

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLER İÇİN YENİ BİR GEÇMELİ TİP
ÇEKİRDEK TASARIMI

Doğancan ÇELEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL

Şubat, 2021

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRLER İÇİN YENİ BİR GEÇMELİ TİP
ÇEKİRDEK TASARIMI**

Doğancan ÇELEN tarafından hazırlanan tez çalışması 06.02.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Makinaları ve Güç Elektronik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr.Öğr.Üyesi Sibel ZORLU PARTAL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr.Öğr.Üyesi Sibel ZORLU PARTAL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kamuran Nur BEKİROĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Caner AKÜNER, Üye
Marmara Üniversitesi

Danışmanım Dr.Öğr.Üyesi Sibel ZORLU PARTAL sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Üç Fazlı Transformatörler İçin Yeni Bir Geçmeli Çekirdek Tasarımı başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Doğancan ÇELEN

İmza



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübeleri ile araştırmalarım elinden gelen bütün desteği veren ve tavsiyeleri ile çalışmamda önemli katkıları bulunan çok değerli hocam Sayın Dr.Öğr.Üyesi Sibel ZORLU PARTAL'a ; simülasyon çalışmalarım boyunca yardımını hiç bir zaman esirgemeyen Umut Yusuf GÜNDOĞAR'a; tez çalışmamda önerilen çekirdek modelinin bir Ar-Ge projesi olarak gerçekleştirilmesinde ve prototipinin üretilip, testlerinin yapılmasında desteklerini esirgemeyen Breimer-Roth Transformatorenwerk GmbH (Almanya) firması'ndan Herr Wolfgang ORIO, Frau Nicole ORIO ve Herr Alex JEKEL'e şükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

Ayrıca bu çalışma boyunca manevi destekleri ile her zaman yanımda olan anneme, kardeşim ile kıymetli arkadaşlarım Hayat Dilan ÖNSAL ve Erkan TAŞPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Doğancan ÇELEN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	15
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	2
1.2 Tezin Amacı	8
1.3 Hipotez	9
2 TRANSFORMATÖRLER	11
2.1 Transformatör Çalışma Prensibi	12
2.2 Transformatör Eşdeğer Devresi	13
2.3 Transformatör Yapısı ve Kullanılan Malzemeler	14
2.4 Transformatörlerde Verim ve Kayıplar	25
2.5 Boşta Kayıp Azaltma Yöntemleri	37
3 YENİ BİR GEÇMELİ ÇEKİRDEK GEOMETRİSİNİN TANITILMASI	50
3.1 E-I Tip Çekirdek	51
3.2 Yeni Bir Geçmeli Tip Çekirdek Tasarımı	53
4 TRANSFORMATÖRÜN MANYETİK MODELLENMESİ VE BENZETİM ÇALIŞMASI	57
4.1 Manyetik Modelleme	57
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi	59
4.3 Geçmeli ve E-I Tip Çekirdekli Transformatörlerin Benzetim Çalışması	62

5 GEÇMELİ TİP ÇEKİRDEKLİ ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	91
5.1 Geçmeli Tip Çekirdekli Transformatör Prototip İmalatı	91
5.2 Geçmeli Tip ve E-I Çekirdekli Transformatörlerin Boşta Kayıp Testleri.....	97
5.3 Geçmeli Tip ve E-I Çekirdekli Transformatörlerin Verim Hesapları.....	101
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	105
6.1 Sonuçlar	105
KAYNAKÇA	109
A REFERANS MODEL ÜRETİCİ VERİLERİ	115



SİMGE LİSTESİ

A	Amper
A/m	Amper/metre
P	Aktif Güç
P _A	Anormal Kayıplar
P _{cu}	Bakır Kaybı
P _o	Boşta Kayıp
P _{fe}	Demir Kaybı
<i>k_g</i>	Eddy Kayıp Katsayısı
E	Elektro Motor Kuvvet
P _E	Eddy Kayıpları
η	Elektriksel Verim
f	Frekans
S	Görünür Güç
pF	Güç Faktörü
Hz	Hertz
P _H	Histeresiz Kayıplar
<i>k_h</i>	Histeresiz Kayıp Katsayısı
P _{ck(k)}	k Yüklenme Faktöründeki Soğutma Sistemi Kayıpları
U _k	Kısa Devre Empedansı
kg/m ³	Kilogram / Metreküp
kV	Kilovolt
kVA	Kilo Volt Amper
kW	Kilowatt
H	Manyetik Alan Şiddeti
Φ	Manyetik Akı
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
μ	Manyetik Geçirgenlik
m	Metre
MVA	Mega Volt Amper
P _m	Mıknatıslanma Kayıpları
mm	Milimetre

ms	Milisaniye
I_p	Primer Akım
U_1	Primer Sargı Gerilimi
R_p	Primer Sargı Omik Direnç
N_1	Primer Sarım Sayısı
cm	Santimetre
I_s	Sekonder Akım
R_s	Sekonder Sargı Omik Direnç
U_2	Sekonder Sargı Gerilimi
N_2	Sekonder Sarım Sayısı
S/m	Siemens / Metre
P_{c0}	Soğutma Sistemi Kayıpları
T	Tesla
TWh	Terawatt Saat
V	Volt
VA	Volt Amper
W/m^3	Watt / Metreküp
W/kg	Watt / Kilogram
P_k	Yükte Kayıp

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternative Current)
AG	Alçak Gerilim
AISI	Amerikan Demir Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
BMWi	Federal Almanya Ekonomi ve Enerji Bakanlığı (Bundesministerium Für Wirtschaft Und Energie)
CRGO	Soğuk Haddelenmiş Tanecik Yönlendirmeli (Cold Rolled Grain Oriented)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DIN	Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)
FEM	Finite Element Method
GO	Tanecikleri Yönlendirilmiş Silisli Sac (Cold Rolled Grain Oriented Electrical Steel)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
NGO	Tanecikleri Yönlendirilmemiş Silisli Sac (Non-Grain Oriented Electrical Steel)
MSL	Çoklu Adım Atlama Tekniği (Multi Step Lap)
SSL	Tek Adım Atlama Tekniği (Single Step Lap)
YG	Yüksek Gerilim
ZIM	Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İçin Merkezi Yenilik Programı (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Üç fazlı güç transformatör örneği	11
Şekil 2.2 Tek fazlı transformatör nüve ve sargıları	12
Şekil 2.3 Primer sargının referans alındığı eşdeğer devre örneği	13
Şekil 2.4 Güç transformatörlerinde sargı yerleşimi	15
Şekil 2.5 Çeşitli nüvelerin enine kesitleri	17
Şekil 2.6 Tek fazlı transformatör çekirdek yapıları.....	18
Şekil 2.7 Üç fazlı transformatör çekirdek yapıları	18
Şekil 2.8 Elektrik sac kayıplarının yıllara göre değişimi	20
Şekil 2.9 Yönlendirilmemiş elektrik çeliği tanecik dizilimi	21
Şekil 2.10 Yönlendirilmiş elektrik çeliği tanecik dizilimi	22
Şekil 2.11 Amorf malzeme-Silisli Sac Histeresiz Eğrisi	24
Şekil 2.12 75KVA Dağıtım transformatör için yükte-boşta kayıp ilişkisi	26
Şekil 2.13 Eddy akımlarının sargılar üzerindeki etkisi.....	28
Şekil 2.14 Boşta kayıpların sınıflandırılması ve frekansa bağlı değişimleri.....	31
Şekil 2.15 Manyetik malzeme domain yapısı.....	32
Şekil 2.16 Mıknatıslanma aşamaları ve Histeresiz Çevrim.....	32
Şekil 2.17 Mıknatıslanma aşamaları boyunca Domain yön değişimi	33
Şekil 2.18 Manyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi.....	34
Şekil 2.19 Manyetik alan şiddeti-akım-gerilim grafiği	35
Şekil 2.20 Eddy kayıplarının lamine saclar ile azaltılması	36
Şekil 2.21 Üç Fazlı E-I Çekirdek Görünümü.....	39
Şekil 2.22 Alternate Lap laminasyonlar arası akı dağılımı	40
Şekil 2.23 Non-Mitred Joint görünümü	41
Şekil 2.24 45° Mitred Joint Görünümü	42
Şekil 2.25 23°, 45°, 60° ve 90° T Joint Tipleri	43
Şekil 2.26 1 Numaralı Çekirdek İçin 23°, 45°, 60° ve 90° T-Joint manyetik akı yoğunluğu dağılımları.....	44
Şekil 2.27 Single Step Lap dizilimi	46
Şekil 2.28 Multi Step Lap dizilimi.....	46
Şekil 2.29 Single Step Lap akı yoğunluğu dağılımı.....	47
Şekil 2.30 Single Step Lap Hat-1 akı değişimi.....	48

Şekil 2.31 Multi Step Lap akı yoğunluğu dağılımı	48
Şekil 2.32 Multi Step Lap hat-1-2-3-4-5 akı değişimi	49
Şekil 3.1 Yaygın olarak kullanılan çekirdek geometrileri	50
Şekil 3.2 Tek fazlı E-I çekirdek yapısı.....	51
Şekil 3.3 Üç fazlı E-I çekirdek yapısı	52
Şekil 3.4 Ready Core Laminasyon görünümü	53
Şekil 3.7 Önerilen Üç fazlı Plug-In çekirdek yapısı	55
Şekil 3.8 Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk birleşmiş hali.....	56
Şekil 4.1 2D üçgen ve 3D piramit Sonlu Elemanlar	59
Şekil 4.2 M330-50A materyal için B-H eğrisi	65
Şekil 4.3 M330-50A materyal için B-P eğrisi.....	65
Şekil 4.4 400-500ms için primer sargılara uygulanan gerilim.....	66
Şekil 4.5 E-I çekirdek Mesh ağ örgüsü	67
Şekil 4.6 E-I çekirdek için primer sargılara uygulanan gerilim	67
Şekil 4.7 E-I çekirdek için sekonder sargılarda endüklenen gerilim	68
Şekil 4.8 E-I çekirdek için primer boşta çalışma akımı	68
Şekil 4.9 E-I çekirdek $\omega t=0^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu	69
Şekil 4.10 E-I çekirdek $\omega t=120^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu	70
Şekil 4.11 E-I çekirdek $\omega t=240^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu	70
Şekil 4.12 E-I çekirdek $\omega t=0^\circ$ için çekirdek kayıp dağılımı W/m^3	71
Şekil 4.13 E-I çekirdek 0-500ms için çekirdek kayıp değeri.....	72
Şekil 4.14 E-I çekirdek için primer sargılara uygulanan nominal akım	73
Şekil 4.15 E-I çekirdek için sekonder sargılardan geçen nominal akım.....	73
Şekil 4.16 E-I çekirdek 0-300ms aralığı için bakır kayıpları.....	74
Şekil 4.17 E-I tip çekirdek 200ms anında gerilim değişimi.....	75
Şekil 4.18 E-I tip çekirdek transient akım grafiği.....	76
Şekil 4.19 E-I çekirdek için primer faz sargılarına etki eden kuvvetler	77
Şekil 4.20 E-I çekirdek için sekonder faz sargılarına etki eden kuvvetler	78
Şekil 4.21 Plug-In çekirdek Mesh ağ örgüsü	79
Şekil 4.22 Plug-In çekirdek için primer sargılara uygulanan gerilim.....	79
Şekil 4.23 Plug-In çekirdek için sekonder sargılarda endüklenen gerilim.....	80
Şekil 4.24 Plug-In çekirdek için primer boşta çalışma akımı	80
Şekil 4.25 Plug-In çekirdek $\omega t=0$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı	81

Şekil 4.26	Plug-In çekirdek $\omega t=120$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı...	81
Şekil 4.27	Plug-In çekirdek $\omega t=240$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı...	82
Şekil 4.28	Plug-In $\omega t=0^\circ$ çekirdek kayıp dağılımı W/m^3	83
Şekil 4.29	Plug-In çekirdek 0-500ms için çekirdek kayıp değeri.....	83
Şekil 4.30	Plug-In çekirdek için primer sargılara uygulanan nominal akım	84
Şekil 4.31	Plug-In çekirdek için sekonder sargılardan geçen nominal akım.....	85
Şekil 4.32	Plug-In çekirdek 0-300ms aralığı için bakır kayıpları.....	85
Şekil 4.33	Plug-In çekirdek 200ms anında uygulanan gerilim değişimi	86
Şekil 4.34	Plug-In çekirdek Transient Akım grafiği	87
Şekil 4.35	Plug-In çekirdek her faz için primer sargılara etki eden kuvvetler	88
Şekil 4.36	Plug-In çekirdek her faz için sekonder sargılara etki eden kuvvetler....	89
Şekil 5.1	150x65x50mm hazır bobin gövdeleri ve primer-sekonder sargılar	92
Şekil 5.2	250x250mm üç fazlı E-I tip çekirdek modeli.....	92
Şekil 5.3	1.5mm çentikli Plug-In çekirdek sac örneği.....	93
Şekil 5.4	0.5mm çentikli Örnek Plug-In çekirdek sac örneği	93
Şekil 5.5	Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk birleşmiş hali.....	94
Şekil 5.6	Plug-In çekirdek için sargıların bacak paketi üzerine yerleştirilmesi	94
Şekil 5.7	Bobinlerin bacak paketi üzerine yerleştirilmesi	95
Şekil 5.8	Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk paketlerinin birleşmiş hali.....	95
Şekil 5.9	Geçmeli tip çekirdekli üç fazlı transformatör prototipi.....	96
Şekil 5.10	Boşta kayıp ölçümü test düzeneği.....	97
Şekil 5.11	Zimmer LMG-450 Güç Analizörü ve Güç Kaynağı	98
Şekil 5.12	Plug-In ve E-I Tip çekirdek boşta kayıp testi bağlantı şekli	98
Şekil 5.13	Plug-In çekirdek modeli için ölçülen boşta kayıp değeri	99
Şekil 5.14	Plug-In çekirdek modeli için ölçülen boşta çalışma akımları	99
Şekil 5.15	E-I referans çekirdek model için ölçülen boşta kayıp değeri.....	100
Şekil 5.16	E-I referans çekirdek model için ölçülen boşta çalışma akımları	100

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Boşta kayıp azaltma yöntemleri ve etkileri	37
Tablo 2.2 Kullanılan çekirdeklerin bacak boyunduruk ölçüleri	43
Tablo 2.3 Çekirdek-1 farklı T-Joint açılarında boşta kayıplar	45
Tablo 2.4 Çekirdeklerin Joint tipine göre toplam boşta kayıp değerleri.....	45
Tablo 4.1 Benzetim çalışmasında yer alan transformatör etiket değerleri	63
Tablo 4.2 Bobinlere ait sarım sayıları ve omik direnç değerleri.....	64
Tablo 5.1 Transformatörlere ait boşta kayıp ve primer akım değerleri	101
Tablo 5.2 Ek-A verilen transformatör bakır kaybı değerleri.....	102
Tablo 5.3 Geçmeli çekirdek için elde edilen verim değerleri	104
Tablo 5.4 E-I referans çekirdek için elde edilen verim değerleri.....	104

Üç Fazlı Transformatörler İçin Yeni Bir Geçmeli Tip Çekirdek Tasarımı

Doğancan ÇELEN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Sibel ZORLU PARTAL

E-I tip çekirdek geometrisi, transformatörler için en yaygın kullanılan çekirdek tiplerinden biridir. Bununla birlikte transformatör gücü arttıkça E-I tip yerine çekirdek üretimi için şerit şeklinde kesilmiş bacak boyunduruk sacları kullanılmakta ve çekirdek üretim süresi artmaktadır. Bundan dolayı sacların el ile istiflendiği işletmelerde sac dizilimi önemli bir zaman teşkil etmekte, transformatör gücüne bağlı olarak bir iş günü kadar sürebilmektedir. Bu noktadan yola çıkarak sacların istifleme süresini, üretim maliyetlerini azaltmak için, üç fazlı transformatörler için uygulanabilir olması istenilen geçmeli tip çekirdek tasarımı gerçekleştirilmiştir. Plug-In çekirdek geometrisi tasarlanırken literatürde bulunan joint bağlantı şekilleri de dikkate alınmıştır. Böylelikle Plug-In çekirdek tasarımıyla birlikte akının pencere köşe yüzeyleri yerine, eş parçadan oluşan bacakların geniş yüzeyleri yardımıyla akı yığılmasının ve çekirdek kayıplarının azaltılması amaçlanmıştır.

Plug-In çekirdek tasarımına uygun M330-50A elektrik sacına sahip prototip inşa edilmiş, üretim aşamalarına değinilmiştir. Önerilen tasarıma sahip transformatör ve aynı etiket değerlerine sahip referans E-I çekirdekli transformatör ANSYS Maxwell

simülasyon programı kullanılarak manyetik akı yoğunlukları, çekirdek kayıpları ve çekirdek kayıplarının oluştuğu lokal bölgeler ve bakır kayıpları iki boyutlu olarak analiz edilmiştir. Ayrıca E-I ve Plug-In modellerinin prototipleri üretilmiş ve transformatörler boşa çalışma testlerine tabi tutularak, çekirdek kayıpları ve verimleri hesaplanmıştır.

Üretim kolaylığı açısından referans E-I çekirdekli transformatöre göre Plug-In çekirdeğin dizilimi için üçte bir oranında süre gerektiği tespit edilmiştir. Simülasyon çalışmalarında çekirdek modelleri için maksimum akı yoğunluğu değerlerine bakıldığında Plug-In modelde referans E-I modele göre yaklaşık %0.6 daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Ayrıca çekirdek kayıpları bakımından Plug-In modeldeki kayıpların, E-I çekirdeğe göre %0.1 fazla olduğu tespit edilmiştir. Üretilen Plug-In çekirdekli prototip ve E-I çekirdekli transformatöre ait boşa çalışma testleri sonucunda ise Plug-In çekirdeğin yaklaşık %11,4 daha yüksek çekirdek kayıplarına sahip olduğu görülmüştür. Çalışma neticesinde, önerilen Plug-In tasarımının geliştirilerek, üretim tecrübesiyle çekirdek kayıplarının azaltılabileceği ve üretim kolaylığı avantajı ile birlikte, üreticiler için daha rekabetçi bir çekirdek tipi elde edilmesinin mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Transformatör, Joint, akı yoğunluğu, çekirdek kaybı, sonlu elemanlar yöntemi

A New Plug-In Core Design for Three Phase Transformers

Doğancan ÇELEN

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Sibel ZORLU PARTAL

For transformers, E-I type core is one of the most preferred core. As power increases, strip leg-yoke sheets are used for core production and required time increases. At manufacturers where sheets are stacked manually, core stacking process takes important time, and this process may take longer depending on transformer power. It is intended to reduce stacking time and production costs of transformer core with Plug-In design. While designing the Plug-In geometry, joint types in literature were also considered. With Plug-In model it is aimed to reduce stacking flux accumulation and core losses as a result of wide surfaces of the legs consisting of both equal parts instead of the window corner surfaces of the flux.

A prototype transformer with M330-50A electrical sheet was produced in accordance with Plug-In design and the production steps were discussed. Magnetic flux densities, core losses, loss distribution and copper losses were analyzed 2D using the ANSYS Maxwell simulation for Plug-In and E-I core models. In addition, E-I and Plug-In transformers were subjected to no load tests and compared in terms of core losses and efficiency.

In terms of production, it has been determined that one third of the time is required for assembling time of Plug-In core compared to E-I core. According simulation studies, 0.6% higher maximum flux density values are found for Plug-In core compared to the reference E-I model. It has been found that core losses in Plug-In model are 0.1% more than E-I model. As a result of the no load tests for Plug-In core prototype and E-I core transformer, it was observed that Plug-In core has 11.4% higher core losses. Consequently, it was concluded that if proposed Plug-In core design was developed and disadvantages in terms of core losses were eliminated, it would be possible to obtain more competitive core for manufacturers.

Keywords: Transformer, Joint, flux density, core loss, finite element method



1830'larda Michael Faraday'ın, elektromanyetik indüksiyon ilkesini keşfiyle elektriğe ulaşılabilirlik önemli derecede artış göstermiş, elektrik enerjisi gün geçtikçe modern hayatın vazgeçilmez bir unsuru haline gelmiştir. İlk zamanlarda elektrik enerjisi DC (doğru akım) güç şeklinde, yerel, dar kapsamlı ve izole edilmiş güç şebekelerinde kullanılmaktaydı. Ancak bu dönemde enerjinin dağıtım ve iletim aşamaları, yatırım ve işletme bakımından yüksek maliyetler gerektiriyordu. Bunu takiben 19.yy'ın ikinci yarısında güç transformatörlerinin icadıyla ve sabit gerilimli AC (alternatif akım) besleme sistemlerinin geliştirilmesiyle birlikte elektrik enerjisinin alternatif akım ile iletim ve dağıtımı daha verimli ve yaygın bir uygulama şekline dönüşmüştür. Elektrik santrallerinden elde edilen elektrik enerjisinin AC olarak, çok uzaktaki son kullanıcıya kadar düşük kayıplarla iletilmesinde ve dağıtılmasında, transformatörler çok önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak ilk zamanlardan günümüze hem endüstride, hem de artan nüfus ile birlikte son kullanıcılar artan elektrik talebini karşılamak için iletim ve dağıtım sistemleri, boyut ve kapasite bakımından sürekli arttırılmak zorunda kalmıştır. Bunun sonucu olarak günümüzde transformatörler de dahil olmak üzere bu sistemler için, sürdürülebilirliği arttırmak ve elektrik üretiminin sebep olduğu çevreye olumsuz etkileri azaltmak adına sürekli daha yüksek verimlilik standartlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebeple transformatörler için verimliliği etkileyen başlıca faktörlerden olan çekirdek kayıpları, transformatör üreticileri tarafından daha gelişmiş sac malzemesi ve yeni çekirdek, joint tasarımları kullanılarak sürekli azaltmaya çalışılmıştır.

Güç seviyesi ve soğutma şekline bağlı olarak transformatörlerde çeşitli tiplerde çekirdek geometrileri kullanılmaktadır. Her çekirdek geometrisi farklı derecede çekirdek kayıp karakteristiği ortaya koymakla birlikte, ayrı üretim süreçleri ve metodları kullanmayı gerektirmektedir. Güç transformatörlerinde, şerit dilimler halinde kesilmiş elektrik saclar otomatik makineler ile bir araya getirilerek

çekirdek oluşturulurken, örneğin küçük güçlerdeki transformatörler için çekirdek dizilimi hazır bacak boyunduruk saclarının el ile dizilmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Söz konusu küçük güçlü trafo çekirdeklerinin el ile dizilimi uzun zaman gerektirmekte ve yüksek işçilik maliyetlerine sebep olabilmektedir.

1.1 Literatür Özeti

Literatürde şu ana kadar yapılmış olan araştırmalara bakıldığında, transformatör çekirdek dizaynının, manyetik akı dağılımına ve boşta çalışma kayıplarına olan etkisinin incelendiği çok sayıda bilimsel çalışmanın yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda sırayla verilmiştir:

Poveda-Lerma ve Ark. [1] 2017 yılında yaptıkları çalışmada, güç transformatörlerinde sıklıkla kullanılan E-I tip çekirdeklerin Butt Lap (Alternate Lap) ve Butt Edge çeşitlerindeki akı yoğunluğu dağılımlarını incelemişlerdir. Bu çekirdek tipleri üç boyutlu (3D) sonlu elemanlar yöntemi (Finite Element Method-FEM) ile modellenip simüle edilmiş, böylelikle elektrik sac diziliminin ya da bir diğer deyişle laminasyon şeklinin ve bununla birlikte laminasyon sayısının manyetik akı dağılımına etkileri gözlemlenmiştir. Ayrıca bu çekirdek tipleri ve bunların prototiplerinden elde edilen test değerleri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki modelin manyetik akı dağılımları ele alınarak, çekirdek doyumu ve çekirdek kayıplarına ilişkin sonuçlar irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde Alternate Lap yığını ile kurulan çekirdeğin mekanik sağlamlığı arttırdığı ve aynı laminasyon sayısına sahip Butt Edge yığına görece daha az çekirdek kaybına sebep olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak Alternate Lap yığnında bütün akının E ve I bacak-boyunduruk arasındaki hava boşluğundan akı yolunu tamamlamak yerine, buna paralel olarak akının bir bölümünün daha düşük relüktansa sahip olan bir alt ve üst komşu laminasyondan çevrimini tamamlaması olarak gösterilmiştir.

Marketos ve Turgut [2] 2006 yılında yapmış oldukları çalışmada, boşta kayıpları arttırmadan üretim süresini kısaltmak amacıyla, şeritler halinde kesilmiş ve birleştirilmiş elektrik saclarından oluşan yeni bir Sub-Core çekirdek tasarımı yapmışlardır. Çalışmada anizotropik yani tanecik yönlendirmeli çekirdek materyali kullanılmıştır. Çekirdek bacak ve boyunduruk sacları ayrı şeritlere bölünerek, eklem

(joint) bölgelerinde meydana gelen haddeleme yönüne dik olan enine-çapraz akı alanı küçültülüp, çekirdek kayıpları azaltılmaya çalışılmıştır. Sonuçların karşılaştırılabilmesi için Sub-Core çekirdek tasarımı, sıklıkla kullanılan Butt Lap ve Butt Edge çekirdek yapılarının kayıpları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Sub-Core tasarımında, sahip olduğu geometri ve enine akı alanının nispeten az olması sebebiyle, enine akı azaltılmış ve diğer çekirdek konfigürasyonlarına göre çekirdek kayıplarında %18 lik bir düşüş meydana gelmiştir.

2017 yılında Freitag ve Leibfried [3], FEM ve geliştirdikleri özel bir algoritmayı çalışmalarında kullanarak, çekirdek laminasyonunda tek tip sac kullanılmasının yerine, manyetik özellikleri, kilogram başına maliyet ve kayıp güçleri birbirinden farklı sac malzemeleri bir arada kullanarak farklı bir çekirdek oluşturmuşlardır. Farklı manyetik çelik kombinasyonları kullanarak ve üretim maliyetini de gözönünde bulundurarak, aynı malzeme maliyeti ile daha az kayıplı yeni bir tasarım geliştirmişlerdir. Sonuçları karşılaştırılabilmek için, tek tip manyetik sacın kullanıldığı örnek bir klasik yağlı dağıtım transformatörü ele alınmış, çekirdek kayıpları ölçülmüştür. Daha sonra aynı çekirdek maliyetinde kalacak şekilde, çalışmalarında önerdikleri iki farklı sac malzemeyle oluşturulmuş yeni paket çekirdeğin kayıpları hesaplanmıştır. Her iki kayıp hesaplaması karşılaştırıldığında, algoritma ile elde edilen farklı manyetik çelik kombinasyonları ile, maliyet artışı olmaksızın %6.25'e kadar çekirdek kayıplarının azaltılabildiği ve bu yaklaşım ile transformatör maliyetlerinin azaltılabilmesi bakımından avantaj sağlandığı ifade edilmiştir.

1996'da Ilo vd. [4] yürüttükleri çalışmada, çekirdek diziliminde dört temel parametre belirlemişlerdir. Çekirdek sacları arasındaki atlama uzunluğu, bağlantılar arası hava boşlukları, atlama bölümlerindeki kayma uzunluğu ve basamak-atlama sayıları olarak belirledikleri bu dört parametreyi değiştirerek, çekirdek kayıpları, gürültü seviyeleri ve çekirdekteki manyetik akı dağılımındaki değişimleri gözlemlemişlerdir. Çalışmada elde edilen sonuca göre, basamak-atlama sayısı arttıkça, kritik endüksiyon eşiğinin de yükseldiği, böylelikle atlama bölgelerindeki yerel çekirdek kayıplarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca, saclar arası

hava boşlukları kritik endüksiyon seviyesine geldiği durumda, gürültü ve çekirdek kaybının da arttığı gözlemlenmiştir.

Loizos ve ark. 2010 yılında [5] yapmış oldukları çalışmada, dört adet çekirdeğin birbirine sabitlenmesi ile oluşturulmuş 5 bacaklı ve sarılı şekilde bir nüveye sahip transformatör çekirdek yapısı, sonlu elemanlar metoduyla 2D manyetik alan analizi yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışmada sarılı çekirdek yapısının bacak ve boyunduruk bölgelerindeki akı dağılımları ve harmonikleri incelenmiştir. İnceleme sonucunda çekirdekteki akı yoğunluk dağılımının homojen olmadığı, manyetik akının yolunu ve akı çevrimini kenardaki sarılı çekirdekler üzerinden tamamlamadığı gözlenmiştir. Buradan yola çıkarak akı yoğunluğunun merkeze yakın çekirdeklerde daha yüksek olduğu ve böylelikle ısınma değerlerinin de daha yüksek olacağı sonucuna varılmıştır. Bunun yanında bu çekirdek tasarımında, özellikle üçüncü akı harmonik bileşen değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür.

Upadhyay ve ark 2016'da [6] son yıllarda dağıtım transformatörlerinde kullanılmaya başlanan, üçgen şeklinde birleşik bir topolojiye sahip çekirdek yapısını, FEM yöntemiyle modelleyerek simüle etmişlerdir. Simülasyon sonucunda yeni çekirdek yapısına dair elde edilen veriler aynı güçteki tipik bir dağıtım transformatör değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, ilgili üçgen çekirdek yapısının neredeyse ihmal edilecek kadar düşük bir hava aralığına sahip olduğu, böylelikle dağıtılmış akı kayıplarının da (stray kayıpları) azaldığı ortaya konulmuştur. Bununla birlikte üçgen çekirdek yapısında manyetik çevrim ve akının her faza ait bacaklar arasında dengeli dağıldığı, gerekli mıknatıslanma akımının azaldığı görülmüştür. Son olarak aynı güçteki referans çekirdeğe göre önerilen çekirdek modelinin ağırlık bakımından %20 daha az demir malzeme gerektirdiği ve %13 daha az demir kaybına sebep olduğu vurgulanmıştır.

2016 yılında M. Isa ve arkadaşları [7] transformatörlerde sıklıkla kullanılan tipik Butt-Lap ve 90° T joint çekirdek yapısında bir değişiklik yaparak orta bacak boyunduruk bağlantısı için altıgen şeklinde bir T joint önermişlerdir. İlgili değişikliğin etkileri parçaçık yönlendirmeli çelik sac referans alınarak, 3D FEM yönteminin kullanıldığı ANSYS Maxwell yazılımı ile analiz edilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara göre altıgen T joint dizaynında T joint orta bacak ve

boyunduruk arasında dengeli bir akı yoğunluğu dağılımı olduğu gözlenmiştir. Kıyaslama bakımından altıgen joint çekirdek yapısı incelendiğinde, bu bölgede Butt Lap çekirdek yapısına göre %25 daha düşük bir akı yoğunluğu ve %46 daha düşük kaçak akı olduğu bulunmuştur. Böylelikle referans Butt-Lap çekirdek yapısına göre toplam çekirdek kaybında %11.5 azalma görülmüştür.

Ahmad ve ark. 2008 yılında [8] transformatörlerde sıkça kullanılan çekirdek tiplerinden biri olan 90° T joint açısına sahip Mitred Joint konfigürasyonundaki akı yoğunluğu dağılımını incelemişlerdir. Ölçümler yapılırken çekirdekte materyal olarak tanecik yönlendirmeli çelik sac kullanılmıştır ve laminasyonlar tek adımlı şekilde (overlap) üst üste dizilmiştir. Yapılan inceleme sonuçlarına göre; 90° T joint ve köşe joint bağlantı bölgelerinden geçerken akı yoğunluğunun aniden azaldığı, akının laminasyonlar arasından altlı üstlü şekilde dağıldığı görülmüştür. Buna karşın manyetik akı yoğunluğunun joint bağlantı bölgelerinin sargı pencerelerine yakın kısımlarında en yüksek değerine ulaştığı gözlenmiştir. Manyetik akının haddeleme yönünden, en çok köşe jointlerde, boyunduruk bacak geçişi esnasında saptığı belirlenmiştir. Ayrıca adım atlama yani overlap bölgelerinde az da olsa manyetik akının haddeleme yönünden sapmakta olduğu ifade edilmiştir.

2012 yılında [9] Marketos ve arkadaşları, 11 adet farklı genişlikteki tanecik yönlendirmeli paketlerin birleşmesinden oluşan bir çekirdeği test edip, ayrıca akı yoğunluğu ve dağılımını, mıknatıslanma akımını belirleyebilmek için sonlu elemanlar yöntemi ile nümerik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan ölçümler neticesinde, çekirdeğin enine kesiti incelendiğinde, paketler boyunca akı yoğunluğunun homojen olmadığı ve rastgele dağılım gösterdiği, hatta komşu olan paketlerde bile dikkate değer akı yoğunluğu farklılıkları olduğu bulunmuştur. Ayrıca civata deliklerinin bulunduğu bölgelerde, akı yoğunluğunun diğer bölgelere nazaran daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte paketlerdeki civata delik çaplarının paket genişliklerine oranı arttıkça, delikler etrafındaki akı yoğunlukları da yükseldiği için ve çekirdek kayıpları daha da artış göstermiştir. Son olarak çekirdeği meydana getiren paketlerin genişliği arttıkça, relüktans değeri de azaldığından, geniş olan paketlerde akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır.

Çekirdek dizilimindeki laminasyon adımı atlama düzeninin çekirdek kayıplarına etkisini bulmak için Mechler ve Girgis [10], 2000 yılında yaptıkları çalışmada güç transformatörlerinde sıklıkla kullanılan konfigürasyonlardan Non-Step Lap ve Step Lap dizilimli çekirdeklerin joint bölgelerindeki akı dağılımlarını detaylı bir şekilde ortaya koymuşlardır. Non-Step Lap düzeninde manyetik akı, normal endüksiyon değerinde hava aralığına yaklaşırken çoğunlukla alt ve üst laminasyondan yoluna devam eder. Ancak çekirdeğin doyuma yaklaştığı yüksek endüksiyon seviyelerine gelindiğinde, akının artarak hava aralığından yolunu tamamlamaya çalıştığı ifade edilmiştir. Buna karşın Step Lap düzeninde ise akının, hava aralığından tamamiyle ayrı bir biçimde, yoluna diğer komşu alt üst laminasyonlardan devam ettiği ve bu durumda gözlenen laminasyonlar arası akı dağılımının neredeyse eşit olduğu bulunmuştur. Bir diğer avantaj olarak yüksek endüksiyon seviyelerinde bile Step Lap düzeninin oldukça verimli ve düzgün bir akı yoğunluğu dağılımı sağladığı ifade edilmiştir. Araştırmacılar bu durumu, Step Lap çekirdek düzeninin neden daha verimli ve daha düşük kayıplı olduğunun en önemli sebebi olarak açıklamışlardır.

Lundmark ve arkadaşları [11] 2008 yılında yaptıkları çalışmada önerdikleri altıgen kompakt geometriye sahip bir çekirdek yapısı ile geleneksel E tip çekirdek yapısının toplam kayıp değerleri ve diğer parametreler açısından karşılaştırmasını yapmışlardır. Yapılan testler ve 3D FEM tabanlı simülasyon sonuçlarına göre, altıgen çekirdekli transformatörün akı yolunun, aynı güçteki E tip çekirdek yapıları transformatöre göre, görece daha kısa olduğu ve bundan dolayı mıknatıslanma akımının %40 daha düşük olduğu bulunmuştur. Ağırlık kıyaslamasına bakıldığında ise, altıgen çekirdek yapısının ağırlığının, görece olarak tipik çekirdek yapısına göre %12 daha hafif olduğu görülmüştür. Yine yapılan ölçümler neticesinde altıgen çekirdek yapısında, geleneksel E tip çekirdek yapısına göre, çekirdek kayıplarında %25 oranında bir azalma olduğu sonucuna varılmıştır.

2019 yılında [12] Alyozbaky ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarında optimum ve minimum kayıplı T joint dizaynını bulmak amacıyla parçacık sürü optimizasyonu adı verilen bir algoritmadan faydalanmışlardır. Algoritma çıktısından elde edilen 51°-129° lik T joint modeli 3D sonlu elemanlar yöntemi baz alınarak ANSYS Maxwell yazılımı kullanılarak simüle edilmiş, ayrıca karşılaştırılma yapılabilmesi için

referans geometri olarak, sıklıkla kullanılan 90° joint açısına sahip Butt Lap çekirdek yapısı belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, önerilen tasarımda, referans olarak belirlenen Butt Lap çekirdek yapısına kıyasla boşta kayıplarda %12, toplam kayıplarda ise %16 oranında azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca simülasyon ve ölçümler neticesinde, lokal çekirdek sıcaklıkları, sargı sıcaklıkları ve yağ sıcaklık artışı bakımından referans Butt Lap yapısına göre, önerilen tasarımın daha az ısınma eğilimi gösterdiği görülmüştür.

2015 yılında Tang ve ark. [13] yaptıkları bu çalışmada, transformatörlerde sıklıkla kullanılan diğer bir tür olan 45° mitred joint yapısını ele almışlardır. Laminasyon yığınlarının adım-basamak sayılarına göre, tek adımlı Single Step Lap ve çok adımlı Multi Step Lap dizilimlerinde akı yoğunluğu dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmişlerdir. Çekirdek materyali olarak tanecik yönlendirmeli anizotropik çelik sac tercih edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde anlaşılmaktadır ki; Single Step dizilimli çekirdek yapısında, manyetik akının laminasyon üzerinden hava boşluğuna yaklaştıkça haddeleme yönündeki akısı azalmakta, hava aralığından az miktarda manyetik akı geçmekte ve manyetik akı komşu laminasyonlar üzerinden yoluna devam etmektedir. Yine aynı Single Step Lap yapısında hava aralığı dikey ekseninde, altındaki ve üstündeki laminasyonlarda bölgesel yüksek endüksiyon ve aşırı doyum bölgeleri görülmüştür. Multi Step Lap dizilimde ise gözlenen bölgesel en yüksek akı yoğunluğu Single Step Lap'e göre %30 daha düşük olduğu ve hava aralıklarından neredeyse hiç manyetik akı geçmediği görülmüştür.

Haidar ve Al-Dabbagh [14] 2013 yılında yaptıkları çalışmada, 23° 45° 60° ve 90° T joint açılara sahip çekirdek konfigürasyonlarının yerel akı dağılımları ve kayıp hesaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Joint konfigürasyonlarına ait nicel analizler, Quickfield adlı sonlu elemanlar yöntemi tabanlı simülasyon programından alınan verilerle yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre dört konfigürasyon arasında kaydedilen en yüksek akı yoğunluğu ve enerji yoğunluğu 90° jointte iken, en düşük akı yoğunluğu ve enerji 60° joint'de görülmüştür. En yüksek enerji yoğunluğunun 90° jointte olmasının sebebini de, rotasyonel akının en çok 90° jointte meydana gelmesi olarak açıklamışlardır. Çekirdekte enerji yoğunluğu arttıkça, transformatör çekirdek kayıplarının da artacağı vurgulanmış, böylelikle dört adet çekirdek

geometri arasında en avantajlı T joint tipinin 60°'lik olan olacağı öngörülmüştür. Ancak bu karşılaştırma, trafo çekirdek boyutu ve bacak genişlikleri azaltılıp, boyut küçültülüp aynı joint tipleri için yapıldığında, 45° ve 90° jointlerde, 60° jointten daha az çekirdek kaybı meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

2018'de Alyozbaky ve ark. [15] üzerinde daha önce sıklıkla durulan T joint yapısı için küre şeklinde yeni bir geometri önerisi getirmişlerdir. Önerilen küresel T joint konfigürasyonu geleneksel 45° Mitred Lap ve 90°'lik Butt Lap dizaynlar ile akı dağılımı, kayıplar ve ısı analizleri açısından karşılaştırılmış ve 3D sonlu elemanlar yöntemi baz alınarak simüle edilmiştir. Çalışmada önerilen küresel T joint ile, bacak ve boyunduruk arasında daha geniş bir yüzey alanı elde edilerek manyetik akının dar bir alana yığılmasının önüne geçilmiştir. Manyetik akı geçişi bu sayede daha homojen olmuştur. Simülasyon sonuçları ele alındığında, maksimum akı yoğunluğunun 60° joint tipinde, diğer geleneksel konfigürasyonlara kıyasla %23 daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca önerilen küresel joint dizaynında 45° joint tipine göre %10 ve 90° joint tipine göre %6, daha az çekirdek kaybı değeri ölçülmüştür. %30 dan %100'e kadar bütün yüklü çalışma senaryolarında ise aynı şekilde önerilen küresel joint dizayn modelinde toplam kayıpların daha az olduğu görülmüştür. Son olarak tam yüklü çalışma senaryosunda, önerilen küresel joint yapısının, diğer 45° ve 90° joint yapılarına göre 5°C daha az yağ sıcaklık artışına sebep olduğu, transformatör üzerindeki ısı etkileri açısından da avantaj sağladığı ifade edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Küçük güçlerdeki (50kVA'ya kadar) kuru tip üç fazlı transformatörler için E-I tipi çekirdek geometrisi sıklıkla tercih edilen çekirdek türlerinden biridir. E-I tip çekirdek, E şeklinde bacak ve I şeklindeki boyunduruk laminasyon saclarının karşılıklı olarak istiflenmesi ile meydana gelmektedir. Ancak sacların el ile istiflendiği işletmelerde sac dizilim işlemi önemli bir zaman teşkil etmektedir. Bu tez çalışmasında bu noktadan yola çıkarak elektrik saclarının istifleme süresini ve üretim maliyetlerini azaltmak adına, üç fazlı transformatörler için de uygulanabilir olması amaçlanan Plug-In (geçmeli) çekirdek tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Plug-In çekirdek geometrisi dizayn edilirken literatürde yer alan joint bağlantı şekilleri araştırılmış ve bunların manyetik akı yoğunluğuna, çekirdek kayıplarına olan etkileri incelenmiştir. Çekirdeği oluşturan bacak boyunduruk laminasyonları arasındaki yüzey arttıkça akı yoğunluğu ve çekirdek kayıplarının azalacağına işaret eden çalışma [14] ayrıca dikkate alınarak verimliliğin arttırılması amaçlanmıştır. Oluşturulan Plug-In çekirdek tasarımıyla birlikte akının dar pencere köşe yüzeyleri yerine her iki eş parçadan oluşan bacakların geniş yüzeyleri yardımıyla akı yığılmasının ve çekirdek kayıplarının azaltılması beklenmektedir.

