

**EVİRİCİ ÇIKIŞ TRANSFORMATÖRLERİNİN
MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

Selami BALCI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2010
ANKARA**

Selami BALCI tarafından hazırlanan “EVİRİCİ ÇIKIŞ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA
Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Güngör BAL
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Ömer Faruk BAY
Elektronik-Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Tarih: 01/07/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Selami BALCI

EVİRİCİ ÇIKIŞ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Selami BALCI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Temmuz 2010

ÖZET

Kesintisiz güç kaynakları ile güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları eviricilerinde, DA baranın yüklerden izole edilmesi ve/veya DA baranın şebeke gerilimi seviyesine getirilmesi gibi amaçlarla evirici transformatörleri kullanılmaktadır. Evirici transformatörleri yapısal özellikleri bakımından şebeke frekansında çalışan standart transformatörlerden giriş empedansı ve anahtarlama hataları sebebiyle oluşabilecek doyma etkisine önceden tedbir alınması gibi yönleriyle farklılık gösterirler. Bununla birlikte evirici transformatör tasarımı hem güç elektroniği hem de transformatör tasarım bilgilerini gerektiren karmaşık bir konu olup, transformatörün yüksek frekans davranışlarının da tasarımda dikkate alınması gerekir.

Elektrik makinelerinin davranışlarının modellenenebilmesini sağlayan ve sonlu elemanlar yöntemi ile analize olanak veren yazılımlar kullanıldığında nüve akı dağılımı, indüklenen gerilimler, nüve kayıpları, sargı indüktansları, sargı kayıpları, sargılarda oluşan kuvvetler gibi önemli tasarım parametreleri çok yüksek bir doğrulukla hesaplanabilmektedir. Böylece klasik tasarım yönteminin bir dezavantajı olan çok sayıda prototip üretimine gerek kalmamakta, değişik geometri ve nüve özelliklerindeki transformatörler hızlı bir şekilde analiz edilebilmektedir.

Tasarım sürecinde, akı dağılımının tahmin edilmesi büyük ölçüde önem taşıdığından, paket yazılımlar ile görsel hale getirilmesi tasarımcıya öncelikle neleri inceleyeceği konusunda rehber olmaktadır. Akıların görselleştirilmesi, manyetik devrenin değişik bölgelerindeki kaçak ve faydalı akı dağılımını ortaya çıkarmakta, aynı zamanda nüvedeki manyetik doyum durumu hakkında da bilgi vermektedir.

Bu çalışmada, klasik tasarımlı transformatör ile ayırık nüve tasarımlı transformatörün modellemesi yapılarak girişine şebeke ile modüle edilmiş sinüsoidal PWM uygulanmıştır. Hem klasik ve hem de ayırık nüveli modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte eviriciler için ayırık nüve geometrisi ile tasarlanan transformatör kullanıldığında, harmonikleri yok etmek için ayrıca filtre indüktörlerinin kullanılmasına gerek kalmadığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 703.3.012
Anahtar Kelimeler : Evirici çıkış transformatörü, sonlu elemanlar yöntemi, transformatör tasarımı, manyetik modelleme, maxwell
Sayfa Adedi : 90
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA

MODELING AND ANALYSIS OF INVERTER OUTPUT TRANSFORMERS
(M.Sc. Thesis)

Selami BALCI

GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
July 2010

ABSTRACT

Inverter output transformers are used in Uninterruptible Power Supplies and renewable energy sources (such as solar and wind) with the aim of isolating DC link from loads and/ or adjusting DC link at the level of network voltage. Inverter transformers are different from standard transformers in terms of structural properties, such as input impedance and prevention from saturation which is caused by switching errors. Therefore design of an inverter transformer is complicated topic, which needs the information about both power electronics and design of transformer. Besides behaviors of an inverter transformers at high frequency level must be kept in view in the design.

When software's are used, which enables modeling of electrical machines behaviors and analyzing with finite elements methods, some important design parameters, such as core flux distribution, induced voltages, core losses, coil inductances, stranded losses, forces in coils, can be determined with high precision. A disadvantage of conventional design methods so that does not require a large number of the production of prototypes, transformers which have different geometry and core features can be analyzed quickly.

Because prediction of flux distribution is important in design process, visualization with package programs guides the designer which point will be inspected. Visualization of flux exposes escape and useful flows at different

zones of magnetic circuits and at the same time it gives also information about the situation of magnetic saturation at core.

In this study, modeling of classical transformers and discrete core transformers was realized and modular sinusoidal PWM via network was applied to the input of inverter transformer. Obtained results from both single core and split core transformers were compared. Therefore it was also proven that when split core transformers have been used, there was no need to use filter inductors in order to remove harmonics.

Science Code : 703.3.012

**Key Words : Inverter output transformer, finite elements method,
transformer design, magnetic modeling, maxwell**

Page Number: 90

Adviser : Assist. Prof. Dr. İbrahim SEFA

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez çalışmalarım sürecinde yardımlarını esirgemedi rehberlik eden ve sonsuz hoşgörü sahibi Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim SEFA hocama, kullanmış olduğum yazılımlara ilişkin tecrübelerinden ve bilgilerinden faydalandığım Durmuş UYGUN'a, desteklerinden dolayı Türközü Oğuzhan Endüstri Meslek Lisesi yönetimine ve öğretmen arkadaşlarıma, ayrıca manevi olarak destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. TRANSFORMATÖRLERDE KULLANILAN MANYETİK MALZEMELER ...	6
2.1. Manyetik Malzemelerin Özellikleri	6
2.2. Nüve Kayıpları	9
2.2.1. Histerezis kaybı	9
2.2.2. Girdap akım kaybı	10
2.2.3. Anormal girdap akım kaybı	10
2.3. Laminasyon Malzemeleri ve Standartları	12
2.4. Amorf Laminasyon Malzemeleri	16
3. TRANSFORMATÖR TASARIMI	18
3.1. Nüve Geometrik Biçimleri	19
3.2. Nüve Kesiti ve Boyutlarının Belirlenmesi	21
3.3. Dönüştürme Oranı ve Primer-Sekonder Sargı Hesabı	23
3.4. Sargı Özellikleri ve Bakır Dolgu Faktörü	23
3.5. Transformatörlerde Kullanılan Yalıtım Malzemeleri	27

3.6. Primer-Sekonder Sargı Alanları	28
3.7. Kaçak İndüktansın Hesaplanması	30
3.8. Isınma Durumu ve Sıcaklık Artışının Hesaplanması	30
3.9. Transformatör Tasarım Akış Diyagramı	31
4. EVİRİCİ ÇIKIŞ TRANSFORMATÖRLERİ	33
4.1. Evirici Yapıları	33
4.1.1. Gerilim kaynaklı eviriciler	34
4.1.2. Eviricilerde PWM anahtarlama yöntemi	35
4.1.3. Üç fazlı eviriciler	36
4.1.4. Üç fazlı gerilim kaynaklı eviricilerde PWM	37
4.1.5. Eviricilerde harmoniklerin azaltılması	38
4.2. Evirici Transformatörlerinde Kaçak Reaktansın İncelenmesi	39
4.3. Evirici Transformatör Tasarımı	39
4.4. Yüksek Frekanslı Transformatörlerde Kapasitif Etki	40
5. TRANSFORMATÖRLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI	43
5.1. Transformatörlerin Modellenmesi ve Analizi	44
5.1.1. Analitik yöntemler	44
5.1.2. Sayısal yöntemler	45
5.1.3. Sonlu elemanlar yöntemi	45
5.2. SEY ile Doğrusal Olmayan Manyeto-Statik Problemlerin Çözümü	49
6. EVİRİCİ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ	53
6.1. Klasik Tasarımlı Transformatörde Analiz Sonuçları	55
6.1.1. Sinüsoidal uyarım durumunda analiz sonuçları	58
6.1.2. PWM ile uyarım durumunda analiz sonuçları	62

6.2. Ayrık Nüve Tasarımlı Transformatörde Analiz Sonuçları.....	67
6.2.1. Sinüsoidal uyarım durumunda analiz sonuçları	68
6.2.2. PWM ile uyarım durumunda analiz sonuçları	71
6.3. Evirici Transformatörlerinde Kaçak Akıların Öneminin Simülasyonu	77
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	84
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	90

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. AISI normuna göre yönlendirilmiş laminasyon malzemeleri.....	13
Çizelge 2.2. Dünyadaki mevcut Elektrik Çelik Standartları	14
Çizelge 2.3. EN ISO 9000 kalitesi ile üretilen yönlendirilmiş laminasyon malzemelerinin manyetik özellikleri.....	14
Çizelge 2.4. Global çelik kodlarının Amerikan ve Japon standartlarındaki eşdeğerleri	15
Çizelge 2.5. Yönlendirilmemiş elektrik çeliklerinin manyetik özellikleri.....	15
Çizelge 3.1. Değişik frekans değerleri için 100°C sıcaklıkta bakır iletkenin deri kalınlık değerleri	25
Çizelge 3.2. Elektrik cihazlarının sıcaklık ve yalıtım sınıfı ile yalıtkan malzemeler	28
Çizelge 6.1. Transformatörlerin tasarım biçimi ve uyarım durumuna göre nüve kayıplarının karşılaştırılması	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Mıknatıslanma ve geçirgenlik eğrileri	8
Şekil 2.2. B-H mıknatıslanma eğrisi	9
Şekil 2.3. Klasik girdap akım yolları	11
Şekil 2.4. Dömen duvarlarının etkisindeki anormal girdap akım yolları.....	11
Şekil 2.5. Muhtelif elektrik çeliklerinin ve amorf metallerin 50 Hz frekans değerindeki doyma akı yoğunlukları ile nüve kayıpları.....	17
Şekil 3.1. EI laminasyon biçimi	20
Şekil 3.2. UI laminasyon biçimi.....	20
Şekil 3.3. I tipi laminasyon levhalar ile oluşturulan nüve biçimleri	20
Şekil 3.4. Transformatör nüvesinin geometrik ölçüleri	22
Şekil 3.5. Yuvarlak iletkenlerden oluşan sarımda doluluk miktarı	25
Şekil 3.6. Folyo sargı	26
Şekil 3.7. Ortak merkezli üst üste sarılmış primer ve sekonder sargılar.....	30
Şekil 3.8. Transformatör tasarımı akış diyagramı	32
Şekil 4.1. Çift yönlü (bipolar) anahtarlama PWM kontrol gerilimi ve evirici çıkış dalga formları	35
Şekil 4.2. Tek yönlü (unipolar) anahtarlama PWM kontrol gerilimi ve evirici çıkış dalga formları	36
Şekil 4.3. Üç fazlı iki seviyeli evirici topolojisi ve PWM çıkış dalga formu	36
Şekil 4.4. Üç fazlı üç seviyeli evirici topolojisi ve PWM çıkış dalga formu.....	37
Şekil 4.5. Üç fazlı eviricilerde PWM sinyalinin üretilmesi	38
Şekil 4.6. Üç fazlı evirici çıkış dalga formu.....	38
Şekil 4.7. Transformatörün tam eşdeğer devresi.....	41

Şekil	Sayfa
Şekil 5.1. İki boyutlu (2D) üçgen ve dikdörtgen biçimli elemanlar.....	45
Şekil 5.2. Üç boyutlu (3D) üçgen prizma biçimli eleman.....	46
Şekil 5.3. Birinci derece üçgensel sonlu elemanların ayrıntılandırılması.....	47
Şekil 5.4. Manyetik materyalin B-H eğrisi	50
Şekil 5.5. Manyetik malzemenin $v_f = B^2$ eğrisi	51
Şekil 6.1. SEY yazılımı ile modelleme ve analiz süreci akış diyagramı.....	53
Şekil 6.2. Ayrık nüveli evirici çıkış transformatörü.....	54
Şekil 6.3. Klasik tasarımlı üç fazlı transformatör	55
Şekil 6.4. M5 tipi laminasyon malzemesinin mıknatıslanma (B-H) eğrisi	56
Şekil 6.5. Yazılımın malzeme özelliklerine ilişkin penceresi	56
Şekil 6.6. M5 tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kayıpları.....	57
Şekil 6.7. Yazılımın nüve kayıp parametrelerine ilişkin penceresi.....	57
Şekil 6.8. Klasik tasarımlı Δ/Y bağlı transformatörün simülasyonundaki devre şeması.....	58
Şekil 6.9. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları	59
Şekil 6.10. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları	60
Şekil 6.11. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda nüve kayıpları.....	61
Şekil 6.12. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sargı kayıpları.....	61
Şekil 6.13. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda akı dağılımı	62
Şekil 6.14. Üç fazlı iki seviyeli evirici için simülasyon devresi	63

Şekil	Sayfa
Şekil 6.15. Üç fazlı PWM referans sinyali.....	63
Şekil 6.16. Klasik tasarımı transformatörün PWM uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları	64
Şekil 6.17. Klasik tasarımı transformatörün PWM uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları	65
Şekil 6.18. Klasik tasarımı transformatörün PWM uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları	66
Şekil 6.19. Klasik tasarımı transformatörün PWM uyarım durumunda akı dağılımı	67
Şekil 6.20. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları	68
Şekil 6.21. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları	69
Şekil 6.22. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları	70
Şekil 6.23. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda akı dağılımı	71
Şekil 6.24. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda primer sargı gerilim ve akım dalga formları	72
Şekil 6.25. Transformatör nüvesinin SEY yazılımı ile sonlu elemanlar ağ ayrıntısı.....	73
Şekil 6.26. Kapasitör filtreli PWM geçici durum simülasyon devresi.....	73
Şekil 6.27. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları	74
Şekil 6.28. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları	75
Şekil 6.29. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda akı dağılımı	76
Şekil 6.30. Üç fazlı PWM evirici simülasyon devresi	77

Şekil	Sayfa
Şekil 6.31. PWM referans sinyali	78
Şekil 6.32. İki seviyeli PWM sinyalleri üretici özelliklerine ilişkin pencere	78
Şekil 6.33. Transformatör eşdeğer devresi	79
Şekil 6.34. Transformatör eşdeğer devre parametrelerine ilişkin pencere	79
Şekil 6.35. Yük üzerindeki evirici çıkış gerilimi dalga formu	80
Şekil 6.36. Kaçak akıların büyük olduğu durumda evirici çıkış gerilim dalga formu	81
Şekil 6.37. Evirici çıkışında filtre indüktörlerinin kullanılması	81
Şekil 6.38. Filtre indüktörleri kullanıldığı durumda evirici çıkış gerilim dalga formu	82
Şekil 6.39. Evirici çıkışında filtre kapasitörlerinin kullanılması	83
Şekil 6.40. Filtre kapasitörlü durumda evirici çıkış gerilim dalga formu	83

