çekirdek sıcaklıklarının hesaplanabilir olmasıdır. Bu çalışmada ayrıca, SEY'e dayalı transformatörlerin ısı transferinin ve kapasitesinin belirlenmesi için birleştirilmiş elektromanyetik-termal model önerilmektedir. Genelde literatürde, sadece sınır sıcaklık koşulları, geometrik bilgiler ve malzeme bilgisi kullanılarak ısı analiz yöntemiyle yapılmaktadır. Elektriksel büyüklüklerin sıcaklığa veya sıcaklığın elektriksel büyüklüklere etkisi göz önüne alınarak sıcaklık hesaplamalarının yapılması zor olduğu için nadiren yapılmaktadır. Transformatörlerin karmaşık durumlarda daha doğru modellenebilmesi için kayıp ve ısınma mekanizmalarının eş zamanlı belirlenmesi gerekir.

Tez çalışmasının uygulamalar bölümünde Sonlu Elemanlar Yöntemi dayalı ANSYS@MAXWELL ile transformatörlerin tasarımı ve transformatörlerin tüm bölgelerindeki kayıp hesaplaması, nüve üzerinden akan akı dağılımı, kaçak akıların hesaplanması ve görüntülenmesi açıklanmıştır. Tasarlanan Autotransformer modelinden ve elde edilen sonuçlar, modelin elektromanyetik ve kayıp yönünden üretime hazır olduğunu göstermektedir.

Elde edilen önemli değerler;

- Maksimum manyetik akı yoğunluğu 1.74 T.
- Minimum manyetik akı yoğunluğu 1.2 T.
- Toplam nüve kaybı 95.34 kW olmuştur.

Farklı nüve malzemeleri ile tasarlanan 2D ve 3D modellerin analiz sonuçları karşılaştırılmış ve nüve malzemesi olarak hangi malzemesinin daha uygun olduğu konusunda fikir sunulmuştur. 2D ve 3D modellerinde elde edilen nüve kayıp değerleri arasında küçük bir fark olduğunu göstermektedir. 50 Hz'de test edilen nüve kayıpları 23,7 kW'dır. Her iki trafo modelinden elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için 50 Hz'de ölçülen 23.7 kW'lık sonuç ile karşılaştırıldığında sunulan modellerin sonuçlarının doğru olduğunu ortaya çıkmaktadır. 2D ve 3D modeller, 50 Hz'lik frekansta, M530-50A ve M125-27S materyallerinin her ikisi içinde simüle edilmiştir. Nüve kayıpları, M530-50A materyali için daha yüksek olmuştur.

Farklı malzemelerin sac kombinasyonları ile tasarlanan transformatörlerin elektromanyetik analizlerinde ise kullanılan elektriksel çeliklerle tasarlanan transformatörün manyetik nüvesinin T-bağlantı biçiminin ortalama manyetik akı yoğunlukları hesaplanmıştır. Kullanılan elektriksel çeliklerle tasarlanan transformatörün manyetik nüvesinin T-bağlantı biçiminin ortalama manyetik akı yoğunlukları hesaplanmıştır. M125-027S malzemesinin akı yoğunluğu maksimum $B = 1.84$ T, M530-50A malzemesinin akı yoğunluğu $B = 1.64$ T, bileşim malzemesinin manyetik akı yoğunluğu $B = 1.67$ T olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem, dağıtım, güç ve ölçü transformatörlerinde manyetik nüveler için uygulanabilmektedir. Ayrıca sayısal sonuçlar, nüve laminasyon adımlarındaki elektriksel çeliklerin kombinasyonunun, istiflenmiş manyetik nüveli nüve kayıplarının % 5'ini azaltabildiği göstermiştir.

Transformatörlerin kısa devre durumundaki analizlerinde bir transformatörün sargılarına kısa devre durumunda etki eden geçici elektromanyetik kuvvetlerin tahmini için Sonlu

Elemanlar Yöntemi kullanılmıştır. Geçici elektromanyetik kuvvetleri hesaplamak için transformatörün ANSYS@Maxwell 3D ortamında tasarlanan model kullanılmıştır. Güç transformatörüne uygulanan kısa devre geçici akımlarından kaynaklanan manyetik vektör potansiyeli, manyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik kuvvetler Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir. Transformatör modelinin aksenal ve radyal elektromanyetik kuvvetleri hesaplanmış ve analitik değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile kullanılan nümerik modelleme tekniğinin transformatörlerin tasarım aşamasında kolaylık sağlaması amaçlanmıştır.