İstenilen Plug-In çekirdek tasarımına uygun şekilde, yönlendirilmemiş tanecik yapılı M330-50A elektrik sacına sahip üç fazlı bir transformator prototip olarak üretilmiş ve üretim aşamalarına değinilmiştir. Önerilen Plug-In çekirdekli ve aynı etiket değerlerine sahip referans bir E-I çekirdekli transformator ANSYS Maxwell simülasyon programı kullanılarak manyetik akı yoğunlukları, çekirdek kayıpları ve çekirdek kayıplarının oluştuğu lokal bölgeler 2D olarak analiz edilmiştir. Ayrıca Plug-In çekirdekli prototip ile birlikte aynı etiket değerlerine sahip referans E-I çekirdekli transformator boşta çalışma testlerine tabi tutularak çekirdek kayıpları açısından karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmada, küçük güçteki üç fazlı transformatorlere ait çekirdek montajının el ile yapıldığı işletmelerde sıklıkla kullanılan E-I laminasyonlu çekirdek tipine alternatif olarak, üç fazlı transformatorlerde kullanılabilen ve çekirdek montaj süresini üçte birine kadar azaltabilecek Plug-In çekirdek modeli önerilmektedir. Özellikle daha büyük güçteki transformator çekirdekleri için düşünüldüğünde, çekirdek montaj ve istifleme süre bakımından bu oranın üçte bir oranından daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Önerilen Plug-In çekirdek modeli ile birlikte transformator üretim sürecinde zaman olarak önemli bir yer tutan çekirdek imalat süreleri düşürülebilecek, böylelikle gerekli işgücü maliyetleri açısından iyileştirme yapılabilecektir. Bunun dışında birim süre içerisinde daha fazla sayıda transformator üretimi mümkün olabilecektir.

Üretim sürecine dair olumlu etkilerin dışında elektriksel olarak bakıldığında Plug-In çekirdeğin, sıklıkla kullanılan E-I tip çekirdeğe göre çok daha geniş bir joint bağlantı yüzeyine sahip olması sebebiyle, çekirdek köşe bölgelerinde daha düşük manyetik akı yoğunluğu ve lokal çekirdek kayıpları oluşturması, böylelikle çekirdek ve boşta kayıplar bakımından daha avantajlı olması beklenmektedir.



2

TRANSFORMATÖRLER

19. yüzyılın sonlarından günümüze kadar, öncelikle elektrik enerjisinin iletim, üretim, dağıtım süreçlerinde ve elektriğin neredeyse adının geçtiği bütün uygulamalarda kullanılan transformatörü en genel anlamda tanımlayacak olursak, şöyle bir açıklama yapılabilir: Bir devredeki elektrik enerjisini sabit frekans altında başka bir devreye elektromanyetik endüksiyon yoluyla aktarmaya ve gerilim-akım değerini şebekeler arasında artırıp azaltmaya yarayan hareketsiz elektrik makinalarına transformatör adı verilir. [16]

Özellikle iletim ve dağıtım şebekelerinde gerilim yükseltici ve düşürücü uygulamalarda, işletmelerin verimliliği açısından, yüksek verimli transformatör kullanmak büyük öneme sahiptir. Kullanım alanlarına ve güç değerlerine göre transformatörlerin verimliliği %99'a kadar arttırılabilmektedir [14]. Şekil 2.1 de 40 MVA gücünde 3 fazlı yağlı tip bir transformatörün dış görünümü verilmiştir.



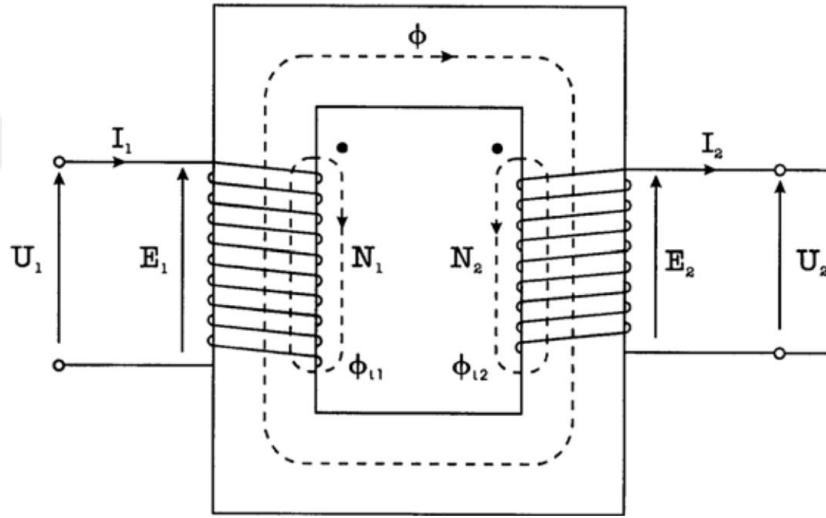
Şekil 2.1 Üç fazlı güç transformatör örneği [17]

2.1 Transformatör Çalışma Prensibi

Aşağıda Şekil 2.2'de demir çekirdek (nüve) üzerine sarılmış olan N_1 sarım sayılı primer sargıya alternatif gerilim uygulandığında, sargı üzerinde H (A/m) manyetik alan oluşur. Böylece nüve üzerinden, malzemenin manyetik geçirgenliğiyle doğru orantılı olarak Φ manyetik akısı akar. Söz konusu manyetik akı çevrimini ve yolunu nüve üzerinden tamamlar. Primer sargının enerjilendirilmesi ile oluşturulan Φ manyetik akısının, N_2 sarım sayılı sekonder sargıyı kesmesi ile sargı üzerinde E_2 elektro motor kuvveti (EMK gerilimi) endüklenir. Sekonder sargı üzerindeki N_2 sarım sayısına bağlı olarak sekonder sargı uçlarında U_2 gerilimi oluşur ve I_2 akımı akar [18].

$$E_1 = 4.44. N_1. f. \Phi. 10^{-8} \quad (1.1)$$

$$E_2 = 4.44. N_2. f. \Phi. 10^{-8} \quad (1.2)$$



Şekil 2.2 Tek fazlı transformatör nüve ve sargıları [19]

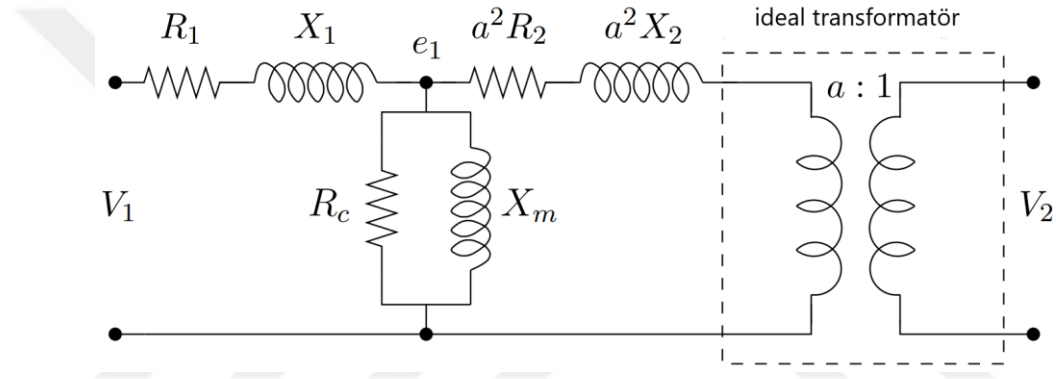
Primer sargılara uygulanan alternatif gerilimin şiddeti ve yönü sinusoidal olarak sürekli değiştiği için bununla birlikte meydana gelecek akımın da şiddeti ve yönü değişecektir. Böylelikle sekonder sargılar üzerinde aynı şekilde sinusoidal gerilim endüklenecektir.

Transformatörün eğer primer sargılarına doğru gerilim uygulandırsa, kısa süreli de olsa bir manyetik alan meydana gelecektir. Ancak oluşan bu manyetik alan, sabit bir

alandır. Üretilen manyetik alanın yönü ve şiddeti de sabit olduğu için, sekonder sargıları kestiğinde yalnızca çok kısa bir süre için anlık olarak elektro motor kuvvet (emk) endüklenmesi söz konusu olacaktır [20]. Dolayısıyla transformatörler yalnızca alternatif gerilim ve sabit frekans ile kullanılabilirlerdir.

2.2 Transformatör Eşdeğer Devresi

Tasarım yapmadan önce bir transformatör eşdeğer devresini anlamak, transformatörün kullanılacağı şebekenin karakteristik ihtiyaçlarını karşılamak açısından önem arz etmektedir. Aşağıda Şekil 2.3'de ideal bir transformatörün primer sargısı referans alınarak çizilmiş eşdeğer devre örneği verilmiştir.



Şekil 2.3 Primer sargısının referans alındığı eşdeğer devre örneği [21]

$$\frac{V_1(t)}{V_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.1)$$

$$\frac{I_1(t)}{I_2(t)} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.2)$$

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (2.3)$$

$$P_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (2.4)$$

İdeal bir transformatörden bahsederken kayıpları olmadığı farz edilir [22], yani P_1 giriş ve P_2 çıkış güçlerinin eşit olduğu varsayılır. Yani gösterim kolaylığı ve eşdeğer devrenin temel bağıntılarını anlamak açısından transformatörün kayıpsız olduğu kabul edilir. Ancak pratikte çekirdek ve sargı kayıpları söz konusu olduğundan ilerleyen bölümlerde kayıplar da göz önüne alınıp, anlatılacaktır.

2.3 Transformator Yapısı ve Kullanılan Malzemeler

Küçük güçteki dağıtım transformatörlerinden, üretim ve iletim tesislerindeki büyük güçteki güç transformatörlere kadar, bütün transformatörleri oluşturan yapılar, üretim süreçleri ve kullanılan malzemeler en temelde büyük benzerlikler göstermektedir [23]. Ancak kullanılacak transformatörün tipine, gücüne, gerilim değerine, şebekedeki görevine, soğutma şekline, izolasyon gerekliliklerine, çevre şartlarına vb. göre yapısal farklılıklar mevcut olabilmektedir. En genel anlamda tüm transformatörler için en basit tanımla, üst üste dizilmiş ince manyetik saclardan meydana gelen bir nüve, bu nüvenin bacakları üzerinde sarılı, birbirine göre yalıtılmış iki veya daha fazla sayıdaki sargılardan oluşan güç aktarım elemanları denilebilir. Bundan dolayı bu bölümde temel bileşenleri anlamak açısından yalnızca sargı, çekirdek özellikleri ile bu elemanlarda kullanılan malzemeler ele alınacaktır.

2.3.1 Transformator Sargıları

Bir fazlı ya da üç fazlı olsun, bütün transformatörlerde akım taşıyan, primer ve sekonder olarak iki bölümden oluşan ve üzerinde genellikle toplam kayıpların çoğunun meydana geldiği yapılar sargılardır. Materyal olarak genellikle bakır, bazı durumlarda ise alüminyum kullanılmakla beraber, sarımlar arasında akım geçişi olmaması adına, sargıları oluşturan bütün sarım iletkenleri birbirinden yalıtılır. Akımın ve gerilimin düşük olduğu küçük güçteki trafolarında, bobin telleri kullanılıp komşu sarımlar arası izolasyon, emaye tabaka kaplanması ile mümkün olurken, akım ve gerilimin yüksek olduğu dağıtım ve güç trafolarında, dikdörtgen kesitli şerit iletkenler kullanılarak izolasyon, yağ emdirilmiş kağıtlar ve izolasyon çitaları ile sağlanmaktadır [24].

Kaçak akıyı minimize etmek için primer ve sekonder sargılar eş merkezli olacak şekilde dizilirler. Bununla birlikte çekirdeğe karşı kolay izolasyon sağlayabilmek ve transient akımların etkisini azaltmak için genellikle alçak gerilim sargıları çekirdek bacaklarının hemen üzerine yerleştirilir ve yüksek gerilim sargıları en dış kısımda bulunur. Ayrıca yüksek gerilim sargılarının dışarıda bulunması, kademe değiştiricili transformatörlerde ayar sargı çıkışlarının bağlanmasına olanak sağlar [25].

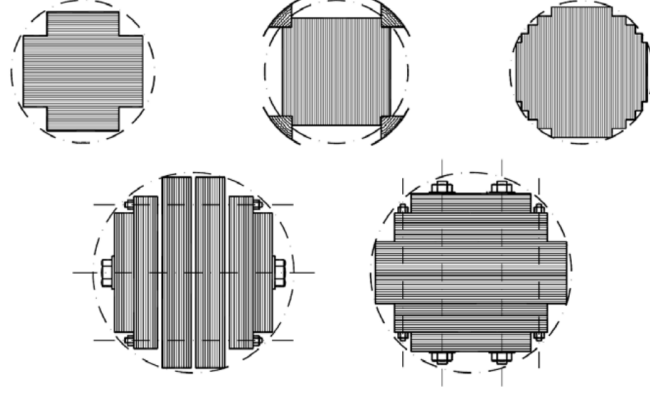
kullanılmaktadır. Büyük güçteki trafolar da alçak gerilim sargılarından daha da büyük akım geçeceğinden artık klasik dikdörtgen şerit iletken kullanmak yerine transpoze iletken kullanılır. Bunların yanında transpoze iletken kullanmanın, sargılar üzerindeki eddy kayıplarını düşürmek ve kısa devre durumundaki mekanik dayanımını yükseltmek gibi bazı diğer faydaları da mevcuttur [27].

Sargıların transformatörlerin soğutulmasında da önemli bir rol oynadıkları söylenebilir. Yükte kayıplar en çok sargılarda olduğundan dolayı, en yüksek sıcaklık artışları sargılarda meydana gelmektedir. Örneğin güç transformatörlerinde sargı sıcaklık dereceleri tam yükte 180°C'ye kadar çıkabilir. Bu sebeple sargıların konveksiyon yoluyla hareket eden yağ ile etkili bir biçimde soğutulabilmesi için sargı içlerinde soğutma ve yağ yönlendirme kanalları bulunur [28].

2.3.2 Transformatör Nüve Yapısı

Transformatör çekirdeği, sargılar arasında en düşük kayıp olacak şekilde iyi bir manyetik bağlantı ortaya koymalıdır. Bunun için tek blok olarak elektrik sacı kullanıp, yüksek eddy kayıplarına neden olmak yerine, ince ve çok sayıda lamine elektrik saclarının istiflenmesi ile nüve yapıları oluşturulmaktadır [27]. Lamine saclar istiflendikten sonra transformatör kazanı ile birlikte elektriksel olarak bağlanır ve topraklanır. Üzerine faz sargılarının giydirildiği istiflenmiş laminasyon grubuna bacak adı verilirken, bacakların aşağıdan yukarıdan birleştirilip manyetik akı yolunun tamamlandığı laminasyon bölümü boyunduruk olarak adlandırılır.

Transformatör gücü arttıkça çekirdek bacağı için ihtiyaç duyulan laminasyon paketleri de değişecek ve farklı genişlikteki kombinasyonlar bir araya gelecektir. Laminasyon paketlerinin birleşimi sonunu ortaya çıkacak bacak ve boyunduruk şekli silindirik, kare ya da dikdörtgene benzeyen formlarda olabilir. Bu formları belirleyen faktörlerden birisi de kullanılacak sargıların ve izolasyon malzemelerinin yerleşimleridir. Şekil 2.5'te örnek olarak kullanılan değişik transformatör bacaklarının enine kesitleri görülebilir.

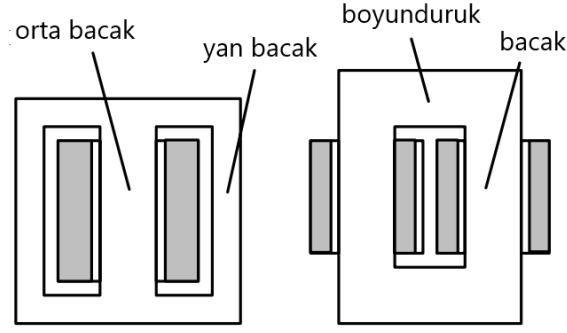


Şekil 2.5 Çeşitli nüvelerin enine kesitleri

Çekirdeği oluşturan lamine saclar birbirinden elektriksel olarak yalıtılmış şekilde ve %3-6 oranında bir silisyum katkısı ile imal edilirler. Laminasyonlar arası elektriksel izolasyon, imalat sürecinde saclar üzerine 2-3 µm kalınlıkta fosfat katkılı cam bir film tabaka giydirilmesi ile sağlanır [29]. Silisyum katkısı çekirdeğin omik direncini arttırarak eddy kayıplarını azalttığı gibi, transformatör çekirdeki yaşlanma etkilerini de azaltmaktadır. Bunun yanında çekirdek kayıplarını daha da azaltmak amacıyla imalat şekli bakımından soğuk-sıcak haddelenmiş, tanecik yönlendirilmiş, tanecik yönlendirilmemiş ve lazer kesimli saclar sıklıkla kullanılırlar [30]. İlerleyen bölümde tanecik yönlendirme yapısı bakımından saclar ayrıca ele alınacaktır.

2.3.2.1 Transformatör Nüve Çeşitleri

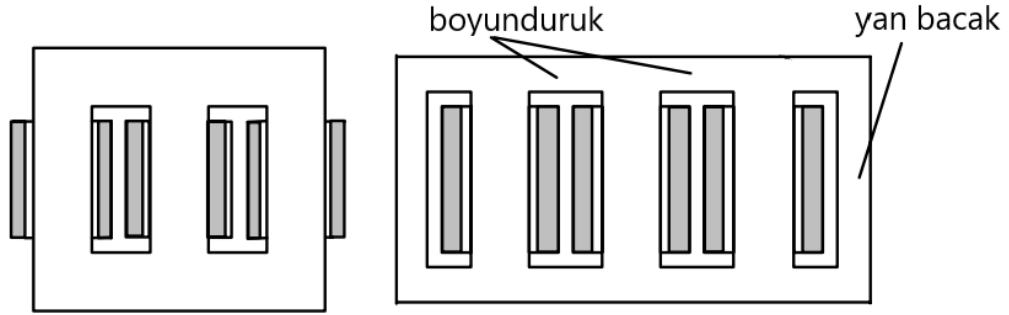
Trafolarada çekirdek ve mantel tipi olarak adlandırılan iki adet nüve yapısı mevcuttur [30]. İmalat bakımından avantajlı oldukları, soğutma performanslarının daha iyi ve tamir edilmeleri daha basit olduğu için çekirdek tipi transformatörler daha fazla tercih edilmektedirler.



a) Mantel Tip Nüve b) Çekirdek Tip Nüve

Şekil 2.6 Tek fazlı transformatör çekirdek yapıları [30]

Şekil 2.6(a)'da bir fazlı transformatöre ait mantel tipi nüve yapısı, Şekil 2.6(b)'de ise çekirdek tipi nüve yapısı gösterilmiştir. Şekil 2.6(a)'dan verilen mantel tipi çekirdek yapıda sargılar orta bacak etrafına sarılmıştır ve yan bacaklar ve boyunduruk kısmı, orta bacağına göre daha dar yapıdadır. Manyetik akı her iki yan bacak arasında yarı yarıya paylaşılacaktır. Şekil 2.6(b)'de verilen çekirdek tip nüvede ise bacak ve boyunduruk genişlikleri eşittir ve yüksek güce sahip tek fazlı transformatörlerde bu yapı tercih edilmektedir. Genel olarak bakıldığında mantel tip çekirdek yapısı kısa devre kuvvetlerine karşı çekirdek tipine nazaran daha dayanıklıdır [30].



a) Üç Bacaklı Nüve b) Beş Bacaklı Nüve

Şekil 2.7 Üç fazlı transformatör çekirdek yapıları [30]

Şekil 2.7(a)'de üç fazlı transformatöre ait üç bacaklı nüve yapısı, Şekil 2.7(b)'de ise beş bacaklı nüve yapısı gösterilmiştir. Şekil 2.7(a)'da verilen üç bacaklı nüve yapısı küçük ve orta güçteki transformatörler için çok yaygın şekilde tercih edilmektedirler. Her faz için baccaktan çıkan akı, diğer iki bacak üzerinden çevrimini

tamamlayıp dönmektedir. Bacaklar ve boyunduruk genişliklerine bakıldığında, bu tür için eşit olduğu söylenebilir. Üç fazlı üç bacaklı nüve yapısının doğasından gelen bir olay mevcuttur. Üç faz asimetrisi sonucu fazlar arasında dengesiz çalışma akımları ve kayıplar gözlenmektedir. Bu durum şu şekilde de açıklanabilir; yan bacaklardaki sargılardan geçen akımlar eşit olmakla beraber, orta bacakta bulunan faz sargısından daha düşük akım geçmektedir. Bunun sebebi de, ortak empedansların ve dolayısıyla relüktansların bütün fazlar için eşit olmamasıdır [31]. Bu durum dezavantaj yaratmasına rağmen, ekonomik olarak ucuz, ağırlık bakımından hafif olduğu için ve daha az atık malzemeye sebebiyet verdiği için üç fazlı transformatörlerde üç bacaklı çekirdek yapısı sıklıkla kullanılmaktadır.

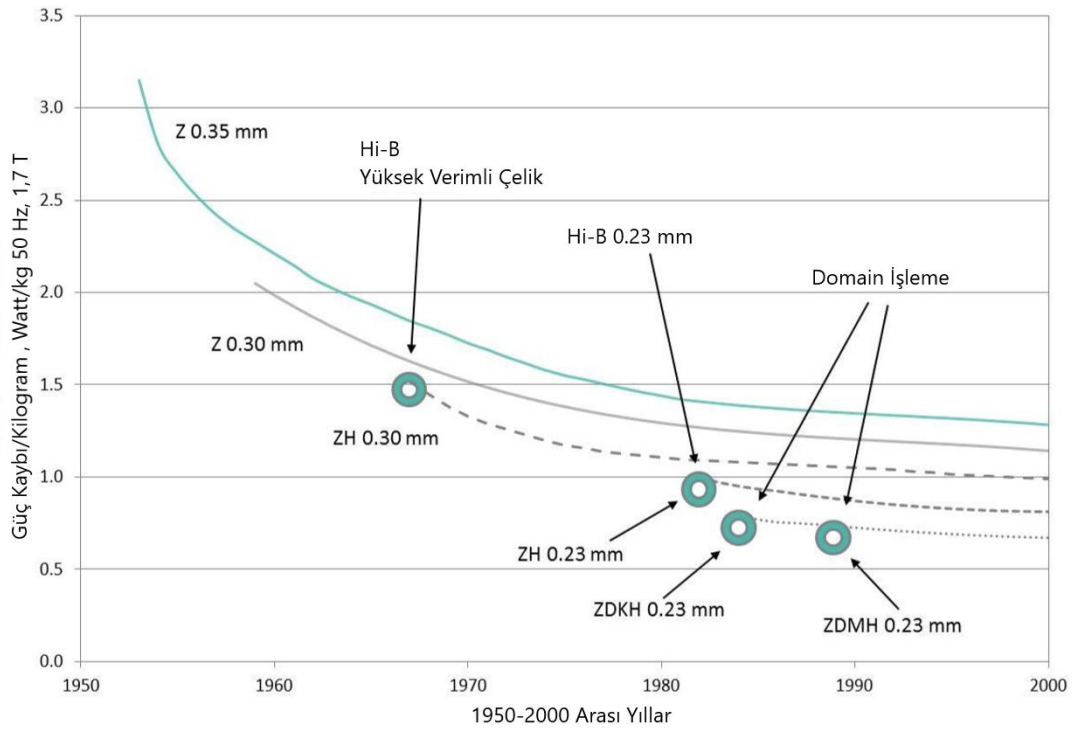
Şekil 2.7(b)'de üç fazlı beş bacaklı nüve yapısı daha çok yüksek güçteki üç fazlı transformatörler için tercih edilmektedir. Bu tip beş bacaklı nüve yapısına sahip transformatörler taşıma kolaylığı açısından aynı güçteki üç bacaklı transformatörlere göre daha alçak boyutlara sahiptirler. Bu yapı için yan boyunduruk ve yan baktan oluşan akı yolu orta boyunduruğa göre daha yüksek bir relüktansa sahiptir. Bundan dolayı akı yükselecek ve öncelikle düşük relüktanslı orta boyunduruk rotasında daha yüksek bir manyetik akı yoğunluğu ve çekirdek kaybı oluşacaktır. Bu etkiyi telafi etmek adına ana boyunduruk genişliği ana bacak genişliğinin %60'ı, yan bacakların genişliği de ana bacakların %50'si olacak şekilde tasarlanır [30].

2.3.3 Transformatör Nüve Malzemeleri

Daha önce bahsedildiği üzere transformatörlerde verimli ve girdap kayıplarının minimum olduğu bir güç aktarımı yapabilmek için, tek bloktan oluşan demir nüve kullanmak yerine, 0,20 mm ve 0,5 mm arasında değişik kalınlıklarda ince lamine sac paketleri kullanılmaktadır [32]. Boşta kayıpları etkileyen faktörler göz önüne alındığında ise malzeme cinsinin boşta kayıpları etkileyen en önemli parametrelerden birisi olduğu bilinmektedir [14]. Bundan dolayı çekirdek üreticileri 20. yüzyılın ilk çeyreğinden bu yana malzeme bilimindeki gelişmelerin de

yardımıyla, çekirdek malzemesinin manyetik özelliklerini geliştirerek boşta kayıpları azaltmaya çalışmaktadır [33].

Aşağıda Şekil 2.8'den görülebileceği gibi 1950'li yıllardan beri uygun üretim teknikleri ile elektrik saclarının kalınlıkları azaltılabilmektedir. Bu gelişmeler sürerken malzeme biliminin de yardımıyla daha yüksek manyetik özelliklere sahip malzeme kullanımı mümkün olmuştur. Böylece daha ince ve daha nitelikli malzeme kullanımının sonucu olarak kilogram başına çekirdek güç kayıpları oldukça düşük seviyelere çekilebilmiştir.



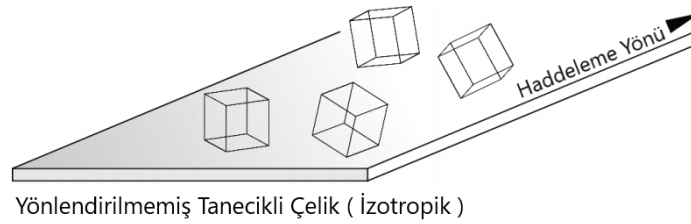
Şekil 2.8 Elektrik sac kayıplarının yıllara göre değişimi [34]

Ancak şunu da belirtmek gerekir ki, materyal maliyetleri bakımından en büyük maliyeti manyetik çekirdek oluşturduğundan [35], bütün transformatörler için en iyi manyetik özelliklere sahip ve üstün performans veren elektrik sacı kullanmak, gerek günümüz serbest piyasa rekabeti, gerekse maliyetler açısından en makul tercih olmayacaktır. Bundan dolayı transformatör üreticileri tarafından teknik gerekliliklere optimum çözüm getirecek şekilde, uygun manyetik özelliklere sahip, gerektiğinde orta-düşük kalite elektrik sacları kullanılabilir.

Bugün çekirdek malzemesi olarak genellikle silisli saclar kullanılmakla beraber, son yıllarda dikkat çeken ve piyasada kendine yer bulan çok düşük kayıp değerlerine sahip amorf metal alaşımlar da transformatör çekirdeklerinde kullanılmaya başlanmıştır [36]. Bir sonraki bölümde en sık kullanılan silisyum katkılı saclar olan tanecikleri yönlendirilmemiş ve tanecikleri yönlendirilmiş elektrik çelikleri genel olarak ele alınacak ve ayrıca amorf metal alaşımlar kısaca incelenecektir.

2.3.3.1 Yönlendirilmemiş Elektrik Çelikleri

Elektrik saclarının tamamında Şekil 2.9'daki gibi tanecikli ve çoklu kristalize yapılar olduğu bilinmektedir. Üretim aşamaları esnasında tanecikli yapı dizilimine müdahale edilmemiş veya bununla ilgili özel bir procesten geçmeyen elektrik sacları yönlendirilmemiş çelik sınıfına girmektedir [37]. Yönlendirilmemiş tanecikli ya da non-grain oriented olarak bilinen elektrik saclarının yapısında genellikle %0-%3,5 arasında silisyum katkısı bulunmaktadır. Bu değer aralığında malzemedeki silisyum oranı arttıkça malzemenin manyetik özellikleri olumlu yönde değişim göstermektedir. Aynı zamanda bu elektrik çeliklerinin kristalleri farklı doğrultularda yöneldiğinden, bütün yönlerde aynı manyetik özelliği gösterirler, bundan dolayı izotropik malzeme sınıfına girerler [38].



Şekil 2.9 Yönlendirilmemiş elektrik çeliği tanecik dizilimi [39]

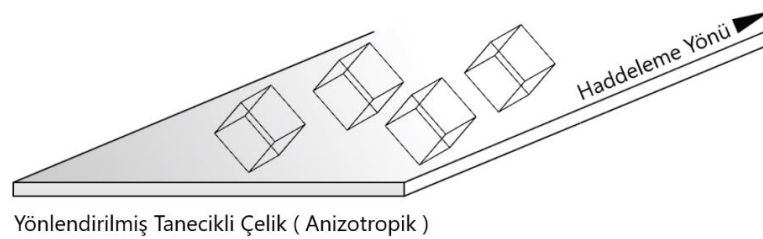
Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin ilk ortaya çıktıkları 20. yüzyılın başında yalnızca sıcak haddeme teknikleri ile üretilebilmeleri söz konusuydu. Sonradan bir dizi saflaştırma, tanecik büyütme ve soğuk haddeme teknikleri ile daha az kayıplı hale gelmeleri mümkün olmuştur. Üretildikleri 1920'li yıllarda 1.5 T, 50 Hz

altında 7 W/kg gibi bir kayıp değerine sahip iken, bugün bu değer 2-3 W/kg aralığına indirilebilmektedir [40].

Yönlendirilmemiş tanecikli elektrik çelikleri güç ve dağıtım transformatörleri yerine genellikle küçük güçteki trafolar, kaynak transformatörleri, elektrik motorları ve generatörlerde kullanılmaktadır [40]. Ayrıca bu tip elektrik çelikleri, yönlendirilmiş tanecikli çeliklere göre %25 kadar daha az maliyete sebep olmaktadır [38]. Bu sebeple yüksek teknik gereksinimlere sahip olmayan transformatörlerde veya uygulamalarda tercih edilirler.

2.3.3.2 Yönlendirilmiş Elektrik Çelikleri

Elektrik çeliklerinde kristalize taneciklerin dizilimi Şekil 2.10'dakine benzer çoğunlukla belirli bir yönde eğilim gösteriyorsa bu malzemenin anizotropik özellikte olduğu söylenebilir [41]. 20.yy'ın ilk çeyreğine kadar demir ve silisli demir kristallerinin yüksek manyetik anizotropik yapıları da sahip olduğu ortaya konulmuştur. Bunun üzerine Norman Goss silisli sacların 2 mm kalınlığa kadar sıcak haddeleme ve sonrasında 0,3 mm- 0,5 mm kalınlığa kadar soğuk haddeleme prosesi esnasında haddeleme yönünde manyetik alana maruz bırakılmasıyla, malzemenin manyetik özelliklerinin aynı haddeleme yönünde iyileşme gösterdiğini keşfetmiştir. [37].



Şekil 2.10 Yönlendirilmiş elektrik çeliği tanecik dizilimi [39]

1950'li yıllarda soğuk haddeleme tekniklerinin giderek gelişmesiyle tanecikleri yönlendirilmiş elektrik çeliklerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bunu takiben 1970'li yıllarda yüksek geçirgenlikli HI-B sacların ve 1980'li yıllarda lazer kesimli

domain arındırma yöntemlerinin getirilmesiyle, 3,5 W/kg çekirdek kayıp seviyesinden 0,85 W/kg değerlerine kadar inilmesi mümkün olmuştur [42].

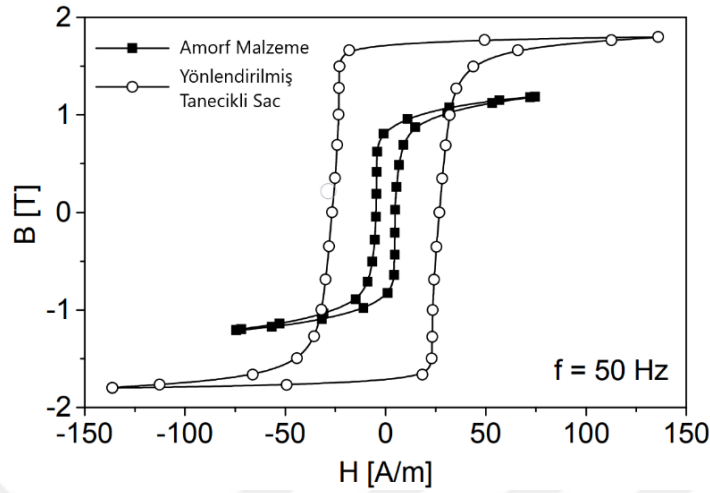
Kullanım amacı olarak çok düşük mıknatıslanma kayıpları ve özellikle yüksek manyetik geçirgenlik elde etmek öncelikli amaç olduğunda, yönlendirilmiş elektrik çelikleri veya diğer bir deyişle anizotropik çelikler öne çıkmaktadır [41]. Düşük kayıp avantajları ile bu tip elektrik çelikleri genellikle 0,23 mm ve 0,50 mm kalınlıklarında olmak üzere sıklıkla güç transformatörleri ve dağıtım transformatörlerinde kullanılmaktadır. Yönlendirilmiş elektrik çelikleri manyetik akı yönünün haddeleme yönünde olacağı uygulamalarda düşük çekirdek kaybı ve yüksek permeabilite özellikleri ile avantaj sağlamaktadır. Ancak manyetik akının sürekli yön değiştireceği motor, generatör vb. uygulamalarda manyetik geçirgenlik ciddi şekilde düşeceği ve mıknatıslanma kayıpları artacağı için tercih edilmezler.

2.3.3.3 Amorf Metal Alaşımlar

Demir, Nikel, Kobalt gibi metaller ve Fosfor, Bor, Karbon gibi diğer elementlerin farklı oranlar ile bir araya gelerek oluşturdukları alaşımların eritilmiş halde çok süratli bir şekilde soğutulmalarıyla amorf malzemeler elde edilir. Bu alaşımın kimyasal birleşiminde genellikle %80 Metal ve %20 diğer elementler bulunur. Yüksek hızlı soğutma prosesi sonucunda metal alaşımın fiziksel yapısı silisli saçlardaki gibi kristalize tanecikli yapıya sahip olmadığı için bu tip malzemeler amorf olarak adlandırılırlar [36]. 1970'li yıllarda amorf malzemelerin manyetik özelliklerinin keşfedilmesinden itibaren transformatör çekirdek malzemesi olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Çekirdek kaybı açısından bakıldığında amorf metal alaşımlar, düşük histeresiz kayıplarına sahiptir. Yine bu malzemelerin yüksek omik direncine ve genellikle 0.025 mm gibi çok ince bir laminasyon kalınlığına sahip olması da, aynı şekilde düşük girdap akımı kayıplarının düşük olmasına yol açar [36]. Amorf saclar için bahsedilen kalınlık, standart silisli sacların yaklaşık onda biri kadardır. Örneğin 1991 yılında yapılan bir çalışmada standart yönlendirilmiş tanecikli silisli sac

kullanımına karşılık, amorf alaşım kullanıldığında boşa kayıplarda %60- %70 azalma görülmüştür [43].



Şekil 2.11 Amorf malzeme-Silisli Sac histeresiz eğrisi [42]

Şekil 2.11'den görüleceği üzere amorf malzemenin histeresiz kayıp alanı silisli saclara nazaran oldukça düşüktür. Ancak histeresiz eğrisi incelendiğinde, amorf malzemenin doyma noktasına, standart silisli saclara nazaran daha çabuk ulaştığı bir dezavantaj olarak görülebilir. Bir diğer dezavantaj olarak, amorf malzemelerin düzenli tanecikli yapıya sahip olmamalarından dolayı, fiziksel stres altında kaldıklarında, güç kayıplarının standart silisli saclara nazaran daha fazla olduğu söylenebilir [37]. Ayrıca sıcaklığa maruz kaldığında amorf malzemelerin kırılabilirliklerinin arttığı bilinmektedir [42]. Ancak bahsedilen dezavantajlara rağmen amorf malzemelerin kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır ve gelişme potansiyeli mevcuttur.

2005 yılında Hasegawa [44] tarafından yapılan çalışmaya göre; sadece gelişmekte olan ülke şebekelerindeki trafolarında amorf malzeme kullanıldığı bir senaryoda, yıllık 100 TWh lik bir enerji tasarrufu elde ederek, her yıl 50-100 milyon ton arası CO₂ salınımını azaltmak mümkündür. Bundan dolayı amorf çekirdek saclarının çevreye etkileri bakımından geleneksel saclara göre avantajlı oldukları söylenebilir.

Amorf malzemeler daha çok dağıtım ve küçük transformatörlerde kullanılmaktadırlar. Malzeme yapısından kaynaklı mekanik özelliklerinden dolayı

elektrik makinelerinde kullanılması güçtür. Ayrıca maliyet bakımından kıyaslama yapıldığında, amorf alaşımların, yaygın olarak kullanılan silisli saclara göre maliyetlerinin yüksek olduğu söylenebilir.

2.4 Transformatörlerde Verim ve Kayıplar

Önceki bölümlerde sadece temel transformatör kanunlarıyla uyumluluk gösteren ideal kayıpsız bir transformatör ele alınmıştı. İdeal transformatörde primer sargılardan üretilen manyetik akının tamamından faydalandığı, primer ve sekonder gerilimlerinin birebir sargıların sarım sayıları ile orantılı olduğu, giriş ve çıkış güçlerinin birbiriyle eşit, verimlerinin %100 olduğu varsayılır. [45]

Buna karşın pratikte böyle bir durum mümkün değildir. Transformatörün kullanım alanlarına ve güç değerlerine göre değişmekle beraber verimlilikleri %99'a kadar çıkabilir [14]. Pratikte kayıplar da devreye girdiği için, sekonder sargıdan ölçülecek akım ve gerilim değerleri her zaman primer ve sekonder sarım sayısı oranından farklı olmaktadır. Bundan dolayı transformatörde toplam kayıpları oluşturacak olan yükte ve boşa kayıplar göz önüne alınır. Literatürde boşa kayıplar (P_0) demir kayıpları, yükte kayıplar da bakır kayıpları (P_k) olarak isimlendirilir. [27]

Toplam kayıplar dikkate alındığında, transformatörün verimi aşağıda verilen 3.1 ve 3.2 denklemleri ile hesaplanabilir.

$$\eta = \left[\frac{S_2}{(S_2 + P_t)} \right] \cdot 100\% \quad (3.1)$$

η = Verimin yüzde olarak ifadesi

S_2 = Çıkış gücü (VA)

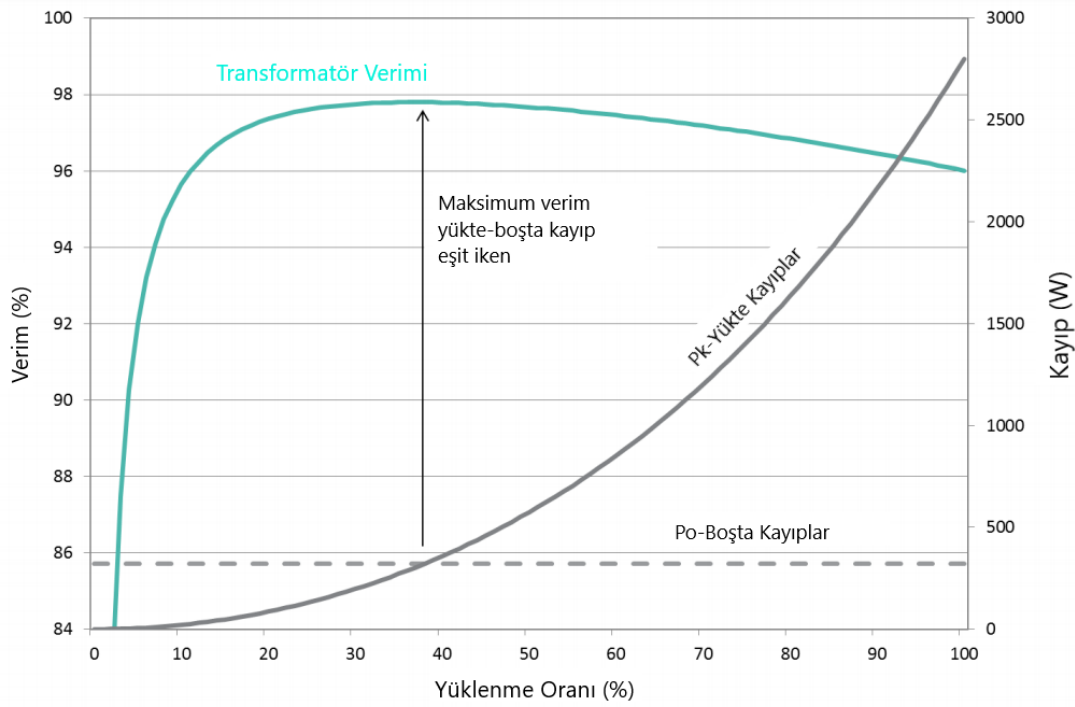
P_t = Toplam kayıp (VA)

$$P_t = (P_0 + P_k) \quad (3.2)$$

Denklem 3.1'den görülebileceği gibi transformatörün verimi toplam kayıpların artması ile azalır. Trafonun toplam kayıpları çıkıştaki yük ile birlikte artış gösterir, dolayısı ile transformatörün yüklenmesi belli bir değer üstüne çıktıkça, yüklenme

ile ters orantılı olarak verimi düşecektir. Yükte kayıplar P_k ile, boşa kayıplar P_0 ile ifade edilmiştir.

Sürekli değişebilen yük profilinden dolayı, dağıtım transformatörleri genellikle %50-%60 yüklenme değerlerinde en verimli çalışacak şekilde tasarlanırlar. Ayrıca dağıtım transformatörlerinde en yüksek verimin olduğu noktalarda P_0 boşa ve P_k yükte kayıpları birbirine yakındır [29-46]. Aşağıda Şekil 2.12’de örnek bir dağıtım transformatörü için verimlilik ve yükte-boşa kayıp ilişkileri verilmiştir.



Şekil 2.12 75KVA Dağıtım transformatörü için yükte-boşa kayıp ilişkisi [34]

Ancak bilinmelidir transformatörlerde yüklenme yüzdesi ve yükte boşa kayıp ilişkisi arasında sabit bir ilişki mevcut değildir ve transformatörün gücüne ve tipine göre değişiklik göstermektedir.