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
a	Nüve bacağı genişliği, cm
b	Nüve bacağı kalınlığı, cm
c_p	Nüve pencere genişliği, cm
f	Frekans, Hz
h_{gp}	Nüve pencere yüksekliği, cm
h_w	Sargı yüksekliği, cm
k	Transformatör dönüştürme oranı
ν	Manyetik direnç derecesi
ν_r	Bağıl manyetik direnç derecesi
x	Steinmetz katsayısı
A_c	Nüve kesit alanı, cm^2
A_{cu}	İletken kesit alanı, mm^2
A_{eff}	Etkin nüve kesit alanı, cm^2
$A_{pr,cu}$	Primer sargı iletken kesit alanı, mm^2
$A_{sk,cu}$	Sekonder sargı iletken kesit alanı, mm^2
A_{primer}	Primer sargı alanı
$A_{sekonder}$	Sekonder sargı alanı
A_w	Sargı pencere alanı
B	Manyetik akı yoğunluğu, Tesla
B_m	Akı yoğunluğunun tepe değeri
B_r	Artık mıknatısiyet değeri
C	Laminasyon malzemesinin kalite katsayısı
F_s	Nüve paketlenme faktörü
F_{cu}	Bakır dolgu faktörü

Simgeler**Açıklama**

$F_{cu,pr}$	Primer sargı bakır dolgu faktörü
$F_{cu,sk}$	Sekonder sargı bakır dolgu faktörü
H	Manyetik alan şiddeti, A/m
I_{pr}	Primer akımı, Amper
I_{sk}	Sekonder akımı, Amper
J	Akım yoğunluğu, A/mm ²
K	Sıcaklık artış katsayısı
K_h	Histerezis katsayısı
K_e	Girdap akım katsayısı
K_c	Anormal girdap akım katsayısı
L_L	Kaçak akı
N_{pr}	Primer sarım sayısı
N_{sk}	Sekonder sarım sayısı
P	Sargılar arası yalıtımın ortalama çevre uzunluğu
$P_{w,cu}$	Sargı (bakır) kayıpları
P_h	Histerezis kaybı, W/kg
P_e	Girdap akım kaybı, W/kg
P_c	Anormal girdap akım kaybı, W/kg
S	Anma gücü, VA
S_{sk}	Sekonder (çıkış) gücü, VA
V_{pr}	Primer gerilimi, Volt
V_{sk}	Sekonder gerilimi, Volt
ΔT	Sıcaklık farkı
μ	Geçirgenlik
μ_0	Boşluğun geçirgenliği
μ_r	Bağıl geçirgenlik
δ	İletken deri kalınlığı, mm
σ	İletken telin öz direnci
ω	Açısal hız
Φ_m	Manyetik akı tepe değeri, maxwell

Kısaltmalar**Açıklama**

AA	Alternatif Akım
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
ASTM	Amerika Elektrik Çelik Standardı
AWG	Amerikan İletken Tel Standardı
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
DA(DC)	Doğru Akım
DIN	Almanya Elektrik Çelik Standardı
EN	Avrupa Elektrik Çelik Standardı
GO	Grain-oriented (yönlendirilmiş)
GOST	Rusya Elektrik Çelik Standardı
GTO	Kapıdan Kapanabilir Tristör
IEC	Uluslararası Elektromekanik Standardı
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
JIS	Japonya Elektrik Çelik Standardı
KGK	Kesintisiz Güç Kaynağı
NF	Fransa Elektrik Çelik Standardı
NO	Non-oriented (yönlendirilmemiş)
PWM	Puls Genişliği Modülasyonu
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SWG	İngiliz İletken Tel Standardı
emk	Elektro Motor Kuvvet
mmk	Manyeto Motor Kuvvet
2D	İki Boyut
3D	Üç Boyut
Δ	Üçgen
Y	Yıldız

1. GİRİŞ

Transformatörler alternatif akım (AA) elektrik enerjisini alçaltan veya yükselten statik elektrik makineleri olarak elektrik tesislerinde ve güç elektroniği dönüştürücü devrelerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca elektrik akımı ile çalışan birçok cihazın (kesintisiz güç kaynakları, elektrik kaynak makineleri gibi) tamamlayıcı devre elemanıdır. Transformatörler alternatif akımı belirli bir gerilim seviyesinden istenilen başka bir gerilim seviyesine manyetik bağ yolu ile dönüştüren makinelerdir. Bu özelliği sebebi ile primer ve sekonder devreleri arasında galvanik bir izolasyon bulunmaktadır.

Döner veya hareketli parçası bulunmayan transformatörler, elektrik enerjisinin sadece gerilim ve akım bileşenlerinin büyüklüklerini değiştirerek, bir devreden diğer bir devreye manyetik kuplaj yolu ile aktarılmasını sağlarlar [1]. Bazı özel durumlarda transformatörlerin primer ve sekonder gerilimleri eşit olur. Böyle transformatörler izolasyon transformatörü olarak adlandırılırlar.

Bir transformatör, ortak bir ferromanyetik nüve üzerine sarılan iki veya daha fazla sayıdaki sargıdan oluşur. Sargılar arasındaki bağı, nüvede oluşturulan manyetik akı sağlamaktadır. Yüksek manyetik bağ ve yüksek akı yoğunluğu sağlamak için ferromanyetik malzeme kullanılan transformatöre “*demir nüveli transformatör*” denilir ve yüksek güç uygulamalarında kullanılır [2].

Ortak manyetik devre üzerine yerleştirilen sargılardan birisine ve özellikle alternatif akım enerji kaynağı tarafından beslenen sargıya “*primer sargı*”; primer sargı tarafından oluşturulan değişken manyetik alandan etkilenerek endüksiyon elektro motor kuvvetini (emk) meydana getiren ve yük devresini besleyen sargıya da “*sekonder sargı*” denilmektedir. Primer ve sekonder sargılardaki elektrik enerjisinin gerilim ve akım değerleri, bu sargıların sarım sayılarına bağlı olarak değişmektedir. Primer ve sekonder sargıların sarım sayıları oranı “*dönüştürme oranı*” olarak bilinmektedir [1].

Transformatörün temel çalışma ilkesini 1831'de elektrik alanında ilk çalışmaları yapmakta olan İngiliz fizikçi Michael Faraday bulmuştur. Elli yıl kadar sonra da çağdaş örneğinin gerekli tüm elemanlarına sahip, kullanışlı transformatör ortaya çıkmıştır. Yüzyılın sonlarında değişken akımlı AA güç sistemleri tüm dünyada kullanılmaya başlamış ve transformatörler elektrik iletim ve dağıtımında önemli bir görev üstlenmişlerdir. Transformatörler 100 yıllık bir tarihsel gelişim sürecinde sürekli olarak geliştirilmiş ve yenilenmiştir; fakat temel transformatör tasarım ve uygulama mantığı esasen aynen süregelmiştir. Son elli yıldaki çalışmalar, transformatörde kullanılabilecek çeşitli manyetik malzemeler ve üretim teknikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Yakın zamanlarda ise, transformatörlerin çalışma koşullarının gözlemlenmesi, geçici durumlardaki tepkisi, oluşabilecek hasarlar ve hasar analizi, ekonomiklik ve bunlara uygun olarak yapılabilecek yeni tasarımlara ilişkin araştırmalar üzerinde durulmaktadır [3].

Güç elektroniği sahalarında yer alan evirici teknolojisinde yarıiletken anahtarlar aracılığı ile doğru akım (DA) gücü AA güce dönüştürülürken gerilimlerin değiştirilmesi için yüksek frekanslı transformatörlerden yararlanılır. Buradaki güç dönüşümü, kesintisiz güç kaynaklarına (KGK) duyulan gereksinim ile küresel ısınmaya karşı geliştirilen güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına duyulan ilgiden dolayı önem arz etmektedir.

Elektrik makinelerinin tasarımı, çok sayıda karmaşık ve birbiri ile bağıntılı problemlerin çözümünü gerektirmektedir [4]. Genellikle transformatör üreticilerince, müşterinin istediği parametrelerde üretime geçilmeden önce makinenin prototip modeli tasarlanmakta ve tasarlanan bu model üzerinde elde edilen sonuçlar analiz edilerek üretilecek nihai makinenin optimizasyonu sağlanmaktadır. Bundan dolayı klasik tasarım yönteminde optimizasyon için çok sayıda prototip oluşturulması gerekebilir. Sonuç olarak istenilen özellikleri karşılayan ve ticari olarak uygulanabilecek tasarıma ulaşmak oldukça zaman alabilir. Ayrıca yeni ve farklı modellerin geliştirilmesi sınırlı kalmaktadır ve üretim süreci uzamaktadır.

KGK üreticileri genellikle transformatör üretimi ile ilgilenmemekte ve bu konudaki ihtiyaçlarını transformatör üreticilerinden karşılamaktadırlar. Türkiye’de pek çok KGK ve pek çok da transformatör üreticisi bulunmaktadır. Ancak evirici transformatörlerine ilişkin önemli problemler olduğundan ve yurt içindeki firmaların tasarlayıp ürettikleri transformatörler KGK üreticilerinin beklentilerini karşılamadığından yurt dışından temin etme eğilimi ağırlık kazanmıştır.

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) ile analize olanak veren yazılımlar, tasarlanacak elektrik makinelerinin (elektrik motoru ve transformatör gibi) davranışlarının modellenenebilmesini sağlamaktadır. Böylece çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan değişik geometrilere ve özelliklere sahip makinelerin hızlı bir şekilde analiz edilmesine olanak vermektedir. Bu yazılımlarda genellikle gerçek hayatta üretilebilen bütün elektrik makineleri modellenenebilir ve analiz edilebilir. Ayrıca bu tür yazılımlar, kullanıcısına manyetik laminasyon malzemeleri ile bakır sargılardan modeller tasarlayabileceği sanal bir laboratuvar ortamı sunmakta, manyetik alan çizimleri ve grafiklerden görüntüler oluşturmakta, indüktans, nüve ve sargı kayıpları, geçici durum akım-gerilim ilişkileri gibi sayısal değerler hesaplamaktadır [4].

Elektrik makineleri tasarımında SEY yazılım paket programlarının kullanılmasının avantajları kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Analizlerde; teorik olarak bilinen ancak uygulamada görülemeyen ayrıntıların görülebilir duruma getirilebilmesi,
- Tasarımda; prototip tasarlamadan önce gerçekteki modelleme pazarlama süresinin ve maliyetlerin azaltılabilmesi,
- Optimizasyonda; tasarlanan cihazların veriminin ve performansının geliştirilebilmesine yardımcı olması,
- Öğretimde; özellikle manyetik alan gibi anlaşılması güç olan konuları görsel hale getirerek eğitimi kolaylaştırmasıdır.

Bu tez çalışmasında KGK ile güneş ve rüzgâr enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının evirici çıkışlarının izole edilmesi veya gerilim dönüşümü gibi amaçlarla kullanılan evirici transformatörlerinin modellenmesi ve analizi gerçekleştirilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde transformatörlerde kullanılan manyetik malzemelerin özellikleri, nüve kayıpları ve laminasyon malzemelerinin standartları üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde genel olarak transformatör tasarımından bahsedilmiş ve transformatör tasarımı için akış diyagramı verilmiştir.

Dördüncü bölümde evirici yapıları ile evirici çıkış transformatörleri incelenmiş ve evirici transformatörlerinde kaçak akıların önemi vurgulanmıştır. Burada transformatör tasarımında kaçak akıları artırmak için kullanılan ayırık nüve geometrilili tasarıma ilişkin bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde transformatörlerin bilgisayar destekli tasarımında SEY yazılımları ile modellenmesi ve analizi üzerinde durulmuştur. Ayrıca bu bölümde SEY ve avantajları anlatılmıştır.

Altıncı bölümde Ansoft-Maxwell yazılımında modelleme ve analiz sürecinin işleyişi açıklanmıştır. Modelleme ve analiz için klasik tasarımlı bir transformatör ile ayırık nüveli olarak tasarlanmış bir transformatör örneklem olarak alınmıştır. Bu transformatörler SEY yazılımında üç boyutlu olarak modellenerek sinüsoidal ve pals genişliği modülasyonu (PWM) ile uyarım durumlarında analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca eviricilerde çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmaya ilişkin bir simülasyon ile filtre indüktörleri gereksinimini ortadan kaldırmak için transformatörün kaçak akılarının özellikle büyük olması gerektiği elde edilen analiz sonuçları ile ispatlanmıştır.

Sonuç bölümünde ise evirici çıkışında kullanılacak transformatörlerin SEY yazılımları ile modellenmesinde elde edilen sonuçlar ile bu sonuçlara göre öneriler sunulmuştur.

2. TRANSFORMATÖRLERDE KULLANILAN MANYETİK MALZEMELER

Elektrik makinelerinin nüve (çekirdek) laminasyonlarında kullanılan manyetik malzemenin kalitesi, üretilecek makinenin verimini ve çalışma özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Transformatörlerde ise primer ve sekonder sargılar arasındaki manyetik bağın özelliği ile nüvenin geometrik yapısı ve manyetik malzemenin özellikleri önem arz etmektedir.

Elektrik makinelerinde oluşacak girdap (eddy) akım kayıplarının azaltılması amacıyla manyetik devrelerinde kullanılan saclar, lamine edilmiş levha haline getirilmektedir. Laminasyon levhaların yüzeyleri yüksek dirençli bir malzeme ile kaplanarak elektriksel olarak yalıtılmalıdır. Aksi takdirde paketlemede üst üste gelecek laminasyon yapraklarında oluşan girdap akım etkisi toplanarak büyür ve nüve kayıpları ile ısısı aşırı derecede artar. Sonuç olarak, verimi düşük ve kullanımı olanaksız bir transformatör üretilmiş olur.

2.1. Manyetik Malzemelerin Özellikleri

Dünyada bulunan bütün malzemeler manyetik özelliklere sahiptir ve karakteristiklerine göre aşağıda belirtildiği gibi beş gruba ayrıştırılabilir:

- Diamanyetik
- Paramanyetik
- Ferromanyetik
- Ferrimanyetik
- Antiferromanyetik

Bunlardan sadece ferromanyetik ile ferrimanyetik malzemeler elektrik makinelerinin nüve kısımları için kullanışlı özelliklere sahiptir. Ferromanyetik malzemeler, demir, nikel, kobalt gibi metallerin belirli oranlarda karıştırılması ile elde edilir. Ferrimanyetik malzemeler ise, bir veya birkaç metal oksit (nikel ve mangan gibi)

içeren demir oksit karışımlarıdır. En önemli avantajı, yüksek frekanslarda kullanıldıklarında girdap akımlarını minimize eden yüksek elektriksel dirence sahip olmalarıdır ve bu tür malzemeler çoğunlukla “*ferrit*” veya “*garnet*” olarak bilinirler [5].