Termal analizde ise analiz bittikten sonra meydana gelen sıcaklıklar, nüvede 88.3 °C ve 84.78 °C, YG sargısında 92.4 °C ve 91.01 °C ve AG sargısında 89.32 °C ve 88.71 °C olarak ölçülmüştür. Yukarıda sunulan şekillerde görüldüğü üzere, transformatördeki maksimum sıcaklık değerinin 92.4 °C olduğu ve YG sargısında meydana geldiği belirlenmiştir. Transformatörün deneysel termal testinde maksimum sıcaklık değeri 89.31°C olarak hesaplanmıştır. Transformatör modelinin simülasyonundan elde edilen sonuç, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında yaklaşık 3,09 °C bir fark olmuştur. Bu değer, hem tasarlanan modeli doğrulamakta hem de analiz sonuçlarını doğrulamaktadır. Sargıların bulunduğu bölgeler trafonun aktif parçalarını barındırdığı için genel olarak transformatörün en sıcak kısımlarıdır. Bu sebeple ısıya dönüşen toplam kayıpların büyük bir bölümü bu aktif kısımlarda meydana gelmektedir.

Transformatör nüvesinin maksimum sıcaklığı sargılarınkinden daha düşük olmuştur. Nüvedeki maksimum sıcaklık değeri nüvenin orta bacağında meydana gelmiştir. Bu nedenle nüvede meydana gelen kayıplar, açığa çıkan ısıya bağlı olarak sargılarda meydana gelen kayıplardan daha düşük olmuştur.

Yıldırım darbe analizi gerçekleştirilen modelde nüve malzemesinde meydana gelen elektromanyetik akı değerinin normal çalışma koşullarındaki elektromanyetik akı değerinden çok yüksek olmuştur. Bu durumun da nüve malzemesinin doyuma gitmesine neden olduğu görülmüştür. Ayrıca nüvedeki zayıf noktalar ve sıkıntılı bölgeler tespit edilmiştir. Yıldırım Darbesine bağlı olarak yapılan analizde hem kayıplar hem elektromanyetik akı çok çok yüksek olmuştur. Transformatör kesitindeki akı yoğunluğu dağılımı da hesaplanmıştır. Tüm modellerden elde edilen sonuçlardan yıldırım darbesi altında çalışan transformatörün, nüvenin doyma noktasının çok üstünde çalıştığı kanıtlanmıştır.

Yapılan bir diğerk çalışma olan akım transformatörlerinin (AT) tasarımı ve analizi olmuştur. Tasarlanan modelin kalıcı rejim ve geçici rejim çalışma koşullarındaki elektromanyetik akı ve elektromanyetik kuvvet incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Normal şartlarda AT'nin primer ve sekonder sargıları nominal akımları taşımaktadır.

- Modelin maksimum akı yoğunluğu $B= 1.23 \text{ T}$
- Modelin maksimum alan şiddeti $H= 7893 \text{ A/m}$
- Meydana gelen elektromanyetik kuvvetin maksimum değeri 1.348 N olmuştur.

AT sekonder açık devre durumunda,

- Meydana gelen elektromanyetik kuvvetin maksimum değeri 1.398 N olmuştur.

Gerilim transformatörlerinin normal çalışma koşulları ve geçici rejim altındaki çalışma koşulları için analizleri gerçekleştirilmiştir. Normal şartlarda gerilim trafosunun primer ve sekonder sargıları nominal gerilimleri taşımaktadır.

- $B= 1.53 \text{ T}$
- $H= 7903 \text{ A/m}$
- Meydana gelen elektromanyetik kuvvetin maksimum değeri 1.401 N olmuştur.