Boşa ve yükte kayıpların toplam sistem kayıpları üzerinde ekonomik etkileri vardır. Bu etkiler sebebiyle elektrik idareleri, transformatör satın alımlarında maliyetler için ortalama 35 yıl olarak öngörülen transformatör ömür süresine, boşa ve yükte kayıp maliyetlerini de eklerler [47]. Söz konusu hesaplama Loss Capitalization ya da Loss Evaluation adı verilmektedir. Kayıp değerlendirilmesi aynı zamanda

transformatörün işletme maliyeti olarak da kabul edilebilir [48]. Aşağıda Denklem 3.3'de transformatör kayıplarının toplam maliyete dahil edildiği ve sıklıkla kullanılan hesap yöntemi verilmistir [49].

$$TOC = TC + (A * P_0) + (B * P_k) \quad (3.3)$$

TOC = Transformatör Toplam Maliyeti (USD)

TC = Transformatör Satış Fiyatı (USD)

A = Boşta Kayıplar için Watt Başına Kapitalizasyon Maliyeti (USD/W)

B = Yükte Kayıplar için Watt Başına Kapitalizasyon Maliyeti (USD/W)

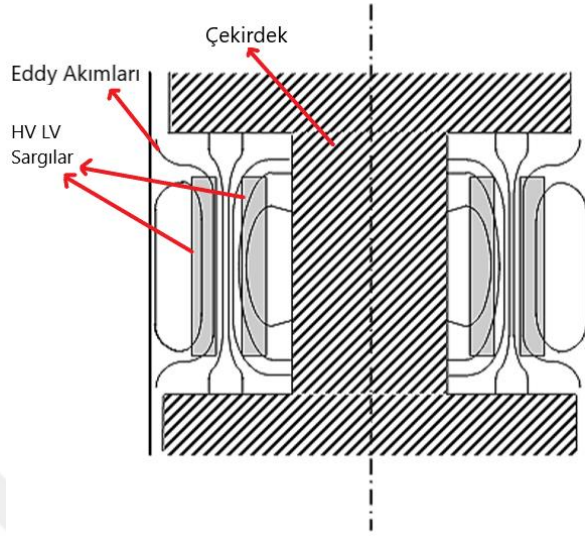
2.4.1 Transformatör Yükte Kayıpları

Yükte kayıplar, sargılarda kullanılan, çoğunlukla bakır ya da nadiren alüminyum iletken materyallerin, omik dirence sahip olmaları nedeniyle akımın karesiyle doğru orantılı olarak ($I^2 \cdot R$) ısıya dönüşen kayıplardır. Trafo sekonderinin yüksek oranda, örneğin %70 ve üzeri yüklenmesi durumunda, yükte kayıplar toplam kayıpların büyük çoğunluğunu oluşturmaktadır [50]. Ayrıca Şekil 2.12'den de görülebileceği gibi yüklenme yüzdesi ile birlikte P_k yükte kayıplar da artmaktadır.

Yükte kayıplar sargı iletkenlerinin kesitinin büyütülmesi, sargı sayısının azaltılması ya da bunların her ikisi birden uygulanarak azaltılabilir [51]. Ancak hatırlanmalıdır ki, sargı iletken kesiti arttırıldığında çekirdek boyutu da artacağı için, boşta kayıplar yani demir kayıpları da artacaktır. Bu yüzden gerektiğinde teknik şartnamelere uygunluk sağlayabilmek için yükte kayıpların azaltılması adına demir kayıplarının artmasına müsaade edilebilir [23].

Sargı iletkenlerinin akımla birlikte ısıya dönüşen kayıpları dışında yükte kayıpları oluşturan nedenlerden birisi de sargı iletkenleri arasında dolaşan Eddy akımları ya da girdap akımları olarak adlandırılan akımlardır [52]. Eddy akımları sargıların radyal genişliği boyunca akı yoğunluğu oluştururlar. Eddy akımları aşağıda verilen Şekil 2.13'den görüleceği üzere yükte kayıplar üzerinde arttırıcı etkiye ve özellikle

sargıların merkezinde ısı artışına sebep olurlar. Sargılar üzerinde yükte kaybın artmasına sebep olan kayıplar ayrıca stray kayıpları olarak anılmaktadır.



Şekil 2.13 Eddy akımlarının sargılar üzerindeki etkisi [50]

Eddy akımlarının sargılar üzerindeki kaybını minimize etmek için manyetik akı çizgilerine dik gelen iletken yüzeyi mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır veya diğer bir deyişle daha uzun ve ince iletkenlerin kullanılmasıyla Eddy kayıpları azaltılabilir. Ancak bu defa da sargıların omik direnci artacağından sargıların yükte kaybı daha fazla artacak ve trafonun U_k kısa devre empedansı değişecektir. Bu sebeple her iki parametre de göz önüne alınmalıdır [50]. Bütün bunların dışında Eddy akımları ve ayrıca boşta kayba etkilerinden ilerleyen boşta kayıplar bölümünde detaylıca bahsedilecektir

2.4.2 Transformatör Boşta Kayıpları

Genellikle çekirdek ya da demir kayıpları olarak da anılan boşta kayıplar, transformatör sekonderinde aktif olarak bir yük bulunmadığında dahi primer sargılar enerjilendiği andan itibaren kendini gösteren kayıplardır. Boşta kayıplar yükten bağımsızdır, yani transformatörün yüklenmesi ile birlikte artması ya da azalması sözkonusu değildir [50]. Söz konusu durumda boşta kayıpların daima sabit kaldığı Bölüm 2.4 ve Şekil 2.12'deki grafikten de görülebilir.

Genel olarak bakıldığında elektrik iletim ve dağıtım sistemlerindeki enerji kayıplarında en büyük pay dağıtım transformatörlerinin boşa kayıplarına aittir. Özellikle dağıtım transformatörlerinde boşa kayıplar, toplam trafo kayıplarının %50'sine kadar çıkabildiği için, transformatör tasarımı öncelikle göz önüne alınması gereken bir husustur [53].

Transformatörlerde boşa kayıplar, beş bileşenden meydana gelir. Çekirdek laminasyonlarındaki histeresiz ve eddy-girdap kayıpları, primer sargıda $I^2 \cdot R$ olarak ısıya dönüşen kayıplar, stray kayıpları ve dielektrik kayıplar toplamda boşa kayıpları oluşturmaktadır. Stray kayıpları, dielektrik kayıplar ve primer sargıda $I^2 \cdot R$ olarak ısıya dönüşen kayıplar, çekirdek kayıpları ile kıyaslandığında oldukça küçük bir etkiye sahiptirler. Histeresiz ve girdap-eddy kayıpları toplamda boşa kayıpların %99 dan fazlasını meydana getirdikleri için, bunların dışındaki kayıplar boşa kayıplar hesaplanırken çoğunlukla dikkate alınmazlar ve ihmal edilirler [54]. Yapılan çalışmalarda deneysel olarak ölçülen histeresiz ve eddy kayıpları değerlerinin, hesaplanan değerlerden fazla çıktığı görülmüştür [55]. Bu farkın sebebi için de, boşa kayıp bileşenlerinden ayrı olarak bahsedebileceğimiz anormal ya da ilave kayıplar adı verilen kayıpların mevcut olması söylenebilir. Bu kayıplara sebep olarak atomlar arası düzeyde kristal büyüklükleri, domain durumu, madde içerisindeki gerilmeler, maddenin yapısal kusurları ve uygunsuz yerleşimler olduğu düşünülmektedir [56]. A kayıplar büyüklükleri bakımından histeresiz ve eddy kayıpları toplamına kıyasla küçük olmalarına karşın boşa kayıplar hesaplanırken bu kayıplar da dikkate alınmaktadır.

Büyüklük olarak boşa kayıplar ilk bakışta çekirdekteki manyetik akı yoğunluğu, uyarım frekansı, çekirdek malzemesi ve çekirdek kütlesine göre şekillenmektedir. Bunların yanında çekirdek saclarının genişliği ve yığınların dizilimi, sacların kesilme ve haddelme prosesi ve benzeri bir çok faktör daha çekirdek kayıplarında rol oynamaktadır. Çekirdek üreticileri malzemenin manyetik özelliklerini geliştirerek boşa kayıpları azaltmaya uğraşırken, transformatör üreticileri ise genelde çekirdek dizilimi ve geometrisinde değişikliğe giderek sonuç almaya çalışmaktadır [33].

2.4.3 Boşta Kayıpların Modellenmesi

Transformatör boşta kayıplarının modellenmesiyle ilgili olarak biri diğerinin benzeri ve gelişmiş olan iki adet yaklaşım öne çıkmaktadır. Bunlardan ilki 1892 yılında Steinmetz tarafından ortaya atılan histeresiz ve eddy kayıplarının toplamından oluşan bir modellemedir [57]. Steinmetz metodu elektrik makineleri, transformatör, reaktör vb manyetik malzemelerin var olduğu çoğu uygulama için basit ve temel bir yaklaşım ortaya koymaktadır.

$$P_o = (P_H) + (P_E) \quad (3.4)$$

$$P_o = (k_h \cdot f \cdot B_{max}^n) + (k_g \cdot f^2 \cdot B_{max}^2) \quad (3.5)$$

k_h = Histeresiz Kayıp Katsayısı

k_g = Eddy Kayıp Katsayısı

n = Steinmetz sabiti

B_{max} = Maksimum Manyetik Akı değeri

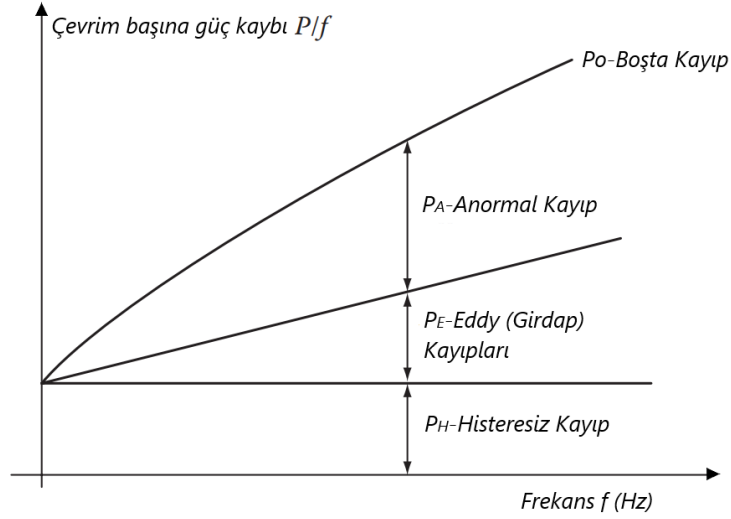
$$k_g = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6\rho} \quad (3.6)$$

Eddy kayıp katsayısı denkleminde göre ρ, σ, d sembolleri sırasıyla malzeme yoğunluğu, malzemenin iletkenliği ve manyetik sacın kalınlığını temsil etmektedir.

İkinci bir kayıp modelleme yöntemi olarak [58], 1988 yılında Bertotti, Steinmetz çekirdek formülünü bir adım ileriye götürerek boşta kayıpların içine anormal ya da ilave kayıplar olarak adlandırılan kayıpları da dahil etmiştir. Bu modele göre transformatörün boşta kayıpları Şekil 2.14'deki gibi, histeresiz kayıplar, eddy kayıpları ve ilave kayıpların toplamından oluşmaktadır. Günümüzde Bertotti'nin boşta kayıp modelleme yöntemi yaygın şekilde kullanılmakla birlikte araştırmacılar tarafından geliştirmeye devam edilmektedir [59].

$$P_o = (P_H) + (P_E) + (P_A) \quad (3.7)$$

$$P_o = (k_h \cdot f \cdot B^n) + (k_g \cdot f^2 \cdot B^2) + (k_a \cdot f^{1,5} \cdot B^{1,5}) \quad (3.8)$$



Şekil 2.14 Boşta kayıpların sınıflandırılması ve frekansa bağlı değişimleri [60]

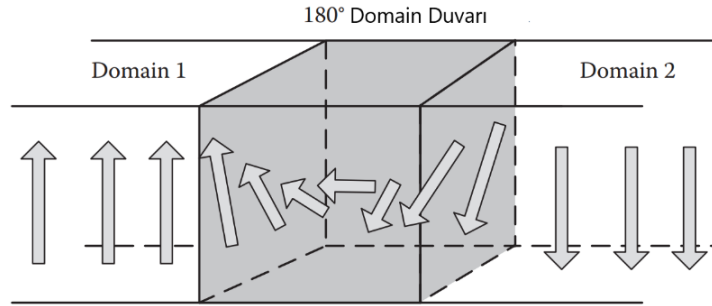
2.4.3.1 Histeresiz Olayı ve Histeresiz Kayıplar

Histeresiz olayını açıklamak için öncelikle kısaca manyetizma fenomenini temel olarak ele almak gerekir. Manyetizma olayı en temel olarak manyetik alan şiddeti H ve manyetik akı yoğunluğu B ile anlatılır. İki büyüklük arasındaki ilişkiyi μ permeabilite ya da manyetik geçirgenlik üzerinden aşağıdaki gibi açıklamak mümkündür.

$$B = \mu_r \mu_0 H \quad (3.9)$$

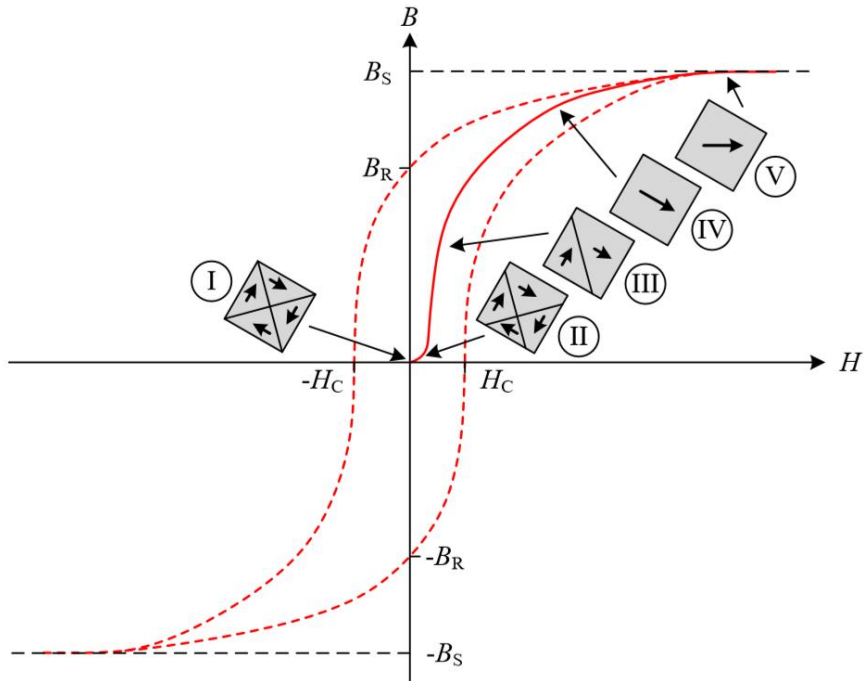
μ_0 permeabilite sabiti olarak $4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$ değişmez bir değer alırken, μ_r rölatif permeabilite ise materyalin türüne, manyetik karakteristiğine göre değişmektedir. Örneğin hava için referans μ_r değeri 1 olarak kabul edilir. Histeresiz olayı ferromanyetik yapıda olan malzemelerde görülür ve rölatif permeabilite değeri bu malzemeler için $\mu_r \gg 1$ oldukça yüksektir [61]. Ferromanyetik malzemelerde parçacık düzeyinde domain adı verilen farklı yönlerde olan tanecik yapıları bulunur. Manyetik malzemenin içindeki enerjii muhafaza edebilmek için domainlerin yönlerinin farklı olacak şekilde konumlandıkları ve aralarında domain duvarları adı verilen yapılar olduğu kabul edilmektedir [62]. İşte bu domainler ve domain

duvarları arasındaki ilişki manyetik malzemenin histeresiz karakteristiğini belirlemektedir. Domainlerin görünümü ve dizimleri Şekil 2.15 de verilmiştir.



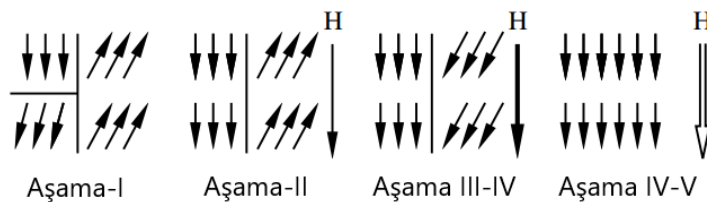
Şekil 2.15 Manyetik malzeme domain yapısı[60]

Ferromanyetik malzemeler manyetik alan etkisi altında kaldıklarında, domainler zamanla manyetik alan yönünde olacak şekilde yön değiştirip, dizilmeye başlarlar. Aşağıda Şekil 2.16'da görüldüğü gibi, domain dizimlerinin manyetik alan ile değişimi ve histeresiz olayı beş aşamada verilebilir. Bu grafik aynı zamanda manyetik malzemenin histeresiz çevrim grafiği olarak da tanımlanmaktadır. Şekil 2.17'de ise malzemedeki domainlerin değişimi de yine 5 aşamada verilmiştir.



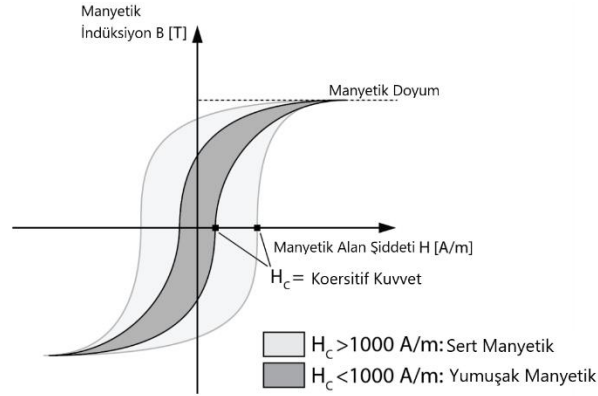
Şekil 2.16 Mıknatıslanma aşamaları ve histeresiz çevrim [60]

Başlangıçta I numaralı aşamada materyalin manyetik alana maruz kalmadan önceki domain yapısı görülmektedir. Domainler birbirini dengeleyecek şekilde dizilmiştir. II numaralı anda malzemeye ufak bir manyetik alan uygulandığında, manyetik alan ile aynı yöndeki domainler büyürken, diğer yönlerde bakan domainler küçülmeye başlarlar. Bu aşamada malzemeye büyük olmayan bir manyetik akı uygulandığı için manyetik akı ortadan kaldırıldığında domainler eski dizilimine geri dönebilirler ve bu durumda histeresiz olayından söz edilemez. Bunun yerine manyetik alan şiddeti arttırılmaya devam edildiğinde III numaralı aşamada permeabilite en yüksek değerlerine ulaşır ve ufak bir manyetik alan şiddeti artışında da manyetik akı yoğunluğu hızla yükselir. Artık bu aşamada manyetik alan ile aynı yönde olan domainler büyüdükleri ve öne çıktıkları için malzemenin manyetik karakteri değişmeye başlamıştır. Bu durum Şekil 2.16'da yer alan grafiğin yukarıya doğru kırılması ile anlaşılabilir. Manyetik alan şiddetinin artmaya devam ettiği IV numaralı aşamada, artık bütün domainler manyetik alan ile aynı yönde hizalanmış durumdadır ve permeabilite değeri oldukça düşmüştür. Grafikte bir kırılma daha olduğu görülmektedir. Bu aşamada alan şiddetinin artmasıyla artık akı yoğunluğu eskisi kadar fazla artmamaktadır. V numaralı aşamada ise eğer manyetik alan şiddeti daha da arttırılmaya devam edilirse artık manyetik akı yoğunluğunda artış gözlenmez. Malzeme en yüksek manyetik akı yoğunluğu değerine (B_s) ulaşmış ve artık manyetik malzeme doyuma girmiş demektir. Grafiğe bakıldığında bu aşamada artık manyetik alan sıfırlandığında dahi manyetik akı yoğunluğu değeri başlangıç durumuna dönmemekte ve malzeme B_r artık mıknatisiyet değerinde kalmaktadır.



Şekil 2.17 Miknatıslanma aşamaları boyunca domain yön değişimi [63]

Bu kalıcı mıknatısiyet etkisini gidermek için zıt yönde $-H_c$ büyüklüğünde bir manyetik alan şiddetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alan şiddetine koersitif kuvvet yada sıfırlama kuvveti adı verilmektedir.



Şekil 2.18 Manyetik malzemenin mıknatıslanma eğrisi [39]

Malzemenin H_c koersitif değeri ne kadar düşükse, histeresiz kaybı da o kadar küçük olur. Ayrıca histeresiz çevriminin apsisi ve koordinatı kestiği noktalar arasındaki alan ne kadar küçük olursa, manyetik malzemenin histeresiz kaybı da o derece düşük olacaktır. Farklı manyetik malzemelerin koersitif değerleri Şekil 2.18'den görülebilmektedir. Bu sebeple transformatörlerde H_c koersitif değeri 1000 A/m den küçük yumuşak manyetik malzemeler tercih edilmektedir [64].

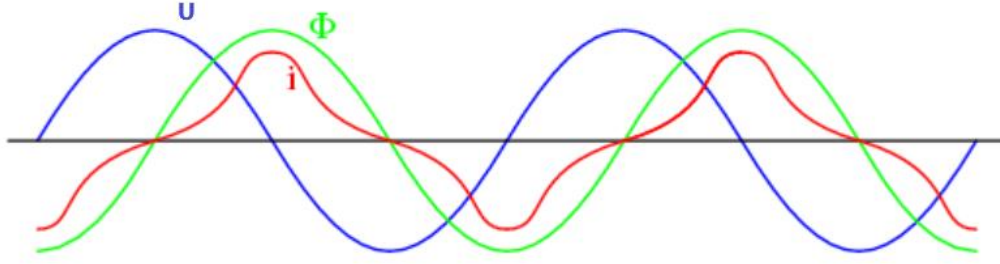
Histeresiz kaybı hesaplamada kullanılan en yaygın eşitlik Steinmetz tarafından ortaya konulmuştur [57]. İlgili eşitlik Denklem 3.11'den görülebilir.

$$P_k = (k_h \cdot f \cdot B_{max}^n) \quad (3.11)$$

k_h her malzemeye mahsus olmakla birlikte manyetik histeresiz kayıp katsayısı olarak ifade edilir. Bu katsayı malzemenin hacmi ve cinsine göre değişmektedir. Ayrıca Steinmetz sabiti olarak anılan n değeri çoğunlukla 1,6 değeri alınırken malzeme cinsine göre 1,5-2,5 değerleri arasında değişmektedir. Denklem 3.11'den ayrıca görülebileceği üzere histeresiz kayıpları frekansın artmasıyla orantılı olarak artmaktadır.

2.4.3.2 Eddy-Girdap Akımları ve Kayıpları

Transformatör primer sargılarına alternatif akım uygulandığında buna paralel olarak Şekil 2.19'daki gibi çekirdek üzerinde sinusoidal bir manyetik alan oluşacak ve manyetik akı akacaktır. Çekirdekteki manyetik akı periyodik olarak değiştiği için Faraday kanunu gereği çekirdek üzerinde akı yoluna dik olacak şekilde bir gerilim endüklenecektir.



Şekil 2.19 Manyetik alan şiddeti-Akım-Gerilim grafiği

Endüklenen gerilimin sonucunda çekirdeğin içinde akımlar dolaşacaktır. İşte bu akımlara eddy ya da girdap akımları adı verilir. Bu akımlar ve izlediği yollar şekil olarak girdaba benzediklerinden dolayı genellikle girdap akımları olarak isimlendirilirler. Oluşan bu akımlar çekirdek içerisinde en düşük direnç ya da en yüksek iletkenliğe sahip belirsiz bir rota üzerinden çevrimini tamamlar.

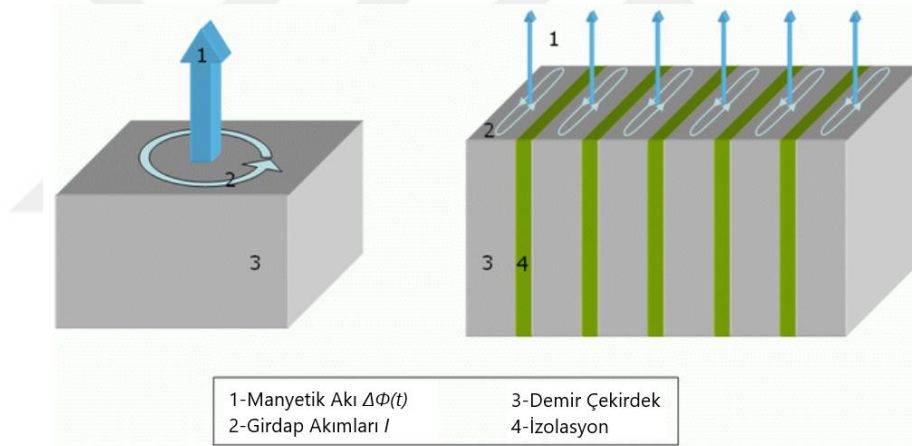
Ancak manyetik devre boyunca dolaşan eddy akımları çekirdekte güç kaybına yani $I^2.R$ akımın karesiyle orantılı şekilde sıcaklık artışına yol açmaktadır. Söz konusu güç kayıpları Eddy Kayıpları olarak adlandırılırlar ve bu kayıplar toplam çekirdek kayıplarının önemli bir kısmını oluştururlar [65].

Genelde 1 kHz'den düşük frekanslar için kullanılan, eddy kayıplarının formülize edilmiş hali aşağıda Denklem 3.12 ve 3.13 deki gibi ifade edilebilir.

$$P_E = (k_g \cdot f^2 \cdot B_{max}^2) \quad (3.12)$$

$$k_g = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6\rho} \quad (3.13)$$

Denklem 3.12 ve 3.13 ye göre Eddy kayıpları frekans (f) ve maksimum manyetik akı yoğunluğu (B_{max}) kareleri ile orantılı olarak artmaktadır. Eddy kayıplarının bir parametresi olan Eddy kayıp katsayısı k_g değeri ise, σ iletkenlik değerine ve d elektrik sacının kalınlığına bağlıdır. Eddy kayıplarını azaltmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. En çok uygulanan yöntemlere bakıldığında, iki yöntemin öne çıktığı görülür. İlk yöntemde, çekirdeklerin üretimi esnasında iletkenliği azaltmak ya da omik direnci arttırmak adına demir malzemeye %3 oranında Silisyum eklenir. Bu sayede eddy akımları azaltılarak oluşacak kaybın azaltılması mümkün olmaktadır. Ancak yüksek oranlarda silisyum katkısı malzemenin kırılgenliğini arttırdığından genelde bu oran yaklaşık %3-6 ile sınırlı tutulmaktadır [66]. Eddy akımlarını azaltmak adına uygulanan bir diğer yaygın yöntem de çekirdek saclarının kalınlıklarının azaltılmasıdır. Daha ince saclar kullanılarak girdap akımının alanı oldukça kısıtlanmış olur ve eddy kayıplarının azaltılması sağlanır [27].



Şekil 2.20 Eddy kayıplarının lamine saclar ile azaltılması

Yukarıdaki Şekil 2.20'den görülebileceği gibi daha ince laminasyonlu elektrik sacları kullanarak eddy kayıpları azaltılabilmektedir. Günümüzde sıklıkla kullanılan laminasyon kalınlıkları 0,23 mm ve 0,50 mm arasında değişmekle beraber yüksek performanslı elektrik sacları için kalınlık olarak 0.20 mm değerine kadar inilebilmektedir [32]. Ancak nüvedeki her bir sac laminasyon kalınlığı azaldıkça transformatör çekirdeğinin mekanik etkilere dayanımı bakımından değişiklikler gözlenmektedir. Bu sebeple çekirdek dizaynı süresince her bir laminasyon

kalınlığının çekirdek mekanik dayanımı üzerindeki etkisi de göz önünde bulundurulur.

Ayrıca şekilden görülebileceği üzere laminasyonlar arasında 2 µm ila 5 µm arasında bir çeşit izole film katmanı kullanmak da, girdap akımlarını azaltmak için tercih edilen yöntemlerden birisidir. Katmanlar arasında izolasyon kullanmak bütün çekirdek yapılarında yaygın olarak kullanılmasa da, laminasyonlar arası izolasyon kullanılan çekirdeklerde eddy kayıplarının daha da azaltıldığı yapılan çalışmalarda kanıtlanmıştır [67].

2.5 Boşta Kayıpları Azaltma Yöntemleri

Transformatör boşta kayıpları, çekirdek malzemenin türüne ve tanecik yönlendirme yapısına, çekirdek geometrisine, bacak boyunduruk arası joint şekilleri ve joint açlarına, laminasyonlar arası hava boşluğuna ve adım sayısı gibi faktörlere bağlıdır [14]. Çekirdek malzemenin türünün yanında, uygun çekirdek geometrisinin seçimi, manyetik akının çekirdek ve laminasyonlar arasındaki dağılımını ve endüksiyon değerini etkilediği için, kayıpların azaltılması konusunda üzerinde durulması gereken çok önemli bir konudur [1].

Tablo 2.1 Boşta kayıp azaltma yöntemleri ve etkileri [34]

	Yaklaşım Metodu	Boşta Kayıplara Etkisi	Yükte Kayıplara Etkisi
1	Düşük kayıplı manyetik malzeme kullanımı	Azalır	Değişiklik yok
2	Çekirdek geometrisinde iyileştirme	Azalır	Değişiklik yok
3	Çekirdek enine kesitini arttırarak manyetik akı yoğunluğunu azaltma	Azalır	Artar
4	Gerilim/Sarım oranını azaltarak manyetik akı yoğunluğunu düşürme	Azalır	Artar
5	Sargı enine kesit alanını azaltarak akı yolunu kısaltma	Azalır	Artar

Tablo 1.1’de verilen boşta kayıpları azaltma yöntemleri sırasıyla aşağıda açıklanmıştır:

1) Daha düşük kayıplı ve daha yüksek kaliteli manyetik malzeme kullanımı, boşta kayıpları azaltır, ancak yükte kayıplara etkisi olmaz. Bu yöntemin dezavantajı ise çekirdek maliyetinin artmasıdır. Bu sebeple öncelikli olan maliyeti etkilemeyecek seçenekleri değerlendirmek olmalıdır [34].

2) Çekirdek boyutu ve ağırlığı aynı kalacak şekilde, çekirdek geometrisi iyileştirildiğinde, yükte kayıplar artmadan, daha düşük boşta kayıp elde etmek mümkün olabilir. Ancak bu yöntemle üretilecek çekirdeğin, maliyeti arttıracak karmaşık süreçlere ve farklı üretim ekipmanlarına ihtiyaç duyulmadan üretilebilmesi gerekmektedir [34].

3) Çekirdek enine kesiti arttırıldığı takdirde, üzerine monte edilecek sargı iletkenlerinin de uzunluğu artacaktır. Bunun sonucu olarak sargı iletkenlerinin uzunluğu arttığı için, omik dirençleri ve yükte kayıplarda da artış meydana gelecektir. Ayrıca daha uzun sargı iletkenleri kullanılacağı için maliyet de artacaktır [34].

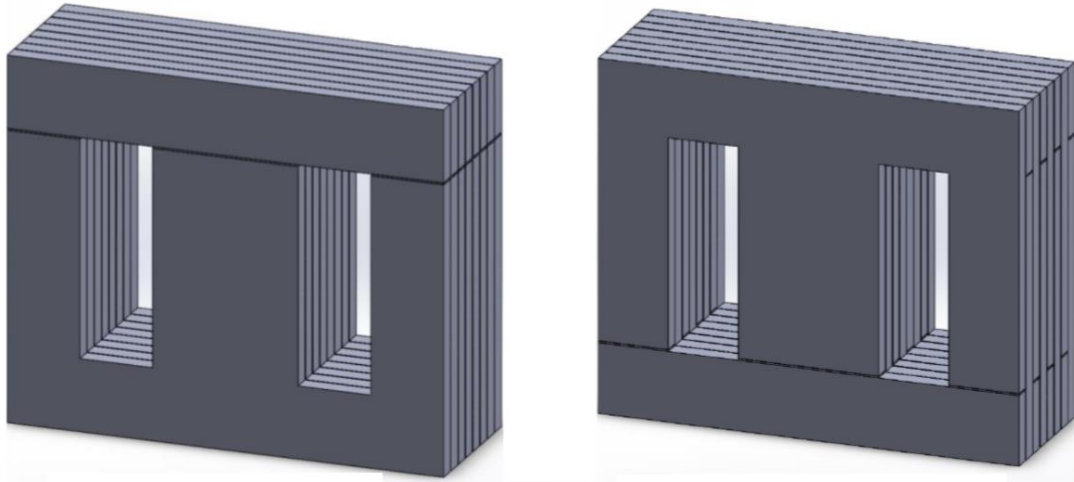
4) Primer ve sekonder sargılar arasındaki çevrim oranı sabit tutulacak şekilde, primer ve sekonder sargılardaki sarım sayıları arttırılabilir. Böylece manyetik akı yoğunluğu ve boşta kayıplar azaltılabilir. Ancak bu yaklaşımda da daha uzun sargı iletkenleri gerekeceği için yükte kayıplar ve maliyette artış gözlenecektir [34].

5) Sargı iletkenlerinin enine kesit alanını düşürerek sargı pencere alanları ve gerekli boyunduruk uzunlukları azaltıldığı takdirde, akı yolunu kısaltmak ve boşta kayıpları azaltmak mümkün olabilir. Ancak düşük kesitli sargı iletkeni kullanımı sargılarda akım yoğunluğu ve omik direncin yükselmesine neden olacağı için yükte kayıpları önemli miktarda arttıracacağı göz önünde bulundurulmalıdır. Bununla birlikte sargı iletken kesitleri küçüleceği için, gerekli sargı iletkeni ağırlığı ve maliyet azalacaktır. Ancak bu durum toplam kayıplarda artışa sebep olacağı için, transformatörün verimine olumsuz etkisi olacaktır [34]. Bu şekilde bir yaklaşım ancak maliyetin ilk planda olduğu uygulamalar için değerlendirilebilir.

Tablo 1.1’de sıralanan ve yukarıda açıklanan sebeplerden dolayı, yükte kayıpları ve malzeme maliyetlerini arttırmayacak ve üretim süreçlerini karmaşıktırmayacak şekilde bir yaklaşım, boşta kayıpların azaltılmasında öncelikli düşünülmesi gereken bir konudur. Bu sebeple bu tez çalışmasında önerilen çekirdek yapısının geometrisinde yapılan iyileştirmelerin, boşta kayıpların azaltılmasına etkisi, bu çalışmada ayrıca ele alınacaktır. Söz konusu iyileştirmeler kapsamında, laminasyon istifleme şekilleri, bacak boyunduruk arası joint şekilleri ve açıları, laminasyonlar arası hava boşluğu ve adım sayısı gibi faktörler ele alınarak incelenmiştir.

2.5.1 Çekirdek İstifleme Yöntemleri ve Kayıplara Etkisi

Boşta kayıpları azaltmak ve çekirdeğin mekanik sağlamlığı arttırmak gibi nedenlerle, E-I çekirdek laminasyonlarında farklı sac dizilim metodları ve çeşitli joint şekilleri ayrıca ele alınarak çalışmalar yapılır. Tek fazlı ve üç fazlı transformatör çekirdeklerinde kullanılan ve aşağıda Şekil. 2.21’de verilen iki tip laminasyon metodu mevcuttur [1].



a) Butt Edge Dizilimi

b) Alternate Lap Dizilimi

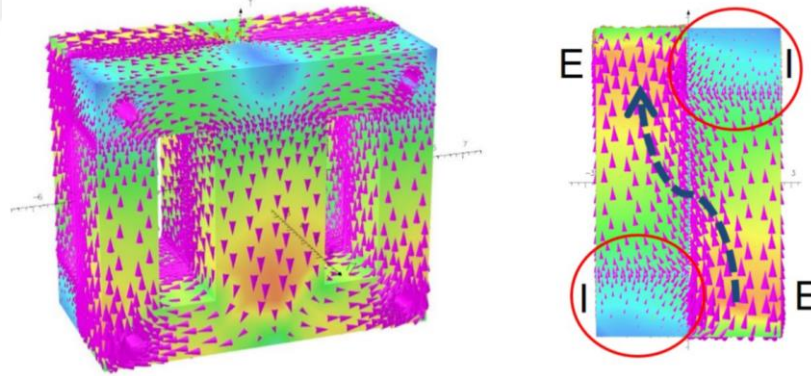
Şekil 2.21 Üç Fazlı E-I çekirdek görünümü [1]

Şekil 3.21 (a)’da yer alan Butt Edge ya da Butt Joint olarak adlandırılan dizilim metodunda, çekirdeğin E bacak ve I boyunduruk parçaları her bir kat laminasyonda aynı yöne gelecek şekilde yerleştirilirler. Şekil 3.21 (b)’de Alternate Lap diziliminde ise E ve I laminasyonları her katta farklı yönlerde bakacak şekilde dizilirler. Böylece

Alternate Lap dizilimi ile manyetik akı dağılımı Butt Edge çekirdeğe göre farklı olacaktır. Alternate Lap dizilimi, çekirdeğin mekanik dayanımını arttırdığı ve boşta kayıpları azalttığı için daha sıklıkla tercih edilir, ancak çekirdek montajı için Butt Edge dizilimine göre daha fazla işçilik süresi gerektirmektedir.

Alternate Lap dizilimi ile Butt Edge çekirdek dizilimlerinin çekirdek kayıplarını kıyaslamak ve manyetik akı yoğunluğu dağılımını incelemek için Poveda-Lerma ve Ark. 2017 yılında bir çalışma yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre Butt Edge dizilimindeki çekirdekte ortalama manyetik akı yoğunluğu değerinin, Alternate Lap çekirdekteki ortalama manyetik akı yoğunluğu değerinden daha az olduğu görülmüştür.

Butt Edge diziliminde manyetik akı E laminasyonundan I laminasyonuna doğru hava boşluğu üzerinden geçip manyetik devresini tamamlarken, Alternate Lap diziliminde E laminasyonundan akan akı hava boşluğundan aynı şekilde I laminasyonuyla devam etmek yerine, düşük relüktanslı komşu E laminasyonu üzerinden çevrimini tamamlamaktadır.



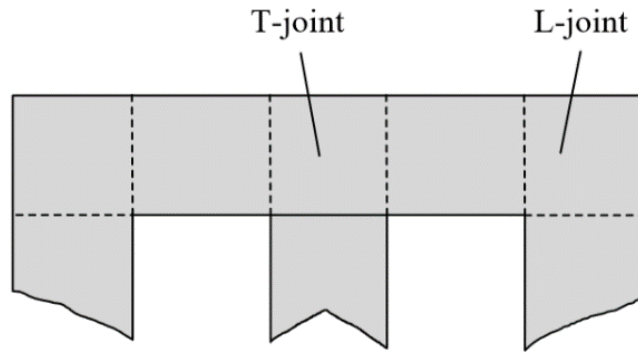
Şekil 2.22 Alternate Lap laminasyonlar arası akı dağılımı [1]

Şekil 3.22'den de görülebileceği gibi, Alternate Lap dizilimde I laminasyonları üzerinden geçen akı yoğunluğu, E laminasyonlarına nazaran düşüktür. Bu sebeple E laminasyonu yüksek endüksiyon seviyesine erişmiş ve böylece Alternate Lap dizilimindeki ortalama akı yoğunluğu değeri, Butt Edge dizilimine göre daha fazla olmuştur [1]. Ancak buna rağmen Alternate Lap çekirdek dizilimi, Butt Edge dizilimine kıyasla daha düşük çekirdek kaybına sebep olmaktadır.

2.5.2 Çekirdek Joint Bağlantı Şekilleri ve Kayıplara Etkisi

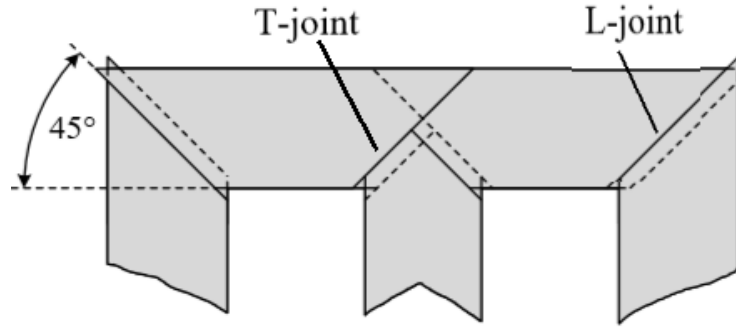
Transformatörlerin boşa kayıplarını etkileyen önemli faktörler arasında joint dizaynı da yer almaktadır. Joint adı verilen eklem bölgelerinde bacakla boyunduruk arasındaki temas yüzeyi boyunca çok küçük de olsa hava boşlukları bulunur. Bu bölgelerde örneğin bacadan boyunduruğa geçerken, manyetik akı çekirdek haddeleme yönünden sapmakta ve böylece kayıplar ve ısı artışları meydana gelmektedir [68]. Genel bir kabul gören yaklaşıma göre, çekirdek manyetik akı yoğunluğu %1'lik azaldığında, çekirdek kayıplarında yaklaşık olarak %2'lik bir azalma meydana gelmektedir [69]. Bu yüzden joint adı verilen çekirdek bölgelerinin tasarımı bu nedenle boşa kayıpların belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Transformatör çekirdeklerinde yaygın olarak Non-Mitred ve Mitred olmak üzere iki tip joint dizaynı tercih edilmektedir. Non-Mitred joint, Şekil 2.23'deki bağlantı açısının 90° olduğu joint tipini ifade ederken, Şekil 2.24'de yer alan Mitred joint tipinde bağlantı açısı genellikle 45° veya 90° 'den farklı olur. Günümüzde kullanım alanlarına bakıldığında Mitred joint türünün, dağıtım ve güç transformatörlerinin çekirdek dizaynlarında yaygın olarak tercih edildiği görülmektedir.



Şekil 2.23 Non-Mitred Joint görünümü [70]

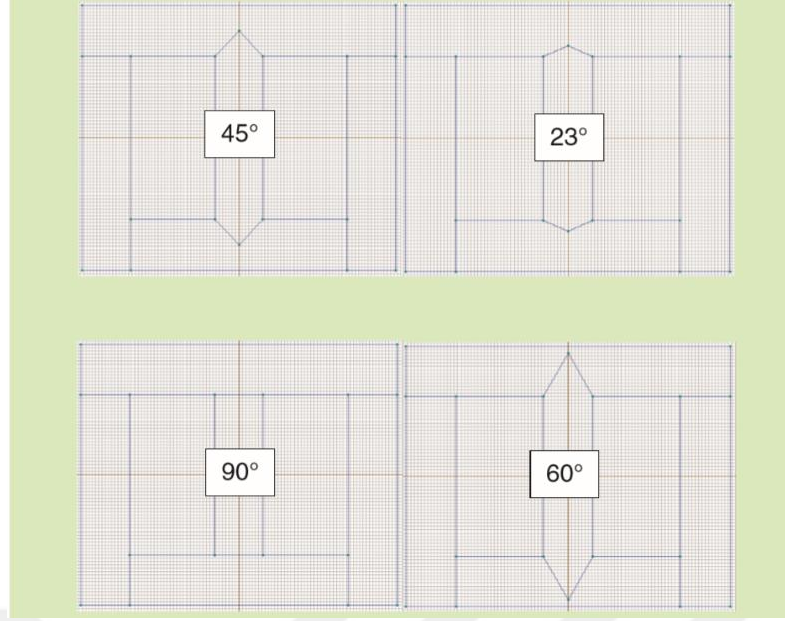
Şekil 3.23 ve 3.24 den görülebileceği üzere orta bacak ile boyunduruğun birleştiği eklem bölgesi T-joint diye ifade edilirken, dış bacakların boyunduruk ile birleştiği kısımlar L-joint olarak adlandırılırlar.