Demir ve kobalt, nikel, tungsten ve alüminyum katkılı demir alaşımlarından yapılan ferromanyetik malzemeler, yapısı ve özellikleri yönünden büyük farklılıklar gösterir. Manyetik malzemenin yönlü manyetik bir ortamda bulunması halinde, yapısını oluşturan atomların manyetik momentleri paralel konuma gelirler. Mıknatıslanmamış malzemede atomların manyetik momentleri rastgele yönlerde bulunurlar. Malzemeye dışarıdan belirli bir yönde mıknatıslanma kuvveti uygulandığında, yapısını oluşturan atomların manyetik momentleri, uygulanan mıknatıslanma kuvveti ile aynı yöne gelmeye çalışırlar. Böylece, manyetik geçirgenliği artan malzemede dış manyetik alan etkisi ile büyük bir manyetik akı yoğunluğu oluşur. Manyetik malzemenin geçirgenliği, boşluğun manyetik geçirgenliğinin katları olarak belirlenir. Malzemenin yapısını oluşturan bütün atomların manyetik momentleri, dış manyetik alan etkisi ile aynı yöne geldiklerinde, malzeme manyetik bakımdan doymuş olur [1].

Harici manyetik alan etkisi kaldırıldığı zaman atomların manyetik momentleri tekrar tamamen gelişigüzel hale dönmezler. Çünkü malzeme kalıcı mıknatıs olmuştur. Atomların manyetik momentlerinin alan yönlerini değiştirmek için; ters yönde manyeto motor kuvvet (mmk) uygulamak, büyük bir mekanik şok uygulamak veya malzemeyi aşırı ısıtmak gerekmektedir. Bu olayların herhangi birinin oluşması, atomların manyetik momentlerinin alan yönlerini değiştirmeye neden olabilecek enerjiyi ortaya çıkarır. Kalıcı mıknatıs malzemeler düşürüldükleri, çekiç gibi sert bir cisimle vuruldukları veya aşırı derecede ısıtıldıkları takdirde mıknatıs özelliklerini kaybederler [2].

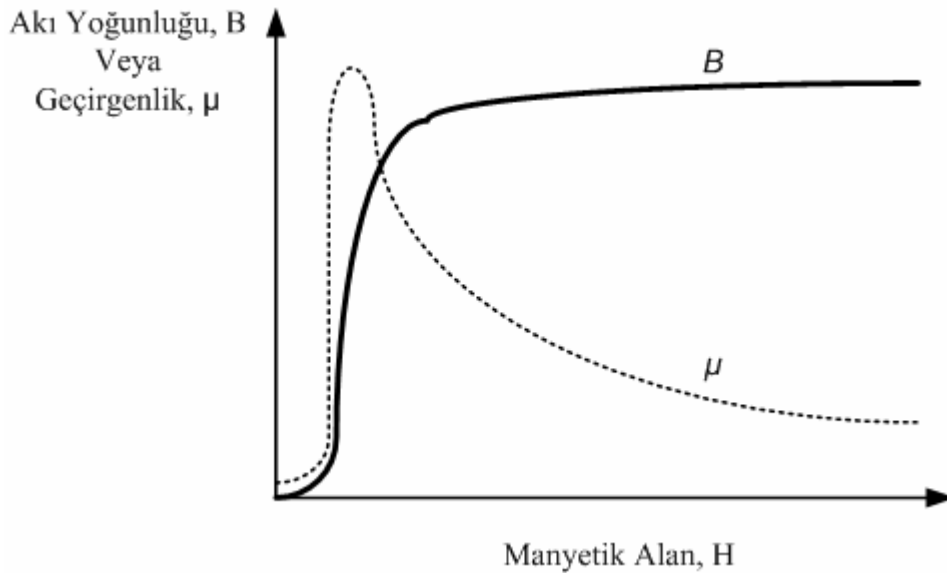
Manyetik malzemelerdeki önemli parametreler şunlardır:

- *Geçirgenlik (μ)*: Akı yoğunluğu (B) ile manyetik alan şiddeti (H) arasındaki ilişkidir ve 2.1’de verilen eşitlik ile tanımlanabilir.

$$B = \mu H = (\mu_0 \mu_r) H = \left(\frac{1}{\nu} \right) H = \left(\frac{\mu_0}{\nu_r} \right) H \quad (2.1)$$

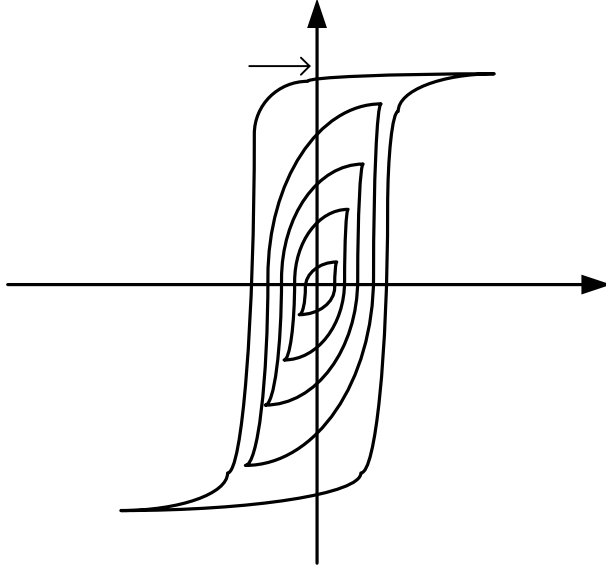
Burada; $\mu_0 = 4\pi \frac{10^{-7} H}{m}$ değerindeki boşluğun geçirgenliğidir, μ_r ise malzemenin cinsine göre değişen bağıl geçirgenlik katsayısıdır. ν , malzemenin manyetik direnç derecesi ve ν_r ise bağıl manyetik direnç derecesidir.

- *Doyma akı yoğunluğu (B)*: Bir manyetik malzemenin doyması için uygulanan yeterli manyetik alanın değeridir. Şekil 2.1'deki grafikte B'nin H'a ve μ 'nün H'a göre değişimi verilmiştir. Bu grafikte görülebileceği gibi; manyetik alan şiddetinin değeri bobinden geçen akım şiddeti ile doğru orantılı artarken doyma şartına yaklaştıkça akı yoğunluğunun artması daha yavaş, doyum noktasından sonra eğri yatay olmakta mıknatıslanma şiddeti hemen hemen sabit kalmaktadır. Ayrıca geçirgenliğin değeri de manyetik alan şiddetinin bir fonksiyonu olarak doğrusal olmayan bir değişime sahiptir.



Şekil 2.1. Mıknatıslanma ve geçirgenlik eğrileri

- *Remanans (B_r)*: Harici manyetik alan etkisi kaldırıldığında manyetik malzemede geriye kalan artık mıknatısiyet değeridir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. B-H mıknatıslanma eğrisi

2.2. Nüve Kayıpları

Değişken manyetik alan etkisinde bulunan ferromanyetik malzemede, demir kayıpları olarak nitelendirilen histerezis ve girdap akım kayıpları meydana gelir. Nüve kayıpları, manyetik akı yoğunluğunu azaltan ve makinenin işletme performansını dolayısıyla verimini düşüren etki yaratırlar. Isı olarak açığa çıkan nüve kayıpları literatürde “*demir kayıpları*” olarak da bilinmektedir.

2.2.1. Histerezis kaybı

Histerezis kayıpları, nüve malzemesinin yapısını oluşturan moleküllerin makinenin uyarıldığı gerilimin frekansına bağlı olarak manyetik alan yönüne yönlendirilmesi için harcanan manyetik enerjiden kaynaklanmaktadır. Değişken manyetik alan içerisinde bulunan nüvede oluşan histerezis kayıpları aşağıda verilen Eş.2.2 yardımıyla hesaplanabilir [1, 6-14].

$$P_h = K_h B_m^x f \quad (2.2)$$

Burada, K_h malzemenin cinsine göre değişen histerezis katsayısıdır ve malzemenin manyetik geçirgenliği arttıkça bu katsayı azalmaktadır. B_m akı yoğunluğunun tepe değeri olup, x ise Steinmetz katsayısıdır ve malzemenin cinsine göre 1.5 ile 2.5 arasında değişmektedir. Uygulamada x katsayısı 2 olarak alınmaktadır. Formülde f , Hz olarak frekansı göstermektedir. Maksimum manyetik akı yoğunluğu (B_m), Tesla olarak alındığında birim ağırlık başına histerezis kaybı P_h , W/kg olarak hesaplanabilir [1,6-14].

2.2.2. Girdap akım kaybı

Fuko kayıpları olarak da adlandırılan girdap akım kayıpları, değişken manyetik alan içerisinde bulunan laminasyon yapraklarında kapalı devreler şeklinde oluşan indükleme akımları nedeniyle oluşan kayıplardır. Girdap akım kaybı Eş.2.3 ile hesaplanmaktadır [6-14]. Burada, K_e malzeme cinsine bağlı olarak değişen bir katsayıdır.

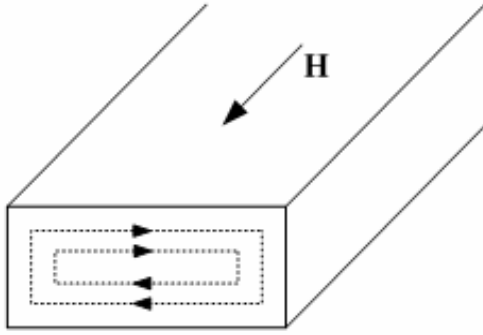
$$P_e = K_e B_m^2 f^2 \quad (2.3)$$

Nüve yapımında kullanılacak olan manyetik malzemenin elektrik direncinin yüksek, laminasyon yapraklarının mümkün olduğunca ince seçilmesi ve yaprak yüzeylerinin özel yalıtım malzemeleri (lak, vernik, kâğıt ve son yıllarda karlit gibi yalıtkanlar) ile yalıtılması önemli derecede girdap akım kaybını azaltmaktadır.

2.2.3. Anormal girdap akım kaybı

Girdap akım kayıpları, klasik girdap akım kaybı ve anormal girdap akım kaybı olarak sınıflandırılmıştır. Anormal girdap akım kaybı, manyetik malzemenin yapısını oluşturan manyetik domen duvarlarının, değişken manyetik alandaki yüksek frekanslı harmoniklerin etkisiyle oluşmaktadır.

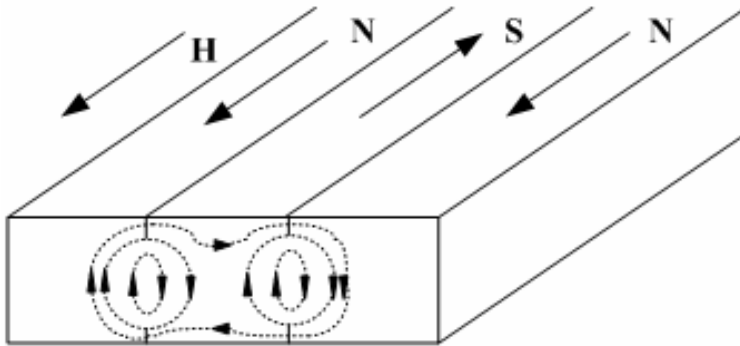
Girdap akımları mıknatıslanma sürecinde manyetik domen duvarlarının hareketi ile indüklenmektedir. Şekil 2.3’de domen duvarlarının etkisinde olmayan klasik girdap akım yolları gösterilmiştir [8].



Şekil 2.3. Klasik girdap akım yolları

Şekil 2.4’de ise domen duvarları etkisinde olan girdap akım yolları gösterilmektedir. Güncel girdap akım kaybı hesaplamaları, domen duvar hareketi etkileri dikkate alınmadan hesaplanan klasik girdap akım kaybından farklıdır ve 2.4’de verilen eşitlikten bulunan anormal girdap akım kaybı ilave edilmelidir [6-14]. Burada K_c anormal girdap akım sabitidir.

$$P_c = K_c B_m^{1,5} f^{1,5} \quad (2.4)$$



Şekil 2.4. Domen duvarlarının etkisindeki anormal girdap akım yolları

2.3. Laminasyon Malzemeleri ve Standartları

Elektrik elikleri ya da başka bir adıyla silikon çelikleri elektrik makine tasarımcılarınca laminasyon malzemeleri olarak tanınmaktadır[4]. Yönlendirilmemiş (Non-oriented, NO) ve yönlendirilmiş (Grain-oriented, GO) elikler olarak iki farklı türde üretilmektedir.

Sac levha şeklinde imal edilen manyetik malzeme alaşımlı elik olup, bileşiminde manyetik geçirgenliği ve elektriksel direncini artırarak histerezis kayıplarını azaltmak amacıyla belirli bir oranda silikon bulunur. Ancak silikon, malzemenin mekanik gerilmesini artırarak kırılgan bir özellik kazanmasına neden olmaktadır [1].

Yumuşak demire %5’den daha fazla silikonun eklenmesi malzemeyi kırılgan hale getirerek işlenmesini aşırı derecede zorlaştırır. Bu durum, ticari olarak kullanılan laminasyon malzemelerinde alaşımdaki silikon içeriğini maksimum %3,4 ile sınırlamaktadır [4].

Bu alaşımlar ferrit malzemeler ile karşılaştırıldığında büyük bir elektrik iletkenlikleri ve yaklaşık 1,8 Tesla gibi büyük bir doyma akı yoğunluklarına sahiptir. Demir alaşım nüve malzemeleri girdap akım kaybından ötürü çoğunlukla sadece düşük frekanslı (2 kHz’e kadar) uygulamalarda kullanılmaktadır. Demir alaşım manyetik malzemeler 60 Hz gibi düşük seviyeli frekanslarda bile girdap akım kaybını azaltmak için yalıtılmış ince levhalar haline getirilmelidir. Nüve kısımları, toz haline getirilmiş demir ve demir alaşımlardan da oluşturulabilir. Toz halindeki demirden yapılmış nüveler, birbirinden elektriksel olarak yalıtılmıştır. Aynı zamanda belirgin bir biçimde ince levhalara bölünmüş lamine paketi nüvelerden daha büyük direnci olan küçük demir parçacıklarından oluşur. Böylece toz halindeki demirden yapılmış nüvelerde daha düşük girdap akım kaybı vardır ve yüksek frekanslara kadar kullanılabilirler [15].

Yönlendirilmiş silikon çeliğinin kalitesi, 1945’te üretilen malzemedan bu yana bir hayli iyileştirilmiştir. 1970’den önceki geliştirme alışmaları, Armco firmasının

idaresinde yoğunlaşmıştır. Yönlendirilmiş ilk ticari silikon-demir alaşımı levha 1939'da Armco tarafından üretilmiştir. Bu alaşım 1,5 Tesla ve 50 Hz'de yaklaşık 1,5 W/kg özgül kaybı ile 0,32 mm kalınlığındadır. 1970 yılında yüksek geçirgenliğe sahip olan yönlendirilmiş GO silikon çeliği ticari kullanıma sunulmuştur. Karbon içeren kalitesiz çelik kimyasına %3,2'ye kadar silikon eklenmesi ile nüve kayıpları minimize edilmektedir [16].

Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsüne (AISI) göre yönlendirilmiş GO laminasyon malzemesi Çizelge 2.1.'de gibi sınıflandırılmıştır [16].

Çizelge 2.1. AISI normuna göre yönlendirilmiş GO laminasyon malzemeleri

LAMİNASYON	KALINLIK (mm)	NÜVE KAYBI (1,5 T ve 50 Hz) (W/kg)	NÜVE KAYBI (1,7 T ve 50 Hz) (W/kg)
M2	0.18	0.68	0.639
M3	0.23	0.75	0.672
M4	0.27	0.85	0.794
M5	0.30	0.97	0.90
M6	0.35	1.11	0.981
M19	0.470	1.76	-
M22	0.635	1.984	-

Çizelge 2.1'den görülebileceği gibi laminasyon malzemeleri inceldikçe nüve kayıpları azalmaktadır. Aynı zamanda malzemenin doyma akı yoğunluğu yani kalitesi arttıkça da kayıplar azalmaktadır.

Sahada kullanılmakta olan transformatör silikon çelik levhaların manyetik akı yoğunlukları bu yöndeki gelişmelerle 1,5 T (15000 Gauss) ile 1,7 T (17000 Gauss) gibi yüksek değerlerdedir.

Her firma ürettiği yüksek geçirgenliğe sahip çeliğe diğerlerinden farklı kendi sembollerini kullanmaktadır. Çizelge 2.2'de muhtelif firmalara ait laminasyon malzemeleri ve kodlamaları görülmektedir [16].

Çizelge 2.2. Dünyadaki mevcut Elektrik Çelik Standartları

KOD	KODUN YABANCI DİLDEKİ AÇILIMI	ÜLKE
EN	European Standard	Avrupa
IEC	International Electrotechnical Commission	Uluslar arası
DIN	Deutsches Institut für Normung	Almanya
NF	Norme Française	Fransa
JIS	Japanese Industrial Standard	Japonya
GOST	National Standard of the USSR (Union of Soviet Socialist Republics)	Rusya
ASTM	American Society for Testing and Materials	Amerika
AISI	American Iron and Steel Institute	Amerika

Cogent Power firması tarafından EN ISO 9000 kalitesi ile üretilen yönlendirilmiş GO malzemelerin özellikleri Çizelge 2.3’de verilmiştir [17].

Çizelge 2.3. EN ISO 9000 kalitesi ile üretilen yönlendirilmiş GO laminasyon malzemelerinin manyetik özellikleri

Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzemenin Ticari Firma Kodu	Malzemenin EN 10107 standardına göre kodu	50 Hz, 1,7 T’da Max. Spesifik nüve kaybı (W/kg)	50 Hz, 1,7 T’da Karakteristik Spesifik nüve kaybı (W/kg)	H = 800A/m için Minimum Manyetik Polarizasyon (T)
0.27	ET 114-27		1.14	1.11	1.83
	ET 120-27		1.20	1.17	1.82
	ET 130-27	M130-27S	1.30	1.23	1.80
	ET 140-27	M089-27N	1.40	1.34	1.77
0.30	ET 117-30	M117-30P	1.17	1.15	1.85
	ET 122-30		1.22	1.19	1.83
	ET 130-30		1.30	1.25	1.82
	ET 140-30	M140-30S	1.40	1.34	1.80
	ET 150-30	M097-30N	1.50	1.44	1.75
0.35	ET 130-35		1.30	1.27	1.84
	ET 140-35		1.40	1.34	1.83
	ET 150-35	M150-35S	1.50	1.44	1.80
	ET 160-35	M111-35N	1.65	1.55	1.75

Global silikon çelik kodlama standartlarının Amerikan ve Japon standartlarındaki eşdeğerleri Çizelge 2.4’de açıklanmıştır [4,16].

Çizelge 2.4. Global çelik kodlarının Amerikan ve Japon standartlarındaki eşdeğerleri

EN 10107	ASTM A876	JIS C2553
M110-23S		23 G 110
M120-23S	23 G 045, 23 H 070	
M120-27S	27 H 074	27 G 120
M130-27S	27 G 051	27 G 130
M130-30S		30 G 130
M140-30S	30 H 083	30 G 140
M150-30S	30 G 058	
M150-35S	35 H 0 94	35 G 155

Cogent Power firması tarafından üretilen yönlendirilmemiş NO elektrik çeliklerinin manyetik özellikleri Çizelge 2.5’de verilmektedir [17].

Çizelge 2.5. Yönlendirilmemiş NO elektrik çeliklerinin manyetik özellikleri

Malzeme Kalınlığı (mm)	Malzemenin EN 10107 standardına göre kodu	50 Hz, 1,5 T’da Max. Spesifik nüve kaybı (W/kg)	50 Hz’de H = 1000A/m için Manyetik Polarizasyon (T)
0.27	M210-27A	2.10	1.70
0.35	M235-35A	2.35	1.70
	M250-35A	2.50	1.70
	M270-35A	2.70	1.70
	M300-35A	3.00	1.70
	M330-35A	3.30	1.70
	M700-35A	7.00	1.77
0.50	M250-50A	2.50	1.70
	M270-50A	2.70	1.70
	M290-50A	2.90	1.70
	M310-50A	3.10	1.70
	M330-50A	3.30	1.70
	M350-50A	3.50	1.70
	M400-50A	4.00	1.73
	M470-50A	4.70	1.74
	M530-50A	5.30	1.75
	M600-50A	6.00	1.76
	M700-50A	7.00	1.77
	M800-50A	8.00	1.78

Bu çizelgede yer alan M800-50A kodlamasının anlamı şöyle açıklanabilir; M harfi malzemenin EN 10107 standardına göre kodunu, 800 rakamı toplam nüve kaybının

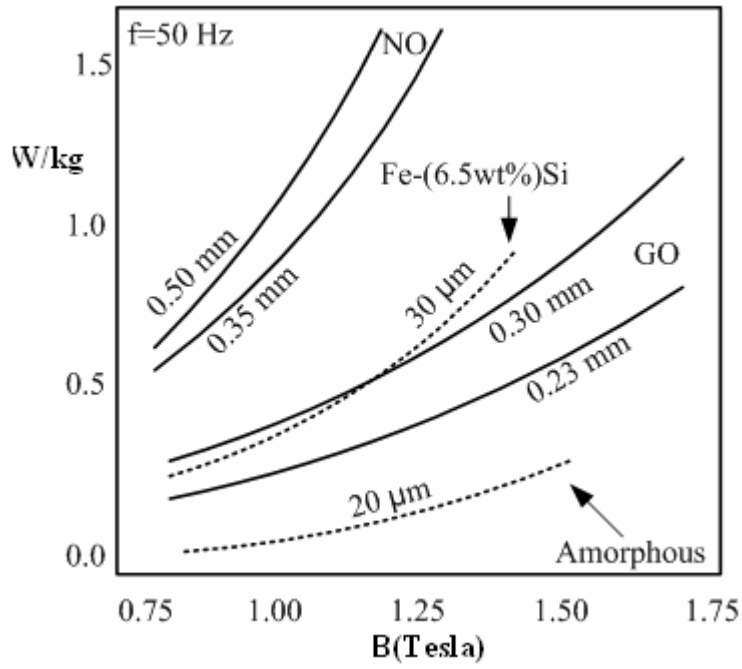
100 katını, 50 rakamı malzeme kalınlığının 100 katını ve A harfi ise malzemenin yönlendirilmemiş olduğunu ifade etmektedir. Eğer, son harf A yerine S olursa (M140-30S gibi) yönlendirilmiş silikon çeliği anlamına gelmektedir. Yönlendirilmiş M140-30S malzemesi ile yönlendirilmemiş M800-50A malzemesi karşılaştırıldığında nüve kayıplarının oldukça farklı olduğu anlaşılmaktadır [4].

Üretici firmaların kataloglarında laminasyon malzemelerinin manyetik özellikleri çizelgeler ve grafikler halinde verilmektedir. Manyetik özelliklerin ölçülmesi ve üretilen laminasyonların kalite kontrolü, en çok bilinen test metotlarından biri olan Epstein testi ile yapılmaktadır [17].

2.4. Amorf Laminasyon Malzemeleri

Amorf malzemeler, özellikle son yıllarda teknolojinin birçok sahasında ilgi odağı haline gelen bor madeninin, silikon çelik alaşımının içerisine ilave edilmesiyle elde edilmektedir. Bor, silikon ve karbon gibi kristalize yapıda olmayan elementlerin bir veya bir kaçının özel üretim teknikleri kullanılarak demir, nikel ve kobalt alaşımlarıyla birleştirilmesiyle ortaya çıkan özel manyetik malzeme “*amorf metal*” olarak adlandırılmıştır.

Bu tür malzemeler ile tasarlanan makinelerde oluşan kayıplar, yönlendirilmiş laminasyon malzemeleriyle karşılaştırıldıklarında, oldukça küçük değerlerde nüve kayıpları ile düşük sıcaklıklar ve yüksek verim sağlamaktadır. Buna rağmen doyma akı yoğunluğunun küçük değerde olması (50 Hz frekans için 1,5 T); 20µm gibi çok ince olan ve aşırı derecede sert laminasyon yapraklarına sahip olması çekirdeğin üretimi sırasında malzemenin işlenmesini zorlaştırarak paketlenme faktörünü etkilemekte ve elektrik makineleri tasarımında amorf metallerin kullanımını sınırlamaktadır. Şekil 2.5’de verilen grafikte 50 Hz frekans değerinde çeşitli elektrik çeliklerinin ve amorf metallerin doyma akı yoğunlukları ile nüve kaybı karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 2.5. Muhtelif elektrik çeliklerinin ve amorf metallerin 50 Hz frekans değerindeki doyma akı yoğunlukları ile nüve kayıpları [18].

Amorf laminasyon yaprağı 25 μm kalınlığı ile silikon çelik laminasyonuna göre yaklaşık olarak 10 kat daha incedir[19]. Bununla birlikte %92 demir, % 5 silikon ve % 3 bor içeren amorf laminasyon malzemesi yüksüz durumda iken, % 97 demir ve % 3 silikon içeren silikon çelik alaşımına göre yaklaşık % 70 daha düşük nüve kaybına sahiptir [20].

3. TRANSFORMATÖR TASARIMI

İşletme performansı optimum düzeyde olan ve yüksek verimli transformatör tasarımına ulaşmak için nüve yapımında kullanılacak laminasyonun malzeme seçimi ile nüvenin üç boyutlu geometrik biçimi çok önemlidir. Transformatörlerin üretiminde nüve geometrisi tasarlanırken şu faktörlerin göz önünde bulundurulması gereklidir:

- Manyetik devrenin relüktansının azaltılması için geçirgenliği yüksek malzeme kullanılması,
- Nüve hacminin ve ağırlığının azaltılması dolayısıyla makine boyutlarının küçültülmesi için doyma akı yoğunluğu yüksek malzeme kullanılması,
- Yüksek verim elde edilmesi ve ısınmanın fazla olmaması için özgül kayıpları az olan manyetik malzeme kullanılması.

Transformatör tasarımında en kaliteli malzemeyi kullanmak tek başına yeterli değildir. Kaliteli malzeme özellikleri, tasarımın henüz ilk aşamasında uygun olmayan nüve geometrik biçimlerinin seçilmesi ya da üretim sırasında paketlenme ve montaj aşamasında yok edilmektedir [4]. Manyetik akı yönü, laminasyon malzemesinin haddeleme yönü ile aynı yönlü ise nüve kayıpları en küçük değerdedir. Bu nedenle nüvenin montajı sırasında laminasyon levhaların kesme ve paketlenme işlemlerinde, manyetik akı yönünün haddeleme yönüne uygun olarak yapılması gerekmektedir.

Transformatörlerin nüve kayıplarını dolayısıyla da verimlerini manyetik malzeme, nüve tasarım ve üretim parametreleri etkilemektedir. Bu parametrelerin açılımı şu şekildedir [20]:

- *Manyetik malzeme parametreleri:* Manyetik malzemeyi üreten firma, kalınlık, tip (M3, M4, M5 gibi), spesifik nüve kaybı (W/kg), yüzey yalıtım direnci, sertlik,

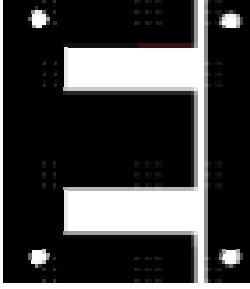
- *Tasarım parametreleri:* Anma manyetik indüksiyon, nüve bacağına kalınlığı ve genişliği, nüve penceresinin yüksekliği ve genişliği,
- *Üretim parametreleri:* Sertleştirme işleminin parametreleri, manyetik malzeme yalıtımının sınıfı, nüvenin biçimlendirilmesi sürecinde oluşan mekanik etkiler (stres), nüvenin gerçek ağırlığı, manyetik malzemenin kesilme kalitesidir.

Transformatörlerin tasarımı için temel giriş verileri; anma gücü (VA), gerilimler, dönüştürme oranı ve frekans değerleridir. Nüve geometrisinin belirlenmesi için gerekli olan veriler ise; transformatör anma gücü (S) ve frekansı (f), paketleme faktörü (F_s), doyma manyetik akı yoğunluğu (B), sargıların yapımında kullanılacak bakır telin öz direnci (ρ), bakır telin pencere alanına oranı olarak tanımlanan bakır dolgu (F_{cu}) faktörüdür.

Paketleme faktörü laminasyon malzeme üreticisi tarafından verilmekte ve uygulamada 0,98 değerine kadar alınabilmektedir [17]. Bakır dolgu faktörü ise iletken kesiti ve iletkeninin yüzey biçimine göre daha önceki deneyimlere dayanarak belirlenmektedir. Doyma manyetik akı yoğunluğu manyetik malzemenin mıknatıslanma (B-H) eğrisinden elde edilmektedir.

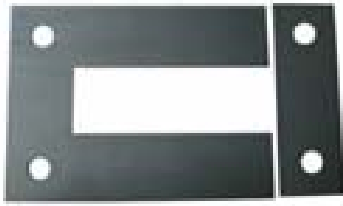
3.1. Nüve Geometrik Biçimleri

Transformatörlerin üç boyutlu nüve geometrileri kullanım amacına uygun olarak E, U ve I harflerine benzer biçimlerde tasarlanmaktadır. Küçük güçlü transformatörlerde EI biçimler tercih edilmekte ve Şekil 3.1’de görüldüğü gibi E bölümünün pencere kısmı I parçasını oluşturmaktadır. Böylece kesme işleminde laminasyon malzemesinden fire verilmemektedir [4,21].