Gerilim trafosu geçici rejim olayındaki manyetik akı ve elektromanyetik kuvvet değerleri aşağıda verilmiştir,

- Maksimum elektromanyetik kuvvet 3411 N

Geçici rejim çalışma koşulunda nüvedeki manyetik akı yoğunluğu normal çalışma koşullarındaki akı yoğunluğundan çok daha büyük olmuştur ve nüve doyuma gitmiştir. Geçici rejim durumundaki akım normal çalışma şartlarındaki akımdan çok yüksek olmuştur. Oluşan bu yüksek akımda büyük elektromanyetik kuvvetler meydana getirmiştir. Meydana gelen bu büyük elektromanyetik kuvvetler daha büyük elektrodinamik gerilimler meydana getirebilirler ve ölçü trafolarına önemli zararlar verebilirler. Birleştirilmiş manyetik ve mekanik alan kullanılarak, mekanik dayanıklılık bakımından gerilim trafosunun zayıf ve güçlü noktaları belirlenmiştir.

Tasarlanan modelleri doğrulamak için gerçek transformatörlerin deneysel verileri kullanılmıştır. Elde edilen model ve ölçümlerin hem dinamik bölgede hem kalıcı durumda iyi örtüşümü ve hataların düşük olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada kuru tip transformatörlerin termal modellerin doğruluğu incelenmiştir. Bu çalışmanın devamında sentetik, bitkisel yağlı ve silikon bazlı yağlı transformatörlerin termal modelleme çalışmaları

yapılabilir. Bu çalışmanın diğ er bölümünde ise, incelenen transformatörün tasarımı kısa devre durumunda incelenmiştir. Bu durumda meydana gelen radyal ve aksiyel kaçak akıları ve elektromanyetik kuvvetleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlara göre, transformatörün primer ve sekonder sargısında Lens kanununa göre, ana kaçak akıya karşı bir manyetik akı üretilir. Bunun bir sonucu olarak, transformatörde kaçak akı ve kaçak endüktans azalacaktır. Ayrıca sargılarda oluşan aksiyel ve radial elektromanyetik kuvvetlerin önemli nedeni, sargıların radyal ve aksiyel kaçak akı bileşenidir. Böylece kaçak akıların azaltılması elektromanyetik kuvvetlerinin azalmasına neden olur.



6. KAYNAKLAR

- [1] Standard IEEE, (1995). *IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers*. USA: Contact the IEEE-SA.
- [2] Povh, D., Schultz, W. (1978). Analysis of overvoltages caused by transformer magnetizing inrush current. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 4(PAS-97), 1355-1365.
- [3] Buhan, S., Boyrazoglu, B., Unsar, O., Altintas, B., Polat, B. and Ozdemirci, E. (2007). *Türkiye elektrik iletim sisteminde mobil güç kalitesi ölçümleri*, Enerji Verimliliği Kongresi, Kocaeli.
- [4] Salor, Ö., Buhan, S., Ünsar, Ö., Boyrazoğlu, B., Altıntaş, E., Atalık, T. and Açık, A. (2009). Mobile monitoring system to take nationwide PQ measurements on electricity transmission systems. *Measurement*, 42(4), 501-515.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] Hyun-Mo Ahn, Ji-Yeon Lee, Joong-Kyoung Kim, Yeon-Ho Oh, Sang-Yong Jung, Sung-Chin Hahn, "Finite element analysis of short circuit electromagnetic force in power transformer," in *Proc. ICEMS*, Tokyo, Japan, 2009, pp. 1–4.
- [11] Özüpak Yıldırım, Mamıs Mehmet Salih (2019). Kısa Devre Durumunda Güç Trafosunda Meydana Gelen Elektromanyetik Kuvvetlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi. **Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 2019, sayfa 228-240.
- [12] Hjalmar, M. 2012. Optmiization, Study on Oil Flow and Temperature Distribution in Power Transformer Windings, MS.c. Thesis, Stockholm, sweden.