Şekil 2.24 45° Mitred Joint Görünümü [70]

Non Mitred jointler genellikle küçük güçteki transformatörler için ve taneciği yönlendirilmemiş çekirdek malzemesi ile kullanılmaktadır [70]. Yönlendirilmiş tanecikli çekirdek malzemesi kullanıldığında joint bölgelerinde haddeleme yönüne dik olacak şekilde rotasyonel ya da döngüsel akı adı verilen akılar akmakta ve ek çekirdek kayıpları meydana gelmektedir. Rotasyonel akılar özellikle tanecik yönlendirmeli çekirdek kullanımında non-mitred joint yapısında daha yoğun bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bundan dolayı mitred jointler sıklıkla verimliliği ön planda olduğu büyük güçlü transformatörlerde, yönlendirilmiş tanecikli çekirdek malzemesi ile kullanılırlar [68]. Ayrıca mitred jointlerin, non-mitred jointlere göre imalatı ve üretimi daha karmaşık olduğu için, kullanımı daha maliyetlidir. Ancak günümüzde sıklıkla kullanılan yönlendirilmiş tanecikli elektrik saclarla kullanıldığı göz önüne alındığında mitred Joint yapısı, non-mitred joint tipine göre daha az çekirdek kaybına sebep olmaktadır [68].

2013 yılında Haidar ve Al-Dabbagh yaptıkları çalışmada, Şekil 2.25'de verilen 23°, 45°, 60° ve 90° gibi farklı T joint açlarına sahip çekirdek konfigürasyonlarının yerel akı dağılımları ve T joint açlarının kayıplara etkilerini incelemişlerdir. Joint konfigürasyonlarına ait analizler, sonlu elemanlar yöntemi tabanlı simülasyon programından alınan verilerle yapılmıştır.



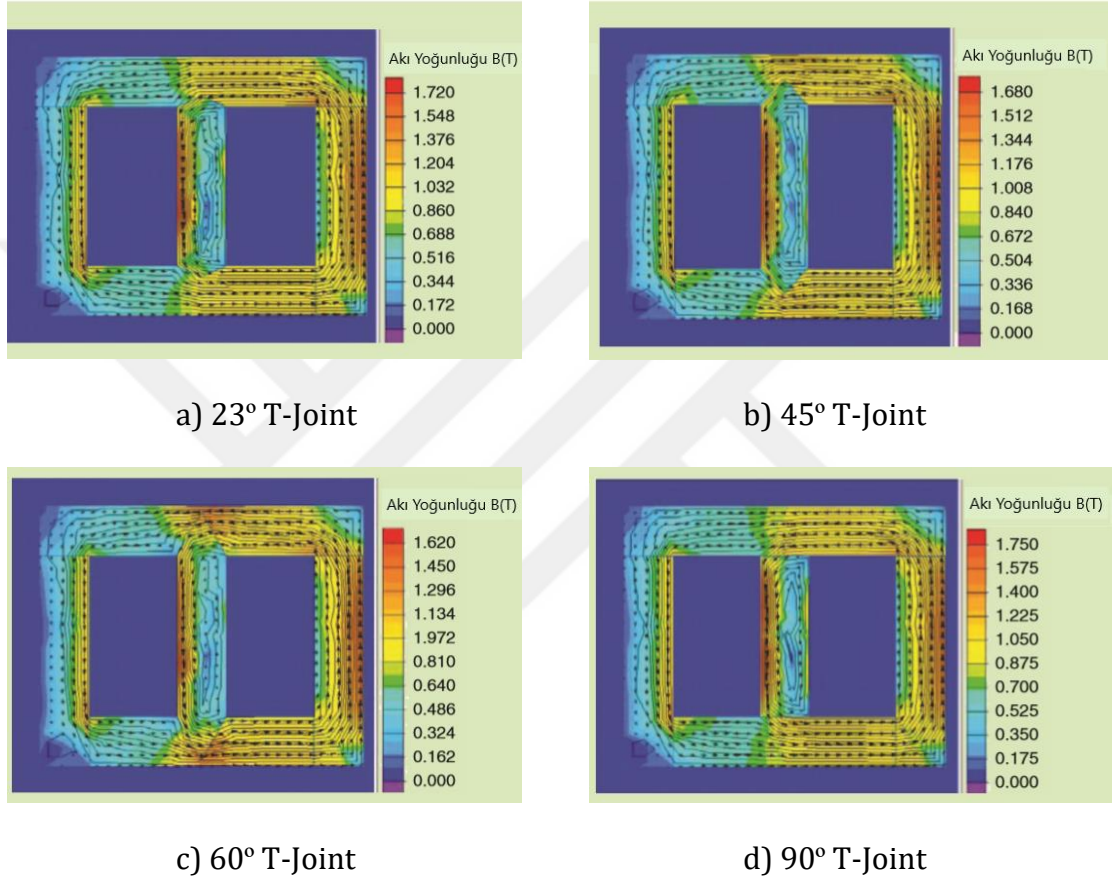
Şekil 2.25 23°, 45°, 60° ve 90° T Joint tipleri[14]

Çalışmada T joint tiplerine dair değerlendirmeler çekirdek malzemesinin M5 CRGO (Soğuk Haddelenmiş Tanecik Yönlendirmeli) tip olduğu kabul edilerek yapılmıştır. Ayrıca T joint tiplerinin çekirdek büyüklüğüne göre kayıplara etkilerini anlamak adına her bir T joint tipi için dört farklı boyutta laminasyon paketleri oluşturulmuş, sonuçlar bu dört farklı çekirdek büyüklüğüne göre analiz edilmiştir. Çalışmada kullanılan dört farklı çekirdek için bacak ve boyunduruk boyutları Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2 Kullanılan çekirdeklerin bacak boyunduruk ölçüleri [14]

Çekirdek	Boyunduruk Uzunluğu (mm)	Bacak Uzunluğu (mm)	Bacak ve Boyunduruk Genişliği (mm)
1	970	780	150
2	950	760	130
3	930	740	110
4	910	720	90

Tablo 2.2’de her bir T joint konfigürasyonu için kullanılacak çekirdek bacak boyunduruk ölçüleri verilmiştir. Birinci ve en büyük çekirdek için Şekil 2.26’da, dört farklı T joint konfigürasyonu için verilen simülasyon sonuçları incelendiğinde, en yüksek akı yoğunluğu ve enerji yoğunluğunun 90° T joint tipinde, en düşük akı yoğunluğu ve enerji yoğunluğunun da 60° T joint tipinde olduğu görülmüştür.



Şekil 2.26 Çekirdek-1 için 23°, 45°, 60° ve 90° T-Joint manyetik akı yoğunluğu dağılımları [14]

Tablo 2.3 Çekirdek-1 farklı T-Joint açılarında boşa kayıplar [14]

Çekirdek	T-Joint	Boşa Kayıplar (W)
1	23°	95,445
	45°	90,720
	60°	84,105
	90°	99,225

Tablo 2.3’de verilen değerlerden de görüleceği gibi, kayıpların ve enerji yoğunluğunun 90°’lik T jointte yüksek olmasının sebebi, rotasyonel akının en fazla 90° T jointte meydana gelmesidir. Bununla birlikte çekirdekteki enerji yoğunluğu arttıkça, transformatör boşa kayıpları da artar. Böylelikle 1 numaralı en büyük çekirdek için, T jointler arasında en avantajlı seçeneğin 60°’lik tip olacağı öngörülebilir.

Tablo 2.4 Çekirdeklerin Joint tipine göre toplam boşa kayıp değerleri [14]

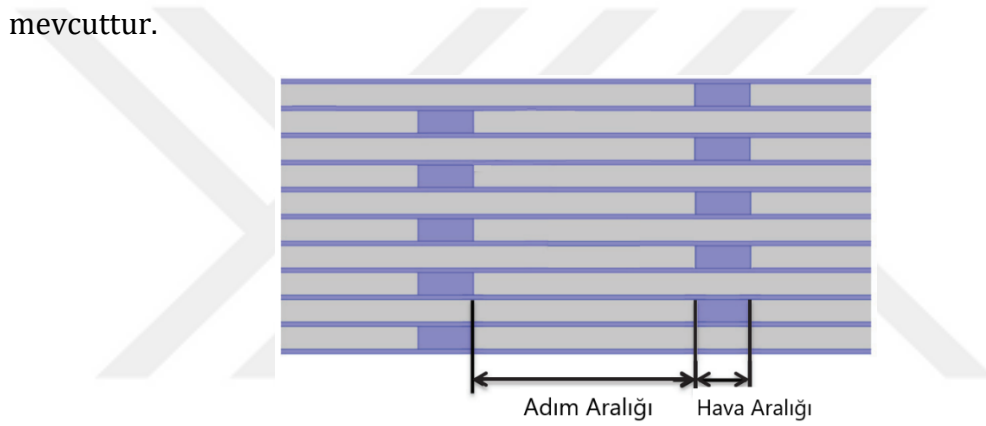
T-Joint	Çekirdek-1	Çekirdek-2	Çekirdek-3	Çekirdek-4	Toplam Boşa Kayıplar (W)
23°	95,445	83,604	52,322	56,700	288,0708
45°	90,720	81,965	53,015	40,257	265,9565
60°	84,105	54,507	50,589	43,659	232,8597
90°	99,225	68,851	71,033	42,242	281,3496

Yukarıda Tablo 2.4’de, kullanılan dört farklı çekirdek boyutlarına göre 23°, 45°, 60° ve 90° T-Joint açıları için boşa kayıp değerleri verilmiştir. Boşa kayıplara dair karşılaştırma 4 numaralı en küçük çekirdek için yapıldığında, 45° ve 90° T jointlerin, 23° ve 60° T jointten daha az çekirdek kaybına sahip olduğu söylenebilir. Ancak 1,2

ve 3 numaralı çekirdek türleri için Tablo 2.4’de verilen boşa kayıp değerleri incelendiğinde, en düşük kayıplı seçeneğin 60° T joint olduğu görülmektedir.

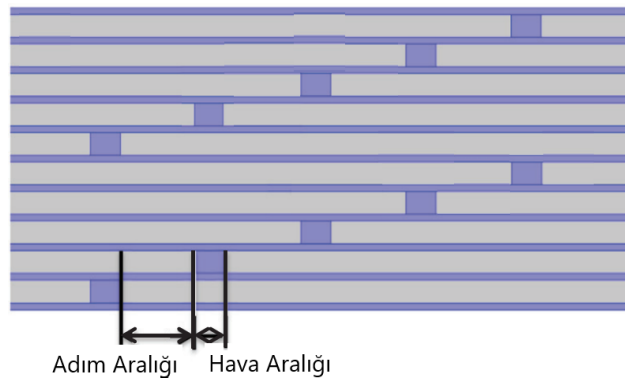
2.5.3 Laminasyon Adım Kaydırma Teknikleri ve Kayıplara Etkisi

Transformatör boşa kayıplarına etki eden faktörlerden birisi de elektrik saclarının sırayla kaydırılarak, aralıklarla dizilmesi şeklindedir. Modern bir transformatör çekirdeğine ilişkin kayıpların önemli bir kısmı, bacak-boyunduruk birleşim bölgelerinde olduğu için, üreticiler manyetik akının bacak-boyunduruk arası daha düzgün geçiş yapabildiği adım kaydırma tekniklerini kullanırlar [71]. Single Step Lap (SSL) ve Multi Step Lap (MSL) olmak üzere iki adet adım kaydırma tekniği mevcuttur.



Şekil 2.27 Single Step Lap dizilimi[13]

Şekil 2.27’den görülebileceği gibi Single Step Lap tekniğinde laminasyonlar arası tek bir adım mevcuttur ve adım aralıkları sabittir. Laminasyonlar arası hava aralıkları her katmanda aynı izdüşümde bulunacaktır.

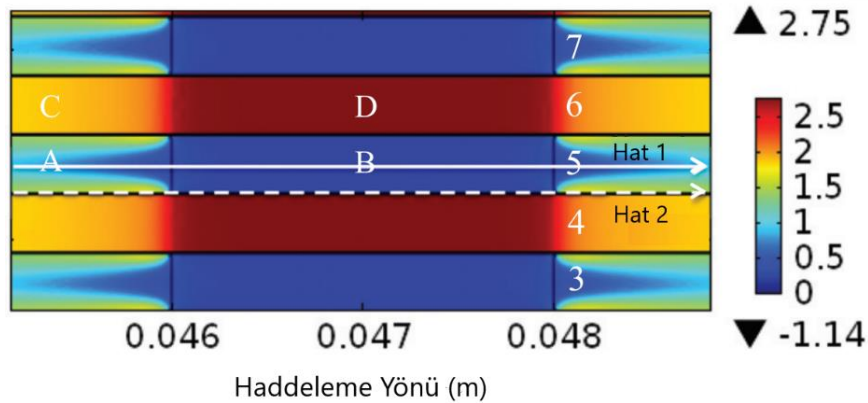


Şekil 2.28 Multi Step Lap dizilimi [13]

Multi Step Lap tekniğinde, komşu olan bütün laminasyonlar, aralarında adım aralığı kadar kaydırılacak şekilde dizilirler. Hava aralıkları da aynı şekilde adım sayısı kadar yer değiştirecektir. Şekil 2.28’de gösterilen dizilim beş adımlı Multi Step Lap dizilimine örnektir.

Multi Step Lap tekniği ile transformatör çekirdeğinin üretilmesi, Single Step Lap tekniğine göre daha karmaşık ve maliyetlidir. Ancak Multi Step Lap dizilimi gereği, laminasyonlar arasındaki hava aralığını oluşturan bölgelerin adım adım kaydırılarak konumlandırılması işlemi, hava aralıkları dikey eksen boyunca manyetik akı yoğunluğu artışını önlediğinden, mıknatıslanma akımı ve çekirdek kayıplarında azalma meydana gelmektedir [72].

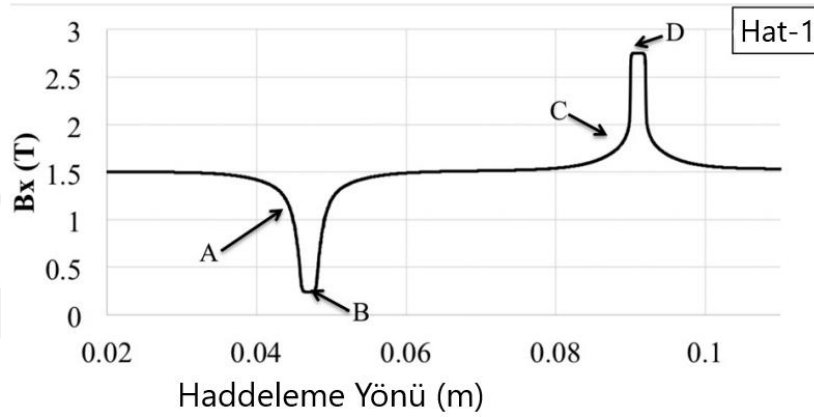
2015 yılında Tang ve ark. yaptıkları çalışmada, sıklıkla kullanılan çekirdek tipi olan 45° Mitred joint yapısını ele almışlar, laminasyon yığınlarının adım-basamak sayılarına göre, tek adımlı Single Step Lap ve çok adımlı Multi Step Lap dizilimlerindeki akı yoğunluğu dağılımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çekirdek materyali için tanecik yönlendirmeli M6 anizotropik materyal kullanılmıştır. Ayrıca SSL ve MSL modellerinde laminasyonlar arası hava aralığı uzunluğu her iki model için 2mm ve her bir adım aralığı uzunluğu 9 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.29 Single Step Lap akı yoğunluğu dağılımı[13]

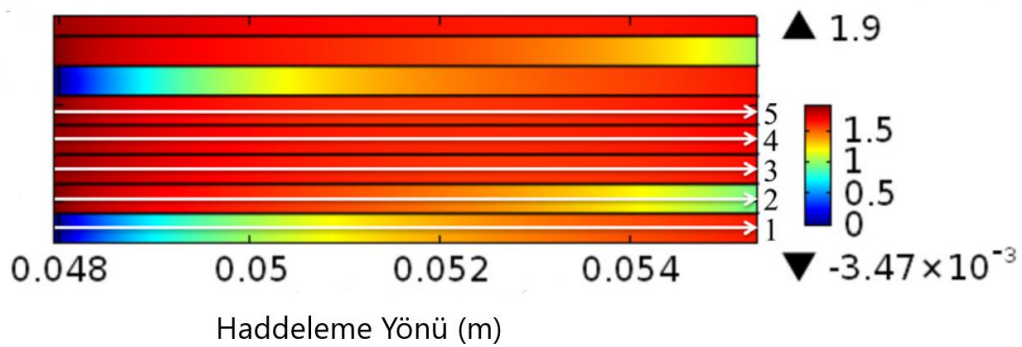
Yapılan çalışma neticesinde anlaşılmaktadır ki; Şekil 2.29’de gösterilen Single Step dizilimli çekirdek yapısında, Hat-1 üzerinde A’dan B’ye doğru manyetik akı 5 numaralı laminasyon üzerinden hava boşluğuna yaklaştıkça, haddelme yönündeki

akı azalmakta, hava aralığından az miktarda manyetik akı geçmekte ve manyetik akı, daha düşük relüktansa sahip C ve D yolunu izleyerek komşu laminasyonlar üzerinden yoluna devam etmektedir. Yine aynı Single Step Lap yapısında hava aralığı dikey ekseninde, altındaki ve üstündeki laminasyonlarda, örneğin 6,4 numaralı laminasyon ve D bölgesinde, lokal yüksek endüksiyon ve aşırı doyum bölgeleri görülmüştür. Bununla birlikte görülen maksimum akı yoğunluğu değeri 2.75 T olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.30 Single Step Lap hat-1 akı değişimi[13]

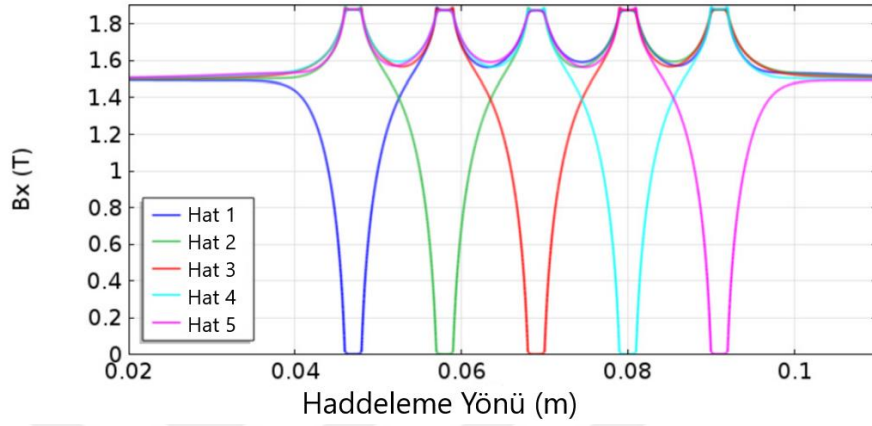
Şekil 2.30'dan görülebileceği üzere Hat-1 boyunca manyetik akı yoğunluğu A'dan B'ye hava aralığına doğru yaklaştıkça 0.25 T değerine kadar düşmektedir ve komşu laminasyon aracılığıyla C'den D'ye doğru devam etmektedir.



Şekil 2.31 Multi Step Lap akı yoğunluğu dağılımı [13]

Şekil 2.31'de görülen Multi Step Lap dizilimi için toplam adım sayısı 5 adım olarak kullanılmıştır. Laminasyonlarda ise bölgesel en yüksek akı yoğunluğu 1.9 T olarak,

Single Step Lap'e göre yaklaşık %30 daha düşük olduğu gözlenmiş ve 1 numaralı laminasyonda olduğu gibi hava aralıklarından çok düşük yoğunlukta manyetik akı geçtiği görülmüştür. Ayrıca, adımların tamamlandığı komşu beş adet laminasyon arasında, 2,3,4,5 numaralı saclardan akı yoğunluğunun genel olarak homojen şekilde dağıldığı görülmektedir.

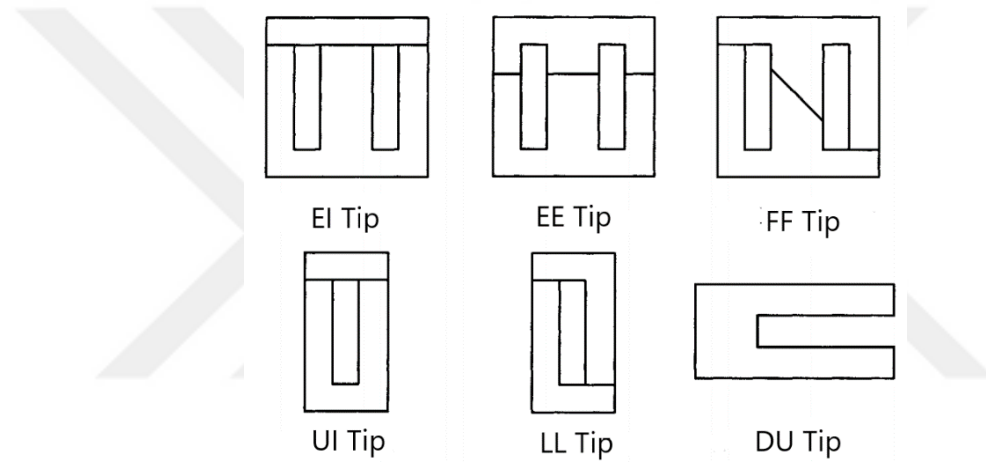


Şekil 2.32 Multi Step Lap hat-1-2-3-4-5 akı değişimi [13]

Şekil 2.32'den görülebileceği gibi, Multi Step Lap dizilimde laminasyonlar arası hava aralıklarında var olan akı yoğunluğunun çok düşük bir değere ulaştığı, yaklaşık 4 mT olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte Multi Step Lap tekniğinin, çekirdek kayıplarını azaltmak açısından Single Step Lap dizilimine göre daha başarılı olduğu vurgulanmıştır.

YENİ BİR GEÇMELİ ÇEKİRDEK GEOMETRİSİNİN TANITILMASI

İşletme amacına, faz sayısına ve güç seviyesine bağlı olarak transformatörlerde çeşitli tiplerde çekirdek geometrileri kullanılmaktadır. Üç fazlı transformatörler için genellikle E-I tipi çekirdek geometrisi tercih edilmektedir. Bununla beraber E-I tipi çekirdek geometrisi, aynı zamanda tek fazlı transformatör çekirdekleri için de tercih edilen bir seçenektir. Diğer başlıca geometriler için tek fazlı transformatörlerde yaygın olarak kullanılan EE, FF, LL, UI ve DU çekirdek tipleri sıralanabilir [73].



Şekil 3.33 Yaygın olarak kullanılan çekirdek geometrileri [73]

Şekil 3.1'deki çekirdek tiplerinden görüleceği üzere, çekirdek geometrileri birbirlerinden, manyetik devredeki kesimin yerine ve şekline göre farklılık gösterirler. Her bir geometride laminasyonlar birbiri ile kusursuz şekilde karşı karşıya gelmedikleri için, kesimlerin yer aldığı eklem ya da joint bölgelerinde hava boşlukları kalmaktadır. Jointlerdeki hava boşluğunun manyetik geçirgenliği manyetik devreye göre çok düşük olduğundan, bu bölgede lokal olarak doyuma gidecek kadar akı yoğunluğu yükselmesi görülür.

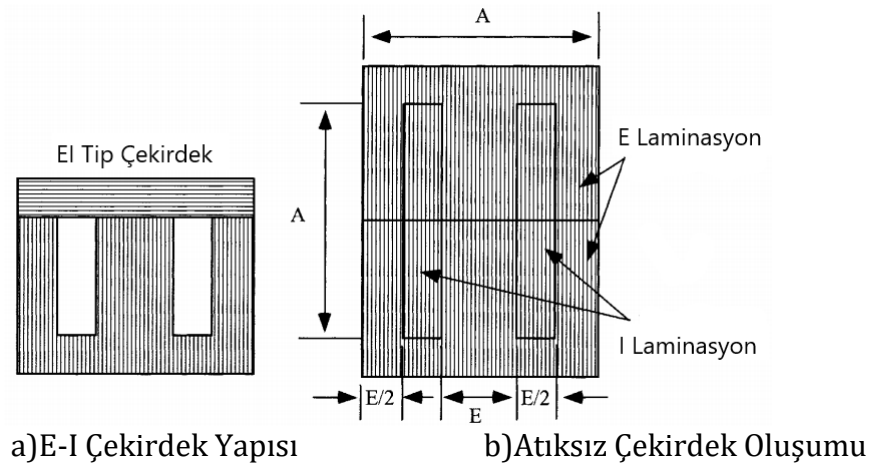
Çekirdek genelinde de olduğu gibi, lokal olarak hava boşlukları çevresinde manyetik akı yoğunluğunun yükselmesi, demir kayıplarının ve mıknatıslanma kayıplarının artması anlamına gelir [74]. İşte bu nedenle yığınlar arasındaki joint bölgelerinde

kayıplar meydana gelmektedir. Bu etkiyi azaltabilmek adına çekirdek montajı esnasında hava boşluklarının olduğu joint bölgelerinde saclar birbiri üzerine mümkün olduğunca sıkı şekilde yaslandırılmalıdır.

E-I tip çekirdek modeli, en yaygın kullanılan çekirdek tipidir. Bu sebeple bu tez çalışmasında geliştirilen geçmeli tip çekirdek modeli ile karşılaştırabilmek için bundan sonraki bölümlerde referans olarak aynı güçte bir E-I tip çekirdek modeli ele alınmış ve her iki modelin de detaylı analizi yapılmıştır.

3.1 E-I Tip Çekirdek

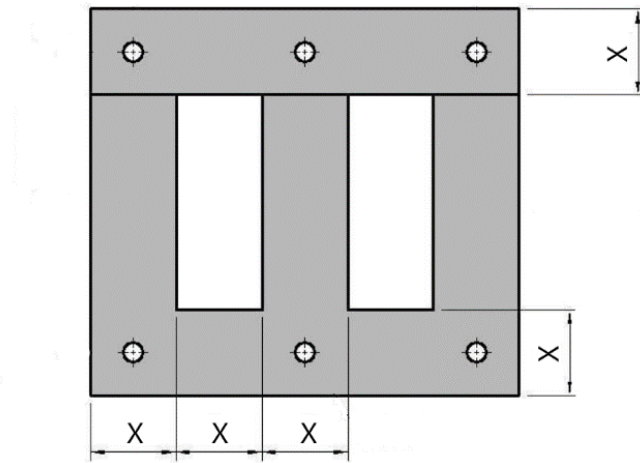
Bu bölümde sırasıyla tek fazlı ve üç fazlı transformatörlerde sıklıkla kullanılan E-I çekirdek çeşitleri ve istifleme (laminasyon) metodları ele alınacaktır. Düşük güçteki tek fazlı transformatörlerde genellikle mıknatıslanma akımının ve kayıpların daha az olduğu E-I tip çekirdek laminasyonu tercih edilmektedir [74]. E-I tip çekirdek yapısının tek fazlı transformatörlerde kullanılmasının diğer önemli sebebi de diğer çekirdek yapılarına göre daha ekonomik olmasıdır. Bu tip çekirdekte, diğer türlere nazaran daha az demir sac malzemesi kullanılmakta ve atık malzeme oluşmamaktadır. Şekil 3.2'den görülebileceği üzere sac imalatı esnasında boyunduruk I laminasyonu, sacdan kesilen E laminasyonlarından geriye kalan malzeme ile imal edilmektedir. Şekil 3.2'deki gibi E-I çekirdek kullanımı sayesinde tek fazlı transformatörler için iki ayrı bacakta iki ayrı sargı kullanmak yerine sadece geniş olan orta bacak üzerinde sargıları konumlandırmak yeterli olabilecektir.



Şekil 3.34 Tek fazlı E-I çekirdek yapısı [73]

Atık malzeme oluşmaması için dış bacakların genişliği genelde Şekil 3.2(a) ve 3.20(b)'deki gibi orta bacak genişliğinin yarısı olacak şekilde tasarlanır. Düşük kayıplı bir uygulama yapılmak istendiği takdirde mıknatıslanma akımını azaltmak için dış bacakların genişliği arttırılabilir [74]. Böylece dış bacaklarda akı yoğunluğu ve mıknatıslanma kayıpları azalacaktır. Ancak bu durumda artık 3.2 (b)'de verilen atıksız çekirdek tasarımı söz konusu olmayacağından, çekirdek malzemenin maliyetinde artış olması göz önüne alınması gereken bir husustur.

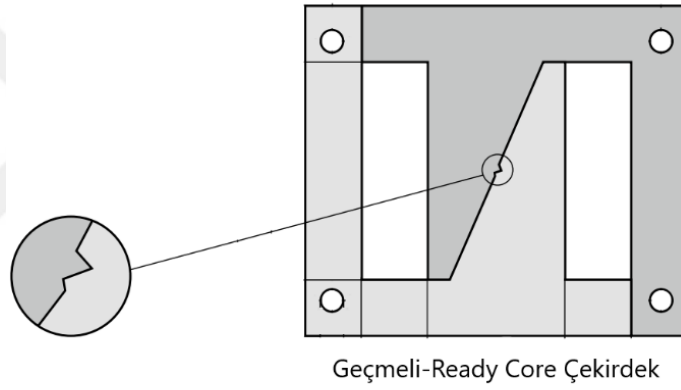
Daha önce bahsedildiği gibi E-I çekirdek geometrisi üç fazlı transformatörler içinde en çok kullanılan çekirdek tipidir. Şekil 3.3'ten görülebileceği gibi, tek fazlı transformatörler için kullanılan E-I geometrisi ile kıyaslandığında, üç fazlı transformatörlerde kullanılan E-I çekirdeklerde orta ve dış bacakların genişlikleri aynıdır. Tek fazlı E-I çekirdek tipinde olduğu gibi atık oluşturmayıp, sacın tamamından bacak ve boyunduruk olacak şekilde üretim yapmak mümkündür. Belirli bir güç sınırı olmamakta birlikte genellikle 40-50 kVA'ya kadar üç fazlı küçük güçteki transformatörlerde ve ayrıca dağıtım transformatörlerinde E-I tipi çekirdekler kullanılmaktadır. Büyük güç transformatörler için çekirdekte bulunan her bir bacak ve boyunduruk ayrı şeritler halinde paketlenmekte ve birbiri üzerine klemp adı verilen yapıların yardımıyla sabitlenmektedir.



Şekil 3.35 Üç fazlı E-I çekirdek yapısı [75]

3.2 Yeni Bir Geçmeli Tip Çekirdek Tasarımı

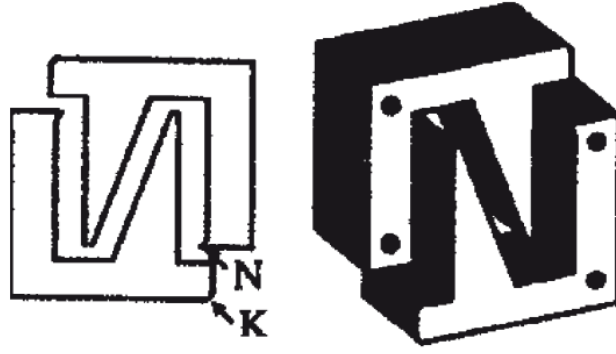
Büyük güçteki transformatörler için çekirdek laminasyonları bir araya getirilmeden önce ihtiyaca ve boyutlarına göre dizayn edilip sonrasında imal edilmektedir. Buna karşılık küçük güçteki transformatör çekirdekleri için, üretim maliyetlerini ve süresini azaltmak adına önceden hazırlanmış çeşitli boyutlarda standart atıksız E-I tip ve UI tip elektrik sacları ve laminasyonlar kullanılır [66]. Özellikle 100 VA gibi çok küçük güçlerdeki tek fazlı transformatörler için, önceden hazırlanmış, E-I ve UI türlerin bir türevi olarak Ready Core olarak bilinen laminasyonlar tercih edilmektedir. Ancak Ready Core çekirdek tipinin uygulama alanlarına bakıldığında, üç fazlı transformatörler için şu ana kadar kullanımının söz konusu olmadığı görülmektedir.



Şekil 3.36 Ready Core laminasyon görünümü [76]

Bu tez çalışmasında üç fazlı transformatörler için önerilen yeni geçmeli çekirdek tipi tasarlanırken öncül bir referans olarak ready core laminasyon tipi kabul edilmiştir. Ancak ready core laminasyon tipi günümüzde yalnızca tek fazlı transformatörler için kullanılmaktadır. Yukarıda Şekil 3.4'de geçmeli ya da Plug-In çekirdek tipinin öncüsü sayılabilecek ready core laminasyon görünümü verilmiştir.

Ready core tip çekirdekler, önceden bir araya getirilmiş boyunduruk ve bacak paketlerinin birbiri üzerine kuvvet uygulanmasıyla kenetlenip, orta bacak üzerindeki Şekil 3.5 (a)'da gösterildiği gibi N, K harfleri ile gösterilen çentik ve çıkıntılar sayesinde kilitlenir ve sabit bir yapı meydana getirirler.

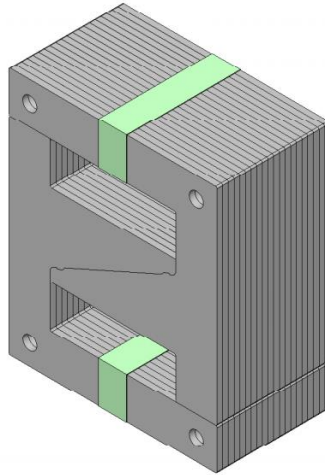


a)Çentikli Ready Core Yapısı

b)Kaynaklı Ready Core Yapısı

Şekil 3.5 Ready Core laminasyon şekilleri [66]

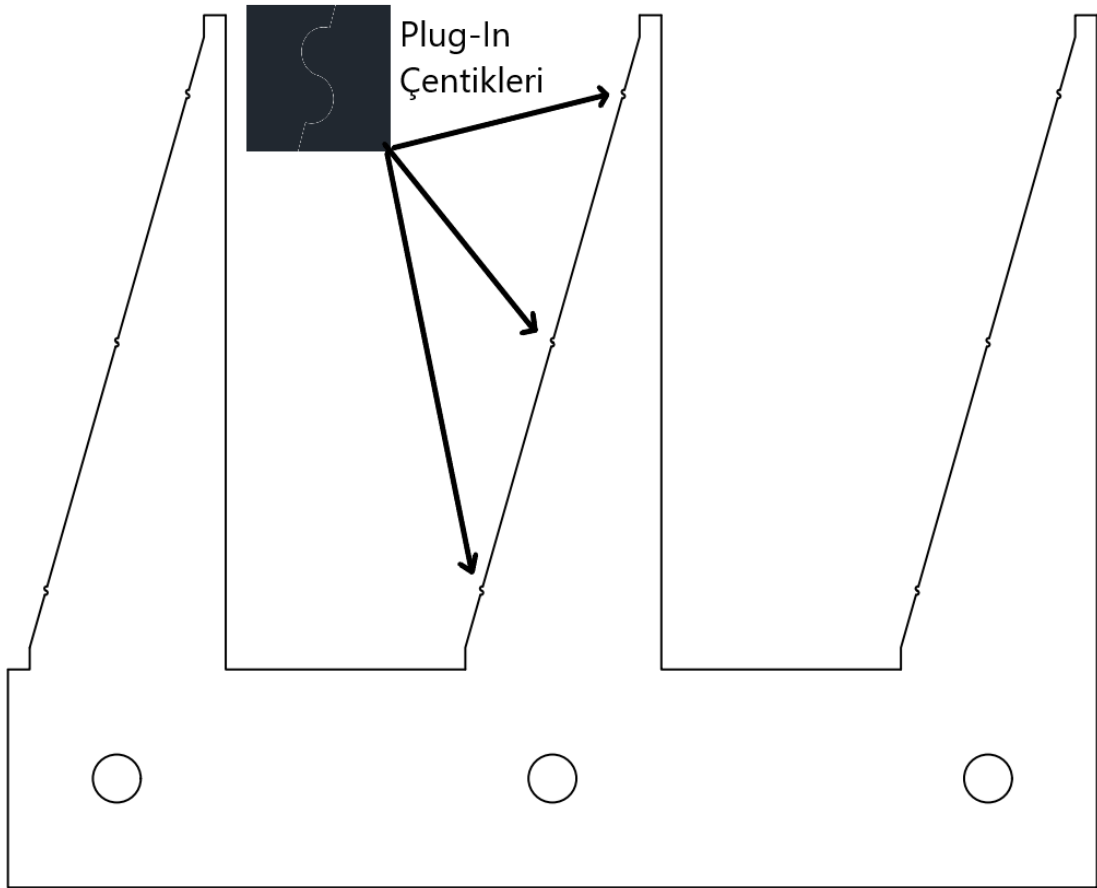
Şekil 3.5 (b)'de gösterilen ready core yapısında ise çekirdek paketlerinin kaynaklanması ile sabit bir yapı mümkün olabilir. Genel olarak ready core laminasyon tipine bakıldığında çekirdeği oluşturan bacak ve boyunduruk parçaları birbiri ile tamamen aynı ölçülerde imal edilmekte, böylelikle çekirdek montaj işlemi oldukça kolay ve hızlı bir şekilde mümkün olmaktadır. Esasen manyetik özelliklerine bakıldığında, bu tip çekirdeklerde orta bacak üzerinde uzun bir hava boşluğu hattı mevcut olduğundan dolayı manyetik olarak mümkün olan en verimli şartları sağlanmıyor olmasına rağmen, çentikler sayesinde hazır sac paketleri ile hızlı ve pratik bir üretim gerçekleştirebilme imkanı sunduğu için avantajlıdır [63]. Aşağıda Şekil 3.6'da paketlenmiş ready core çekirdek modeli gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Ready Core dizilmiş örnek çekirdek yapısı [77]

3.2.1 Üç Fazlı Geçmeli Tip Çekirdek Yapısı

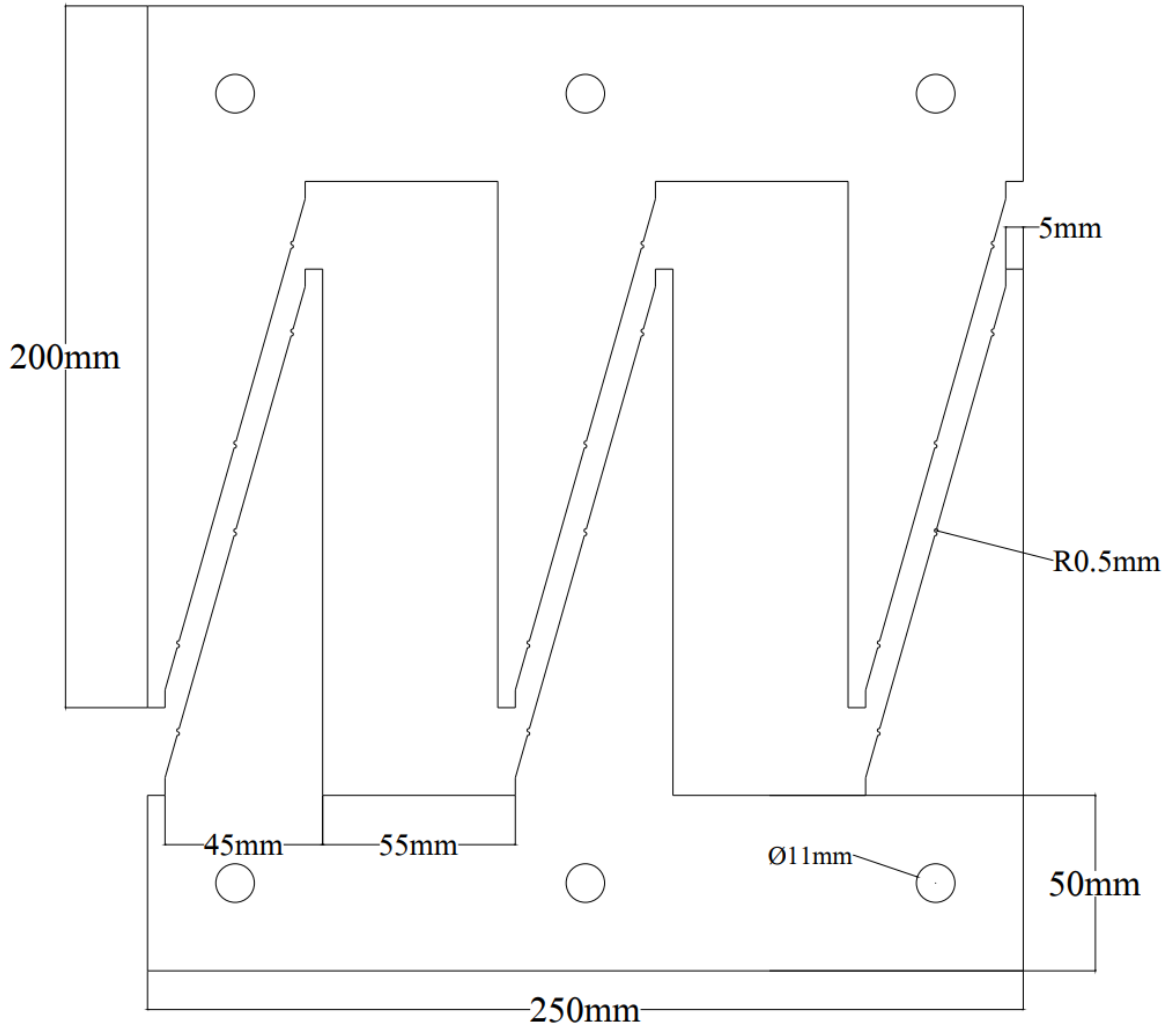
Geçmeli tip ve ready core çekirdek yapısı ile ilgili yapılan literatür araştırmasında, bu konuda özellikle akademik çalışmaların yetersiz olduğu ve yeterli kaynak bulunamadığı görülmüştür. Üreticiler açısından ise ready core çekirdek yapısının kullanımı yalnızca küçük güçteki tek fazlı transformatörler için mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada önerilecek yeni çekirdek modeli ile ready core geçmeli çekirdek tipinin üç fazlı ve daha büyük güç seviyesindeki transformatörler için de uygun bir seçenek olması hedeflenmektedir.