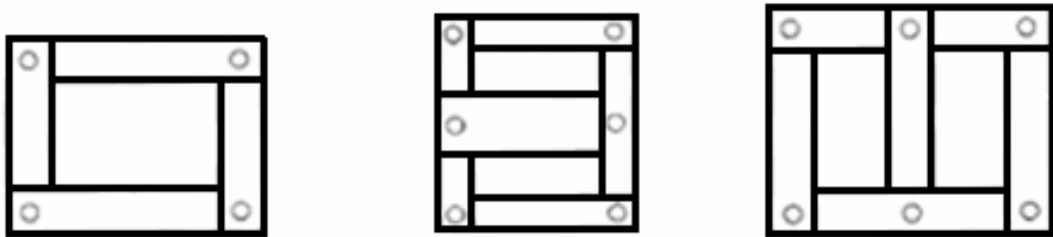
Şekil 3.1. EI laminasyon biçimi

Şekil 3.2’de verilen UI biçimindeki laminasyonlarda toroid nüve yapılarında olduğu gibi kaçak akılar minimum seviyededir. Ancak çok yönlü kullanıma olanak vermemesi ve kesme işleminde fire verilmesinden dolayı uygulama alanları sınırlı kalmaktadır [4,21].



Şekil 3.2. UI laminasyon biçimi

E ve U tipi levhalar kalıpla preslenerek kesilmektedir. Buna karşılık I tipi levhalar kalıp ve pres makinesine gerek duyulmadan giyotin makaslar ile kesilebilir. Özellikle büyük güçteki tasarımlarda I tipi laminasyon levha tercih edilmektedir. Şekil 3.3’de, I tipi levhalar ile oluşturulan bir fazlı ve üç fazlı nüve biçimleri verilmiştir [4,21].



Şekil 3.3. I tipi laminasyon levhalar ile oluşturulan nüve biçimleri

Yüksek frekanslı uygulamalarda standart kalıplarla dolgu dökümle biçimlendirilmiş E, U ve toroidal tip tek parça ferrit nüve yapıları kullanılmaktadır. 50-60 Hz gibi alçak frekans bantlarında paketlenmiş silikon çelik laminasyonları tercih edilmektedir. Transformatörlerde güç yükseldikçe geometrik boyutlar da artacağından nüve laminasyonu I tipi levhalardan oluşturulur. Ayrıca bazı uygulamalar (evirici transformatörü gibi) özel olarak hava aralıkları konulmasını gerektirdiğinden tek parça yapılar uygun değildir.

3.2. Nüve Kesiti ve Boyutlarının Belirlenmesi

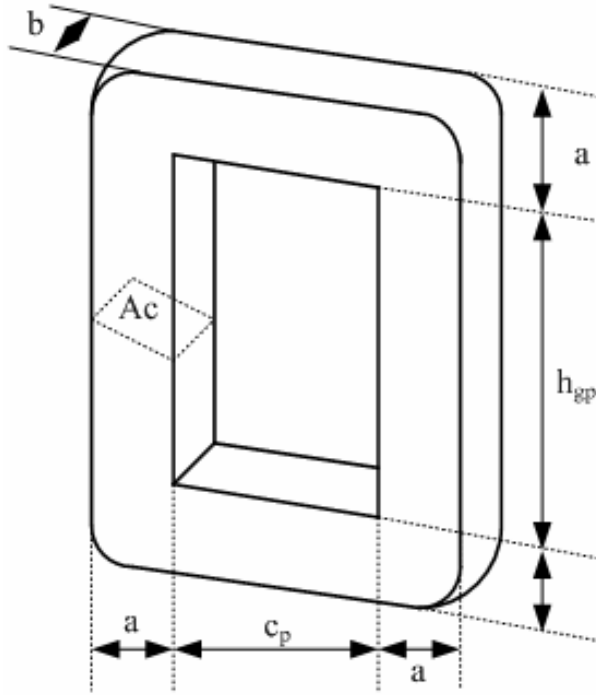
Nüve kesit alanı, tasarlanacak transformatör gücünün karekökü ile laminasyon malzemesinin kalitesine (C) bağlı olarak kare veya dikdörtgen biçiminde olmaktadır. Bir fazlı transformatör tasarımında 3.1'deki eşitlik; ortak nüveli üç fazlı transformatör tasarımında ise 3.2'deki eşitlik kullanılmaktadır. Ayrıca Şekil 3.4'de transformatör nüvesinin geometrik ölçüleri verilmiştir.

$$A_c = C\sqrt{S_{sk}} \quad (3.1)$$

$$A_c = C\sqrt{\frac{2}{3}S_{sk}} \quad (3.2)$$

Nüve kesiti, 3.3'deki eşitlik yardımıyla kare veya dikdörtgen biçiminde tasarlanarak belirlenmektedir. Eğer mevcut kalıplara uyulacaksa genellikle nüve bacak genişliği olan a ölçüsü standart olarak ilk belirlenecek değerdir. Nüve bacağının üst üste gelen laminasyon levhalarının kalınlığı ise b ölçüsünü vermektedir.

$$A_c = ab \quad (3.3)$$



Şekil 3.4. Transformatör nüvesinin geometrik ölçüleri

Nüve kesiti, üretim sırasında laminasyonunun paketlenmesinde bir miktar azalmaktadır. Laminasyon üreticisi tarafından verilen paketleme faktörü F_s kullanılarak etkin nüve kesiti eşitlik 3.4 ile bulunmaktadır.

$$A_{eff} = F_s A_c \quad (3.4)$$

Nüvedeki akı yoğunluğunun tepe değeri B_m , Faraday kuralına göre sinüsoidal uyarım için 3.5’de verilen eşitlik çözülerek 3.6’daki eşitlik elde edilmektedir[7,12].

$$b(t) = \frac{1}{NA_c} \int e(t) dt \quad (3.5)$$

$$B_m = \frac{\phi_m}{A_c} = \frac{1}{2NA_c} \int_0^{\pi/\omega} V_m \sin \omega t dt \quad (3.6)$$

3.3. Dönüştürme Oranı ve Primer-Sekonder Sargı Hesabı

Transformatörler elektromanyetik endüksiyon yolu ile 3.7’de verilen eşitlikteki dönüştürme oranına göre AA gerilim seviyesini alçaltır veya yükseltirler.

$$\frac{V_{pr}}{V_{sk}} = \frac{N_{pr}}{N_{sk}} = \frac{I_{sk}}{I_{pr}} = k \quad (3.7)$$

Primer ve sekonder sargıların sarım sayıları, nüve kesiti, manyetik malzemenin doyma akı yoğunluğu, çalışma frekansı ve gerilim parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Eşitlik 3.6’da verilen Faraday kuralından yararlanılarak önce primer sargı sarım sayısı 3.8’deki eşitlikten bulunur. Daha sonra aynı formül kullanılabileceği gibi transformatör tasarımında temel giriş verisi olan dönüştürme oranından da sekonder sarım sayısı eşitlik 3.9’da verildiği gibi hesaplanabilir [22].

$$N_{pr} = \frac{V_{pr}}{4,44BA_c f} \quad (3.8)$$

$$N_{sk} = \frac{V_{sk}}{4,44BA_c f} = \frac{V_{pr}}{k} \quad (3.9)$$

3.4. Sargı Özellikleri ve Bakır Dolgu Faktörü

Manyetik devrede gerekli manyetik alanın yoğunlaştırılması için sargı adı verilen belirli bir sayıdaki iletken demeti nüve bacaklarına yerleştirilmektedir. Transformatörlerde yüksek iletkenliği ve kolay şekillenebilmesi özelliği ile çoğunlukla bakır iletkenler tercih edilmektedir. Özel uygulamalarda alüminyum iletkenler de kullanılabilir.

Transformatörlere ilişkin olarak çeşitli sargı tipleri geliştirilmiştir. Bu sargı tipleri katmanlı sarılmış sargılar, bobin sarımlı sargılar, üniversal sarımlar ve toroidal sarımlar olarak açıklanabilir [4,21].

Elektrik sistemlerindeki bütün iletkenlerin bir iç direnci olduğundan transformatöre yerleştirilen bakır iletkenler ile sarılmış olan primer ve sekonder sargıların dirençlerinden dolayı devre akımlarının karesi ile doğru orantılı olarak güç kaybı oluşmaktadır. Bakır kayıpları adı verilen bu güç kayıpları ısı olarak açığa çıkar ve hem sargıların hem de nüve ısısının artmasına sebep olur. Bundan dolayı transformatörlerde iletken kesitinin belirli bir akım yoğunluğuna göre uygun değerde seçilmesi, bakır kayıplarını etkileyecek ve verimi yükseltecektir.

Transformatörlerde sargıların yapımında iletken olarak tek damarlı yuvarlak iletken tel; özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda deri etkisinin sorun yaratacağı göz önüne alınarak çok damarlı Litz teli ya da Folyo sargı kullanılmaktadır.

İletkenin dış yüzeyindeki akım yığılmaları AA direncini artırmaktadır. 20 kHz frekansta etkin olarak bakır iletkenin sadece 0,5 mm derinliğinde akım taşınmaktadır ve yüzey (deri) derinliği frekansın karekökü ile orantılı olarak azalmaktadır. Çözüm için özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda ince folyo sargı veya çok ince telli yalıtılmış iletkenlerden oluşan Litz teli kullanılmaktadır [23].

Deri kalınlığı eşitlik 3.10 ile hesaplanabilir. Bu eşitlikte frekans değeri açısal hız $\omega = 2\pi f$ olarak alınmıştır [18].

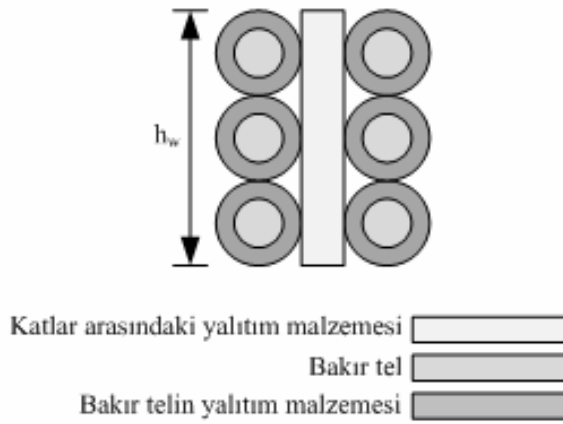
$$\delta = \sqrt{2 / \mu_0 \mu_r \sigma \omega} \quad (3.10)$$

Çizelge 3.1’de 100°C sıcaklıkta, değişik frekans değerleri için bakır iletkenin deri kalınlık değerleri verilmiştir. Bu çizelge frekans değeri arttıkça yüzey derinliğinin azaldığını ifade etmektedir [15].

Çizelge 3.1. Değişik frekans değerleri için 100°C sıcaklıkta bakır iletkenin deri kalınlık değerleri

Frekans	50 Hz	5 kHz	20 kHz	500 kHz
δ (mm)	10,6	1,06	0,53	0,106

Nüvenin sargı penceresindeki primer ve sekonder sargıların toplam sarım sayısı N ile iletken kesitinin A_{cu} çarpımı, sargı penceresindeki toplam bakır alanını verir. Toplam bakır alanı birkaç nedenden dolayı sargı penceresinin A_w alanından daha küçük olacaktır. Bunun nedenleri, Şekil 3.5’de görüldüğü gibi iletkenlerin genellikle yuvarlak olan geometrik şekli ve iletkenin bitişik sarımlarının birbiriyle kısa devre yapmaması için elektriksel olarak yalıtkan malzemeyle kaplı olması, sargı yerleştirme sürecinde N adet iletkenin pencereyi tamamen doldurmasını engeller. Ayrıca sarım katları arasındaki yalıtım malzemesi de sargı penceresine ilişkin alanın bir kısmını kaplar [15].

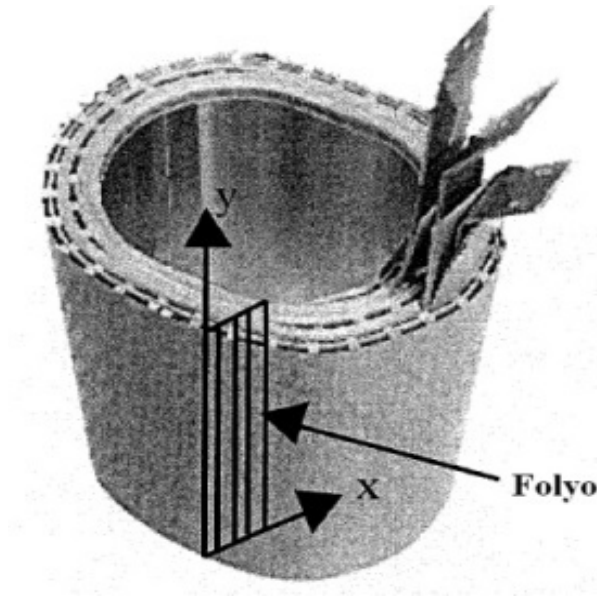


Şekil 3.5. Yuvarlak iletkenlerden oluşan sarımda doluluk miktarı [20].

Toplam bakır alanının sargı pencere alanına olan oranı bakır dolgu faktörü F_{cu} olarak adlandırılır ve 3.11’de verilen eşitlikten bulunabilir [15].

$$F_{cu} = \frac{NA_{cu}}{A_w} \quad (3.11)$$

Dolgu faktörü, yüksek gerilimli uygulamalarda yalıtım problemi çok önemli olduğundan 0,05 gibi çok küçük değerlerde; düşük gerilimli uygulamalarda ise 0,7 gibi yüksek değerlerde alınmaktadır. Bu faktör, sıfıra doğru küçüldükçe sargıların sarım sayılarının sığdırılabilmesi için nüvenin geometrik boyutunu önemli ölçüde artırmaktadır. Yuvarlak iletkenlerde 0,3 ve Litz teli için 0,5-0,6 gibi değerler arasında değişiklik gösterebilir. Sargıların yapımında Şekil 3.6'da görülen uzun bir dikdörtgen yüzeye sahip olan folyo sargı kullanıldığında ise bu faktör 0,9'a kadar yükselmektedir [4,24].



Şekil 3.6. Folyo sargı [24].

Tasarım aşamasında dolgu faktörü belirlenirken transformatör üreticilerinin deneyimlerinden faydalanılmalıdır. Nüve boyutunun (pencere yüksekliği ve genişliği) hesaplanabilmesi için bakır dolgu faktörü önemli bir parametredir. Eğer tasarlanacak transformatörde nüve boyutu, seçilen iletken tipine göre değişen bakır dolgu faktörüne uygun değilse, yani sarım sayısı sargı alanına sığmıyorsa nüve geometrik boyutları büyütülecek ya da mevcut seçilmiş iletken dolgu faktörü daha büyük olan bir iletken (Litz ve folyo gibi) ile değiştirilecektir.

Klasik bakır ve alüminyum iletken teller Amerikan standartlarında tel ölçüsü (AWG) ve İngiliz standartlarında (SWG) olarak belirlenmiştir. Son yıllarda ise uluslar arası tel standardı IEC 182-1 düzenlenmiştir. Tasarımcıların AWG ve SWG ölçü standartlarına alışkanlığı göz önüne alınarak üretici firmaların kataloglarında IEC standardındaki eşdeğerleri de verilmektedir [4].