- [13] Yugendrao K. N. 2016. *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 Vol. 4, Issue 4, April, pp. 17-20.
- [14] Kardag, R. 2012. Temperature Distribution in Power Trasformers, MS.c. Thesis, Electrical and Electronics Engineering in Middle East Technical University September.
- [15] Myint, M. L. OO, Y. A. 2014. *Analysis of distribution transformer design using FEA*, International Journal of Scientific Research Engineering &Technology (IJSRET), Volume 3, Issue 4, July (773-775).
- [16] Y. Wang, J. Pan, M. Jin: Finite Element Modeling of the Vibration of a Power Transformer, Proceedings of ACOUSTIC 2-4 November, Australia , 2011, pp. 1-7.
- [17] Yıldırım ÖZÜPAK, Mehmet Salih MAMIŞ, İbrahim Halil TEKE, “Comparison Of Two-Dimensional (2D) And Three-Dimensional (3d) Analysis Of Electromagnetic Flux And Core Losses Of Transformers”, September, Diyarbakır, Turkey, 2018.
- [18] A. Karademir ve M. K. Eker, Transformatör T-bağlantı yapısının çekirdek kayıplarına etkisi, Journal of Polytechnic, 19:4 (2016) 389-397.
- [19] G. K. Singh, “Power system harmonics research: A survey”, Eur. Trans. Electr. Power, vol. 19, no. 2, pp.151 -172, 2007.
- [20] T. D. Kefalas, A. G. Kladas, “Harmonic impact on distribution transformer no-load loss”, IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 57, no. 1, pp.193 -200, 2010.
- [21] M. Yazdani-Asrami, M. Mirzaie, A. A. S. Akmal, “No-load loss calculation of distribution transformers supplied by nonsinusoidal voltage using three-dimensional finite element analysis”, Energy, vol. 50, no. 1, pp. 205-219, 2013.
- [22] M. Shareghi, B. T. Phung, M. S. Naderi, T. R. Blackburn, E. Ambikairajah, “Effects of current and voltage harmonics on distribution transformer losses”, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD) 2012, pp.633-636, 2012.
- [23] T. L. G. Soh, D. M. Said, N. Ahmad, K. M. Nor, F. Salim, “Experimental study on the impact of harmonics on transformer”, IEEE 7th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), pp.686-690, 2013.

- [24] Mamızadeh, A. (2010). Yağlı tip transformatörlerin doğrusal olmayan dinamik termal modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] Aydın, E. (2014). *Gömülü kalıcı mıknatıslı senkron motorların moment dalgalanmalarının minimizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [26] Islam, M. A. (2012, March). Prospective Analysis of Energy Efficient Amorphous Metal Distribution Transformer (AMDT). In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, 1-4.
- [27] Anonim. (2018). <http://www.senerjieng.com/sea> (Online ulaşma tarihi 10 Mart, 2018).
- [28] S. J. Salon, *Finite Element Analysis of Electrical Machines*. Troy, New York: Rensselaer Polytech. Inst., 1995.
- [29] S. V. Kulkarni and S. A. Khaparde, *Transformer Engineering*. New York: Marcel Dekker, 2004.
- [30] G. Bertagnolli, *Short-Circuit Duty of Power Transformer*. Zurich, Switzerland: ABB Ltd., 2007.
- [31] Yugendrao K. N., *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 Vol. 4, Issue 4, April 2016, pp. 17-20.
- [32] Madžarević, V. Kapetanović, I. Tešanović, Kasumović, M. M. 2011. Different Approach to Thermal Modeling of Transformers - a comparison of methods, INTERNATIONAL JOURNAL of ENERGY and ENVIRONMENT, Issue 5, Volume 5, p-610-617.
- [33] <https://circuitglobe.com/harmonics-in-three-phase-transformers.html>
- [34] Georgilakis, P. S. (2009). *Spotlight on modern transformer design*. Springer Science & Business Media, 125-129.
- [35] Kulkarni, S. V., Khaparde, S. A. (2012). *Transformer engineering: design, technology, and diagnostics*. Taylor and Francis group, California: CRC Press.
- [36] Beckley, P. (2002). *Electrical steels for rotating machines* (No. 37). IET.
- [37] Zare, M., Razi, S. M. P., Farahani, H. F. and Khodakarami, A. (2012). Finite Element Analysis of Leakage Inductance of 3-Phase Shell-Type and Core Type Transformers.

- Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(12), 1721-1728.
- [38] Njafi, A., Iskender, I. and Genc, N. (2014, March). Evaluating and derating of three-phase distribution transformer under unbalanced voltage and unbalance load using finite element method. In *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014 IEEE 8th International*, 160-165.
- [39] Atabak, N., Ires, I. (2015). *Estimation of stray loss and leakage flux in the structural componrnt of 3- phase distribution transformer under unbalanced voltage based on numerical analysis*. IEEE 6th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization, Istanbul, Turkey.
- [40] Atabak, N., Ires, I. (2015). A new approach to reduce the leakage flux and electromagnetic force on distribution transformer under unbalanced faults based on finite element method, *Electrical Engineering*, 97, 45-56.
- [41] Selami, B. (2010). *Evirici çıkış transformatörlerinin modellenmesi ve analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [42] Murat, K. (2007). *Sonlu elemanlar metodu kullanılarak güç ablolarının ısı analizi ve akım taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [43] Barbisio, E., Fiorillo, F. and Ragusa, C. (2004). Predicting loss in magnetic steels under arbitrary induction waveform and with minor hysteresis loops. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 40(4), 1810-1819.
- [44] Zhang, H., Yang, B., Xu, W., Wang, S., Wang, G., Huangfu, Y. and Zhang, J. (2014). Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, 24(3), 1-4.
- [45] 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)
- [46] 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.
- [47] Anonim. (2019). <https://www.ozeninc.com/products/electromagnetic/ansys-maxwell> (Online Ulaşma tarihi 02 Şubat, 2019).

- [48] M. Heindl, S. Tenbohlen, R. Wimmer, "Transformer modeling based on standard frequency response model", XVII International Symposium on High Voltage Engineering, Hannover, Germany, August 22-26, pp. 1-5, 2011.
- [49] S. Magdaleno-Adame, E. Melgoza-Vazquez, J.C. Olivares-Galvan, R. Escarela-Perez, "Loss reduction by combining electrical steels in the core of power transformers," *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, vol. 26, no. 8, pp. 1737-1751, 2016.
- [50] Maizana, D. "Analyze eddy current loss in the three phase 100kVA transformer core with the mix 60 T joint core", *Asian J. of Sci. Res.*, 6, 122-128, 2013.
- [51] T.D. Kefalas, A.G. Kladas, "Mixed Si-Fe wound cores five legged transformer: losses and flux distribution analysis," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp.1609-1612, 2012.
- [52] Erdi doğan, Bedri Kekezoğlu "Güç Transformatörlerinde Gürültü Seviyesinin Analizi", YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2016.
- [53] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth Edition, BAE Systems Australia, 2005.
- [54] Standard IEEE, (2002). IEEE guide for transformer loss Measurement, C57.123-1-36.
- [55] Alexandru B.M., M. M., "Calculation methods for lightning impulse voltage distribution in power transformers", *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)* (s. 71-76). Bran: IEEE, (2014).
- [56] D. Phaengkio, W. Somlak, S. Ruangsinchaiwanich, "Transformer design by finite element method with DOE algorithm", *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS 2013)*, pp. 2219-2224, 26-29 Oct., 2013.
- [57] Maizana, D., "Analyze eddy current loss in the three phase 100kVA transformer core with the mix 60 T joint core", *Asian J. of Sci. Res.*, 6, 122-128, (2013).
- [58] Chen, T. H., Yang, C. H. and Hsieh, T. Y. (2009). Case studies of the impact of voltage imbalance on power distribution systems and equipment. In S. Chen (Ed.), *WSEAS International Conference. Proceedings. Mathematics and Computers in Science and Engineering 8*. World Scientific and Engineering Academy and Society.
- [59] J. Smajic, T. Steinmetz, M. Rüegg, Z. Tanasic, R. Obrist, J. Tepper, B. Weber, M. Carlen, "Simulation and Measurement of Lightning-Impulse Voltage Distributions Over Transformer Windings." *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 2, 553-556, (2014).

7. EKLER

Bu tezde hiçbir ek sunulmamıştır.