Şekil 3.37 Önerilen üç fazlı Plug-In çekirdek yapısı

Şekil 3.7den görülebileceği gibi önerilen 3 Fazlı Plug-In çekirdek modelinde bacaklar boyunca eşit olarak dağıtılmış üçer adet iç bükey ve dış bükey yuvarlak

sıkıştırma çentikleri yer almaktadır. Yeni Plug-In modeline göre çekirdek, Şekil 3.8'deki gibi karşılıklı olarak konumlandırılan ve boyunduruk üzerinden kuvvet uygulanarak, çentikler yardımıyla birbirine sabitlenen laminasyon paketlerinden oluşmaktadır. Alt ve üst laminasyon paketlerinin önceden kendi içinde sorunsuz bir şekilde civata ile sıkıştırılıp sabit halde kalabilmeleri için ayrıca her bacak altında civata delikleri oluşturulmuştur.



Şekil 3.38 Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk birleşmiş hali

TRANSFORMATÖRÜN MANYETİK MODELLENMESİ ve BENZETİM ÇALIŞMASI

Transformatör ve elektrik makinalarının yer aldığı bütün elektromekanik sistemlerde elektromanyetik modelleme verimli bir tasarım elde etmek açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu türdeki sistemlerde manyetik alanının analiz edilebilmesi için öncelikle çeşitli matematiksel hesaplama yöntemlerine başvurulur. Transformatör çekirdeği gibi sınır değerleri belirlenmiş uygulamalarda elektromanyetik alanların hesaplanması, esas olarak kısmi diferansiyel denklemlerin çözülmesi ile mümkün olmaktadır. Tasarım aşamasında öncelikle üzerinde çalışılacak fiziksel yapısının matematiksel yöntemlerle modellenmesi ve daha sonra ilgili modelin sayısal yöntemler yardımıyla çözülmesi gerekmektedir.

4.1 Manyetik Modelleme

Geleneksel bir yol olarak Maxwell manyetik alan denklemleri, analitik metodlarla hesaplanır ve bu denklemlere sınır koşulları eklenerek, matematiksel modelleme elde edilir. Maxwell denklemleri ile elektromanyetik alanların tamamı ifade edilebildiği için, elektromanyetik alan kuramı için bu denklemler temel olarak kabul edilmektedir [78].

$$\nabla \times \vec{E}(t) = -\frac{d\vec{B}(t)}{dt} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \vec{H}(t) = \vec{J}(t) \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{B}(t) = 0 \quad (4.3)$$

Denklem 4.1 Faraday kanunu, Denklem 4.2 Maxwell-Ampere yasası, Denklem 4.3 ise Manyetik Gauss yasası olarak bilinir. Ancak bu denklemler James Maxwell tarafından derlenip yayınlandığı için Maxwell denklemleri olarak da anılmaktadır.

$$B = \mu \cdot H \quad (4.4)$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (4.5)$$

Söz konusu Maxwell denklemleri ile yukarıda verilen Denklem 4.4 ve Denklem 4.5 referans alınarak, manyetik alan şiddeti H ve manyetik akı yoğunluğu B arasındaki bağıntı Denklem 4.6'daki gibi bulunabilir.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma} \nabla \times \vec{H}(t) \right) = - \frac{d\vec{B}(t)}{dt} \quad (4.6)$$

Ancak karmaşık düzen ve problemleri bu hesaplama yolu ile çözmek zahmetli olduğu ve uzun zaman aldığı için, çoğunlukla problemler basitleştirilerek bu yöntemle çözülebilirler [79]. Transformator çekirdeği üzerindeki manyetik alanlar hesaplanırken yukarıda bahsedilen işlemleri kolaylaştırmak adına eşdeğer devre şemalarına dayanan klasik yöntemlere ek olarak, çeşitli sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Ancak söz konusu sayısal yöntemler basitleştirme dereceleri ve elde edilen sonuçların gerçeğe yakınlık dereceleri bakımından farklılık göstermektedir. Sıklıkla kullanılan sayısal yöntemler aşağıdaki şekilde listelenmiştir [80].

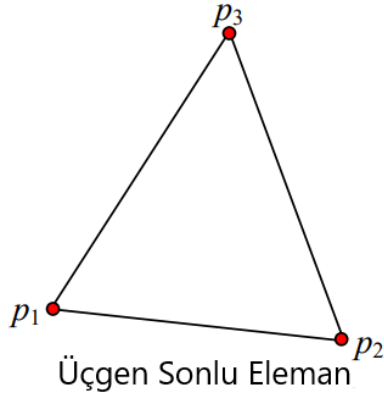
- Sonlu Elemanlar Yöntemi
- Sonlu Farklar Yöntemi
- Moment Metodu
- Nokta Eşleştirme (Point Matching)
- Spektral Alan Analizi (Spectral Domain Analysis)
- Genel Kırınım Teorisi (General Theory of Diffraction)

Simülasyon imkanı sunan yazılımların temelinde de yukarıda bahsi geçen sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en çok tercih edileni ve bu tez çalışmasında da kullanılacak yöntem Sonlu Elemanlar Yöntemi'dir.

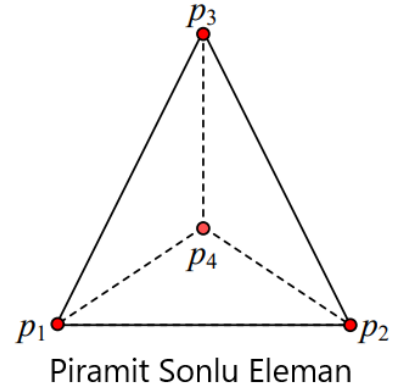
4.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) 1943 yılında ilk olarak matematikçi Richard Courant tarafından geliştirilmiştir. Sonrasında 1960 yılında R.W. Clough, sürekli ortam mekaniği ile ilgili yayınladığı çalışmada ilk defa sayısal analiz yöntemi olarak sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır [78]. Elektrik mühendisliği alanında, lineer olmayan manyetik alan probleminin çözümü için ise sonlu elemanlar yönteminin ilk kullanımı 1970 yılında P.Silvester ve K.Chari tarafından gerçekleştirilmiştir [81].

Sonlu elemanlar yöntemi ile öncelikle hesaplanacak olan iki boyutlu (2D) alan veya üç boyutlu (3D) hacim, herhangi bir sayıda alt bölgelere bölünmektedir. Bu alt bölgelerin sayısı mümkün olduğunca en fazla olacak şekilde belirlendiği takdirde, toplamda gerçeğe yakınsayacak biçimde sonlu bir sayı kadar alt bölge elde edilmiş olur. Problem çözümü adına her bir alt bölge için hesaplama yapılır ve alt bölgelerin her biri denklemler ile ifade edilir. Böylece bütünü oluşturan parçalar yani alt bölgeler üzerinden yaklaşık çözüm elde edilmesi beklenir. Şekil 4.1'de 2D ve 3D olarak sonlu elemanlar gösterilmiştir.



a)2D Üçgen Sonlu Eleman



b)3D Piramit Sonlu Eleman

Şekil 4.39 2D üçgen ve 3D piramit sonlu elemanlar [70]

Her bir 2D üçgen sonlu elemanın alanı Denklem 3.19 daki gibi hesaplanacaktır.

$$A = \frac{1}{2} \left| \det \begin{pmatrix} 1 & P_1(x, y) \\ 1 & P_2(x, y) \\ 1 & P_3(x, y) \end{pmatrix} \right| \quad (4.7)$$

Üç boyutlu hesaplama yapabilmek için her bir sonlu elemanın 3D piramit olarak hacminin Denklem 3.20'deki gibi hesaplanması gerekir.

$$V = \frac{1}{6} \left| \det \begin{pmatrix} P_2(x, y, z) - P_1(x, y, z) \\ P_3(x, y, z) - P_1(x, y, z) \\ P_4(x, y, z) - P_1(x, y, z) \end{pmatrix} \right| \quad (4.8)$$

Denklem 4.7 ve Denklem 4.8 ile determinant değerlerinin hesaplanmasıyla, iki ve üç boyutlu bölgelere ait alan ve hacim değerleri belirlenir.

Şayet 2D veya 3D bir simülasyon programı kullanılarak, bir transformatör çekirdeği sonlu elemanlar yöntemi ile modellendiği takdirde, çekirdeğe ait alt bölgelerin $B-H$ karakteristiği, yine alt bölgelerin ve dolayısıyla bütün çekirdek modelinin manyetik özelliklerini belirleyecektir [70]. Böylelikle Şekil 4.1'de yer alan her nokta ve her doğrultudaki (2D için x, y 3D için x, y, z) B akı yoğunluğu değerleri elde edilebilecektir. Manyetik akı yoğunlukları B ve mıknatıslanma kayıpları P_m her bir sonlu eleman için x, y ve z doğrultularında ayrı ayrı hesaplandığı takdirde,

2D üçgen sonlu eleman için ,

$$\bar{B}_x = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 B_{xi}$$

$$\bar{B}_y = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 B_{yi} \quad (4.9)$$

3D piramit sonlu eleman için,

$$\begin{aligned}\bar{B}_x &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{xi} \\ \bar{B}_y &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{yi} \\ \bar{B}_z &= \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 B_{zi}\end{aligned}\tag{4.10}$$

Her bir 2D sonlu eleman için mıknatıslanma kayıplarını P_{m2D} ele alacak olursak,

$$P_{m2D} = (P_s(\bar{B}_x) + P_s(\bar{B}_y)) \cdot d \cdot A\tag{4.11}$$

Her bir 3D sonlu eleman için mıknatıslanma kayıplarını P_{m3D} ele alacak olursak,

$$P_{m3D} = (P_s(\bar{B}_x) + P_s(\bar{B}_y) + P_s(\bar{B}_z)) \cdot d \cdot V\tag{4.12}$$

eşitliklerini yazabiliriz.

Denklem 4.11 ve 4.12 de yer alan P_s değeri, elektrik çeliği üzerinde x, y, z doğrultularında farklı endüksiyon değerlerinde meydana gelecek mıknatıslanma kayıplarını ifade etmekte ve bu değer malzemenin manyetik karakterini tanımlamaktadır. Bu veriler ölçümlerle elde edilmekte ya da çoğunlukla çelik üreticisi tarafından sağlanmaktadır [70]. Ayrıca Denklem 4.11 ve 4.12'de d olarak belirtilen değer, elektrik çeliğinin yoğunluk (density) değeridir.

Buraya kadar anlatılanlardan yola çıkarak simülasyon programı aracılığı ile n adet sonlu elemandan oluşan çekirdekteki toplam mıknatıslanma kayıpları P_{mt} , 2D ve 3D sonlu elemanlar için aşağıda Denklem 4.13 ve 4.14'deki gibi hesaplanabilir.

$$P_{mt2D} = \sum_{i=1}^n P_{m2D(i)}\tag{4.13}$$

$$P_{mt3D} = \sum_{i=1}^n P_{m3D(i)}\tag{4.14}$$

4.3 Geçmeli ve E-I Tip Çekirdekli Transformatörlerin Benzetim Çalışması

Bu bölümde, önerilen Plug-In çekirdek yapısına sahip üç fazlı transformatör ile üç fazlı referans E-I tip çekirdekli transformatör ANSYS Maxwell 18 simülasyon programı yardımıyla iki boyutlu (2 Dimension, 2D) olarak analiz edilecektir. Sonlu elemanlar analizi yöntemiyle 2D analiz yapılmasına olanak verdiği için bu tez çalışmasında ANSYS Maxwell 18 simülasyon programı tercih edilmiştir. Bununla birlikte literatürde sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalarda üç boyutlu (3 Dimension, 3D) analiz yöntemi de sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu tez çalışmasında yapılacak olan simülasyon ve gerekli analiz sürecini kısaltmak için transformatörler 2D olarak modellenmiştir.

Plug-In çekirdekli ve E-I referans tip transformatörler ANSYS Maxwell 18 ile simüle edilirken sırasıyla izlenen adımları şu şekilde özetlemek mümkün olabilir:

1. Bölüm 3.2.1'de Şekil 3.7'de ölçüleri belirtilmiş olan Plug-In çekirdek ile birlikte aynı bacak boyunduruk boyutlarına sahip referans bir E-I tip çekirdek geometrisi simülasyon programında oluşturulmuştur.
2. Ölçülecek parametreye göre işletilecek olan çözücü (solver) tipi, eddy akım veya transient olacak şekilde belirlenmiştir.
3. Çekirdek ve sargı yapılarının malzemeleri tayin edilmiştir. Bu aşamadan sonra elektriksel uyartımı elde edebilmek için sarım sayıları ve polariteleri dikkate alınarak sargılar oluşturulmuştur.
4. Problemin sınır koşulları ve analiz edilecek bölge belirlenip sonlu sayıda ağ yapısı (mesh) meydana getirilmiştir.
5. Son adım olarak ise analiz işlemlerine ait süre ve hassasiyet derecesi gibi parametreler programa işlenerek analiz ve simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda her iki model için manyetik akı yoğunluğu ve çekirdek kayıp güç dağılımları, çekirdek kayıp değerleri, boşa ve yükte çalışma akımları,

bakır kaybı ve toplam kayıp değerleri, verim yüzdeleri, transient enerjilendirme (Inrush) akım karakteristikleri, primer-sekonder sargılara etkiyen radial-aksiyel kuvvetler elde edilip, sonuçlar değerlendirilmiştir. Her iki tip transformatör için de etiket değerleri olarak Tablo 3.1'deki değerler alınmıştır. Bununla birlikte ilerleyen bölümlerde Tablo 3.1'deki etiket değerlerine uygun olarak üretilmiş Plug-In ve E-I çekirdekli transformatörler boşa kayıp testine tabi tutularak çekirdek kayıp değerleri elde edilmiş, deney sonuçları ve simülasyon sonuçları karşılaştırılıp, sonuçlar irdelenmiştir.

Tablo 4.1 Benzetim çalışmasında yer alan transformatör etiket değerleri

Model	Anma Gücü (kVA)	Primer Gerilim (V)	Sekonder Gerilim (V)	Frekans (Hz)	Bağlantı Vektör Grubu
Plug-In Çekirdek	4,7	400	200	50	Dyn5
E-I Çekirdek					

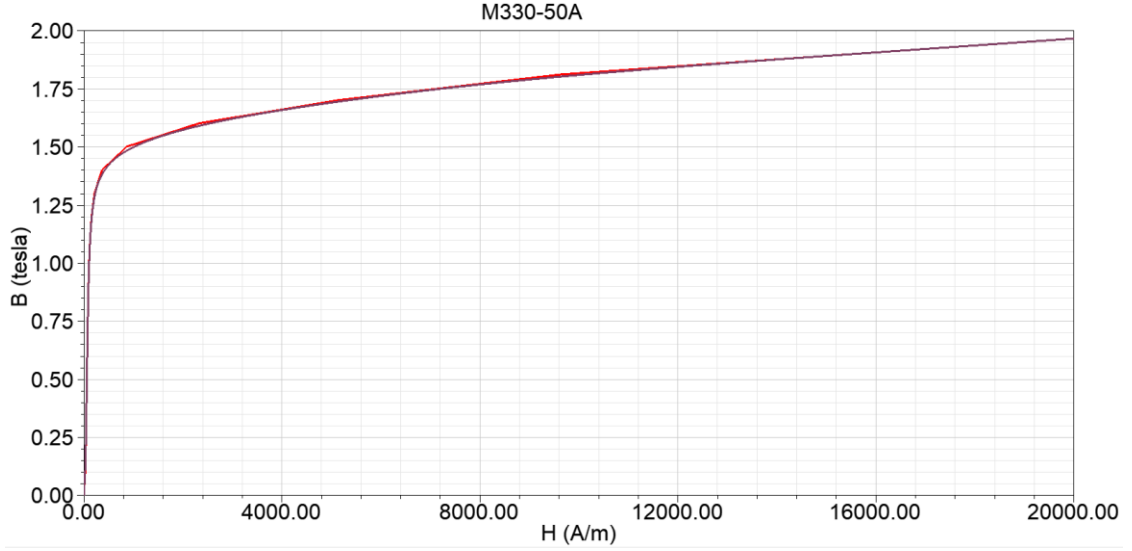
Bölüm 4.3'de bahsedildiği gibi, simülasyon yazılımında E-I tip çekirdeğin boyutları belirlenirken bacak, boyunduruk, civata delikleri ve sargı pencerelerinin uzunluk ve genişlikleri Bölüm 3.2.1 Şekil 3.7'de yer alan Plug-In çekirdek ile aynı olacak şekilde dikkate alınmıştır.

Alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinleri oluşturulurken her bir faz (U,W,V) için kullanılan bobinlere ait sarım sayıları, sargı direnç değerleri ve sargı materyalleri Tablo 3.2'deki gibi verilmiştir. Her iki tip çekirdekli transformatör düşürücü tip olduğu için, primer sargılar yüksek gerilim, sekonder sargılar ise alçak gerilim tarafına ait bobinlerdir.

Tablo 4.2 Bobinlere ait sarım sayıları ve omik direnç değerleri

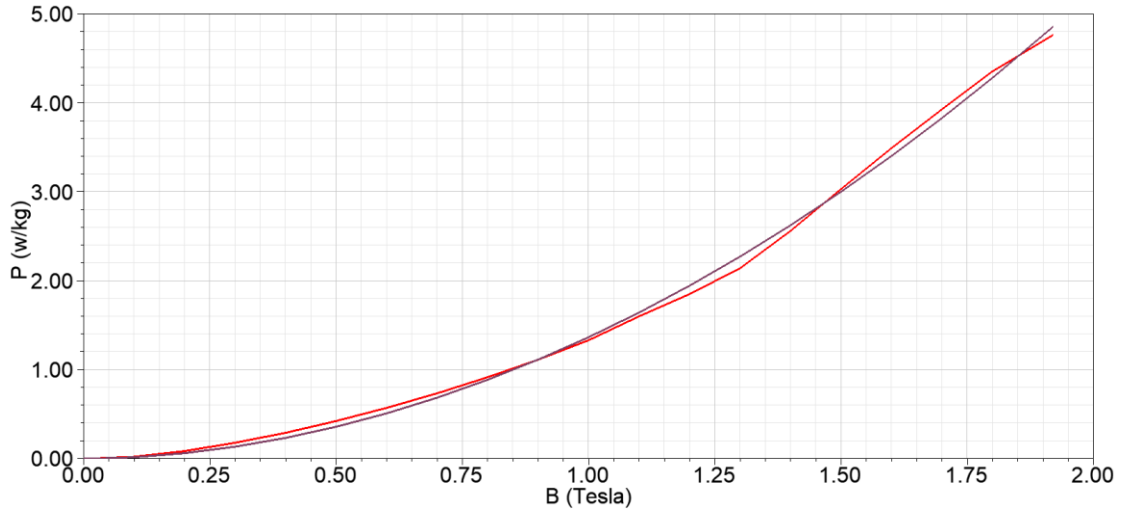
Model	Primer Sarım Sayısı U, W,V	Sekonder Sarım Sayısı u,w,v	Primer Sargı Direnci	Sekonder Sargı Direnci	Sargı Materyali
Plug-In Çekirdek	405	120	1,24 Ω	85,5 m Ω	Cu-Cu
E-I Çekirdek					

Her iki tip transformatör simüle edilirken çekirdek materyali olarak EN 10106 standardına göre M330-50A olarak adlandırılan ya da başka bir açıklamayla 0.50 mm kalınlığında tanecikleri yönlendirilmemiş (Non grain oriented) 1.5 T indüksiyon seviyesinde maksimum 3.3 W/kg kayıp değerine sahip elektrik sacları kullanılmıştır. ANSYS Maxwell programında çekirdek materyali eski AISI (American Iron and Steel Institute) standartlarına göre M27-24G olarak tanımlanmaktadır. Ancak programda tanımlanan M27-24G çekirdek materyali gerçekte ortaya çıkan manyetik akı yoğunluğu ve kayıp değerlerini yansıtmamaktadır. Bundan dolayı program arayüzünde çekirdek materyaline ait çekirdek üreticisinden alınan teknik veriler işlenmiş ve bu verilerden yola çıkarak simülasyon programında B-H ve B-P eğrileri oluşturulmuştur [82]. Bu eğriler çekirdek kayıpları ve akı yoğunlukları modellenirken belirleyici rol oynamaktadırlar. Simülasyonda yer alan çekirdekler için kullanılan M330-50A materyaline ait B-H grafiği Şekil 4.2'den görülebilir.



Şekil 4.2 M330-50A materyal için B-H eğrisi

Çekirdek üreticisinden alınan D kütle yoğunluğu (Mass Density) 7650 kg/m^3 , laminasyon kalınlığı 0.50mm ve iletkenlik (Conductivity) 2331000 S/m değerleri simülasyon programına işlenmiştir. Ayrıca 50-2500Hz aralığındaki frekans değerleri için kayıp değerleri çekirdek üreticisinden temin edilmiş, bu sayede örnek olarak 50Hz frekans değerinde geçerli olan Şekil 4.3'deki B-P eğrisi elde edilmiştir. Böylelikle Şekil 4.3'de her bir indüksiyon değeri için kilogram başına elde edilen W güç kayıp değerleri görülebilmektedir.



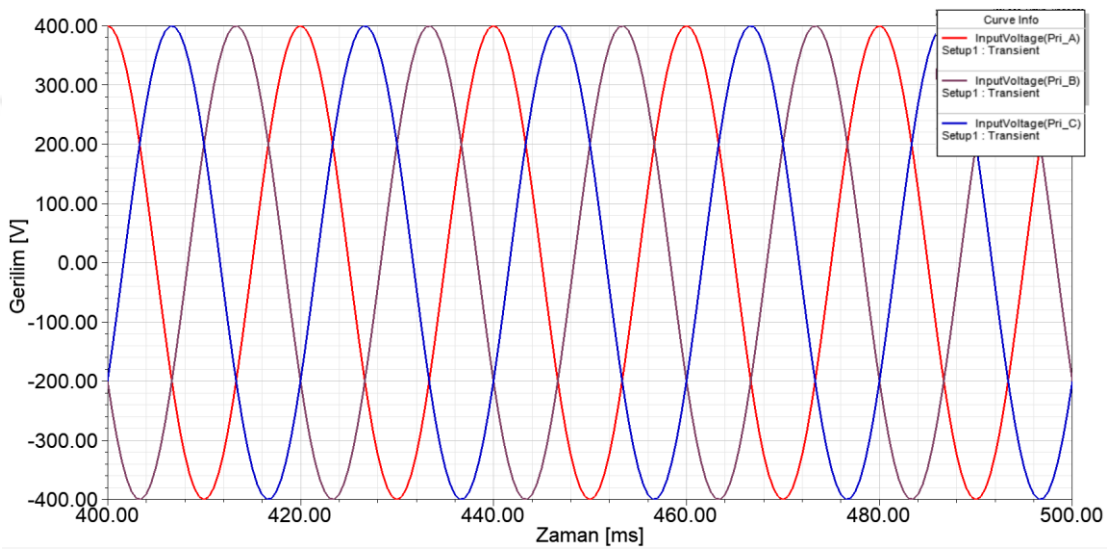
Şekil 4.3 M330-50A materyal için B-P eğrisi

Simülasyon programında gerekli materyaller tanımlandıktan sonra transformatör primer sargılarına uygulanacak 3 fazlı gerilimler 120° derece faz farkı olacak şekilde aşağıdaki Denklem 4.15, 4.16 ve 4.17'deki gibi tanımlanmıştır. Her bir faz için pik gerilim V_{peak} değeri etiket değerleri ile aynı şekilde 400V olarak alınmıştır.

$$400 * (1 - \exp(-50 * time)) * \cos(2 * pi * 50 * time) \quad (4.15)$$

$$400 * (1 - \exp(-50 * time)) * \cos(2 * pi * 50 * time + 120deg) \quad (4.16)$$

$$400 * (1 - \exp(-50 * time)) * \cos(2 * pi * 50 * time + 240deg) \quad (4.17)$$

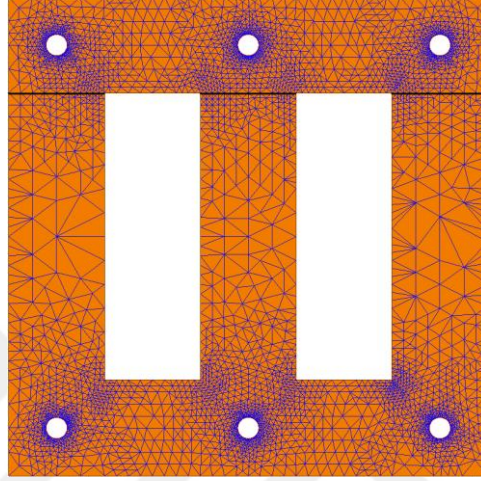


Şekil 4.4 400-500ms için primer sargılara uygulanan gerilim

Gerekli E-I referans tip ve Plug-In çekirdek geometrileri ANSYS Maxwell programında oluşturulup, çekirdek malzeme üreticisinden gelen veriler çerçevesinde B-H ve B-P karakteristikleri program arayüzüne işlenmiştir. Sonraki adımda primer, sekonder sargılara ait bobinler, sarım sayıları ve sargı materyaline ilişkin sayısal değerler Tablo 1.6 de verildiği şekilde tanımlanmıştır. Plug-In çekirdekli ve referans E-I çekirdekli transformatörler ANSYS Maxwell 2D ile simüle edilirken üretim ebatlarıyla aynı olacak şekilde model derinlikleri (Model Depth) 65mm olarak belirlenmiştir. Programda 2D çözümleme yapıldığı için B Manyetik akı yoğunluğu analizi öncesi her iki çekirdek tipi sonlu sayıda üçgen elemana ayrılacak şekilde ağ örgülerine (Mesh) ayrılmıştır.

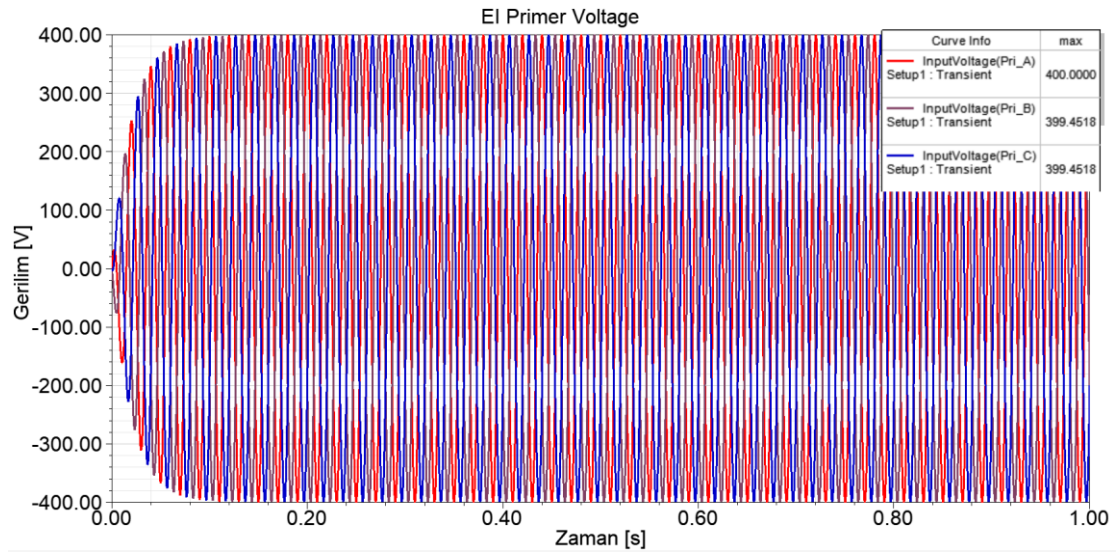
4.3.1 E-I Tip Referans Çekirdek Modelin Benzetim Çalışması

Simülasyon programında E-I tip referans çekirdek modellendikten sonra analiz yapılabilmesi için ağ modellerinin oluşturulması gerekmektedir. Böylece ağ örgüleri elde edildikten sonra simülasyon programında sonlu eleman analizi gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır. E-I tip referans çekirdekli transformatör için oluşturulan ağ modelleri Şekil 4.5'de yer almaktadır.



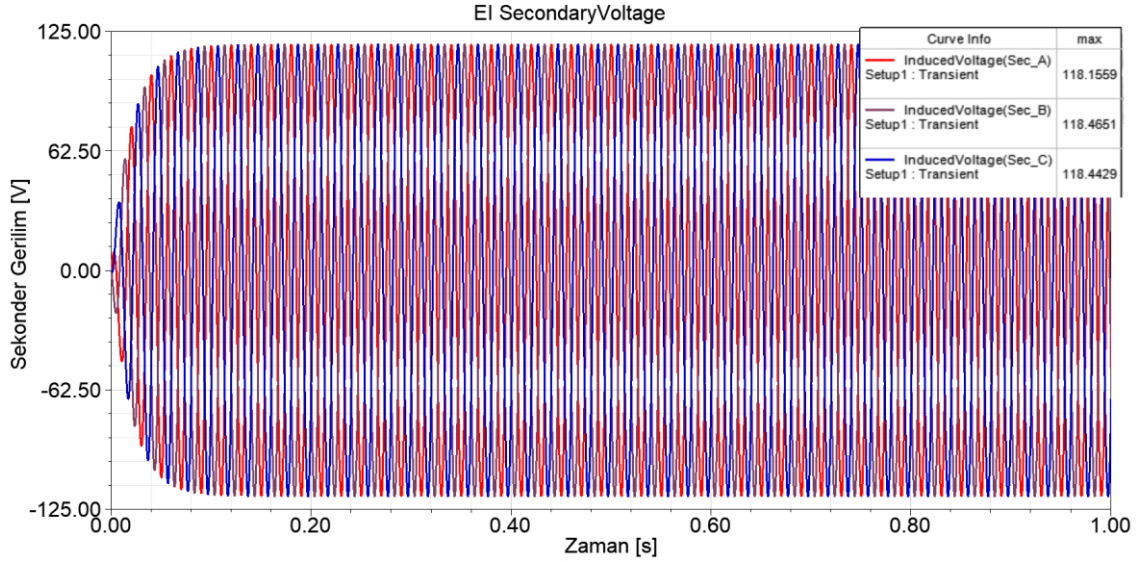
Şekil 4.5 E-I çekirdek Mesh ağ örgüsü

Önceden belirlenen Dyn5 bağlantı grubuna göre simülasyon programında primer sargılara uygulanan gerilim değeri aşağıda Şekil 4.6'da görülmektedir.



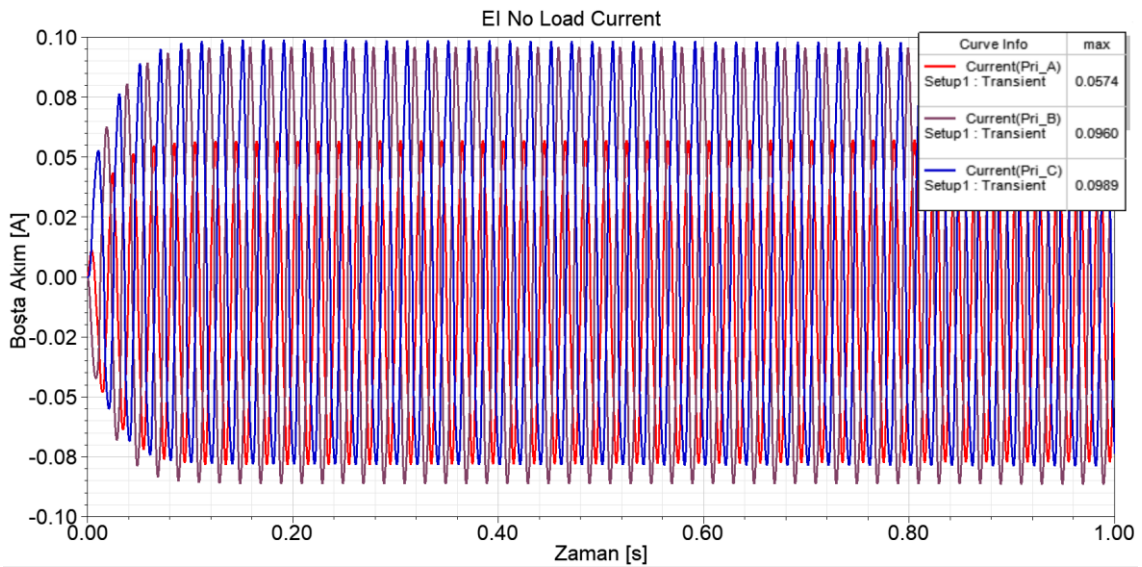
Şekil 4.6 E-I çekirdek için primer sargılara uygulanan gerilim

Sekonder sargılarda her bir faz için endüklenen gerilim değerleri aşağıda Şekil 4.7'den görülebilir. Yıldız bağlı sekonder sargılar için her bir sargıda endüklenen gerilim değeri çıkış gerilim değerinin $\sqrt{3}$ 'de biri kadar olmaktadır.



Şekil 4.40 E-I çekirdek için sekonder sargılarda endüklenen gerilim

Ayrıca boşa çalışma akımı incelendiğinde E-I tip referans çekirdek model için simülasyon programında primer sargılarda her bir fazdan çekilen akımlar aşağıda Şekil 4.8'de verilmiştir.

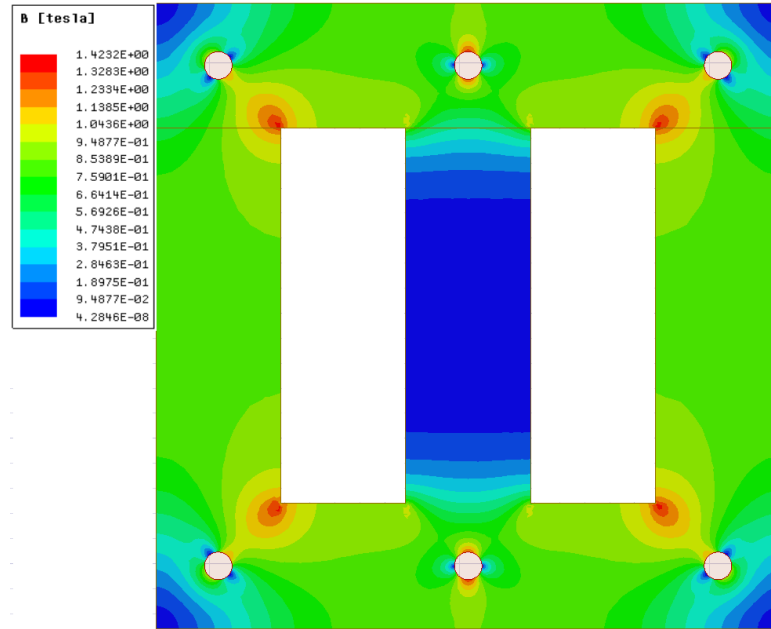


Şekil 4.41 E-I çekirdek için primer boşa çalışma akımı

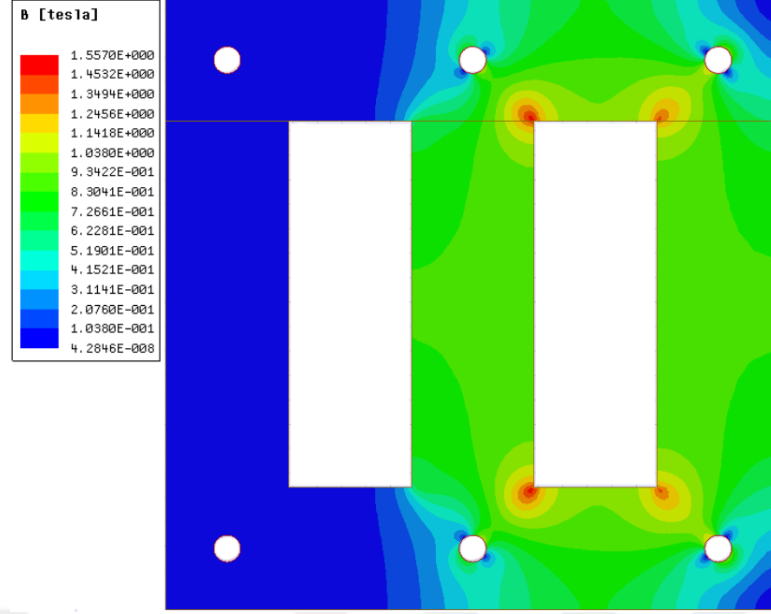
4.3.1.1 E-I Tip Referans Çekirdek Modelin Manyetik Akı Yoğunluğu Analizi

Transformatör çekirdekleri üretilmeden önce manyetik akı yoğunlukları ve nüvedeki akı dağılımları transformatör üreticileri tarafından başlıca dikkat edilen özelliklerden bir tanesidir. Tasarım aşamasında normal işletme koşulları öngörülerek yapılan simülasyon çalışmalarında şu noktaya dikkat edilmelidir: Transformatörün çalışma esnasında çekirdekte oluşacak manyetik akı yoğunluğu değeri çekirdek materyalinin doyum seviyesini aşmamalıdır. Çekirdeğin doyum seviyesini aşacak şekilde uyarılması verimliliği ve transformatörün manyetik performansını olumsuz şekilde etkilemektedir.

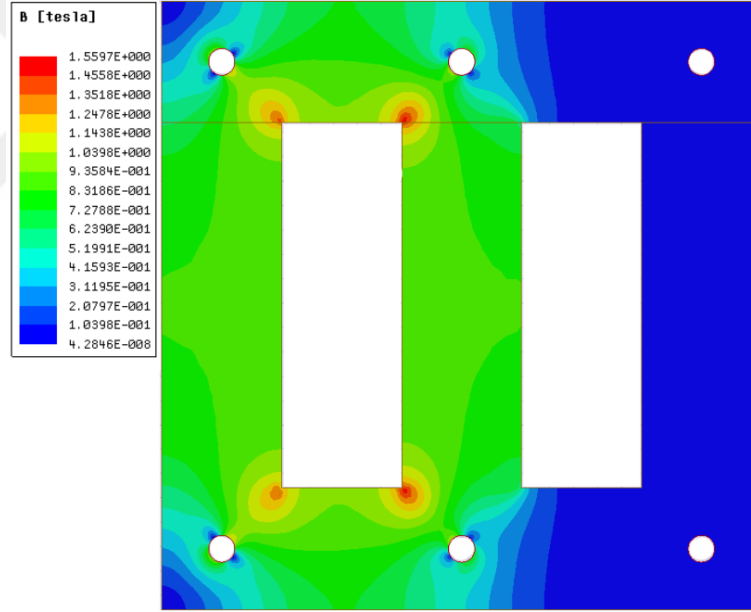
Bu bölümde simülasyon programı kullanılarak yapılan benzetim çalışması sonucunda E-I çekirdek modeline ait B manyetik akı yoğunlukları ve çekirdekteki akı yoğunluğu dağılımları $\omega t=0^\circ$, $\omega t=120^\circ$ ve $\omega t=240^\circ$ için Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de görülebilmektedir. Bununla birlikte, benzetim çalışmasında E-I çekirdek için akı dağılımının düzgün olduğu, ayrıca özellikle joint köşe bölgelerinde ve sargı pencerelerine yakın joint köşe yüzeylerinde manyetik akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.42 E-I çekirdek $\omega t=0^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu



Şekil 4.43 E-I çekirdek $\omega t=120^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu



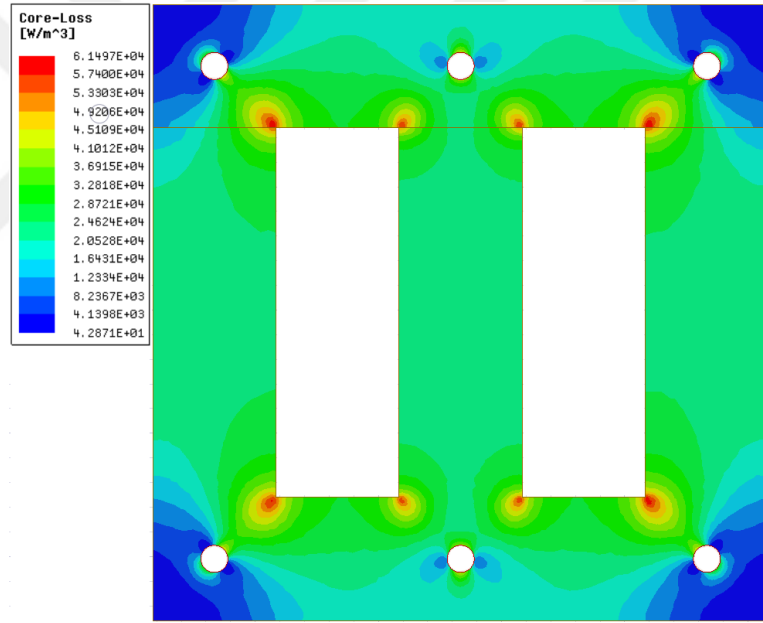
Şekil 4.44 E-I çekirdek $\omega t=240^\circ$ için anlık manyetik akı yoğunluğu

Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'e bakıldığında manyetik akının, haddeleme yönünden sapmaya başladığı pencere köşe bölgelerine yakın olan joint noktalarında maksimum değerlerine eriştiği görülmektedir. Ayrıca benzetim çalışmasında E-I çekirdekli modelde $\omega t=0-360^\circ$ aralığı için elde edilen en yüksek B manyetik akı yoğunluğu değeri 1,6464 T olarak tespit edilmiştir.

4.3.1.2 E-I Tip Referans Modelin Çekirdek Kayıp Analizi

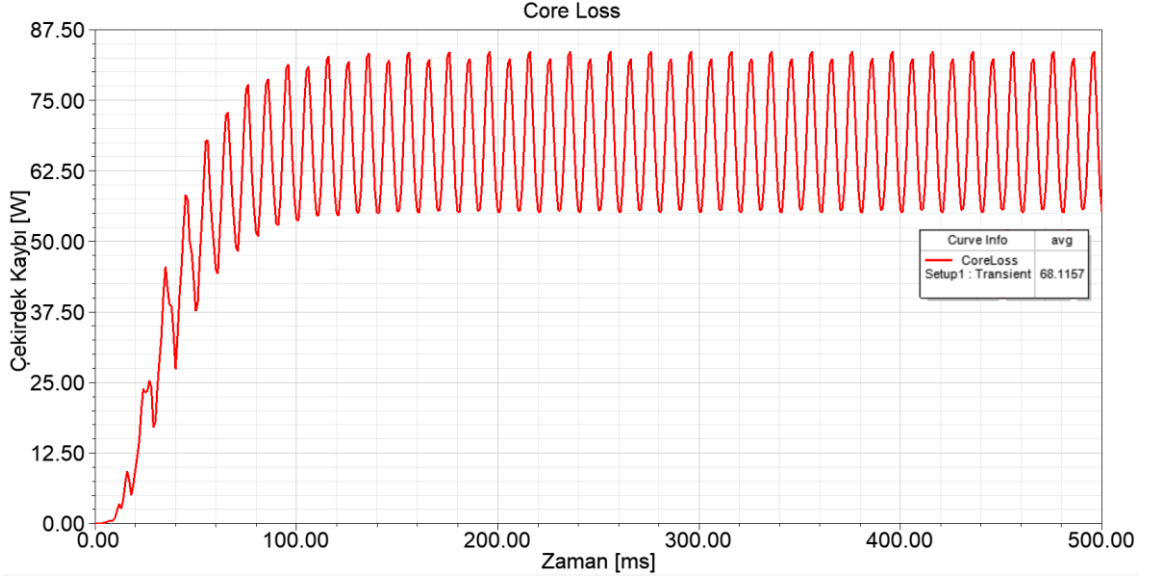
Çekirdek kayıpları olarak da adlandırılan boşa kayıplar, transformatör sekonder sargılarında aktif olarak bir yük bulunmadığı durumda, primer sargılar enerjilendiği andan itibaren ortaya çıkarlar. Çekirdek kaybı yükten bağımsız olmakla birlikte, transformatörün yüklenmesi ile birlikte sabit bir değer olarak kalacağından, transformatör üretimi ve işletimi açısından bu kayıpların mümkün olduğunca düşük seviyede tutulması önemli bir konudur. Çekirdek kayıpları, nüve üzerindeki manyetik devrede harcanan gücün ısıya dönüşmesi ile meydana gelmektedir.