3.5. Transformatörlerde Kullanılan Yalıtım Malzemeleri

Transformatörlerin nüvelerinde ve sargılarında oluşan ısınmalar yalıtım malzemelerinde istenilmeyen etkilere sebep olmaktadır. Bu ısınmalar yükü doğru orantılı olduğundan makine imalatında kullanılan yalıtım malzemelerinin seçiminde sıcaklık artışlarına karşı dayanıklı olmasına dikkat edilmelidir.

Transformatörlerde primer ve sekonder sargılar hem birbirlerine hem de nüve gövdesine karşı yalıtılmalıdır. Sargılarda yalıtılmış (emaye ve pamuk izoleli) iletken kullanılmasına rağmen sarım katları arası ekstra yalıtılmalıdır. Yüksek gerilim transformatörlerinde yalıtma işlemleri daha fazla önem taşımaktadır. Uygulamada presbant, kağıt, mika, plastik, fiber, muhtelif yağlar, pamuk, reçine gibi maddeler yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Uluslararası standartlara göre (IEC 60085) elektrik cihazlarının sıcaklık ve yalıtım sınıfı ile yalıtkan malzemeler Çizelge 3.2’de verilmiştir. Buradaki sıcaklık değerleri her sınıfın maksimum değerleridir. Transformatör üretiminde kullanılan yalıtkan malzemelerin her biri sınırlayıcı bir sıcaklık değeri ile yedi sınıfa ayrılmıştır. 180°C’nin üzerindeki yalıtkanlar C harfi ile sınıflandırılmıştır [4,5,21].

Çizelge 3.2. Elektrik cihazlarının sıcaklık ve yalıtım sınıfı ile yalıtkan malzemeler

Sıcaklık Sınıfı	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Yalıtkan Sınıfı	Yalıtkan Malzeme
Y	90	Y	Kuru kağıt, pamuk, ipek vb.
A	105	A	Vernik veya yağ emdirilerek lamine edilmiş kağıt (presbant), emaye, vernik vb.
E	120	E	Melamin kalıplar, selülozik malzemeli laminantlar vb.
B	130	B	Mika, cam veya asbest fiberleri vb. esnek inorganik yapıdaki fiber malzemeler
F	155	F	B sınıfındaki gibi ancak silikon reçine emdirilmiş malzemeler
H	180	H	Kompozit plastik kağıtlar, silikon lastik vb.
200	200	C	Mika, asbest, seramik vb. kompozit malzemeler
220	220		
250	250		

3.6. Primer-Sekonder Sargı Alanları

Transformatör nüvesinin geometrisinde pencere yüksekliği ve genişliğine göre primer-sekonder sargılar ile yalıtım malzemelerinin sığabilirliğinin denetlenmesinde sargı alanı A_w önem taşımaktadır. Primer ve sekonder sargı alanlarının toplamı 3.12'deki eşitlikte verilmiştir[15].

$$A_w = A_{\text{primer}} + A_{\text{sekonder}} = \frac{N_{pr} A_{pr,cu}}{F_{cu,pr}} + \frac{N_{sk} A_{sk,cu}}{F_{cu,sk}} \quad (3.12)$$

Burada, primer ve sekonder sargı iletkeni aynı seçildiğinde her iki sargı için dolgu faktörü $F_{cu} = F_{cu,pr} = F_{cu,sk}$ aynı olur. Ancak sekonder sargılarda alüminyum

iletken kullanıldığı kaynak makinesi transformatörleri gibi uygulamalarda dolgu faktörü her iki sargı için farklı olacaktır.

Akım yoğunluğu ve iletken kesiti (alanı) arasındaki ilişki sırayla eşitlik 3.13 ve 3.14'den bulunmaktadır.

$$I_{pr} = JA_{pr,cu} \quad (3.13)$$

$$I_{sk} = JA_{sk,cu} \quad (3.14)$$

Eşitlik 3.7'deki transformatör dönüştürme oranında primer ve sekonder sargı akımları (eşitlik 3.13 ve 3.14) yerlerine konularak düzenlendiğinde 3.15'de verilen eşitlik elde edilir.

$$\frac{N_{pr}}{N_{sk}} = \frac{I_{sk}}{I_{pr}} = \frac{JA_{sk,cu}}{JA_{pr,cu}} = \frac{A_{sk,cu}}{A_{pr,cu}} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.11 ve 3.15 çözülerek primer ve sekonder sargılarda kullanılacak iletken alanları sırasıyla 3.16 ve 3.17'deki eşitliklerde verilmiştir [15].

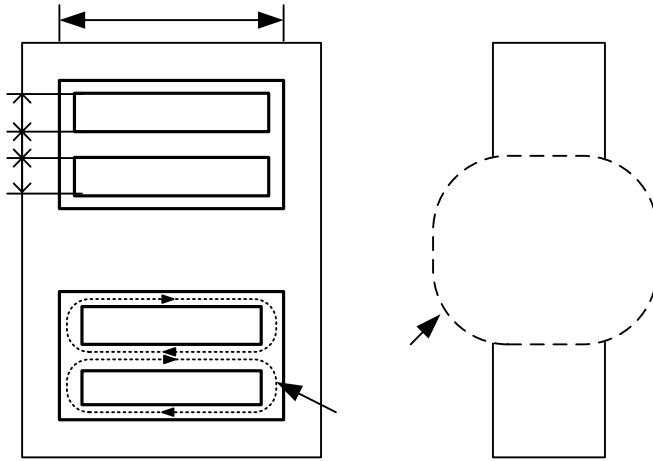
$$A_{pr,cu} = \frac{F_{cu} A_w}{2N_{pr}} \quad (3.16)$$

$$A_{sk,cu} = \frac{F_{cu} A_w}{2N_{sk}} \quad (3.17)$$

Burada sargılarda kullanılacak olan iletken alanları belirlenirken akım yoğunluğu J hava soğutmalı transformatörlerde genellikle 3 olarak alınır. Ancak çalışma rejimi, soğutma şekli, çalışma ortam materyali ve çalışma frekansı akım yoğunluğunun belirlenmesinde önemlidir. Tasarım aşamasında toplam sargı alanı hesaplanırken akım değeri, bakır kayıpları ve ısı düşünülerek akım yoğunluğunun değerinin korunması esastır.

3.7. Kaçak İndüktansın Hesaplanması

Kaçak indüktans değeri yaklaşık olarak sargı boyutlarına ve hesaplanacak sargının sarım sayısına bağlıdır. Referans bir hesaplama örneği olarak Şekil 3.7’de verilen EI laminasyonundaki ortak merkezli olarak sarılmış bir transformatör ele alınmıştır. Burada ortalama sarım uzunluğu, sargılar arasındaki yalıtımın ortalama çevresine göre nüvenin üst görünüşünden yararlanılarak belirlenebilir.



Şekil 3.7. Ortak merkezli üst üste sarılmış primer ve sekonder sargılar [21].

Burada verilen transformatör örneği için kaçak indüktansın yaklaşık değeri 3.18’deki eşitlikten hesaplanabilir [21].

$$L_L = \frac{4\pi N^2 P}{h_w} \left(\frac{h_1 + h_3}{3} + h_2 \right) \times 10^{-9} \quad (3.18)$$

3.8. Isınma Durumu ve Sıcaklık Artışının Hesaplanması

Transformatörlerin nüvesinde oluşan demir kayıpları ile sargılarında oluşan bakır kayıpları, ısı olarak açığa çıkmaktadır. Sıcaklık artışı makine performansını azaltmakta, yalıtım malzemelerini zayıflatmakta ve birçok parametreyi de olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun için tasarım aşamasında ortam sıcaklığına göre sıcaklık

artışının hesaplanması ve yalıtım sınıfının seçimini bu artışı göz önünde bulundurarak seçmek gerekmektedir.

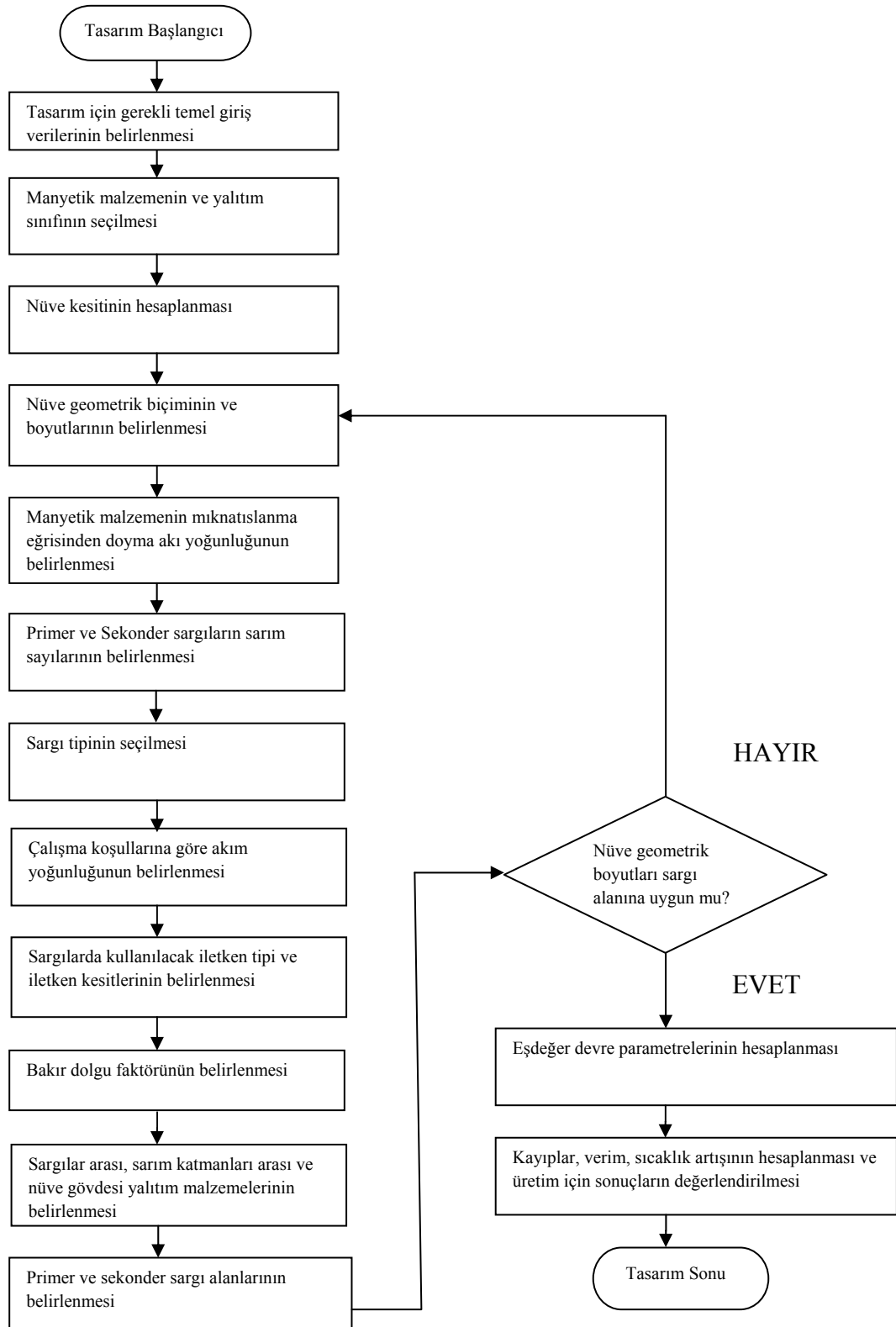
Sıcaklık artışının yaklaşık olarak hesaplanabilmesi için Armour kuruluğu tarafından basit bir metot geliştirilmiştir. Bu metot ile hesaplama yapabilmek için 3.19'da verilen eşitlik kullanılmaktadır [4,21].

$$\Delta T = K \left(\frac{P_{w,cu}}{A_{w,cu}} \right)^{0,8} \quad (3.19)$$

Burada K , yaklaşık olarak sıcaklık artışının hesaplanabilmesi için gerekli olan ve değişik şartlara (çevre sıcaklığı, çalışma frekansı, soğutma şekli ve nüve tipi gibi) bağlı olarak değişen bir katsayıdır [4,21].

3.9. Transformatör Tasarım Akış Diyagramı

Transformatörler, mekanik ve elektriksel tasarım olmak üzere ihtiyaç duyulan parametreler göz önüne alınarak tasarlanmakta ve üretilmektedirler. Şekil 3.8'de bir transformatörün tasarımı akış diyagramı olarak verilmiştir. Üretilen transformatörün optimizasyonu için bu akış diyagramı adım adım izlenmeli ve gerekli kontroller yapılmalıdır [4,21].



Şekil 3.8. Transformatör tasarımı akış diyagramı

4. EVİRİCİ ÇIKIŞ TRANSFORMATÖRLERİ

Evirici transformatörleri, KGK gibi acil durum yedek güç sistemlerinde kullanılan transformatörlerdir. Üreticiler müşterilerin istekleri doğrultusunda, transformatörün anma gücü ve frekansı, giriş-çıkış gerilim değerleri, dönüştürme oranı ve özellikle eviriciler gibi özel amaçlı istenilen modellerde kaçak indüktans faktörünü göz önünde bulundurarak üretmektedirler.

Evirici, DA besleme kaynağından (akü veya batarya grubu) kare dalga veya kıyılmış çıkış üretmek için yarıiletken anahtarlama elemanlarını içeren bir elektrik cihazıdır. Evirici transformatörü ise, eviricinin kıyılmış DA seviyesinden AA sinüsoidal çıkış üretebilmesi için bir kapasitör ile bağlı belirli bir indüktans değerinde tasarlanan yüksek frekanslı transformatördür.

Bir fazlı evirici transformatörleri genellikle dik ve yatay bacakları arasında altta ve üstte bir aralığa sahip olarak tasarlanmış UI tip laminasyon nüveleri olarak yapılırlar. Transformatörün sekonderi ana nüve üzerine sarıldıktan sonra sekonder sargının bittiği noktadan itibaren belirli bir aralıkta yardımcı bir nüve yerleştirilir. Daha sonra primer sargı, sekonder sargı ve yardımcı nüve üzerine sarılır. Yardımcı nüve, primer ve sekonder sargılar arasında manyetik ayrımı sağlayarak büyük bir kaçak indüktans meydana getiren bir elemandır. Kaçak indüktansın değeri yardımcı nüvedeki aralıkla değiştirilebilir ve bu indüktans istenilen sinüsoidal çıkış dalga şeklini üretmek için devre kapasitörleri ile birlikte görev yapması için ayarlanır.