8. ÖZGEÇMİŞ

Ad soyad : Yıldırım ÖZÜPAK
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.05.1985-Muş
E-posta : yildirimosupak@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2016, İnönü Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
- **Doktora** : 2020, İnönü Üniversitesi, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2015 ÇETİNKAYA ELEKTRİK A.Ş’de teknik koordinatörlük.
- 2015- Dicle Üniversitesi Silvan Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

Projelerde Yaptığı Görevler:

Geçici Rejim Altındaki Ölçü Transformatörlerinin Elektromanyetik Alan ve Isıl Analizlerinin Gerçekleştirilmesi, Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi

Arastirmacı: YILDIRIM ÖZÜPAK, Yürütücü: MEHMET SALIH MAMIS 24/07/2017 - 24/09/2019 (ULUSAL)

Eserler

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH (2019). Realization of electromagnetic flux and thermal analyses of transformers by finite element method. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 14(10), 1478-1484. Doi: 10.1002/tee.22966 (Yayın No: 5908898)
2. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH, TEKE İBRAHİM HALİL (2019). Electromagnetic Field and Total Loss Analysis of Transformers by Finite Element Method. International Journal of Engineering And Computer Science, 8(1), 24451-24460. (Yayın No: 5774086)
3. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH (2018). Analyze of Voltage Transformer by Finite Element Method. International Journal of Advance Engineering and Research Development (IAERD), 5(12), 163-170. (Yayın No: 5773449)

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında (proceedings) basılan bildiriler:

1. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH, ASLAN EMRAH (2019). AKIM TRANSFORMATÖRLERİNİN YILDIRIM DARBEANALİZLERİNİN ANSYS@MAXWELL İLE GERÇEKLESTİRİLMESİ. 2. ULUSLARARASI MARDİN ARTUKLUBİLİMSEL ARASTIRMALAR KONGRESİ (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5775453)
2. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH, ASLAN EMRAH (2019). GEÇİCİ REJİM ALTINDAKİ GERİLİMTRANSFORMATÖRLERİNİN ANSYS@MAXWELL İLE ANALİZİ. 2. ULUSLARARASI MARDİN ARTUKLUBİLİMSEL ARASTIRMALAR KONGRESİ (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5775493)
3. TEKE İBRAHİM HALİL, MAMIS MEHMET SALIH, GÖKTAS TANER, ÖZÜPAK YILDIRIM (2018). Üç Fazlı Güç Transformatorünün 3D Tasarımı ve Analizi. International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018), 1867-1877. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4720268)
4. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH, TEKE İBRAHİM HALİL (2018). Comparison of twodimensional (2D) and three-dimensional (3D)analysis of electromagnetic flux and core losses of transformers. International engineering and Natural Sciences Conference (IENSC 2018) (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4732488)

Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler:

1. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH, GÖKTAS TANER, ARKAN MÜSLÜM (2019). Güç Transformatorlerinin Yıldırım Darbe Analizlerinin ANSYS@Maxwell-3D ile Gerçekleştirilmesi. Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, 5(2), 147-158., Doi: 10.34186/klujes.571086 (Kontrol No: 5933961)
2. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH (2019). Birleştirilmiş Elektromekanik Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Güç Transformatorünün Termal Alan Analizi. Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(2), 934-941. (Kontrol No: 5771382)
3. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH (2019). KISA DEVRE DURUMUNDA GÜÇ TRAFOSUNDA MEYDANA GELEN ELEKTROMANYETİK KUVVETLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(10), 228-240. (Kontrol No: 5129232)
4. ÖZÜPAK YILDIRIM, MAMIS MEHMET SALIH (2019). Dağıtım Transformatorlerinin Nüvesinde Kullanılan Farklı Materyallerin Sac Kombinasyonlarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Elektromanyetik Alan Analizi. Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi, 4(1), 21-31. (Kontrol No: 5772823)

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

1. ÖZÜPAK YILDIRIM, DIKMEN SELİM, GÖKTAS TANER, ARKAN MÜSLÜM, MAMIS MEHMET SALIH (2018). Güç Transformatorlerinde Elektromanyetik Akı Dağılımının ve Nüve Kayıplarının Analizi. Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2018), 102-105. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:4717467)