Bu bölümde boşa çalışma koşulları gözetilerek, E-I çekirdekli üç fazlı transformatörün çekirdek kayıpları ve W/m^3 başına çekirdek kayıp dağılımları incelenmiştir.



Şekil 4.45 E-I çekirdek $\omega t=0^\circ$ için çekirdek kayıp dağılımı W/m^3

Şekil 4.12'ye bakıldığında çekirdek kayıpları, pencere köşe bölgelerine yakın olan ve manyetik akının haddelme yönünden saptığı lokal bölgelerde maksimum değerlerine eriştiği görülmektedir. Ayrıca E-I referans çekirdekte $\omega t=0^\circ$ için elde edilen lokal en yüksek P_0 çekirdek kayıp değeri $6,1497 \times 10^4 W/m^3$ olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.46 E-I çekirdek 0-500ms için çekirdek kayıp değeri

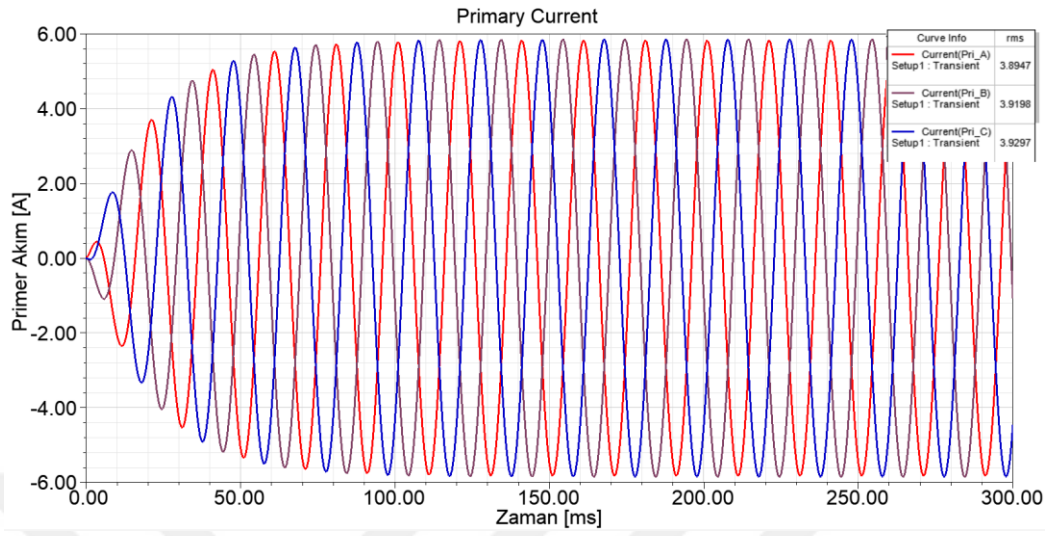
Çekirdek kayıp dağılımına ek olarak, Şekil 4.13'den görülebileceği gibi 0-500ms zaman aralığında, E-I çekirdek için ortalama çekirdek kaybı analiz edilmiştir. Ancak çekirdek kaybının zamana göre belirli bir rejim izlediği zaman aralığı ele alındığında; örneğin 400-500ms aralığında E-I tip için çekirdek kaybının ortalama değeri 68,1157 W olarak tespit edilmiştir.

Yapılan simülasyon çalışması sonucunda her iki çekirdek tipi için elde edilen boşta kayıp değerleri dikkate alındığında, bulunan kayıp değerlerine üretim ve montaj esnasında çekirdek laminasyonlarının maruz kaldığı mekanik stresin sebep olduğu kayıplar, imalat sonrası çekirdeklerde kalan kenar köşe çapaklarının yol açacağı kayıplar, saçak akı kayıpları, sirkülasyon akımı kayıpları gibi faktörler dahil olmayacaktır. Bundan dolayı simülasyon sonucu ve üretim sonrası test sonuçları arasında farklılıklar meydana gelmesi beklenen bir durumdur [83].

4.3.1.3 E-I Tip Referans Çekirdek Modelin Bakır Kaybı Analizi

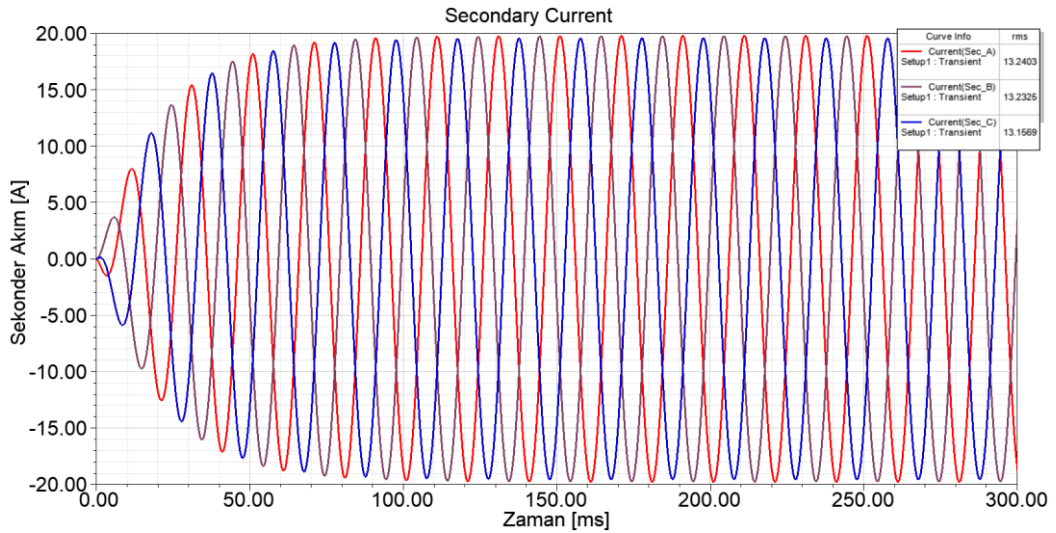
Benzetim çalışmasında P_{cu} bakır kayıplarını analiz etmek için sekonder sargılar kısa devre edilerek, primer sargılar üzerinden 3,91 A değerinde I_{pn} primer nominal akımı geçecek şekilde, primer sargılara 0-300ms zaman aralığında 13,69 V olarak U_k

değerinde kısa devre gerilimi uygulanmıştır. Primer sargılarda 0-300 ms aralığında her bir faz için geçen akımların grafiği aşağıda Şekil 4.14'den görülebilmektedir.



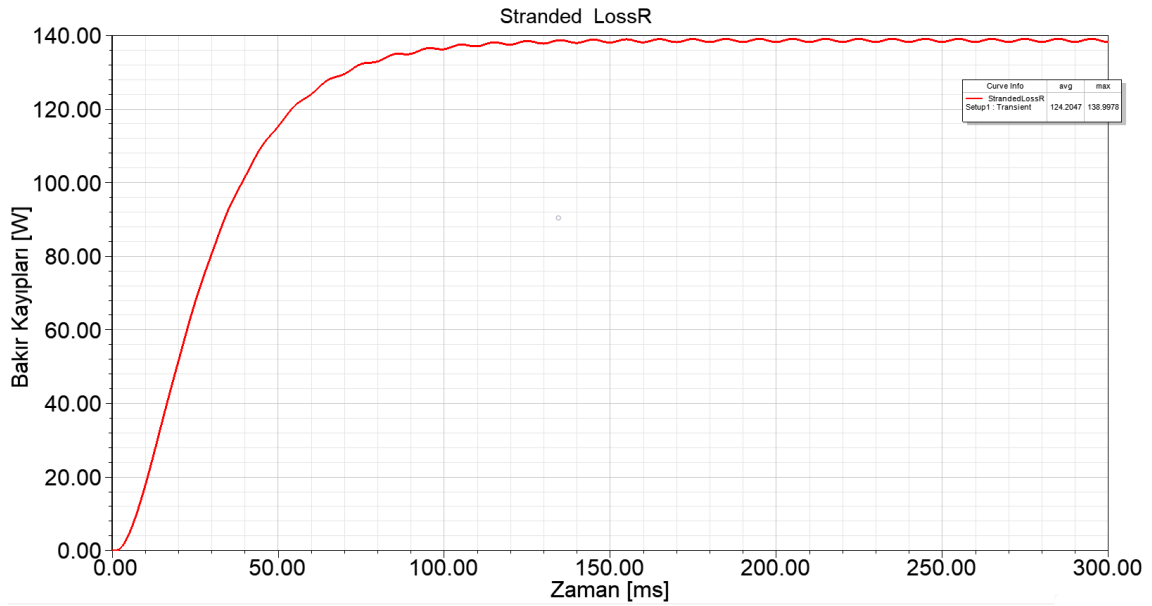
Şekil 4.47 E-I çekirdek için primer sargılara uygulanan nominal akım

Tablo 1.5'deki transformatör etiket değerleri dikkate alınıp her bir sekonder sargıdan geçecek akım I_{sn} 13,3 A olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, benzetim çalışmasında 0-300 ms aralığında sekonder sargılarda her bir faz için elde edilen akımların değeri ve grafiği aşağıda Şekil 4.15'den görülebilmektedir.



Şekil 4.48 E-I çekirdek için sekonder sargılardan geçen nominal akım

Benzetim çalışmasında sargılarda kullanılan iletkenler bakır tel (stranded) olarak tanımlanmıştır. Tablo 1.7’de iletken tel üreticisinden verileri alınan ve uzunlukları dikkate alınarak hesaplanan R_p primer sargı direnç ve R_s sekonder sargı direnç değerleri simülasyon programında girilerek Şekil 4.16’da toplam bakır kayıpları (Stranded LossR) elde edilmiştir. Stranded LossR hesaplanırken her bir sargının R_p ve R_s değerleri, I_{pn} ve I_{sn} değerlerinin kareleri göz önüne alınmaktadır. Böylelikle elde edilen P_{cu} bakır kaybı değeri $3 \times (R_p I_{pn}^2 + R_s I_{sn}^2)$ ifadesine eşit olmaktadır.



Şekil 4.49 E-I çekirdek 0-300ms aralığı için bakır kayıpları

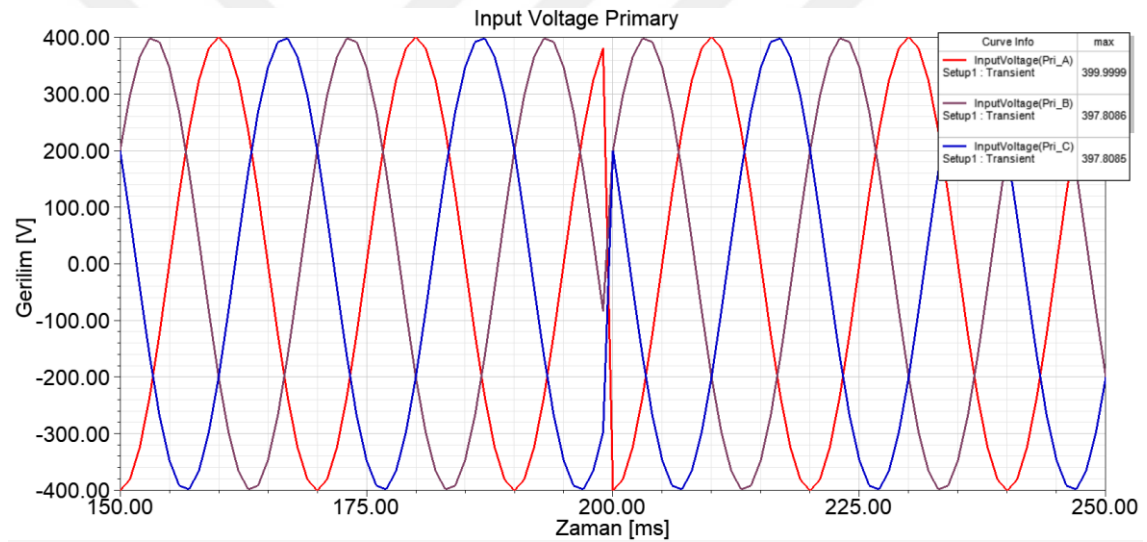
Şekil 4.16’dan görülebileceği üzere benzetim çalışmasında P_{cu} bakır kaybı 0-300ms aralığında ortalama 124,2047W olacak şekilde hesaplanmıştır. Ancak bakır kaybının zamana göre belirli bir rejim izlediği zaman dilimi ele alındığında; örneğin 200-300ms aralığında E-I tip için bakır kaybının ortalama değeri 138,5687 W olarak tespit edilmiştir.

4.3.1.4 E-I Tip Referans Çekirdek Modelin Enerjilendirme Akımı Analizi

Transformatörlerin enerjisi kesildiğinde nüvenin manyetik karakteristiğinden dolayı çekirdekte halen bir miktar artık akı kalır. Bu durumda transformatör devreye alınacak olursa, çekirdekteki artık akıdan dolayı nüve doyuma girer ve çok

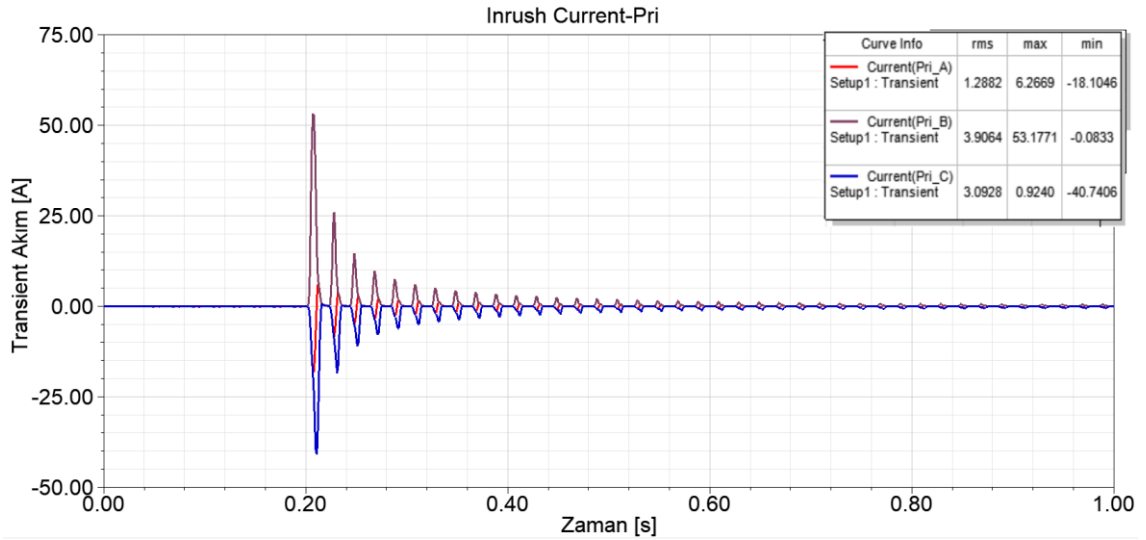
kısa bir zaman aralığında yüksek akımlar oluşması söz konusu olur. Transformatörlerde oluşan bu akımlara transient veya inrush akımları adı verilir ve bazı durumlarda bu akım değeri kısa devre akım değerinden bile yüksek olabilmektedir. Sonuçları göz önüne alındığında transient akımlar hem transformatör, hem de şebeke üzerinde zarar verici etkilere neden olmaktadır.

Benzetim çalışmasında nüvede artık akı oluşturabilmek için E-I çekirdekli transformatörün primer sargılarından gerilim değeri 200 ms anında değişecek şekilde 400 V gerilim uygulanmıştır. Aşağıda Şekil 4.17’de 150-200 ms zaman aralığında gerilim değişimine ait grafik görülebilmektedir. Her bir faza ait transient akım değişimini ve maksimum değerlerini elde etmek için benzetim çalışmasının toplam süresi 1 sn, analiz step adımı ise 1ms olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.50 E-I tip çekirdek 200ms anında gerilim değişimi

Enerjilendirme sonrası primer sargılardan geçen her bir faza ait akım değerleri ve 0-1000ms aralığındaki zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.18’den görülebileceği üzere anlık olarak primer sargılar A fazı için -18,10 A , B fazı için 53,17 A , C fazlı için ise -40,74 A değerlerinde akım çekmişlerdir. Beklenildiği üzere bu değerler, her bir sargıda 3,92 A olarak hesaplanan I_{pn} nominal primer akım değerinden oldukça yüksektir.

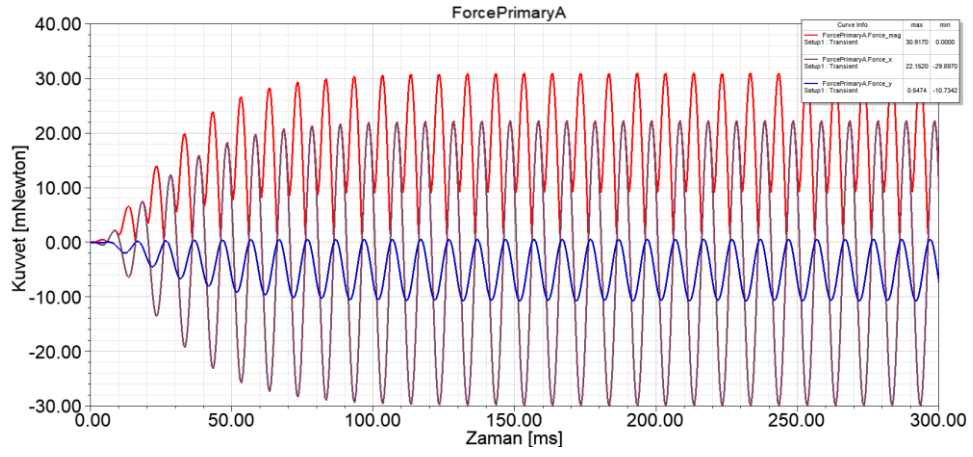


Şekil 4.51 E-I tip çekirdek transient akım grafiği

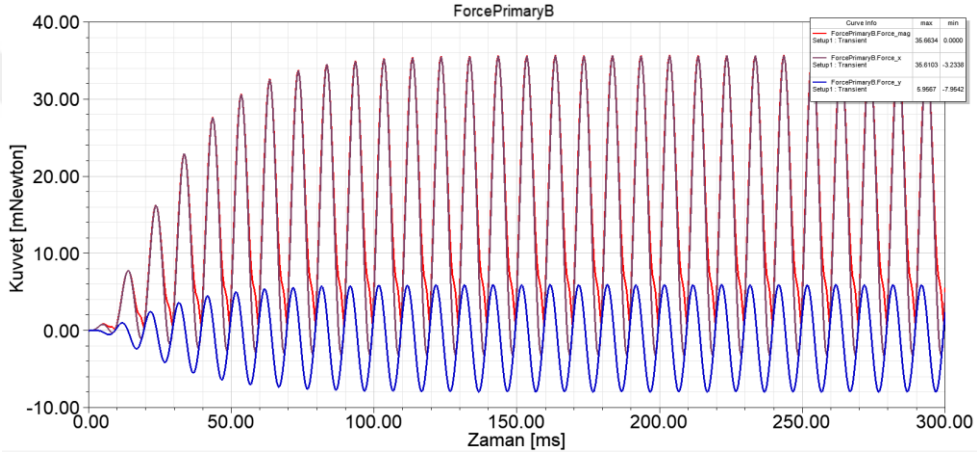
4.3.1.5 E-I Tip Referans Çekirdek Modelinde Sargılara Etkiyen Kuvvetler

Transformatör işletme koşullarında çalıştırılırken, sargılar ve çekirdek arasındaki manyetik alan alçak ve yüksek gerilim sargılarının kuvvet üretmesine neden olmaktadır. Transformatör sargılarında iki farklı kuvvet meydana gelmektedir. Bunlar radyal ve aksiyal kuvvetlerdir. Radyal kuvvetlerin etkisiyle alçak gerilim sargıları çekirdeğe doğru, yüksek gerilim sargısı ise dışa doğru genişler ve iletkenler yatay kuvvetlere maruz kalır. Oluşan diğer tip kuvvetler ise aksiyel kuvvetler olarak adlandırılır. Aksiyel kuvvetler alçak ve yüksek gerilim sargılarını dikey düzlemde sıkıştırarak bir kuvvet oluşturmaktadır. Bu sebeple aksiyel kuvvetler sargılarda çökme gibi durumlara sebebiyet verebilmektedir.

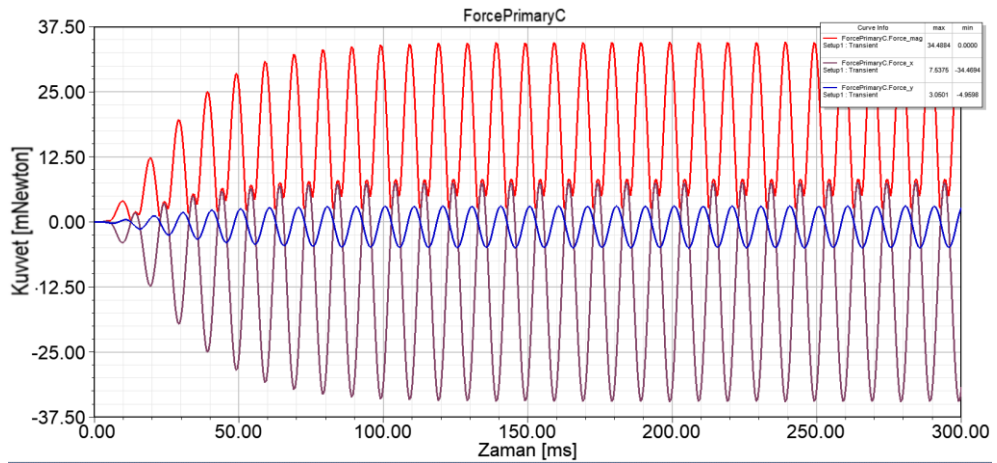
Benzetim çalışmasında normal işletme koşulları dikkate alınarak, transformatörün tam yükleneceği şekilde, primer ve sekonder sargılarından Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'deki gibi I_{pn} ve I_{sn} nominal akımları geçecek şekilde simülasyon koşulları gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sargılara etkiyen radyal ve aksiyel kuvvetler analiz edilmiştir. Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de ise transformatörün primer ve sekonderde her bir faz sargısına ait etki eden radyal ve aksiyel kuvvetler gösterilmektedir.



a) A Fazı Sargı Kuvvetleri

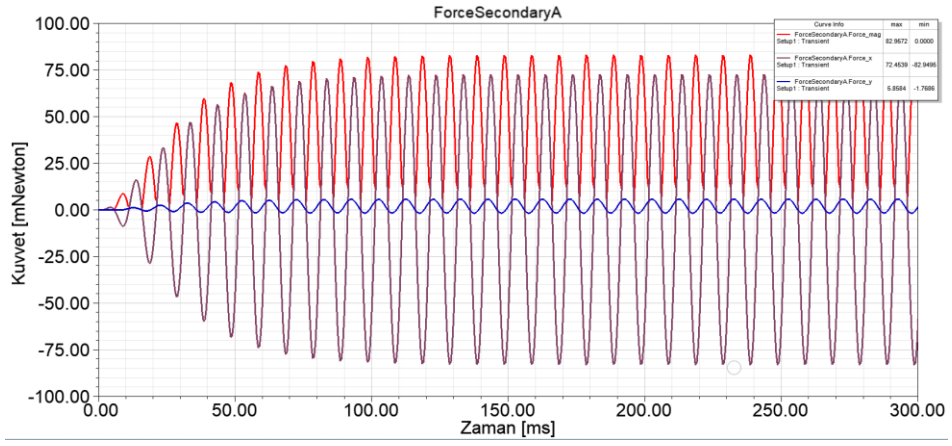


b) B Fazı Sargı Kuvvetleri

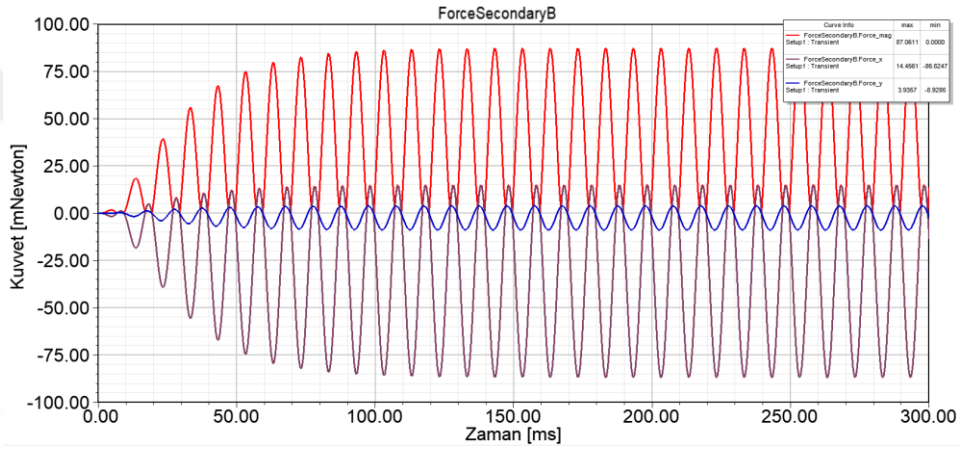


c) C Fazı Sargı Kuvvetleri

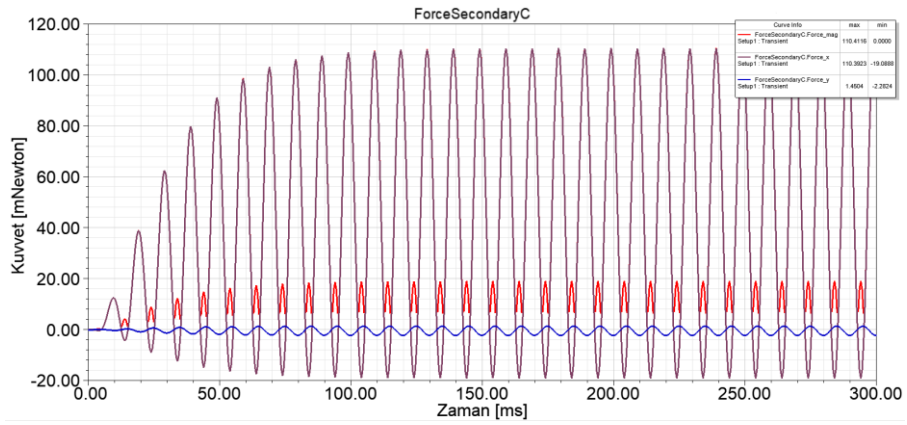
Şekil 4.52 E-I çekirdek için primer faz sargılarına etki eden kuvvetler



a) A Fazı Sargı Kuvvetleri



b) B Fazı Sargı Kuvvetleri

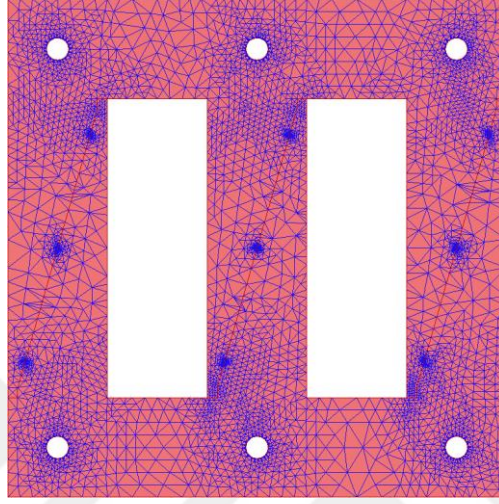


c) C Fazı Sargı Kuvvetleri

Şekil 4.53 E-I çekirdek için sekonder faz sargılarına etki eden kuvvetler

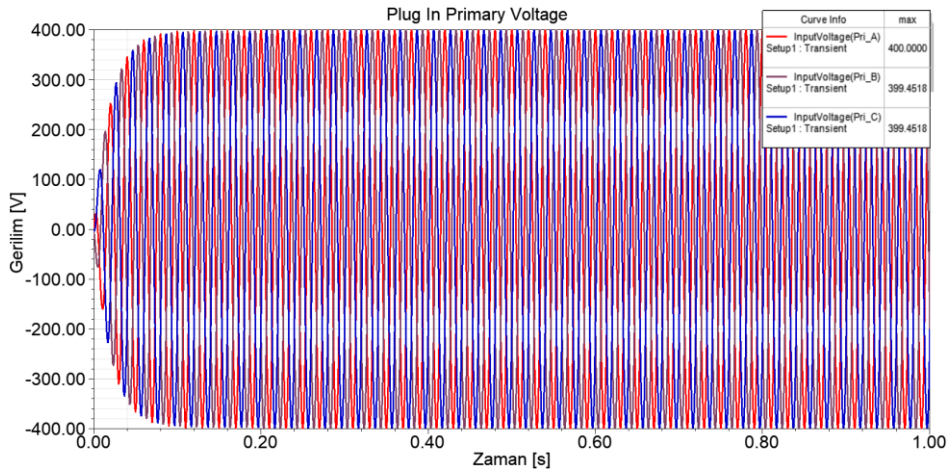
4.3.2 Geçmeli Çekirdek Modelin Benzetim Çalışması

Benzetim çalışması için simülasyon programında Plug-In tip çekirdek, üretilen prototip ile birebir aynı ölçülere sahip olacak şekilde modellendikten sonra analiz yapılabilmesi için ağ modelleri oluşturulmuştur. E-I tipi referans çekirdek transformatör için oluşturulan ağ modelleri Şekil 4.21’de görülebilmektedir.



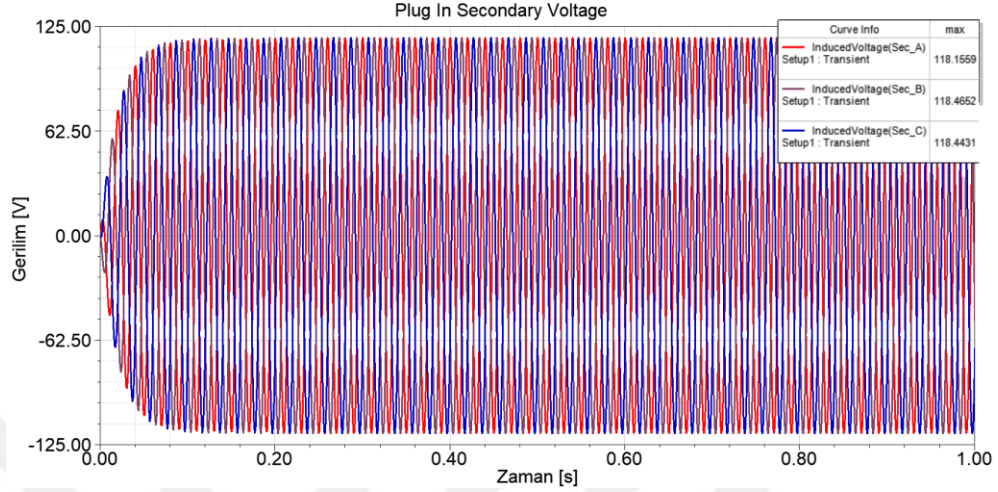
Şekil 4.54 Plug-In çekirdek Mesh ağ örgüsü

Önceden belirlenen Dyn5 bağlantı grubuna göre simülasyon programında primer sargılara uygulanan gerilim değeri aşağıda Şekil 4.22’de görülmektedir. Primer sargılarda üçgen bağlantı söz konusu olduğu için her bir sargı üzerinde uygulanan gerilim fazlar arası gerilime eşit olacaktır.



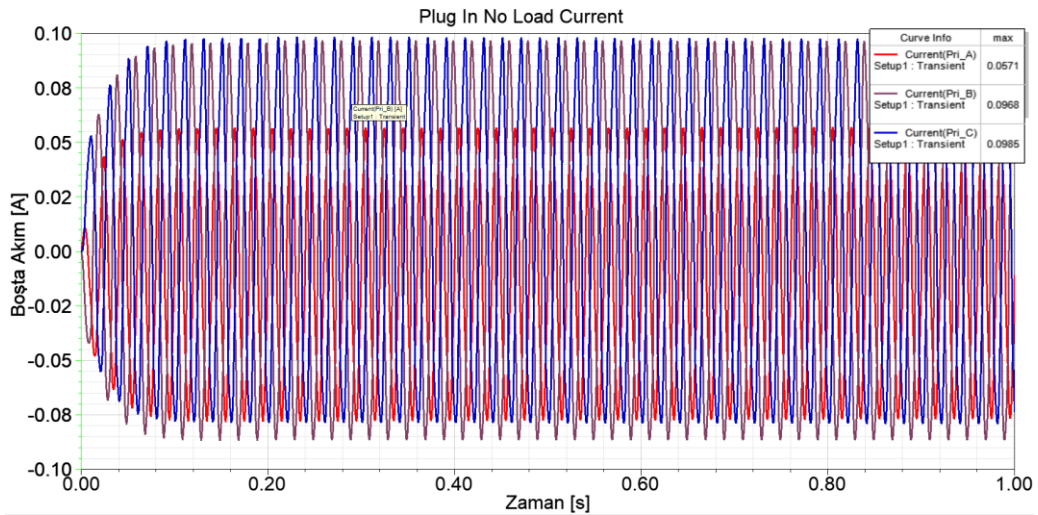
Şekil 4.55 Plug-In çekirdek için primer sargılara uygulanan gerilim

Sekonder sargılarda her bir faz için endüklenen gerilim değerleri aşağıda Şekil 4.23'den görülebilir. Yıldız bağlı sekonder sargılar için her bir sargıda endüklenen gerilim değeri, çıkış gerilim değerinin $\sqrt{3}$ 'de biri kadardır.



Şekil 4.56 Plug-In çekirdek için sekonder sargılarda endüklenen gerilim

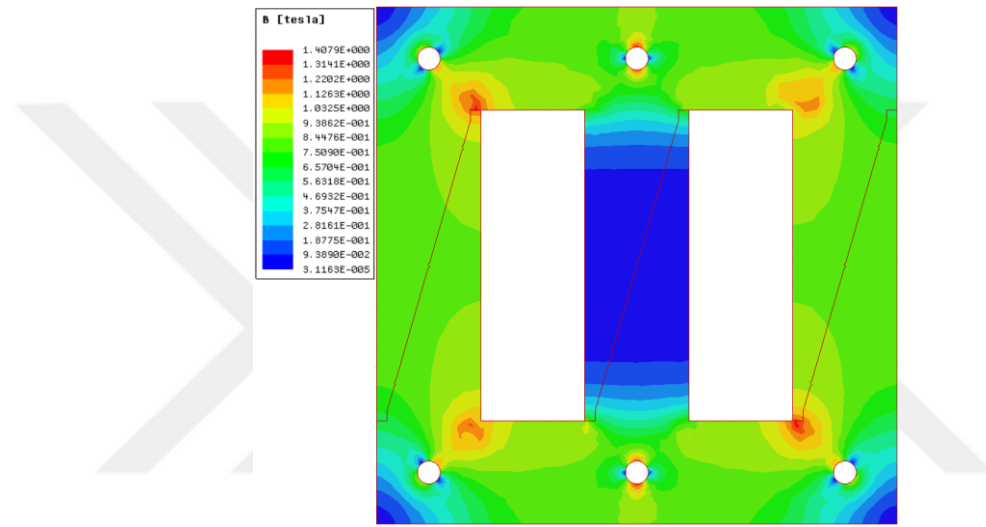
Ayrıca boşta çalışma akımı incelendiğinde Plug-In çekirdekli model için simülasyon programında primer sargılarda her bir fazdan çekilen akımlar aşağıda Şekil 4.24'de verilmiştir.



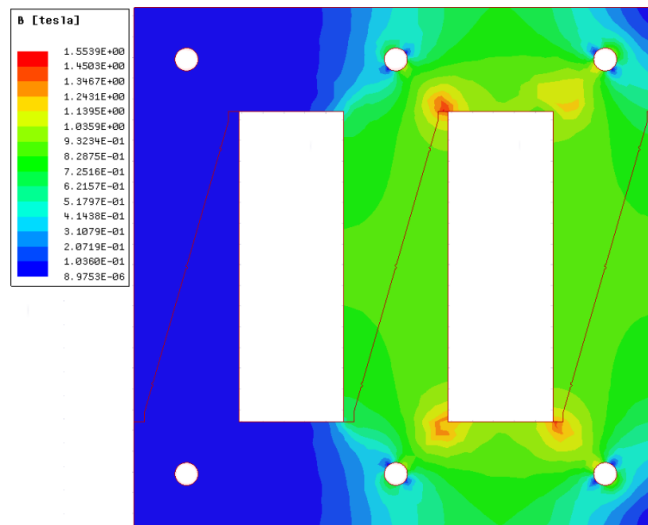
Şekil 4.57 Plug-In çekirdek için primer boşta çalışma akımı

4.3.2.1 Geçmeli Çekirdek Modelin Manyetik Akı Yoğunluğu Analizi

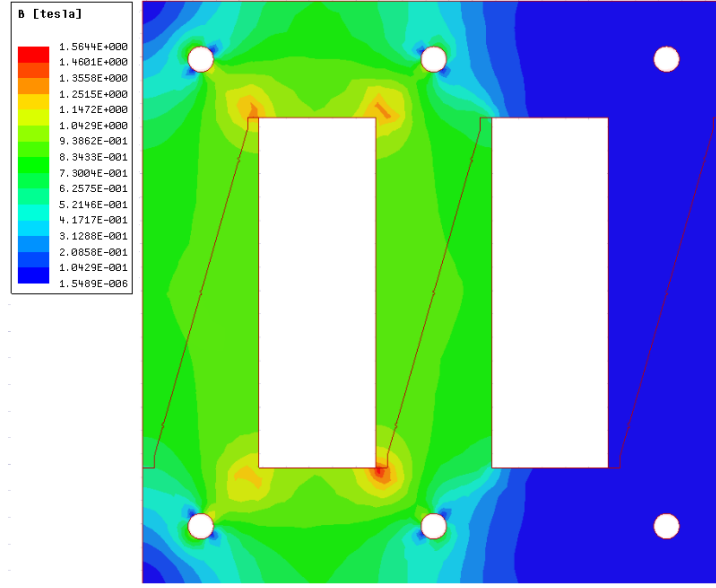
Bu bölümde simülasyon programı kullanılarak yapılan benzetim çalışması sonucunda Plug-In çekirdek modeline ait B manyetik akı yoğunlukları ve çekirdekteki akı yoğunluğu dağılımları $\omega t=0^\circ$, $\omega t=120^\circ$ ve $\omega t=240^\circ$ için Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27’de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Plug-In çekirdek için akı dağılımının düzgün olduğu, bununla birlikte özellikle joint bulunmayan köşe bölgelerinde, sargı pencerelerine yakın joint köşe yüzeylerine kıyasla manyetik akı yoğunluğunun daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.58 Plug-In çekirdek $\omega t=0$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı



Şekil 4.59 Plug-In çekirdek $\omega t=120$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı

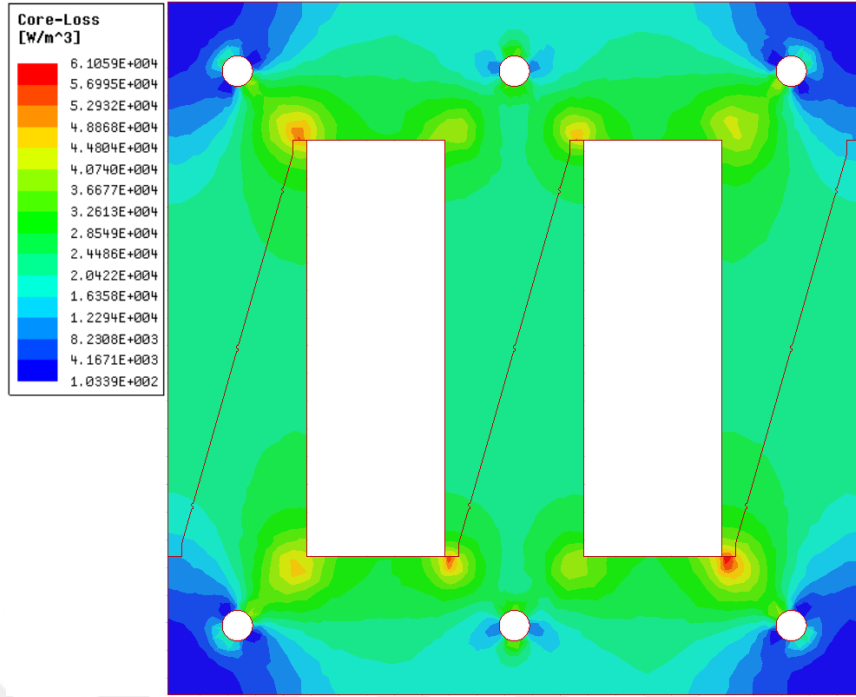


Şekil 4.60 Plug-In çekirdek $\omega t=240$ için anlık manyetik akı yoğunluğu dağılımı

Şekil 4.25, Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'ye bakıldığında manyetik akının, haddeleme yönünden sapmaya başladığı pencere köşe bölgelerine yakın olan joint noktalarında maksimum değerlerine eriştiği görülmektedir. Ayrıca Plug-In çekirdekte $\omega t=0-360^\circ$ aralığı için elde edilen en yüksek B manyetik akı yoğunluğu değeri 1,6577 T olarak tespit edilmiştir.