4.1. Evirici Yapıları

Darbe genişlik modülasyonunda çalışan eviriciler, AA motor tahrik sistemlerinde ve kesintisiz AA güç kaynaklarında kullanılmaktadır. Burada amaç, genliği ve frekansı kontrol edilebilen bir gerilim üretmektir. KGK ve yenilenebilir enerji kaynaklarında kullanılan eviricilerin girişinde bir DA kaynağı bulunmaktadır [15]. Güneş panellerinden ve yakıt hücrelerinden elde edilen gerilim DA'dır. Günlük hayatta yüklerin büyük kısmı ve elektrik şebekesi AA olduğu için elde edilen bu DA elektrik

enerjisinin AA'ya dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm eviriciler ile yapılır. Evirici yenilenebilir enerji kaynağının ürettiği DA elektrik enerjisini AA'ya çevirir ve bununla sadece yükleri besler, şebekeye bağlantı söz konusu değildir. Burada genellikle gerilim kontrollü eviriciler kullanılmaktadır. Ayrıca enerjinin devamlılığı için bir akü grubu bulundurulmaktadır [25].

4.1.1. Gerilim kaynaklı eviriciler

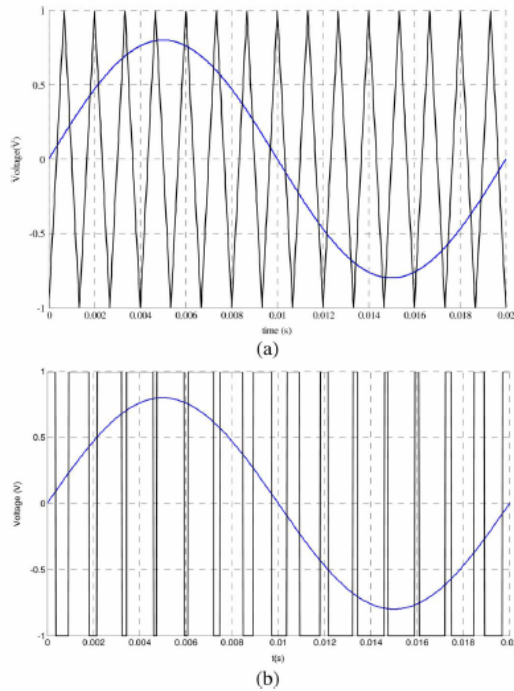
Girişinde DA kaynağı bulunan eviriciler “*gerilim kaynaklı evirici*” olarak tanımlanmakta ve aşağıda verildiği üzere üç sınıfa ayrılmaktadır [15]:

- *Darbe genişlik modülasyonlu eviriciler:* Bu tür eviricilerin girişindeki doğru gerilim hemen hemen sabittir. Çünkü bu gerilim şebeke geriliminin kontrolsüz bir doğrultucu tarafından doğrultulmasıyla sağlanmaktadır. Bu nedenle evirici, çıkış geriliminin hem frekansını hem de genliğini ayarlamak zorundadır. Bu ayar, PWM ile sağlanmakta olduğundan bu tür eviricilere “*PWM evirici*” adı verilmektedir. Ayrıca çıkış geriliminin dalga formunun sinüse yaklaştırılabilmesi amacıyla bir çok PWM yöntemi geliştirilmiştir.
- *Kare dalga eviriciler:* Bu eviricilerin çıkış geriliminin genliği, girişteki doğru gerilimin ayarlanması ile sağlanmaktadır. Bu nedenle eviricinin, yalnızca çıkış geriliminin frekansını kontrol etmesi gerekmektedir. Çıkış geriliminin dalga formu kare biçiminde olduğundan bu tür eviriciler “*kare dalga evirici*” olarak tanımlanmaktadır.
- *Kısmi kare dalga bir fazlı eviriciler:* Çıkışı bir fazlı olan eviricilerde, PWM ve giriş doğru gerilim ayarı gibi yöntemler kullanılmadan çıkış geriliminin genlik ve frekans ayarlaması yapılabilmektedir. Dalga formu kare dalgaya benzemekle beraber, belirli aralıklarda gerilimin yok edilmesi ilkesi ile çalışmaktadır. Çıkış geriliminin belirli aralıklarında sıfır gerilim bölgeleri

oluşturularak gerilim ayarı yapılmaktadır. Ancak bu yöntem, sadece tek fazlı eviricilere uygulanabilir, üç fazlı eviriciler için geçerli değildir.

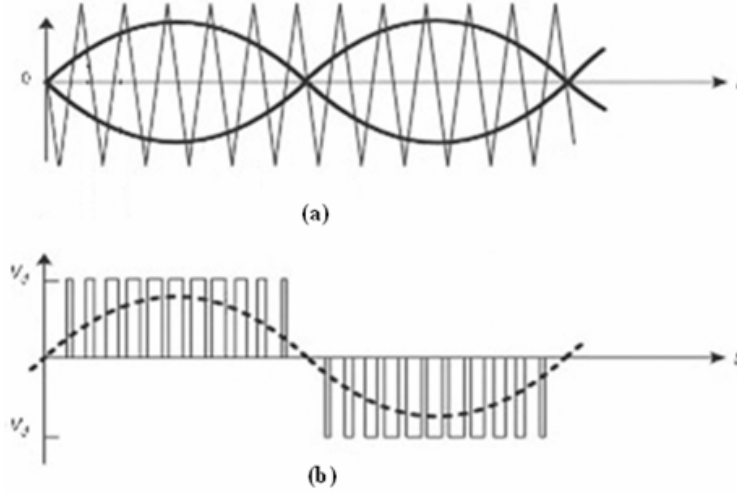
4.1.2. Eviricilerde PWM anahtarlama yöntemi

Evirici çıkışındaki AA dalgasının hem genliğinin ve frekansının ayarlanması hem de dalga formunun sinüse yaklaştırılması gerektiğinden PWM anahtarlama büyük ölçüde önem taşımaktadır. İstenilen frekansta bir sinüsoidal çıkış gerilimi üretebilmek amacıyla Şekil 4.1.a'da görülebileceği gibi referans frekans değerinde sinüsel kontrol işareti, daha yüksek frekansa sahip bir üçgen dalga ile karşılaştırılmaktadır. Genliği modülasyon oranı ile belirlenen üçgen dalganın frekansı genellikle sabit tutulmakta ve bu frekans eviricinin anahtarlama frekansını oluşturmaktadır. Evirici çıkışında elde edilen sinüsoidal çıkış geriliminin dalga formu Şekil 4.1.b'de verilmiştir. PWM anahtarlama ile çıkış geriliminin dalga formu, üçgen formdaki ve kontrol sinüsoidal dalgalarının karşılaştırılması sonucundaki çıkışı birebir aynı olmaktadır [15].



Şekil 4.1. Çift yönlü (bipolar) anahtarlama PWM kontrol gerilimi ve evirici çıkış dalga formları

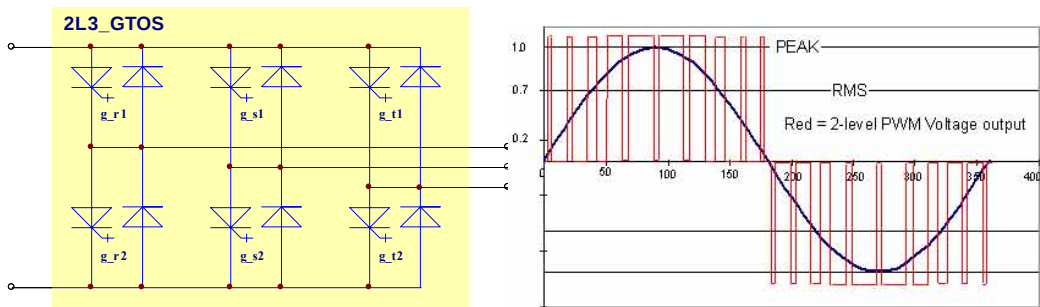
Eviriciler için tek yönlü (unipolar) PWM anahtarlama ve çıkış dalga formu Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Tek yönlü (unipolar) anahtarlama PWM kontrol gerilimi ve evirici çıkış dalga formları

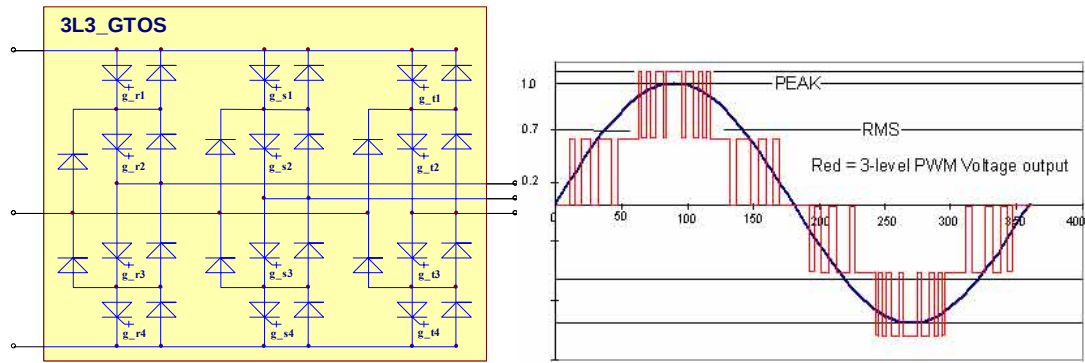
4.1.3. Üç fazlı eviriciler

KGK ve AA motor sürücüler gibi uygulamalarda, üç fazlı yükleri beslemek için üç fazlı eviriciler yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. En çok kullanılan üç fazlı eviricilerde, Şekil 4.3’te verilen devre şemasında görülebileceği gibi her faz için bir tane olmak üzere üç tane kol bulunmakta ve anahtarlama elemanı olarak altı adet kapıdan kapanabilir tristör (GTO) kullanılmıştır. Bu çalışmadaki modelleme ve simülasyon sürecinde üç fazlı iki seviyeli evirici topolojisi kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Üç fazlı iki seviyeli evirici topolojisi ve PWM çıkış dalga formu

Şebeke etkileşimli eviricilerde farklı tipte evirici yapıları kullanılmaktadır. Çoğu uygulamada gerilim kaynaklı eviriciler kullanılmış olsa da kısa devrelere karşı yüksek direnç göstermesi ve ters gerilimi bloke etmesi nedeniyle akım kaynaklı evirici üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır [26]. Kullanılan yapılardan biri de çok seviyeli eviricidir. Akım ripıllarının ve anahtar üzerindeki gerilimin daha az olması ve anahtarlama bant genişliğinin dar olması nedeniyle Şekil 4.4'te görülen üç seviyeli eviricinin iki seviyeli eviriciye göre daha iyi bir performans gösterdiği belirtilmiştir [27].

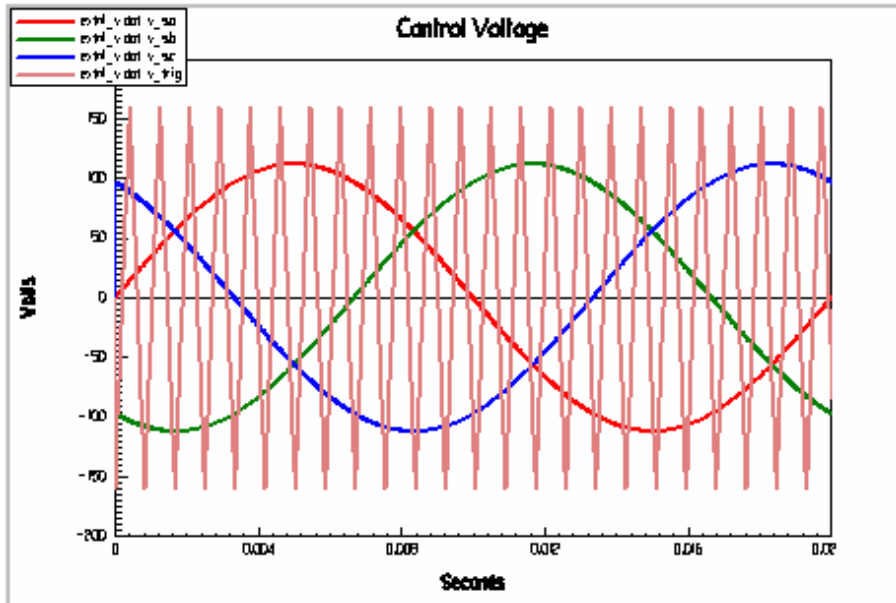


Şekil 4.4. Üç fazlı üç seviyeli evirici topolojisi ve PWM çıkış dalga formu

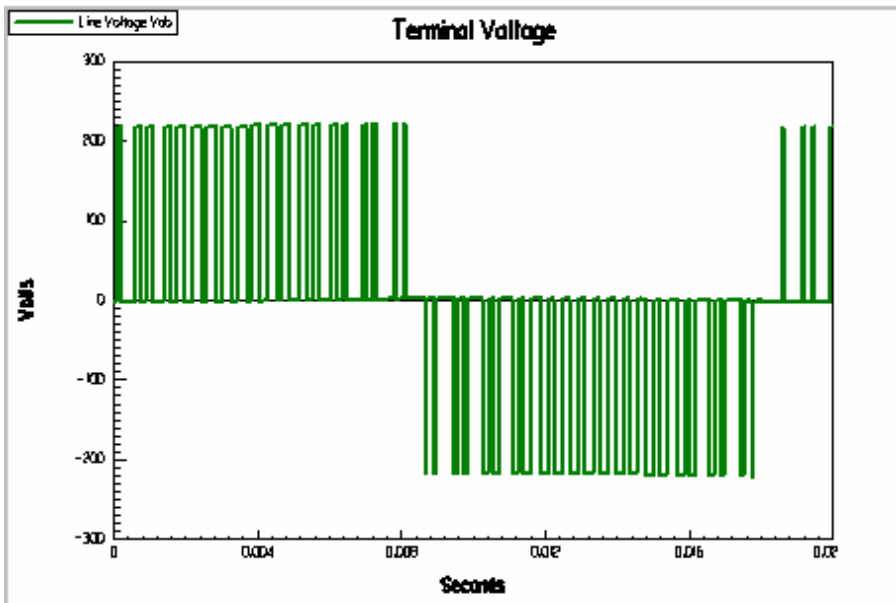
4.1.4. Üç fazlı gerilim kaynaklı eviricilerde PWM

Tek fazlı eviricilere benzer olarak, PWM kontrollü üç fazlı eviricilerde de girişteki sabit doğru gerilim ile üç fazlı çıkış gerilimlerinin büyüklüklerini ve frekanslarını kontrol etmek ve şekillendirmek amaçtır. Üç fazlı eviricilerde dengeli üç fazlı çıkış gerilimleri elde etmek için, aynı üçgen dalga formu Şekil 4.5'te görüldüğü gibi üç tane 120° faz farklı sinüsoidal kontrol gerilimleri ile karşılaştırılmaktadır [15].