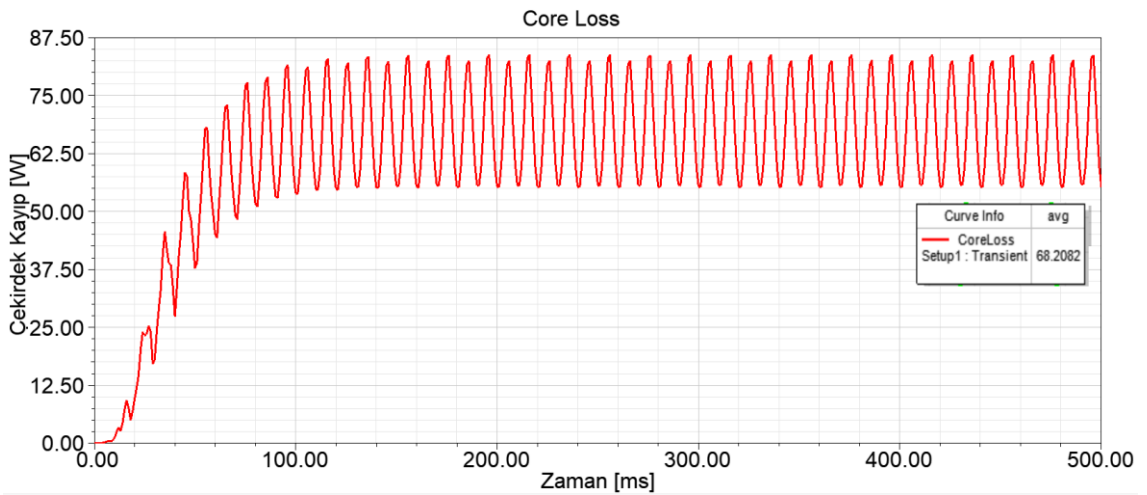
4.3.2.2 Geçmeli Çekirdek Modelin Çekirdek Kayıp Analizi

Bu bölümde boşa çalışma koşulları göz önüne alınarak, Plug-In çekirdekli üç fazlı transformatörün çekirdek kayıpları ve W/m^3 başına çekirdek kayıp dağılımları incelenmiştir.



Şekil 4.61 Plug-In $\omega t=0^\circ$ çekirdek kayıp dağılımı W/m^3

Şekil 4.28'e bakıldığında çekirdek kayıpları, pencere köşe bölgelerine yakın olan joint noktalarında maksimum değerlerine eriştiği görülmektedir. Bununla birlikte özellikle joint bulunmayan lokal köşe bölgelerinde, sargı pencerelerine yakın joint köşe yüzeylerine kıyasla çekirdek kayıp değerlerinin düşük olduğu gözlenmiştir. Ayrıca Plug-In çekirdekte $\omega t=0^\circ$ için elde edilen lokal en yüksek P_0 çekirdek kayıp değeri $6,1059 \times 10^4 W/m^3$ olarak tespit edilmiştir.

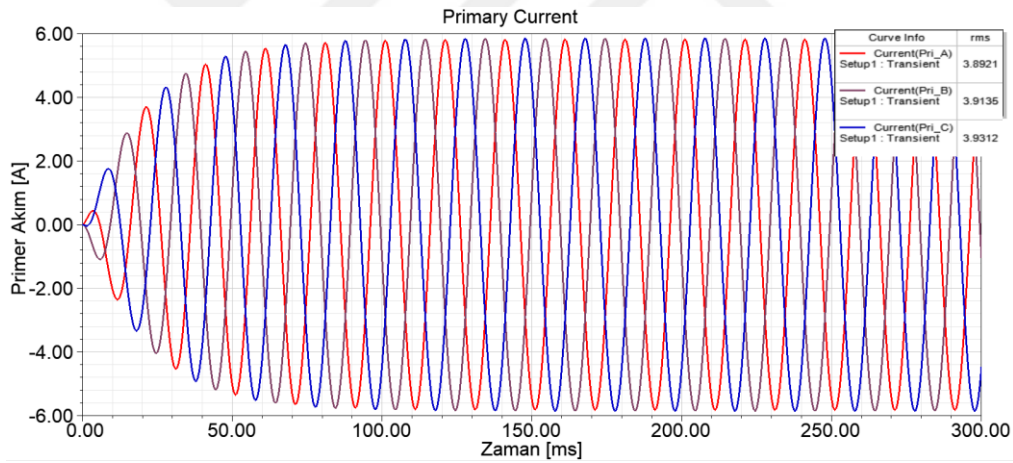


Şekil 4.62 Plug-In çekirdek 0-500ms için çekirdek kayıp değeri

Çekirdek kayıp dağılımına ek olarak, Şekil 4.29'dan görülebileceği gibi 0-500ms zaman aralığında Plug-In tip için ortalama çekirdek kaybı W cinsinden analiz edilmiştir. Ancak Plug-In tip çekirdek kaybı farklı zaman aralıklarında farklı değerlere sahiptir, örneğin 400-500ms zaman aralığı için çekirdek kaybının ortalama değeri yaklaşık 68,2082 W olarak bulunmuştur.

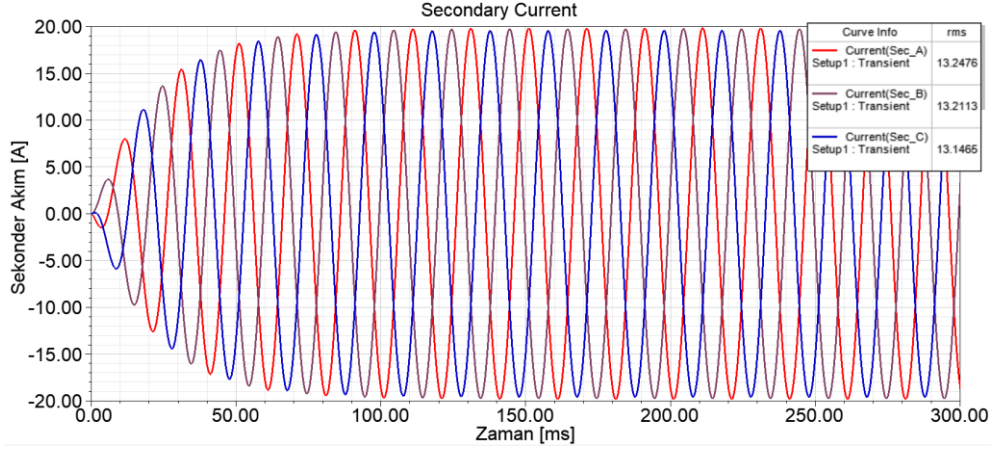
4.3.2.3 Geçmeli Çekirdek Modelin Bakır Kayıplarının Analizi

Benzetim çalışmasında P_{cu} bakır kayıplarını analiz etmek için sekonder sargılar kısa devre edilerek, primer sargılar üzerinden 3,91 A değerinde I_{pn} primer nominal akımı geçecek şekilde, primer sargılara 0-300ms zaman aralığında 13,69 V olarak U_k değerine karşılık gelen kısa devre gerilimi uygulanmıştır. Primer sargılarda 0-300 ms aralığında, her bir faz için geçen akımların değişimi aşağıda Şekil 4.30'da görülmektedir.



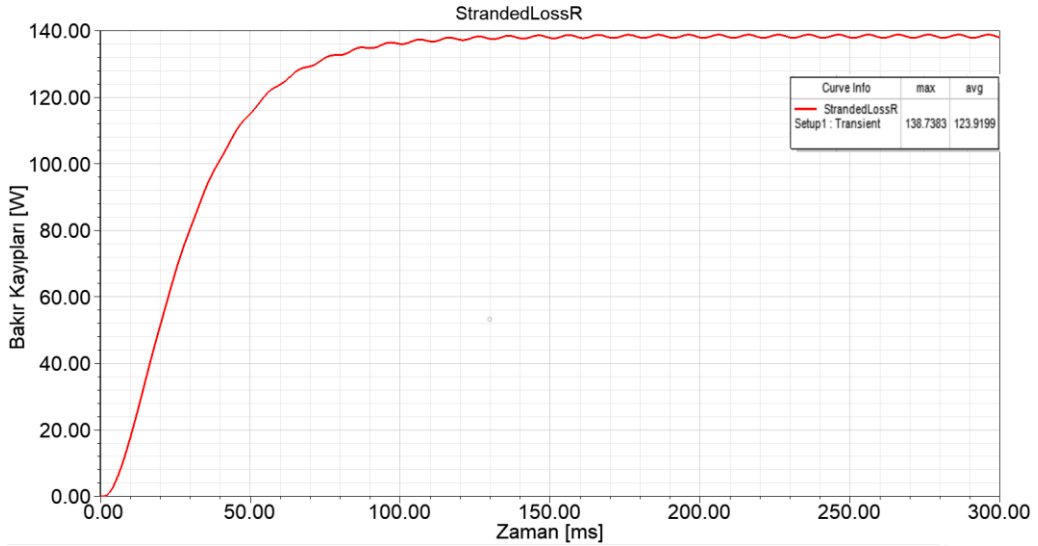
Şekil 4.63 Plug-In çekirdek için primer sargılara uygulanan nominal akım

Tablo 1.5'deki transformatör etiket değerleri dikkate alınıp her bir sekonder sargıdan geçecek akım (I_{sn}) 13,3 A olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık, benzetim çalışmasında 0-300 ms aralığında sekonder sargılarda her bir faz için elde edilen akımların değeri ve grafiği aşağıda Şekil 4.31'den görülebilmektedir.



Şekil 4.64 Plug-In çekirdek için sekonder sargılardan geçen nominal akım

Benzetim çalışmasında sargılarda kullanılan iletkenler bakır tel (stranded) olarak tanımlanmıştır. Tablo 1.7’de iletken tel üreticisinden verileri alınan ve uzunlukları dikkate alınarak hesaplanan R_p primer sargı direnç ve R_s sekonder sargı direnç değerleri simülasyon programında girilerek Şekil 4.32’de toplam bakır kayıpları (Stranded LossR) elde edilmiştir. Stranded LossR hesaplanırken her bir sargının R_p ve R_s değerleri, I_{pn} ve I_{sn} değerlerinin kareleri göz önüne alınmaktadır. Böylelikle elde edilen P_{cu} bakır kaybı değeri $3(R_p I_{pn}^2 + R_s I_{sn}^2)$ ifadesine eşit olmaktadır.



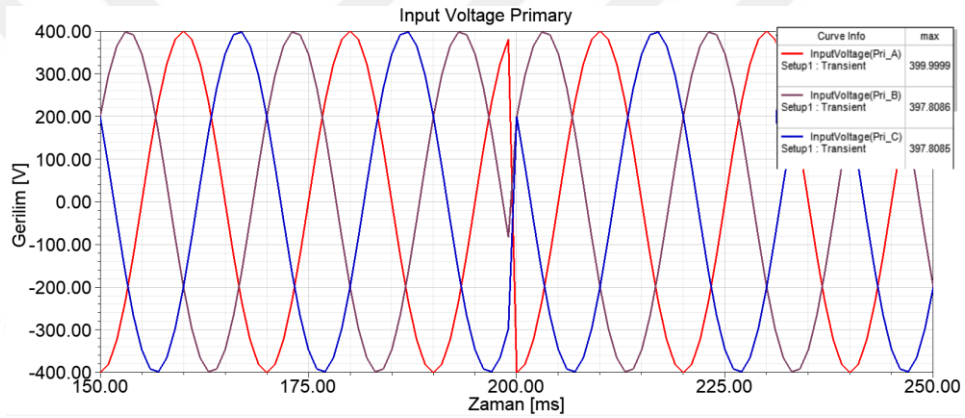
Şekil 4.65 Plug-In çekirdek 0-300ms aralığı için bakır kayıpları

Şekil 4.32’den görüleceği üzere benzetim çalışmasında P_{cu} bakır kaybı 0-300ms aralığında ortalama 123,9199 W olacak şekilde hesaplanmıştır. Ancak farklı bir

zaman dilimi ele alındığında; örneğin 200-300ms aralığında Plug-In tip için bakır kaybının ortalama değeri 138,2505 W olarak tespit edilmiştir.

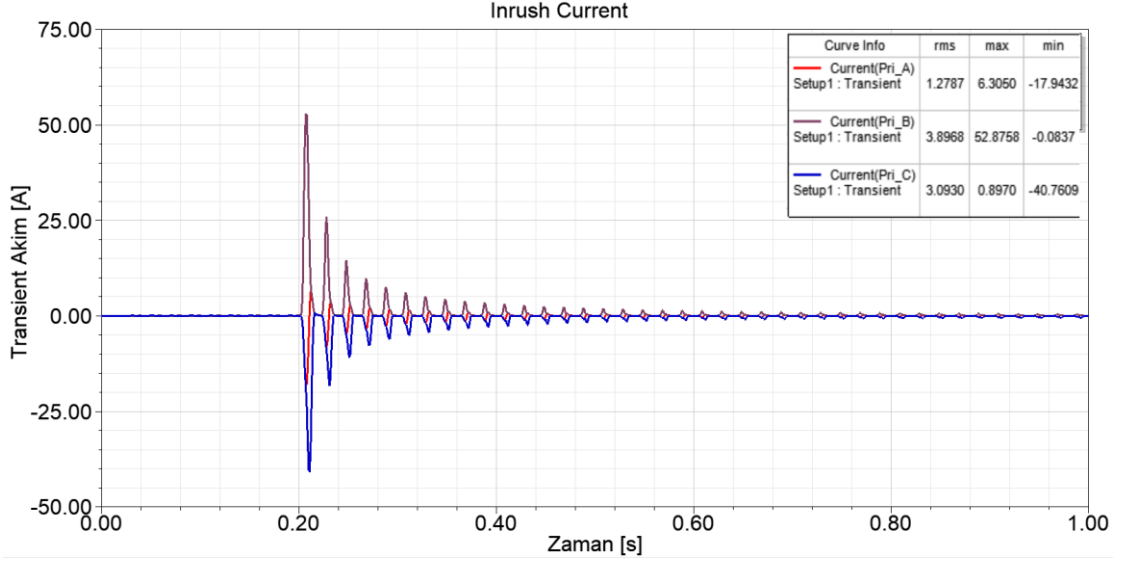
4.3.2.4 Geçmeli Çekirdek Modelin Enerjilendirme Akımı Analizi

Benzetim çalışmasında nüvede artık akı oluşturabilmek için Plug-In çekirdekli transformatörün primer sargılarından gerilim değeri 200 ms anında değişecek şekilde 400 V gerilim uygulanmıştır. Aşağıda Şekil 4.33'de 150-200 ms zaman aralığında gerilim değişimine ait grafik görülebilmektedir. Her bir faza ait transient akım değişimini ve maksimum değerlerini elde etmek için benzetim çalışmasının toplam süresi 1 sn, analiz step adımı ise 1ms olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.66 Plug-In çekirdek 200ms anında uygulanan gerilim değişimi

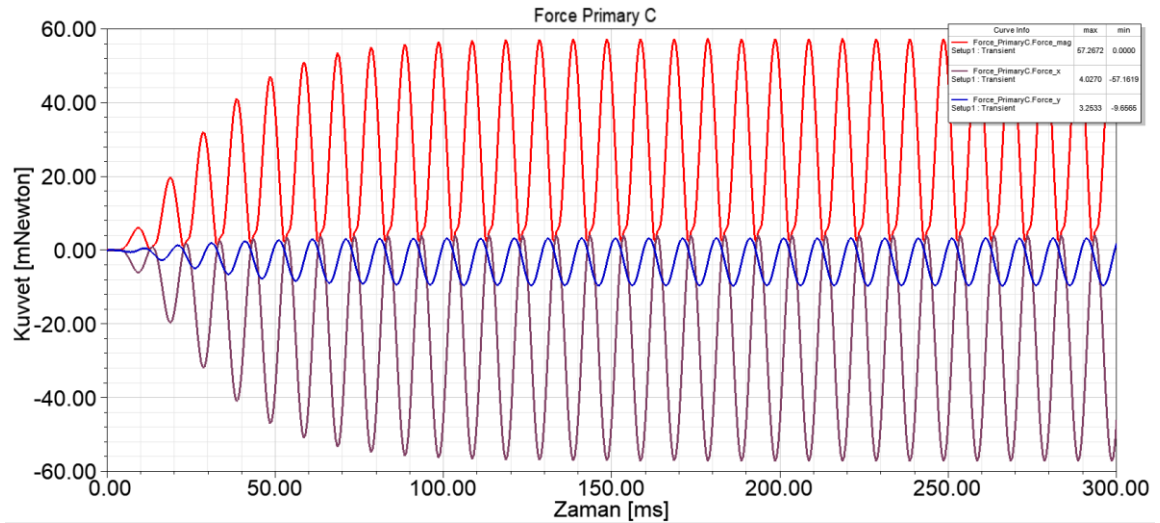
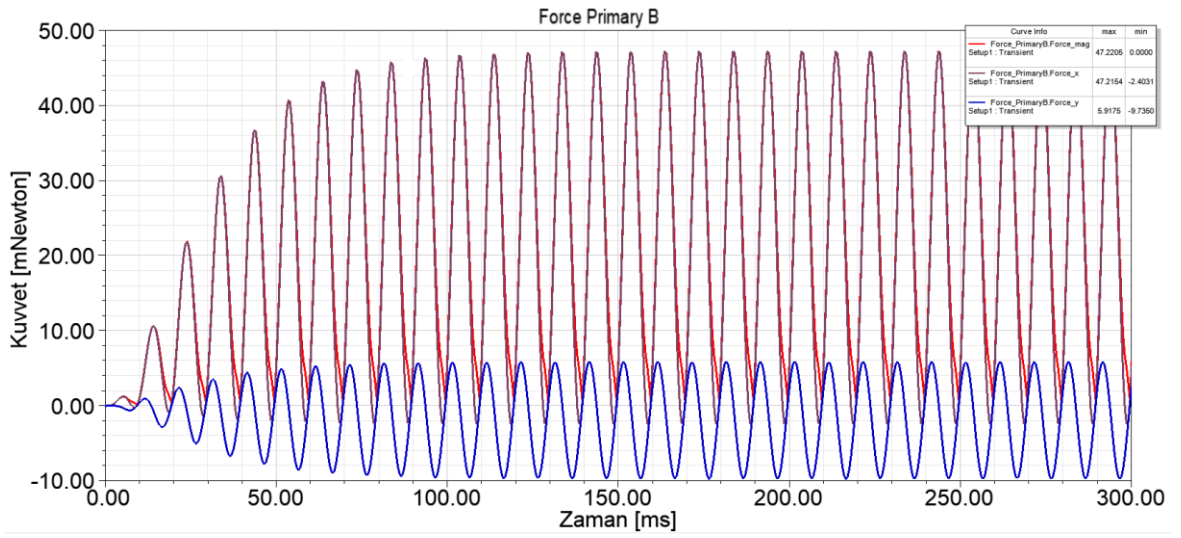
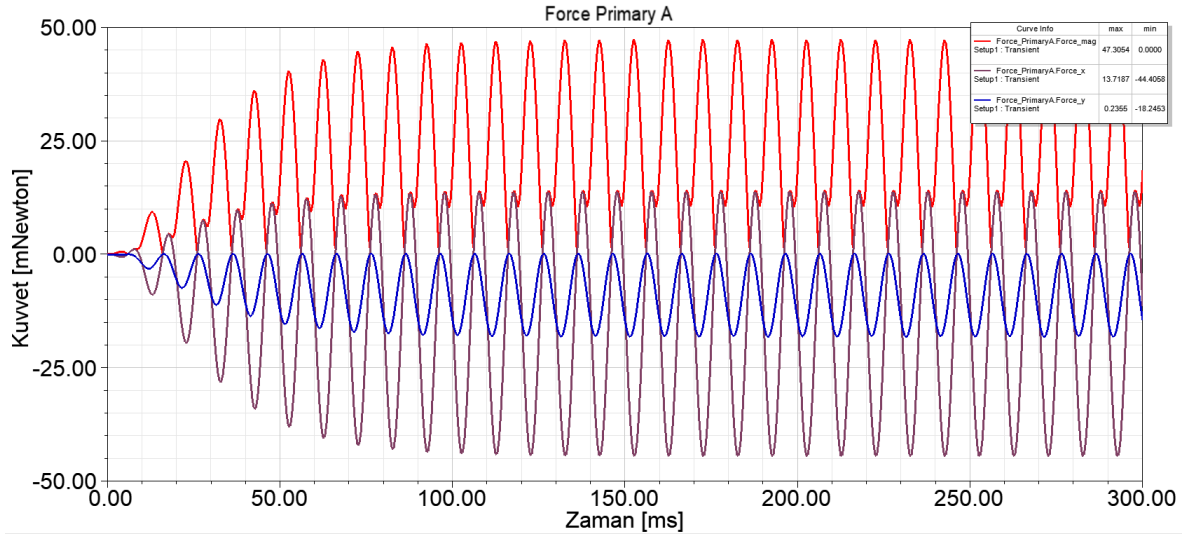
Enerjilendirme sonrası primer sargılardan geçen her bir faza ait akım değerleri ve 0-1000ms aralığında zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Şekil 4.34'den görülebileceği üzere anlık olarak primer sargılar A fazı için -17,94 A , B fazı için 52.87 A , C fazlı için ise -40,76 A değerlerinde akım çekmişlerdir. Beklenildiği üzere bu değerler, her bir sargıda 3,92 A olarak hesaplanan I_{pn} nominal primer akım değerinden oldukça yüksektir.



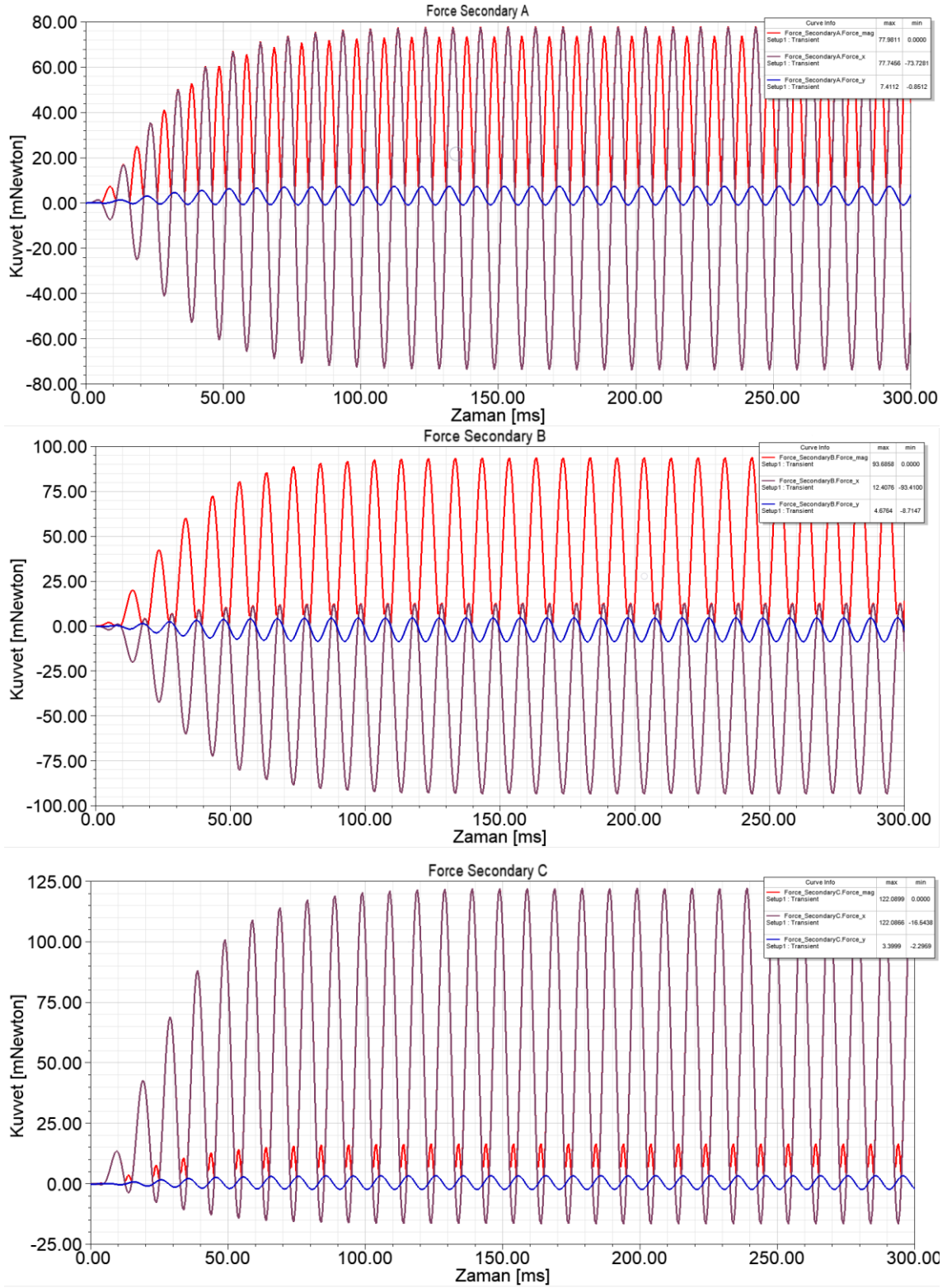
Şekil 4.67 Plug-In çekirdek Transient Akım grafiği

4.3.2.5 Plug-In Çekirdek Modeli İçin Sargılara Etkiyen Kuvvetler

Benzetim çalışmasında normal işletme koşulları dikkate alınarak, Plug-In çekirdekli transformatörün tam yükleneceği şekilde, primer ve sekonder sargılarından Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'deki gibi I_{pn} ve I_{sn} nominal akımları geçecek şekilde simülasyon koşulları gerçekleştirilmiştir. Böylelikle sargılara etkiyen radyal ve aksiyel kuvvetler analiz edilmiştir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'da Plug-In çekirdekli transformatörün primer ve sekonderdeki her bir faz sargısına etki eden radyal ve aksiyel kuvvetler gösterilmektedir.



Şekil 4.68 Plug-In çekirdekte her faz için primer sargılara etki eden kuvvetler



Şekil 4.69 Plug-In çekirdekte her faz için sekonder sargılara etki eden kuvvetler

Simülasyon çalışmaları neticesinde her iki çekirdek modeli için sargılara etkiyen kuvvetler incelendiğinde sargıların yapısına ve bütünlüğüne etki edecek büyüklükte radyal ve aksiyel sargı kuvvetleri gözlenmemiştir. Ancak E-I çekirdekli modele göre Plug-In tip modelde primer sargılarda her bir faz için meydana gelen bileşke kuvvetlerin %55, %30 ve %90 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Sekonder sargılardaki her bir faz için meydana gelen bileşke kuvvetler arasındaki farkın ise %6, %7 ve %11 daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Her iki tip çekirdekli model arasındaki sargılarda meydana gelen bileşke kuvvet farkının büyük oranda radyal kuvvetlerden kaynaklandığı gözlenmiştir, aksiyel kuvvetlerin arasında oransal olarak büyük farklar tespit edilmemiştir.

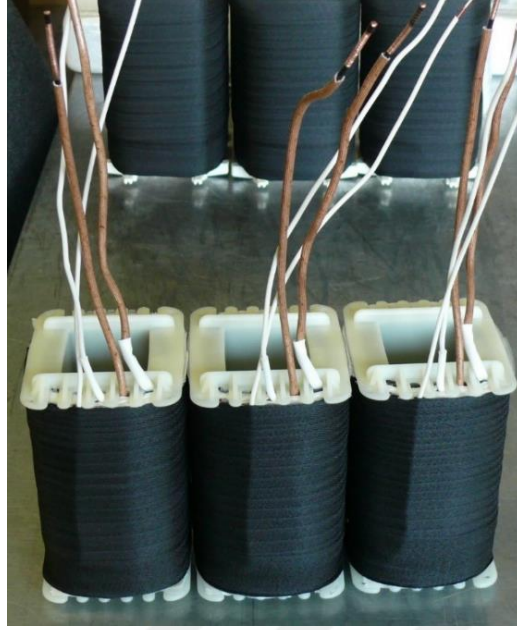


GEÇMELİ TİP ÇEKİRDEKLİ ÜÇ FAZLI TRANSFORMATÖRÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, Bölüm 3'de detayları verilen üç fazlı Plug-In çekirdekli transformatörün prototip imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra Plug-In transformatörle aynı bacak ve boyunduruk ölçülerine sahip, üç fazlı E-I çekirdekli referans transformatör birlikte ele alınarak, boşa kayıp testleri yapılmış ve elde edilen kayıp sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca elde edilen bu boşa kayıp değerleri ve transformatör üreticisinden alınan her iki tip modele ait P_k bakır kaybı, U_k kısa gerilimi değerleri yardımıyla IEC 60076-20 standartlarına uygun olarak transformatörlerin yüklenme yüzdelerine ve P_f güç faktörüne bağlı olarak verimleri hesaplanmıştır. Hem Plug-In çekirdekli hem de referans E-I çekirdekli transformatörlerin 4,7 kVA gücünde prototipleri, Almanya'da bulunan Breimer-Roth Transformatorenwerk GmbH firmasının desteğiyle üretilmiş ve firmanın akredite test laboratuvarlarında kayıp testleri yapılmıştır. Ayrıca bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen projeye ait araştırma, geliştirme, imalat ve test süreçleri, Almanya Federal Cumhuriyeti Enerji Bakanlığı tarafından "Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İçin Merkezi Yenilik Programı" (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand-ZIM) kapsamında desteklenip finanse edilmiştir.

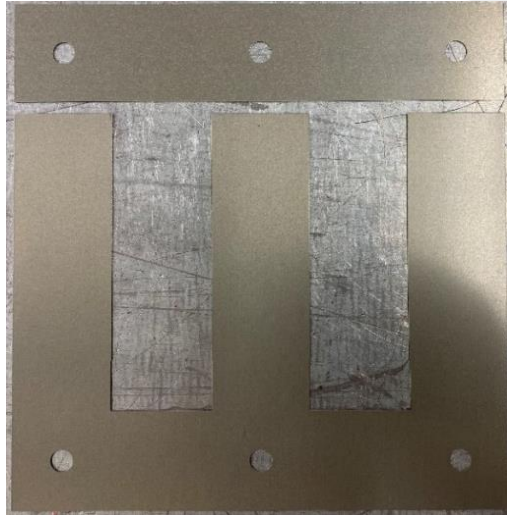
5.1 Plug-In Çekirdekli Transformatör Prototip İmalatı

Plug-In tip çekirdek sacları bir araya getirilirken 1.5mm, 1mm ve 0.5mm gibi farklı çentik yarıçap ölçüleri kullanılarak çekirdek paketleri oluşturulmaya çalışılmıştır. Ancak standart bobin gövdelerinin ölçüleri 150x65x50 mm olduğu için, 1,5mm ve 1mm çentikli çekirdek paketlerinin bobin gövdeleri içine yerleştirilmesinde güçlüklerle karşılaşıldığından, üretilen Plug-In çekirdek prototipi için Şekil 5.1'de verilen ölçülere sahip 0.5mm çentik yarıçaplı bacak boyunduruk sacları kullanılmıştır.



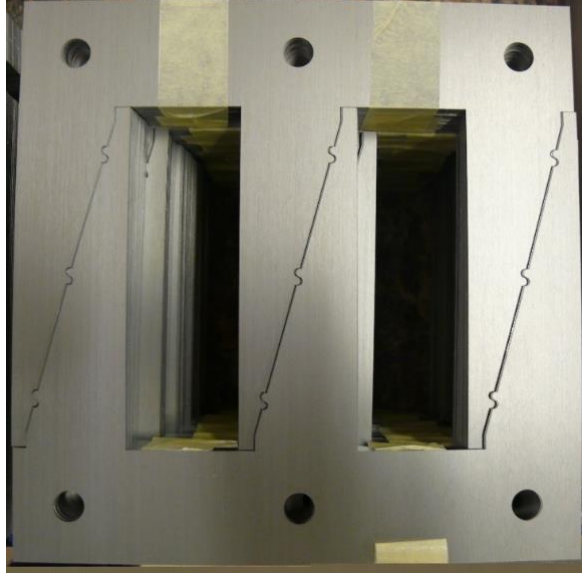
Şekil 5.70 150x65x50mm hazır bobin gövdeleri ve primer-sekonder sargılar

Şekil 5.2'de yer alan üç fazlı E-I tip çekirdekte, tek bir çekirdek sacının görünümü verilmiştir. Çekirdek sacları üst üste gelecek şekilde dizilerek ihtiyaca ve kullanım amacına göre değişik istifleme metodları ile bir araya getirilir.

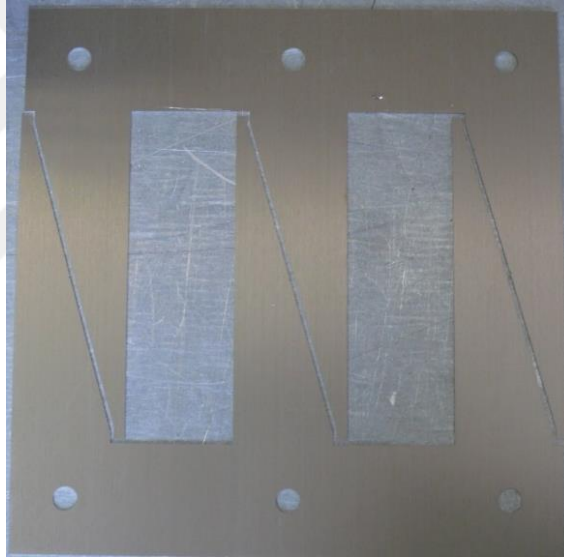


Şekil 5.71 250x250 mm üç fazlı E-I tip çekirdek modeli

Plug-In tip çekirdek modelinde yer alan sac paketlerinde bacak ve boyunduruk üzerinde değişik yarıçap ölçülerine sahip çentikler uygulanmıştır. Şekil 5.3'de 1.5 mm ve Şekil 5.4'de 0.5mm çentikli geçmeli çekirdek sacları görülmektedir.

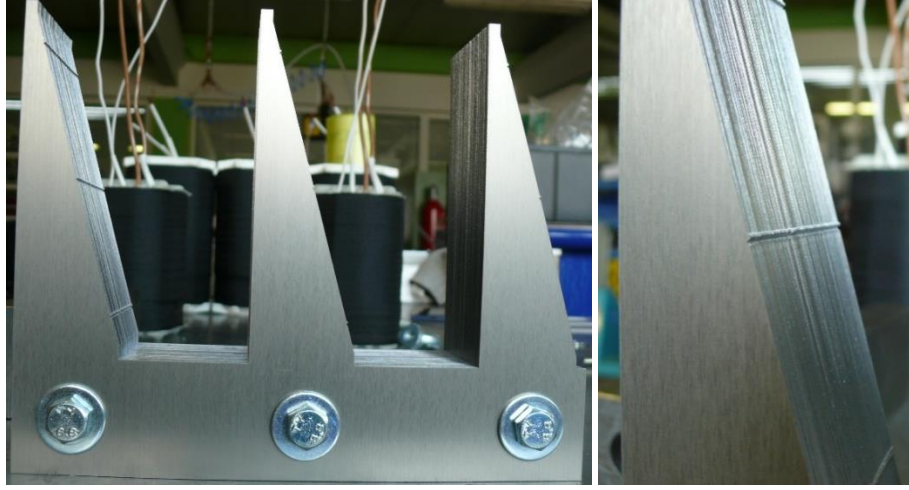


Şekil 5.72 1.5mm çentikli Plug-In çekirdek sac örneği

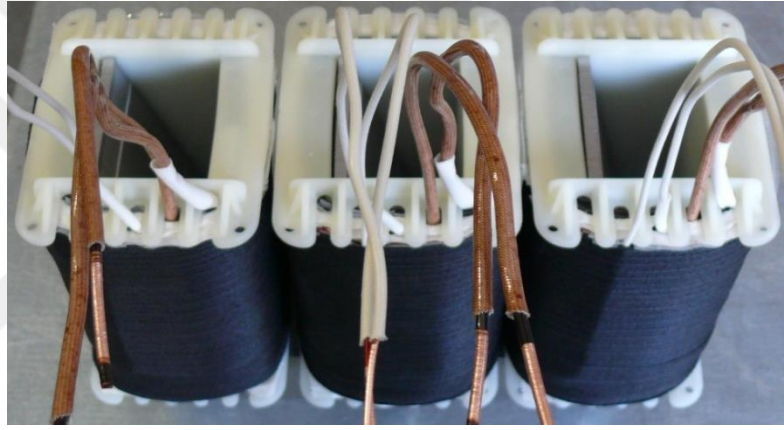


Şekil 5.73 0.5mm çentikli Plug-In çekirdek sac örneği

Prototip imalatı için öncelikle bacak ve boyunduruk paketlerinin oluşturulması gerekmektedir. Her bir bacak ve boyunduruk paketini oluşturmak için 130 adet, toplamda 260 adet olmak üzere 0.50 mm kalınlığında Şekil 5.4'de örneği verilen M330-50A elektrik sacları kullanılmıştır. Elektrik sacları el ile bir arada hizalanmış ve M8 tip civata-somun seti yardımıyla Şekil 5.5'de gösterildiği gibi sabitlenmiştir.



Şekil 5.74 Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk birleşmiş hali



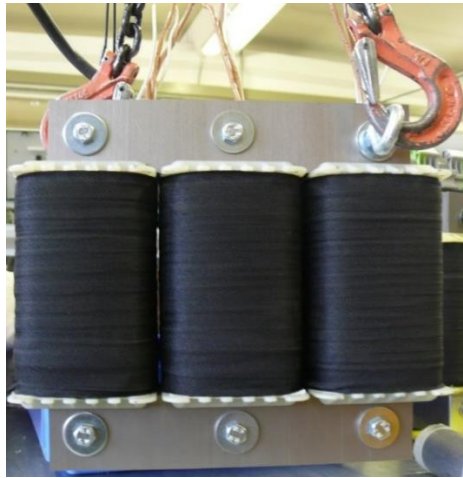
Şekil 5.75 Plug-In çekirdek için sargıların bacak paketi üzerine yerleştirilmesi

Bir araya getirilen ve sabitlenen bacak elektrik sac paketi üzerine primer ve sekonder sargıların yer aldığı 150x65x50mm ölçülerine sahip Şekil 5.6'daki bobin gövdeleri monte edilmiştir. Şekil 5.7'deki gibi bacak paketi üzerine bobinler giydirildikten sonra, ayrıca boyunduruk sac paketi kuvvet uygulanarak bacak paketine çentikler yardımıyla sabitlenmiştir.

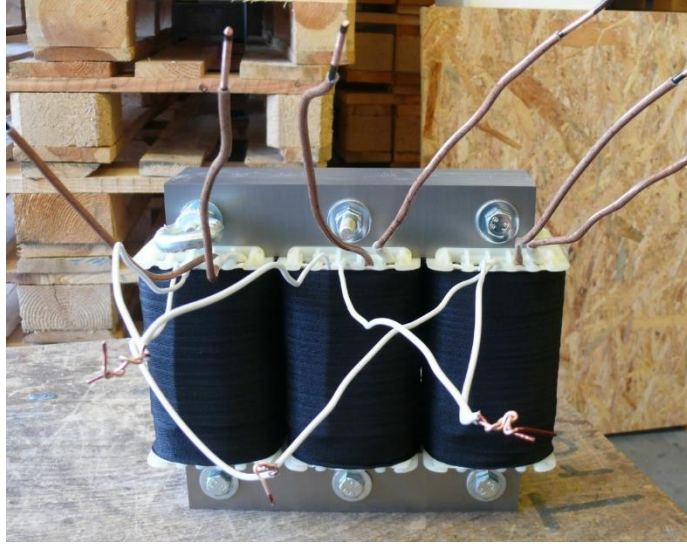


Şekil 5.76 Bobinlerin bacak paketi üzerine yerleştirilmesi

Birbirleri üzerine kuvvet uygulanarak yerleştirilen bacak ve boyunduruk paketlerinin mekanik dayanımını bir ölçüde kontrol etmek ve doğrulamak bakımından geçmeli çekirdekli üç fazlı transformatör Şekil 5.8'deki gibi vinç yardımıyla kendi ağırlığına maruz bırakılmıştır. Bu işlemin sonrasında sac ve boyunduruk paketleri arasındaki hava boşluklarını minimize etmek için yeniden kuvvet uygulanıp sıkıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Son olarak geçmeli çekirdekli üç fazlı transformatör prototip üretimi tamamlanmış ve test edilmeye hazır hale getirilmiştir. Üretilen 4.7 kVA gücündeki prototip transformatörün son hali Şekil 5.9'da görülmektedir.



Şekil 5.77 Plug-In çekirdek bacak-boyunduruk paketlerinin birleşmiş hali



Şekil 5.78 Plug-In tip çekirdekli üç fazlı transformatör prototipi

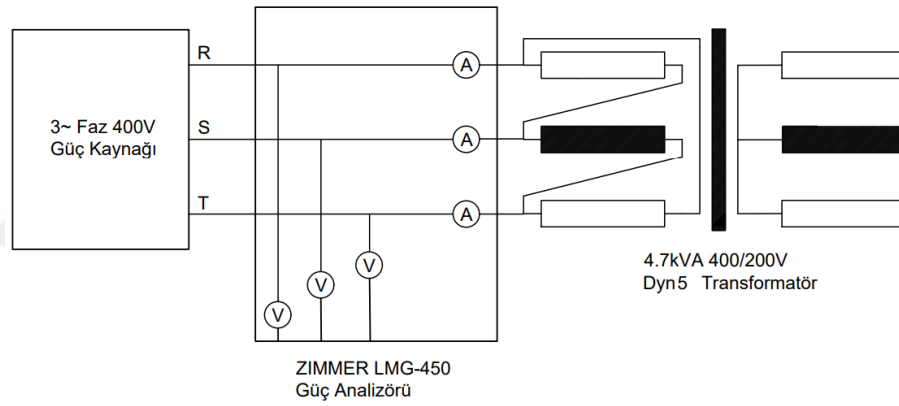
Prototip üretimi esnasında Plug-In tip çekirdekli transformatör için sac dizilim ve paketlenme süresinin 30 dakikadan daha az bir süre gerektirdiği gözlemlenmiştir. Diğer yandan E-I referans çekirdekli modelde aynı işlem için gerekli sürenin minimum 90 dakika olduğu tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak birim zamanda üretim imkanı açısından Plug-In çekirdekli modelin daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Böylelikle çekirdek üretimin yapıldığı bir transformatör üreticisinde, bir iş gününde, klasik E-I tip modele göre 3 kat fazla Plug-In çekirdek imalatı mümkün olabilecektir.

Daha önce bahsedildiği gibi Plug-In çekirdeği oluşturan bacak ve boyunduruk laminasyonları birbiri ile eş boyutlarda olduklarından dolayı laminasyon dizilim ve paketlenme işlemi hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bununla birlikte çekirdek sacı üreticisi açısından da düşünüldüğünde, sac kesim işlemi için tek bir kalıp kullanılacaktır, böylelikle E-I modelinde olduğu gibi iki ayrı kalıba ihtiyaç duyulmayacaktır. Her ne kadar yalnızca prototip üretim maliyeti açısından birim Plug-In tip elektrik sacının E-I referans modele kıyasla %50 daha yüksek maliyetli olduğu görülse de, önerilen Plug-In çekirdek tipinin seri üretimi ve kesim işleminin tek bir kalıp gerektirmesi sebebiyle birim sac maliyetinin E-I referans model ile rekabet edebileceği ve hatta daha düşük maliyetlere üretilebileceği düşünülmektedir.

5.2 Plug-In Tip ve E-I Çekirdekli Transformatörlerin Boşta Kayıp Testleri

Çekirdek kayıpları ölçümü için, boşta kayıp test koşullarına göre test düzeneği kurulmuş ve ölçüm sonuçları kaydedilmiştir. Her iki çekirdek için uygulanan testler neticesinde hem çekirdek kayıpları, hem de boşta çalışma akım değerleri bulunup, karşılaştırma yapılmıştır.

Boşta kayıp testleri için her iki tip transformatörde sekonder sargı uçları boşta bırakılıp, primer sargılara 400V değerinde U_n nominal gerilimi uygulanmıştır. Şekil 5.10'da verilen test düzeneğinden de görüleceği gibi, boşta kayıpları ve boşta çalışma akımlarını ölçmek için, transformatör primer sargıları bir güç analizörü üzerinden uygun gerilim kaynağı ile beslenmiştir.



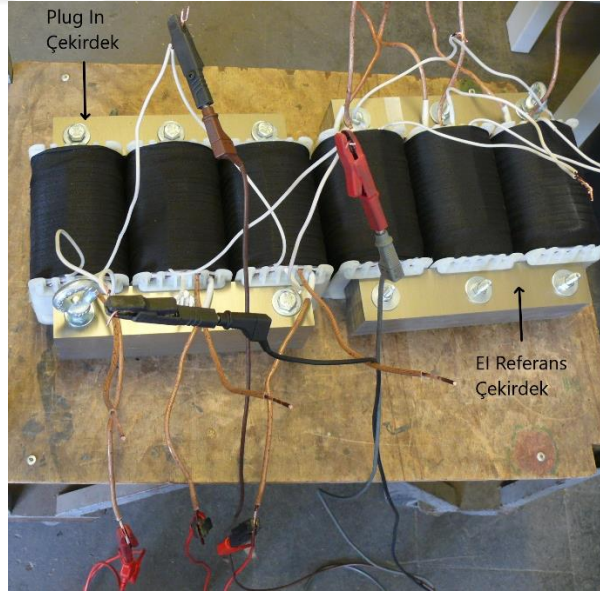
Şekil 5.79 Boşta kayıp ölçümü test düzeneği

Boşta kayıplar ve boşta çalışma akımlarını ölçmek için kullanılan ZIMMER marka LMG-450 model güç analizörü ve kullanılan güç kaynağı Şekil 5.11'de görülmektedir. Boşta kayıp deneyine tabi tutulan geçmeli tip ve referans E-I çekirdekli transformatörler ve test bağlantı şekilleri ayrıca Şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.80 Zimmer LMG-450 Güç Analizörü ve Güç Kaynağı

Plug-In çekirdekli ve E-I referans tip çekirdekli transformatörlerin boşa kayıp testleri Breimer-Roth Transformatorenwerk GmbH firmasının akredite laboratuvarlarında DIN EN 61558-1 ve DIN EN 61558-2-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.81 Plug-In ve E-I tip çekirdek boşa kayıp testi bağlantı şekli

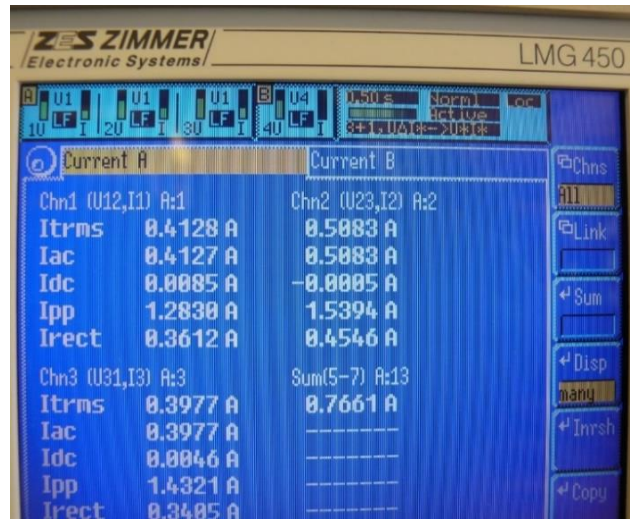
5.2.1 Geçmeli Tip Çekirdekli Üç Fazlı Transformatörün Boşta Kayıp Testleri

Plug-In tip transformatörün sekonder sargı uçları boşta bırakılıp primer sargılara 400V değerinde U_n nominal gerilim uygulanmıştır. Plug-In çekirdek için yapılan testler sonucunda boşta kayıp değeri P_o 72.66 W olarak ölçülmüştür. Ölçülen boşta kayıp değerleri Şekil 5.13'den görülebilmektedir.



Şekil 5.82 Plug-In çekirdek modeli için ölçülen boşta kayıp değeri

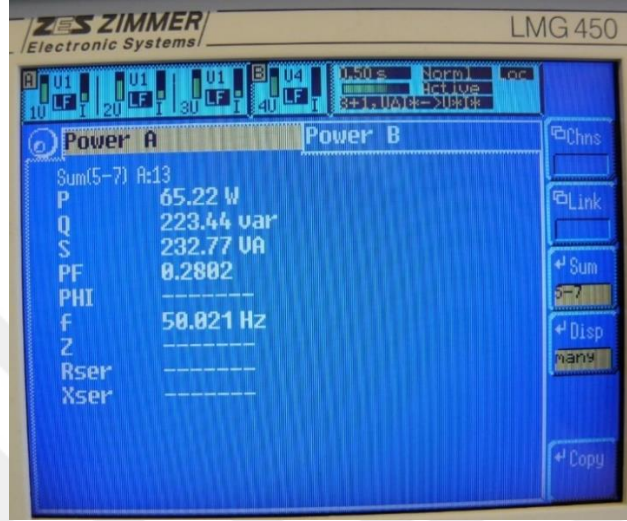
Gerçekleştirilen boşta çalışma deneyi sonucunda Plug-In çekirdek modelde I_o boşta çalışma akımı, Şekil 5.14'den görüleceği gibi 0.7661 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.83 Plug-In çekirdek modeli için ölçülen boşta çalışma akımları

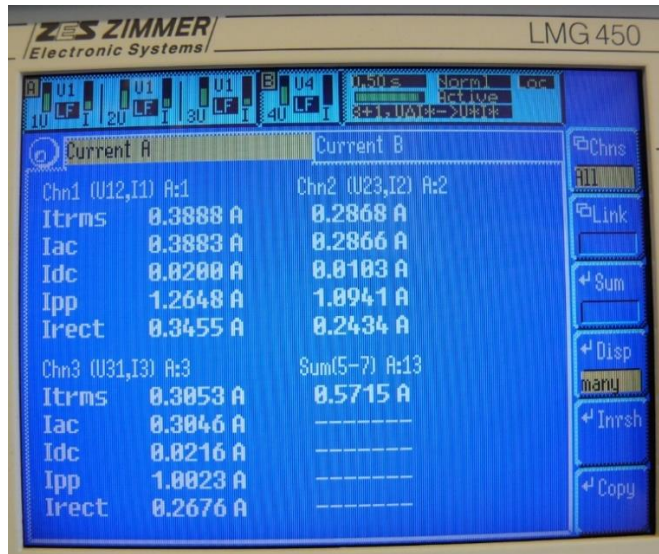
5.2.2 E-I Tip Çekirdekli Üç Fazlı Transformatörün Boşta Kayıp Testleri

E-I referans çekirdekli transformatörün sekonder sargı uçları boşta bırakılıp, primer sargılara 400V değerinde U_n nominal gerilim uygulanmıştır. E-I referans çekirdek için yapılan testler sonucunda boşta kayıp değeri P_0 65.22 W olarak ölçülmüştür. Ölçülen boşta kayıp değerleri Şekil 5.15'den görülebilmektedir.



Şekil 5.84 E-I referans çekirdek model için ölçülen boşta kayıp değeri

Ayrıca boşta çalışma deneyinde, E-I referans çekirdekli modelde I_0 boşta çalışma akımı, Şekil 5.16'dan görüleceği gibi 0.5715 A olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.85 E-I referans çekirdek model için ölçülen boşta çalışma akımları

Üretilen geçmeli tip prototip ve E-I referans modellere ait boşa kayıp deney sonuçları, aşağıda Tablo 5.1’de verilmiştir. Boşa kayıp testleri ve çekirdek kayıpları açısından değerlendirildiğinde Plug-In çekirdek için ölçülen boşa kayıp değeri, E-I referans modeline göre %11,4 fazla olmuştur. Ayrıca faz başına ölçülen boşa çalışma akımlarının, Plug-In modeled, referans E-I çekirdekli modele göre A fazı için %6,1, B fazı için %77,2, C fazı için ise %30,2 kadar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.1 Transformatörlere ait boşa kayıp ve primer akım değerleri

Çekirdek Modeli	Ölçülen Boşa Kayıp (W)	Boşa Çalışma Akımı (A)	Primer A-Faz Akımı (A)	Primer B-Faz Akımı (A)	Primer C-Faz Akımı (A)
E-I Referans Çekirdek	65.22	0.5715	0.3888	0.2868	0.3053
Plug-In Çekirdek	72.66	0.7661	0.4128	0.5083	0.3977
Fark %	11.4%	34.0%	6.1%	77.2%	30.2%

5.3 Plug-In Tip ve E-I Çekirdekli Transformatörlerin Verim Analizi

Bu bölümde geçmeli tip ve referans E-I çekirdekli transformatörlerin P_o boşa kayıp değerleri ile transformatör üreticisinden alınan ve Ek-1’de detayları verilen P_k yükte kayıp değerleri dikkate alınarak verimleri hesaplanmıştır. IEC 60076-20 standardına göre P_k yükte kayıpları 75 °C sıcaklık değeri baz alınarak hesaplanmaktadır. Her iki tip çekirdekli modelde de aynı sargılar kullanıldığı için, üretici tarafından sağlanan P_k yükte kayıp, bir diğer ifade ile P_{cu} bakır kaybı değerleri ve U_k değerleri iki transformatör için de aynı olmuştur. Ayrıca her iki transformatör için de 20 C deki primer ve sekonder sargı dirençleri referans alınmıştır. 20 C deki

primer sargı direnci $1,24 \Omega$, sekonder sargı direnci ise $85,5 \text{ m}\Omega$ olarak ölçülmüştür. Primer sargıda kullanılan iletken kesidi $2,01 \text{ mm}^2$, sekonder sargı iletken kesidi ise $7,07 \text{ mm}^2$ 'dir. Primer sarım sayısı 405 iken sekonder sarım sayısı 120 olarak alınmıştır. Tablo 5.2. de P_k yükte kayıp değerleri hesaplanırken, her iki transformatörde eş primer ve sekonder sargılar kullanıldığı yani sargıların aynı kesitli iletkenler ve aynı sarım sayılarından oluştuğu göz önüne alınmıştır. Böylelikle Tablo 5.2'de her iki transformatör modeli için bakır kayıp değerleri verilmiştir.

Tablo 5.2 Ek-1 verilen transformatör bakır kaybı değerleri

Çekirdek Modeli	Primer Sargı Bakır Kayıpları (W)	Sekonder Sargı Bakır Kayıpları (W)	Toplam Bakır Kayıpları (W)
E-I Çekirdek	76,1	57,4	133,5
Plug-In Çekirdek	76,1	57,4	133,5

Verim hesabında dikkate alınacak diğer kayıp olan boşa kayıp değerinin ise, her iki model için yapılan ölçümlerde farklı olduğu, Bölüm 5.2'de detaylı olarak verilmişti. Bu iki kayıp değerinin elde edilmesinden sonra Denklem 5.1. ve Denklem 5.2'de verilen verim ifadeleri kullanılarak, çekirdek modellerinin ayrı ayrı verimleri hesaplanmıştır.

Verim hesapları yapılırken, IEC 60076-20 ve EN standartlarına uygun olarak A-Metodu kullanılmıştır. A-Metodu hem soğutmalı hem de soğutmasız transformatörler için kullanılmaktadır. A-Metoduna göre bir transformatörün çıkışındaki S_ζ görünür gücünden, soğutma sistemi tarafından tüketilen P_o boşa kayıplar ve P_k yükte kayıplar çıkarılır ve S_ζ görünür gücüne oranı bulunarak verim elde edilir [84].

$$\eta = \frac{S_{\zeta} - (P_0 + P_k)}{S_{\zeta}} \quad (5.1)$$

$$\eta = \frac{kS_r - (P_0 + P_{c0}) - (k^2 P_k + P_{ck}(k))}{kS_r} \quad (5.2)$$

Denklem 4.2'de kullanılan parametrelerin açıklaması aşağıda verilmiştir:

η = Verimlilik İndeksi (Efficiency Index)

P_0 = Nominal gerilim ve kademe seviyesinde ölçülen boşta kayıp değeri (W)

P_{c0} = Fan, pompa vb. soğutma sistemlerinin harcadığı kayıp güç değeri (W)

P_k = Nominal gerilim ve kademe seviyesinde ölçülen yükte kayıp değeri (W)

$P_{ck}(k)$ = k yüklenme faktöründeki fan ve pompa soğutma sistemlerinin harcadığı ilave kayıp güç değeri (W)

S_r = Transformatörün Nominal Güç değeri (VA)

k = Yüklenme Faktörü (load factor)

Geçmeli çekirdek tipi ve E-I referans çekirdek tipli transformatörler için farklı pF güç faktörü ve farklı yüklenme yüzdelerine bağlı olarak elde edilen verim değerleri % olarak, Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir. Sonuçlardan da görüleceği gibi, bütün yüklenme yüzdeleri ve pF güç faktörü koşullarında, boşta kayıplarda elde edilen farktan dolayı, E-I referans model, geçmeli çekirdekli transformatöre göre daha yüksek verim değerlerine sahiptir.

Tablo 5.3 Plug-In çekirdek için elde edilen verim değerleri

Yüklenme Faktörü (%)	1,00 pF Verim (%)	0,95 pF Verim (%)	0,90 pF Verim (%)	0,85 pF Verim (%)	0,80 pF Verim (%)
1,00	95,638	95,408	95,153	94,868	94,547
0,75	95,835	95,615	95,372	95,100	94,793
0,50	95,521	95,285	95,023	94,730	94,401
0,25	93,164	92,805	92,405	91,958	91,456

Tablo 5.4 E-I referans çekirdek için elde edilen verim değerleri

Yüklenme Faktörü (%)	1,00 pF Verim (%)	0,95 pF Verim (%)	0,90 pF Verim (%)	0,85 pF Verim (%)	0,80 pF Verim (%)
1,00	95,781	95,559	95,312	95,036	94,726
0,75	96,025	95,816	95,584	95,324	95,032
0,50	95,807	95,586	95,341	95,067	94,759
0,25	93,736	93,407	93,040	92,631	92,171

6.1 Sonuçlar

Bu çalışmada elektrik saclarının istifleme süresinin ve üretim işçilik maliyetlerinin azaltıldığı, yeni bir geçmeli tip transformatör çekirdek modeli tasarlanmıştır. Yeni tip geçmeli çekirdek modelinin elektriksel değerlerini ve kayıplarını karşılaştırmak için, aynı güç değerine sahip bir E-I çekirdek modeli referans alınmıştır. Bu iki modelin karşılaştırılmasında; çekirdek kayıpları, çekirdek kayıp dağılımları, manyetik akı yoğunluğu, bakır kayıpları ve enerjilendirme akımları ele alınmış ve FEM tabanlı benzetim çalışması yapılarak, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Daha sonra önerilen Plug-In çekirdek modeli prototip olarak üretilmiş, boşa çalışma testi ve kayıp analizleri yapılmıştır. Son olarak bu değerler, aynı güç ve etiket değerlerine sahip üç fazlı E-I tip çekirdek modeli için elde edilen değerlerle karşılaştırılmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

Yapılan benzetim çalışmaları sonucunda Plug-In çekirdek için manyetik akı dağılımının düzgün olduğu, bununla birlikte özellikle joint bulunmayan köşe bölgelerinde, sargı pencerelerine yakın joint köşe yüzeylerine kıyasla, manyetik akı yoğunluğunun daha düşük olduğu gözlenmiştir. Özellikle Plug-In modelde, joint bulunmayan köşe bölgelerindeki akı yoğunluk değerlerinin, referans E-I modele kıyasla oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Her iki çekirdek modelinde maksimum akı yoğunluğu değerlerine bakıldığında Plug-In model için referans E-I modele göre yaklaşık %0.6 daha yüksek bir değer elde edilmiştir. Buna karşın çekirdek köşelerindeki çekirdek kayıp dağılımına bakıldığında, Plug-In çekirdek köşelerindeki kayıp değerleri referans E-I çekirdek modele göre daha düşük kalmaktadır. Simülasyon sonuçlarına göre Plug-In çekirdekteki çekirdek kayıpları, referans E-I çekirdeğe göre yaklaşık %0.1 fazla bulunmuştur. Aynı etiket değerlerine göre üretilen prototip ve referans modellerin yapılan boşa çalışma testlerinde ise, Plug-In çekirdekte ölçülen boşa kayıp değerinin, referans çekirdeğe

göre %11,4 fazla olduğu bulunmuştur. Çekirdek kayıpları sonuçları açısından, benzetim sonuçları ve prototip test sonuçları arasında görülen bu fark, uygulama ile simülasyon koşullarının birebir aynı olmamasından kaynaklanmaktadır. Simülasyon ve test sonuçları arasındaki farkı belirleyen bir diğer etken ise, çekirdek paketlerinde kullanılan elektrik saclarının depolanması ve dizilimi esnasında meydana gelen kusurların, manyetik akı dağılımı ve çekirdek kayıp değerlerini etkilemesi olarak düşünülebilir. Ayrıca Plug-In modelde, köşe joint bölgelerdeki hava aralığı ortadan kalktığı ve rotasyonel akı kayıpları azaldığı için joint bölgelerindeki lokal kayıplarda azalma meydana gelmiştir. Ancak bacak ve boyunduruk arası joint ve hava aralığı yüzeyleri arttığı ve genişlediği için meydana gelen çekirdek kaybı artışı, sargı pencere köşelerindeki lokal kayıp azalmasından fazla olduğu için, Plug-In çekirdekli modelde E-I referans modele göre çekirdek kaybının yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Her iki model arasındaki çekirdek kayıp farkını arttıran bir diğer faktör de, prototip olarak üretilen Plug-In modele ait çekirdek üretim tecrübesinin, E-I referans modele kıyasla çok yeni olduğudur ve bu üretime ait tecrübe eksikliğinden dolayı, muhtemel işçilik hatalarının söz konusu olabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeplerden dolayı prototip nazarında görülen bu boşta çalışma kayıpları arasındaki farkın, seri üretimle beraber azalacağı öngörülmektedir.

Bakır kayıplarına ilişkin yapılan simülasyon çalışmaları değerlendirildiğinde, aynı özellikte sargı materyali ve türü kullanılan her iki modelin sonuçlarında önemli bir fark görülmemekle beraber, Plug-In çekirdekli transformatörün, referans çekirdekli E-I modele göre %0.2 oranında daha düşük bakır kayıp değerine sahip olduğu görülmüştür.

Simülasyon çalışmaları neticesinde Plug-In çekirdek modeli için primer ve sekonder sargılara etkiyen kuvvetler incelendiğinde, E-I çekirdekte olduğu gibi sargıların yapısına ve bütünlüğüne etki edecek büyüklükte radyal ve aksiyel sargı kuvvetleri tespit edilmemiştir. Diğer yandan Plug çekirdekli model için primer ve sekonder sargılarda her bir faz için meydana gelen bileşke kuvvetlere bakıldığında en fazla C fazının, en az A fazının bileşke kuvvetlere maruz kaldığı gözlenmiştir. Bununla birlikte her bir faz için sekonder sargılarda meydana gelen radyal ve bileşke

kuvvetlerin primer sargılara göre minimum 1,6 kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Etki derecesi bakımından kıyaslama yapıldığında aksiyel kuvvetlere göre radyal kuvvetlerin her bir faz için bileşke kuvvetlerin oluşumunda belirleyici olduğu ayrıca tespit edilmiştir.

4,7KVA gücünde, üç fazlı, aynı etiket değerlerine sahip E-I ve Plug-In çekirdek tasarımları daha sonra imalat teknikleri ve imalat süreleri açısından karşılaştırılmıştır. E-I referans çekirdek için gerekli sac dizilim ve paketleme süresi minimum 90 dakika iken, Plug-In çekirdekte bu sürenin 30 dakikanın altında olduğu görülmüştür. Yani çekirdek üretimi yapan fabrikada, tipik bir iş gününde, klasik E-I tip modele göre 3 kat fazla Plug-In çekirdek imalatı mümkün olabilecektir. Bu durum, Plug-In çekirdek üretimi yapan bir firma için, ürünün daha kısa sürede müşteriye teslim kolaylığını sağlayacak ve daha az işçilik ihtiyacından dolayı üretim maliyetini düşürecektir. Bu avantajlarından dolayı Plug-In çekirdek modeli üretici firmalar için daha rekabetçi bir ürün seçeneği olarak göz önünde bulundurulabilir. Plug-In çekirdek modelinin üretiminde, laminasyon kesme ve şekillendirme işlemi yüksek hassasiyet gerektirmektedir. Dolayısıyla laminasyon kesim maliyeti açısından karşılaştırıldığında, Plug-In çekirdek modelinde E-I çekirdek tipine göre maliyet yüksek olabilir. Ancak Plug-In çekirdek üretiminde bacak ve boyunduruk parçalar birbirine eş olduğu için, çekirdek üreticisi firmanın tek bir çekirdek kesim kalıbı kullanacağı ve bu durumda seri üretimde Plug-In çekirdeğin maliyetinin önemli ölçüde azalacağı öngörülmektedir. Bu çalışmadaki örnekte, bu maliyet farkı yalnızca bir adet üretilen prototip Plug-In çekirdekte, E-I çekirdeğe göre %50 yüksek olmuştur. Ancak prototip çekirdek için sözkonusu olan bu maliyet farkının, seri üretimde üretim maliyetinin düşmesi ile azalacağı, hatta tek kalıp kullanma avantajı ile üretim maliyetinin E-I tip çekirdeğe göre daha da azalacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak bu yeni Plug-In çekirdeğin üretim sürecinde elde edilen daha kısa imalat süresi ve daha düşük işçilik maliyeti avantajları ile, küçük güçlü transformatör üretici firmaların daha kısa zamanda, daha fazla sayıda transformatör imal etmesine imkan sağlanarak, ülke ekonomisine katkı sağlayabilecek bir seçenek sunulması amaçlanmaktadır. Çalışmada çekirdek

montajında istifleme kolaylığı sayesinde elde edilen üretim kolaylığı yanında, ileride yapılacak farklı tasarım çalışmaları ile çekirdek kayıpları, verimlilik ve maliyet konularında da iyileştirme sağlanabilir ve böylece üreticiler için daha tercih edilebilir bir çekirdek modelinin elde edilmesi mümkün olabilir.

Teşekkür: Bu proje Breimer-Roth Transformatorenwerk GmbH firması tarafından yürütülen ve “Küçük ve Orta Ölçekli İşletmeler İçin Merkezi Yenilik Programı (Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand-ZIM)” kapsamında, Almanya Federal Cumhuriyeti Enerji Bakanlığı-BMWi tarafından finanse edilen bir Ar-Ge projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için gerekli bilgi, üretim ve test laboratuvarı olanaklarını sunan Breimer-Roth Transformatorenwerk GmbH firmasına teşekkür ederim.

- [1] Poveda-Lerma, A., Serrano-Callergues, G., Riera-Guasp, M., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., & Perez-Cruz, J. (2017) Lamination effects on a 3D model of the magnetic core of power transformers, *Open Physics*, 15(1), 997-1003
- [2] P. Marketos and T. Meydan, "Novel Transformer Core Design Using Consolidated Stacks of Electrical Steel," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 10, pp. 2821-2823, Oct. 2006,
- [3] C. Freitag and T. Leibfried, "Mixed core design for power transformers to reduce core losses," 2017 (OPTIM) & 2017 (ACEMP), Brasov, 2017, pp. 152-158
- [4] Ilo, A., Weiser, B., Booth, T.W., & Pfützner, H. (1996). Influence of geometric parameters on the magnetic properties of model transformer cores. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 160 , pp. 38-40
- [5] G. Loizos, T. D. Kefalas, A. G. Kladas and A. T. Souflaris, "Flux Distribution Analysis in Three-Phase Si-Fe Wound Transformer Cores," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 2, pp. 594-597, Feb. 2010
- [6] G. Upadhyay, A. Singh, S. K. Seth and R. K. Jarial, "FEM based no-load loss calculation of triangular wound core transformer," 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, 2016
- [7] M. M. Isa, M. Z. A. A. Kadir, C. Gomes, N. Azis, M. Izadi and O. S. H. Alyozbaky, "Analysis on magnetic flux density and core loss for hexagonal and butt-lap core joint transformers," 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016, pp. 1-4
- [8] D. M. M. Ahmad and I. Daut, "Measurement of flux density distribution on 100kVA 3-phase distribution transformer assembled with 90° T-joint and mitred lap corner joint with stagger yoke by using search coil," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, pp. 1404-1407
- [9] F. Marketos, D. Marnay and T. Ngnegueu, "Experimental and Numerical Investigation of Flux Density Distribution in the Individual Packets of a 100 kVA Transformer Core," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 4, pp. 1677-1680, April 2012
- [10] G. E. Mechler and R. S. Girgis, "Magnetic flux distributions in transformer core joints," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 198-203, Jan. 2000
- [11] S. Lundmark, Y. V. Serdyuk, S. M. Gubanski and B. Larking, "Comparison between hexa- and conventional E-type core three-phase transformers," 2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008, pp. 1-6

- [12] O. S. Alyozbaky, M. Zainal A. Ab Kadir, M. Izadi, C. Gomes, N. B. Azis and M. Bt. Mohd. Isa, "New Optimization Technique to Design the Core of Three-Phase Transformer," 2019 2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering (ICECCPCE),2019, pp. 13-18
- [13] Qi Tang, Shufeng Guo and Zhongdong Wang, "Magnetic flux distribution in power transformer core with mitred joints" J. Appl. Phys. 117, 17D522 (2015)
- [14] A. M. A. Haidar and M. Al-Dabbagh, "The Influences of T-Joint Core Design on No-Load Losses in Transformers," in IEEE Potentials, vol. 32, no. 3, pp. 40-48, May-June 2013,
- [15] Alyozbaky OS, Ab-Kadir MZA, Izadi M, Gomes C, Azis N, Isa M. A new approach of core structure model for 3-phase distribution transformer. Int Trans Electr Energ Syst. 2018;28:e2572.
- [16] Bob Degeneff, The Electrical Engineering Handbok 2005, pp 715-720, ISBN 978-0-12-170960-0
- [17] <https://electrical-site.blogspot.com/2016/05/transformer-main-parts.html>
- [18] Bharat Heavy Electricals Limited, Transformers, Mc Graw Hill, New York, 8-12, 2004, ISBN 9780071447850
- [19] Yeh, Ting-Jen, NTHU, Department of Power Mechanical Engineering, <https://ocw.nthu.edu.tw/ocw/upload/124/news/af%20inz-transformers.pdf>
- [20] S.Guru-Hüseyin Hızıroglu-Electric Machinery and Transformers - The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering, 2001
- [21] Bell, Simon & Bodger, Patrick. (2008). Power transformer design using magnetic circuit theory and finite element analysis — A comparison of techniques. 2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC. 1 - 6. 10.1109/AUPEC.2007.4548092.
- [22] Fatih Işık, "Amorf Çekirdekli 33/0.4 kV 1MVA Dağıtım Transformatörü Tasarımı ve Performans Analizi", Mayıs 2014, Doktora Tezi
- [23] Martin J. Heathcote, The J&P Transformer Book Twelfth edition, pp-53, 1998, ISBN 07506 1158 8
- [24] V. Lebedev, "Transformer basics," 2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, Nashville, TN, 2007, pp. 356-359,
- [25] Stefan Fassbinder, Deutsches Kupferinstitut, Sonderdruck s.182, pp-6-7,2019, <https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/11/s182.pdf>
- [26] P. Penabad-Duran, X. M. Lopez-Fernandez and C. Alvarez-Mariño, "Transformer Tertiary Stabilizing Windings. Part I: Apparent power rating," 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, (2012), pp. 2362-2368
- [27] James Harlow, The Electric Power Transformer Engineering Handbook Third Edition, 2012, pp 17-17, 461, ISBN 9781439856291

- [28] M. Schäfer, K. Feser, E. Cardillo, "Thermisches Verhalten und Überlastbarkeit von Leistungstransformatoren", Micafil Symposium, 24./25. März 2004, Stuttgart, Tagungsband, Kap. 4, S. 1-13
- [29] Karenina, L.S., Korzunin, G.S. & Puzhevich, "Effect of the phosphate component of electrical insulating coating on the magnetic losses in grain-oriented electrical steel". Phys. Metals Metallogr. 111, 21–24 (2011)
- [30] S.V. Kulkarni, S.A. Khaparde, Transformer Engineering Design, Technology, and Diagnostics 2.nd Edition, pp 37-38. 2012, ISBN-13: 978-1-4398-5418-1
- [31] R. Escarela-Perez, S. V. Kulkarni, N. K. Kodela and J. C. Olivares-Galvan, "Asymmetry During Load-Loss Measurement of Three-Phase Three-Limb Transformers," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1566-1574, July 2007,
- [32] Thyssenkrupp Europa AG, Grain Oriented Steel Powercore Catalogue 2020, https://www.thyssenkruppsteel.com/media/content_1/produkte/elektroband/electrical_steel_integration/thyssenkrupp_electrical_steel_product_range.pdf
- [33] Gamil, A., Schatzl, F. "Determining transformer core losses based on investigation of core material behaviour during test and operation mathematical interpretation", Transformers Magazine, 2(4), pp. 20-25, 2015.
- [34] PROPHET II: The potential for global energy savings from high-efficiency distribution transformers, Final report, pp 15 – November 2014
- [35] Olivares, Juan C. & Liu, Y. & Cañedo, Jose & Escarela-Perez, R. & Driesen, J. & Moreno, P. (2002). Reducing Losses in Distribution Transformers. Power Engineering Review, IEEE. 22. 61-61. 10.1109/MPER.2002.4312601.
- [36] Thomas Allen Short, Electric Power Distribution Handbook, 2nd Edition, pp-215, 2004, ISBN:0-8493-1791-6-
- [37] A. J. Moses, "Electrical steels: past, present and future developments," in IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education, vol. 137, no. 5, pp. 233-245, Sept. 1990,
- [38] Magdaleno-Adame, Salvador & Kefalas, Themistoklis & Fakhravar, Anahita & Olivares, Juan C. (2018). Comparative Study of Grain Oriented and Non-Oriented Electrical Steels in Magnetic Shunts of Power Transformers
- [39] Brachthäuser, N.: Elektromobilität - Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband. Firmenschrift, C.D. Wälzholz GmbH (Hrsg.), Hagen, 2012.
- [40] K. Honma, T. Nozawa, H. Kobayashi, Y. Shimoyama, I. Tachino and K. Miyoshi, "Development of non-oriented and grain-oriented silicon steel," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 21, no. 5, pp. 1903-1908, September 1985
- [41] Carl-Dieter Wuppermann, Andreas Schoppa, "Merkblatt 401 - Elektroband und -Blech", Stahl-Informations-Zentrum, Düsseldorf 2006, ISSN 0175-2006
- [42] Najgebauer, Mariusz & Chwastek, Krzysztof & Szczyglowski, Jan & Wilczyński, Wiesław. Modern core materials for efficient power distribution transformers. Przegląd Elektrotechniczny. 3. pp.133-135. (2009)

- [43] R. Hasegawa, A. C. Lee and L. A. Lowdermilk, "Amorphous alloy core distribution transformers," in Proceedings of the IEEE, vol. 79, no. 11, pp. 1608-1623, Nov. 1991
- [44] Hasegawa R. "Applications of Amorphous Magnetic Alloys". In: Idzikowski B., Švec P., Miglierini M. (eds) Properties and Applications of Nanocrystalline Alloys from Amorphous Precursors. NATO Science Series (Series II: Mathematics, Physics and Chemistry), vol 184. Springer, Dordrecht, (2005)
- [45] John J. Winders, Power Transformers Principles and Applications, pp 69-70, 2002, ISBN: 0-8247-0766-4
- [46] Prof. Krishna Vasudevan, Indian Institute of Technology Madras, Electrical Machines-1 Lecture, <https://nptel.ac.in/courses/108/106/108106071/>
- [47] S. Wijayapala, K. Gamage, G. Bandara, "Determination of Capitalization Values for No Load Loss and Load Loss in Distribution Transformers" Engineer - Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka 49 No:3 pp.11-20, Aug 2016
- [48] Colin Bayliss, Brian Hardy, Transmission and Distribution Electrical Engineering, Third Edition, pp. 540-543, 2006, ISBN 978-0750666732
- [49] Corhodzic, S. and A. Kalam (2000). Assessment of distribution transformers using loss capitalization formulae. 20. Schneider Electric, Transformer Division
- [50] ABB Transformer Handbook, page 62-64, 2004
- [51] George Patrick Schultz, Transformers and Motors, Chapter-1, pp 3-22, 1989, ISBN-13: 978-0750699488
- [52] P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," in Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, August 1966
- [53] D. Mihail, N. Krste and G. Rafajlovski: "Prediction of Core Losses of Three-Phase Distribution Transformer." Journal of Energy and Power Engineering, vol. 7, pp. 2347-2353, 31 December, 2013
- [54] B. W. Kennedy, Energy Efficient Transformers, 1998 , McGraw Hill Companies, Inc, United States of America, pp.30-33, ISBN-13: 978-0070342880
- [55] Ahmet Karademir , Mehmet Kubilay Eker, Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi, Politeknik Dergisi, 2016; 19 (4) : 389-397
- [56] Murat Tören, Mehmet Çelebi, Kuru Tip Transformatörlerde Nüve Materyallerinin Verime Etkisi, ELECO 2016 Bildiri, Elektrik - Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Aralık 2016,
- [57] C. P. Steinmetz, "On the Law of Hysteresis," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. IX, no. 1, pp. 1-64, Jan. 1892, doi: 10.1109/T-AIEE.1892.5570437.
- [58] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, no. 1, pp. 621-630, Jan. 1988

- [59] K. Yamazaki and N. Fukushima, "Iron-Loss Modeling for Rotating Machines: Comparison Between Bertotti's Three-Term Expression and 3-D Eddy-Current Analysis," in IEEE Transactions on Magnetics, vol.46,no.8, pp. 3121-3124, (2010)
- [60] S Tumanski, Handbook of Magnetic Measurements, pp-21, 2011, ISBN-13: 978-1-4398-2952-3
- [61] Ivers-Tiffée, E., Münch, W., Werkstoffe der Elektrotechnik, 10th Ed., B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, pp. 183-185 (2007). ISBN: 9783835100527,
- [62] Bertotti, G., Hysteresis in Magnetism: For physicists, materials scientists, and engineers Electromagnetism, Academic Press, pp. 4-8 , 1998, ISBN: 9780120932702
- [63] Wilfried Pläßmann, Detlef Schulz, Handbuch Elektrotechnik Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker 6.Auflage, pp. 218, 2013, ISBN 978-3-8348-1021-2
- [64] Ohring M., Magnetic properties of materials in Engineering Materials Science, San Diego: Academic Press, 1995 , pp. 711-746.
- [65] Mohamed E. El-Hawary, Electrical Energy Systems, pp. 37, 2000, ISBN: 084-93-2191-3
- [66] Liviu Constantinescu-Simon, Handbuch Elektrische Energietechnik 2.Auflage, pp. 102-106, 1997, ISBN: 978-3-322-85062-1
- [67] Akira Akagi, Norio Takahashi, "Examination of Eddy Current between Steel Sheets without Insulation and a Criterion for Determining the Necessity of Insulation", Electrical Engineering in Japan, Vol. 192, No. 3, 2015
- [68] M. Jones and A. Moses, "Comparison of the localized power loss and flux distribution in the butt and lap and mitred overlap corner configurations," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 10, no. 2, pp. 321-326, June 1974
- [69] H. Pfützner et al., "Automatic 3-D Building Factor Analyses of a Grain-Oriented Model Transformer Core," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 50, no. 4, pp. 1-4, April 2014, Art no. 8400604,
- [70] Christian Freitag, Magnetic Properties of Electrical Steel, Power Transformer Core Losses and Core Design Concepts, PhD Dissertation, Karlsruher Institutes für Technologie (KIT), 2017
- [71] F. Löffler, T. Booth, H. Pfützner, C. Bengtsson and K. Gramm, "Relevance of step-lap joints for magnetic characteristics of transformer cores," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 142, no. 6, pp. 371-378, Nov. 1995
- [72] Valković, Z. (1992), "Some Aspects Of Additional Losses In Step-Lap Joints of Transformer Core", COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 11 No. 1, pp. 137-140.
- [73] Colonel Wm. T. Mclyman, Transformer and Inductor Design Handbook, Third Edition 2004, Chapter 3.5. pp-109, ISBN-0-8247-5393-3

- [74] Jeffery Hampson, Steven Hanssen, Electrical Trade Principles 5th Edition, pp-408-410, 2019, ISBN- 9780170412230
- [75] Leicong Industrial Co.LTD. Taiwan, Online Product E-Catalogue, pp-5, <http://www.leicong.com/en/e-catalog-5/E-catalogue.html>
- [76] Firma Gebr. WAASNER GmbH, Waasner Produkt Katalog 2020, http://www.waasner.de/fileadmin/Assets/PDFs/Katalog_Waasner_01_2020.pdf
- [77] Firma Erich Grau GmbH Katalog für Elektrobleche, https://www.grau-stanzwerk.de/d-wAssets/docs/produkte/ei-2-kernbleche/Zg_Abmessung.pdf
- [78] Dipl.-Ing. Zhijun Ye, "Einfluss der Eisensättigung in Kraftwerkstransformatoren auf die subtransienten Generatorströme", der Technischen Universität Dortmund, Dissertation, 2012
- [79] S. Kulig: "Anwendung der numerischen Feldberechnung zur Modellierung elektrischer Drehstrom-Maschinen mit inneren Fehlern", Zeitschriftenaufsatz, Bulletin Schweizerischer Elektrotechnischer Verein (SVE/VSE), Band 81, Heft 7, Seiten 35-43,1990.
- [80] C. Hafner: "Numerische Berechnung elektromagnetischer Felder- Grundlagen, Methoden, Anwendung", Spring-Verlag, Berlin, 1987
- [81] P. Silvester and M. V. K. Chari, "Finite Element Solution of Saturable Magnetic Field Problems," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1642-1651, Sept. 1970,
- [82] Firma Cogent-Power, Technical Datasheet for M330-50A, 2009, <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m330-50a.pdf>
- [83] ANSYS Maxwell v15 Tutorial 7.4, Transformer Core Loss Calculation in Maxwell 2D and 3D, 2015
- [84] International Electrotechnical Commission Transformer Standard, IEC 60076-20:2017 Power transformers - Part 20: Energy efficiency, pp-10, 2017

A

REFERANS MODEL ÜRETİCİ VERİLERİ



Angeb.: /Var. 1

Datum : 18.04.18
3UI- Kern/1-Kammer

EINGABEDATEN:

Anz. U1	I1	U21	I21	U22	I22	U23	I23	U24	I24	U25	I25
(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)	(V)	(A)
1	400	7.11	200	13.6	0	0	0	0	0	0	0
N/S: 1	D	1	Y	1		1		1		1	
S2 (VA):			4700 VA		0		0		0		0
ED (%) :	100										
Ith (A) :	7.11		13.6		0		0		0		0
F (Hz) :	50		IsolKl: E		Tu('C): 40		DT('C): 80		Styp (VA): 4514		
KERN-Nr.:	13		Sbau (VA): 3150				Kern-Typ : 3UI 150/65				
D (mm) :	50.00		FB (mm): 50.00				Afe (cm2): 31.53				
T (mm) :	65.00		FH (mm): 150.0				Gfe (kg): 22.8				
Dj (mm) :	50.00		LW (mm): 143.3				Pfe (W): 66.8				
WICKFORM:	1		BLECH : V135-50A				Pb (VA): 566.6				
Keil(mm) :	0.00		B (T): 1.41				Pfe-Fakt.: 1.00				
Nkan :	0		BLECHART : Normschnitt				Pb-Fakt. : 0.60				
Hkan(mm) :	0.00		Io (A): 0.82				dTfej('K): 50				
WICK-Anz:											

	2	3	4	5	6	7	8	
POSITION: 1 - SEKUNDÄR								SCHALTUNG: Y ANZ(A/E):A
Wdg/Spul: 120 *	0	0	0	0	0	0	0	0
Lcu (mm): 3.00R	0	0	0	0	0	0	0	0
Hcu (mm): 3.00	0	0	0	0	0	0	0	0
Qcu(mm2): 7.07	0	0	0	0	0	0	0	0
IsZ.(mm): 0.100	0	0	0	0	0	0	0	0
Neb.XÜb.: 1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1
Wdg/Lage: 45.2	0	0	0	0	0	0	0	0
Anz.Lag.: 2.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 2.65
Hw2 (mm): 9.9								Lag.is.: 0.050 x 143.3 jede Lage
Gcu (kg): 6.52	0	0	0	0	0	0	0	6.52
R20 mOhm: 85.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Pcu75(W): 57.4	0	0	0	0	0	0	0	0
Pcuth(W): 62.4	0	0	0	0	0	0	0	0
Zw.Isol.: 8 x (

	0.050 x	143.3)						
POSITION: 2 - PRIMÄR								SCHALTUNG: D ANZ(A/E): A
Wdg/Spul: 405 *	0	0	0	0	0	0	0	0
Lcu (mm): 1.60R	0	0	0	0	0	0	0	0
Hcu (mm): 1.60	0	0	0	0	0	0	0	0
Qcu(mm2): 2.01	0	0	0	0	0	0	0	0
IsZ.(mm): 0.072	0	0	0	0	0	0	0	0
Neb.xÜb.: 1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1	1 x 1
Wdg/Lage: 84.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Anz.Lag.: 4.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00 4.78
Hw1 (mm): 9.0								Lag.is.: 0.050 x 143.3 jede Lage
Gcu (kg): 7.64	0	0	0	0	0	0	0	7.64
R20 Ohm: 1.24	0	0	0	0	0	0	0	0
Pcu75(W): 76.1	0	0	0	0	0	0	0	0
Pcuth(W): 82.7	0	0	0	0	0	0	0	0
Deck.Is.: keine								Pcut = Pri [Pcu75(W)] + Sek [Pcu75(W)]
Gcut(kg): 14.2		Pcut : 133		SA mm: 6.2		dTcu : 62		
Ur (%) :	2.84	Ux(%): 0.87		Uk(%): 2.97		Nein : 9.37		
SEKUNDAER-SPANNUNG:								
U21o (V): 205.2	0	0	0	0	0	0	0	0
U21n (V): 199.4	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek.1 E-I Çekirdekli Referans Modele Ait Üreticiden Alınan Değerler