Ayrıca evirici çıkış dalga formunda hemen hemen birbirine eşit bir ortalama DA bileşeninin bulunduğu göz önüne alınmalıdır. DA bileşenler, fazlar arası gerilimlerde Şekil 4.6'te verilen evirici çıkış dalga formunda görülebileceği gibi birbirini yok ederler. Bu olay PWM anahtarlamanın kullanıldığı tek fazlı tam köprü eviricilerdeki duruma benzer özellik göstermektedir.



Şekil 4.5. Üç fazlı eviricilerde PWM sinyalinin üretilmesi



Şekil 4.6. Üç fazlı evirici çıkış dalga formu

4.1.5. Eviricilerde harmoniklerin azaltılması

KGK uygulamalarında, giriş ile çıkış arasında izolasyonun gerekli olması halinde yüksek frekanslı PWM ile çalışmaya uygun bir transformatörün bulunması

gerekmektedir. Bu tür uygulamalarda, evirici çıkış transformatörlerinin varlığı ile bazı harmonikler elimine edilmektedir. Aynı zamanda çift sayılı harmoniklerin giderilmesi için senkronize PWM kullanılmalı ve pals sayısı tek sayı olmalıdır. Ek olarak, fazlar arası gerilimdeki baskın harmonikleri yok etmek için pals sayısı 3'ün katları olması gerekmektedir.

Bazı eviriciler, DA-AA evirici bünyesinde yüksek frekanslı transformatörler içerirlerken bazıları şebeke tarafında hat frekanslı transformatör kullanırlar. Hat frekanslı transformatörlerin artan ağırlık, boyut ve fiyatlarından dolayı modern eviricilerde yüksek frekanslı transformatörler kullanılmaktadır [25].

4.2. Evirici Transformatörlerinde Kaçak Reaktansın İncelenmesi

Klasik tasarımlarda primer sargı altta, sekonder sargı üstte olan transformatörlerde reaktans yaklaşık olarak %3-6 olacaktır. Düşük reaktans ($<3\%$) için primer ve sekonder sargılar bölünerek birbiri üzerine serpiştirilerek sarılabilir. Evirici transformatörlerinde yüksek reaktans ($>20\%$) oluşturmak için “*yardımcı demir nüve*” teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikte iki ayrı nüve yapıları kullanılmaktadır. Nüvelerden bir tanesi normal transformatör çekirdeği gibi aralıksız olarak yapılır ve “*ana nüve*” olarak adlandırılır. Filtre olarak kullanılan şok indüktörlerinin nüveleri gibi aralıklı olarak yapılan çekirdeğe ise “*yardımcı nüve*” adı verilir. Sekonder sargı sadece ana nüve etrafına, primer sargı ise her iki nüve etrafına sarılmaktadır [23].

4.3. Evirici Transformatör Tasarımı

Eviricilerde, yarıiletken anahtarlar aracılığı ile DA gücünü AA güce dönüştürürken gerilimlerin değiştirilmesi için yüksek frekanslı transformatörlerden yararlanılır. Güç dönüşümü, son yıllarda yüksek gerilim güç dönüşümü ve güneş enerjisi güç jeneratörlerine olan ilgiden dolayı ilerlemiştir. Bu uygulamalar güç dönüşümünün mevcut AA güç dağıtım sistemleri ile uyumlu olmasını zorunlu kılmaktadır. Diğer taraftan başka bir gereksinim ise gemi, uçak ve bazı yer taşıtlarında üretilen elektrik enerjisinin bu taşıtların bünyesindeki cihazlar için uygun olmadığı durumlardan

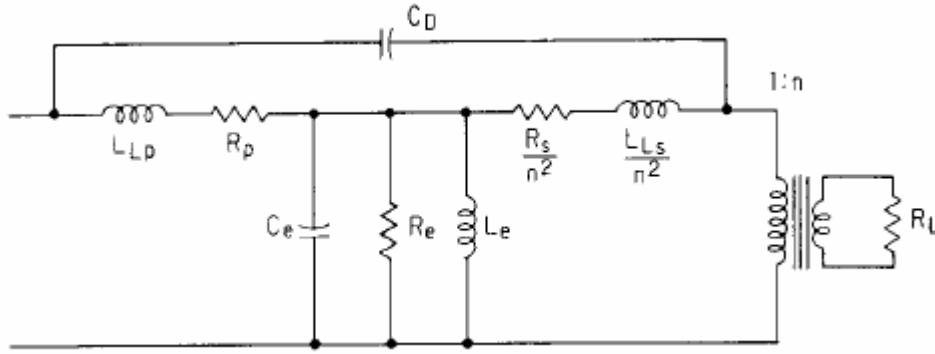
dolayı ortaya çıkmıştır. Evirici transformatörünün çalışma prensibi ve tasarımı genel transformatör teorisine dayalıdır. Giriş dalga formu, anahtarlama frekansı ve gerilimin genliği bir evirici transformatörünün istenilen özelliklerinde temel veridir. Ayrıca düzgün fonksiyonda bulunmaları ve eşdeğer devre parametrelerine tam olarak bağlı olmalarından dolayı pals ve geniş bant transformatörlerine yakın benzerlik gösterirler. Yalıtım sistemleri, nüve malzemeleri ve sargı yapıları temel transformatör tasarımı ile aynıdır [4].

Evirici transformatörlerine güç elektronik anahtarlama devresi ile PWM tekniği kullanılarak dikdörtgen dalga biçimleri uygulanır. Primerdeki dikdörtgen ve farklı genişliklerdeki dalga biçimleri sekonder tarafında sinüse yakın üçgen dalga biçimine dönüşür. Çıkıştan alınan alternatif gerilimin harmoniksiz ve saf sinüsoidal dalga formuna daha yakın olması için normal transformatör kullanılıyorsa indüktörler ile filtrelenmeli ya da ayırık nüveli transformatörler kullanılmalıdır. Bu yönü ile dar bir frekans bandında sinüs dalgalı gerilimle çalışan güç transformatörlerinden farklılık göstermektedir.

PWM ile yapılan anahtarlama pozitif ve negatif alternansların eşit olmaması durumunda evirici çıkışında bulunan transformatör doyuma giderek ısınır. Bu etkinin fazla olması transformatör yüksüz iken dahi ısınmaya sebep olmaktadır. Doyma etkisi PWM ile tamamen engellenememektedir. Kontrol sistemindeki olumsuzluklar, anahtarların gecikmesi, doğrusal olmayan davranışlar bu etkiyi artırmaktadır. Transformatörün nüve yapısı ile doyma etkisi kısmen engellenebilmektedir.

4.4. Yüksek Frekanslı Transformatörlerde Kapasitif Etki

Transformatörlerin primer ve sekonder sargılarının birbirleri ile yakın aralıklı, ayrıca her iki sargı hem nüveye hem de toprağa yakın sarımlardan oluştuğundan oldukça önemli bir miktarda kapasitans değeri söz konusu olmaktadır. Sargıların birbirlerine ve toprağa göre değişen kapasitif etkileri, Şekil 4.7’de verilen transformatöre ait tam eşdeğer devrede görülebileceği gibi birisi seri ve diğeri paralel (C_e ve C_D) olarak iki kapasitör elemanı ile temsil edilerek analize olanak sağlamaktadır [4].



Şekil 4.7. Transformatörün tam eşdeğer devresi [21].

Sargılar arasındaki ve sargılar ile toprak arasındaki kapasitif bağ, anma frekansının üzerindeki sinyallerin geçişine izin verir. Bundan dolayı transformatörler, devreler ve devreler-toprak arasında istenilmeyen sinyaller için etkili bir iletken olabilir. Bu durum güç transformatörlerinin temel bir karakteristiği olarak anma değerinin çok üzerindeki frekansları dönüştürme yeteneğine sahip olmasıdır. Harici koruyucu devreler ile transformatörlerdeki kapasitif etki bir ölçüde kontrol edilebilmektedir. Bitişik sargılar arasına elektrostatik ekran veya kalkanlar yerleştirilebilir ve bu ekranlar topraklanabilir. Sargılar arasındaki kapasitansın değeri elektrostatik ekranların kullanımı ile genliğinin birkaç katı kadar azaltılabilir. Elektrostatik ekran bazı durumlarda sargının hemen altı veya üstündekine benzer biçimde tek katmanlı telden oluşur. Ekran, folyo sargının kendi katmanında da oluşabilir. Etkili bir ekran olması için folyonun kendi üzerine bindirilmesi gereklidir. Burada kısa devreden kaçınmak için folyonun üst üste konulduğu kısım yalıtılmalıdır [4].

Toprağa karşı düşük kapasitans gerektiren uygulamalar transformatör tasarımcısına özel bir zorluk sunmaktadır. Bu tür uygulamalarda primer sargı etkili bir şekilde toprak potansiyelindedir. Tasarımcının görevi, sekonder sargının toprağa karşı olan kapasitansının en aza indirilmesidir. En yakın toprak bölgesi genellikle transformatör nüvesidir. Sekonderin toprağa karşı kapasitans değeri, kapasitörlerde olduğu gibi elektrotların alanı ve elektrotlar arasındaki yalıtımın dielektrik sabiti ile doğru orantılı ve elektrotlar arasındaki uzaklık ile ters orantılıdır. Transformatörde bulunan her bir sargı elemanı tek bir elektrot olarak düşünülebilir. Üretimde kullanılan

yalıtım malzemeleri, havaya oranla 2 ile 5 kat arasında değişen dielektrik sabitine sahiptirler. Genellikle düşük kapasitans değeri için nüve penceresi, sekonder sargıya olan uzaklığın artırılması için büyük yapılır. Dolayısıyla düşük kapasitanslı transformatörler oldukça büyük boyutlarda ve kaba aygıtlardır. Boyutlarda yapılan özveriye rağmen toprağa karşı kapasitansın yaklaşık olarak 25 pF gibi bir değerde aşağısına düşürölmesinde dahi büyük ölçüde zorluklarla karşılaşılmaktadır. Sargılar arasındaki kapasitans azaltıldığında kaçak indüktans değerinde kaçınılmaz bir artış olmaktadır [21].

Yüksek frekans transformatörlerinde sargılar arasındaki kapasitans, frekans karakteristiğini etkilemektedir. Özellikle sargı kaçak kapasitansının, sargı kaçak endüktansı ile rezonansa geldiği frekans değerlerinde gerilim dönüştürme oranı en büyük değere ulaşmaktadır. Burada gerilim oranının değeri, şebeke empedansı ile transformatör sargılarının endüktans ve dağılma kapasitans değerlerine bağlıdır. Kapasitans değerinin hesabı oldukça zordur. Eviricilerde olduğu gibi özel uygulamalardaki yüksek frekans devrelerinde sistemin yüksek frekans cevap karakteristikleri genellikle deneysel yollarla bulunmaktadır [1].

5. TRANSFORMATÖRLERİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ TASARIMI

Transformatör tasarımı için geliştirilmiş ticari olan veya olmayan pek çok yazılım bulunmaktadır. Doğal olarak bu yazılımlar birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Aslında, tüm transformatör tasarım paket yazılımları aynı temel tasarım prensipleri ve formüllerini kullanır; bu benzerlik, yüzyılı aşkın bir bilgi ve teknoloji birikiminin doğal bir sonucudur. Paket programların arasındaki fark ise, tasarımcıya sunduğu imkânlar, görsellik ve ekonomiklik ile ilgilidir. Bir program, tasarımda kullanılacak manyetik malzemenin akı değerini kullanıcıdan alırken; diğer program, üretilen standart manyetik malzemelerden birini seçmesini isteyebilir. Diğer taraftan bir program uygulanan gerilime göre sargı katları arası yalıtım miktarını kendi tespit ederken; diğer program, yalıtım miktarını tasarımcıdan isteyebilir. Bu açıdan bakıldığında, tasarım parametreleri bir hayli fazla olan transformatörler hakkında muhtelif hazır paket programlar olması ve yeni paket programlar üzerinde çalışılması gayet doğaldır [3].

Elektrik makinelerinin SEY ile modellenmesinde karşılaşılan en büyük zorluk, nüve laminasyon malzemesinin özelliklerini tam olarak tanımlayabilmektir. Genellikle nüve tasarımında kullanılan malzeme için yazılımın kütüphanesindeki en yakın malzeme seçilmektedir [29]. Eğer istenilen özellikte malzeme bulunamaz ise yazılımın kütüphanesine malzeme karakteristikleri (mıknatıslanma eğrisi, özgül nüve kayıpları gibi parametreler) veri olarak girilerek kişisel malzeme oluşturulabilmektedir.

Transformatörler mekanik enerji dönüşümü yapmamaları ve hareketli parçaları olmaması sebebiyle SEY’de modellenmeleri göreceli olarak daha kolay makinelerdir. Bu tür yazılımlar ile transformatörün çalışma koşullarının gözlemlenmesi, geçici durumlardaki tepkisi, oluşabilecek hasarlar ve hasar analizi, ekonomiklik ve bunlara uygun olarak yapılabilecek yeni tasarımlar üzerinde çalışmalar yapılabilir [3].

Elektrik makineleri tasarımında SEY yazılımlarının kullanılmasının teorik olarak bilinen ancak uygulamada görülemeyen ayrıntıları görülebilir duruma getirmesi yönü, elektrik makineleri derslerinde manyetik alan gibi anlaşılması güç olan konuları görselleştirdiğinden öğretim sürecinde de büyük ölçüde katkı sağlamaktadır. Ayrıca bilgisayar donanım ve yazılımlarındaki gelişmeler elektrik ve manyetizma öğretimlerinde de yenilikler sunmaktadır. Bu konuya ilişkin olarak Booker, elektrik ve manyetizma öğretiminde değişim ihtiyacına dikkati çekmektedir [30].

5.1. Transformatörlerin Modellenmesi ve Analizi

Elektrik makineleri tasarımında elektromanyetik alanların analizi ve manyeto-statik problemlerin çözümü için iki ana yöntem bulunmaktadır [20]:

- Analitik yöntemler
- Sayısal yöntemler

5.1.1. Analitik yöntemler

Elektromanyetik ve elektriksel eşdeğer devre çözümlerinde kullanılan analitik yöntemler; Değişkenlere ayırma yöntemi, Laplace dönüşümleri yöntemi, Rayleigh yöntemi, Ritz yöntemi ve Galerkin yöntemidir.

Değişkenlere ayırma ve Laplace dönüşüm yöntemleri ile elektromanyetik alan problemlerinin tam olarak çözümü bulunabilir. Ancak bu yöntemler sadece basit geometrili problemlere uygulanabilir. Diğer taraftan, basitleştirilmiş analitik yöntemlerden olan Rayleigh, Ritz ve Galerkin yöntemleri problemlerin çok iyi bir şekilde anlaşılabilmesi için basitleştirme yapmaktadır. Analitik tekniklerde manyeto-statik ve girdap akım problemleri için geçirgenlik ve iletkenlik gibi sabiteler kullanılmalıdır. Bu tekniklerin en büyük avantajı uygulanabilir olması ve çözümün kısa sürede elde edilmesidir [20].

5.1.2. Sayısal yöntemler

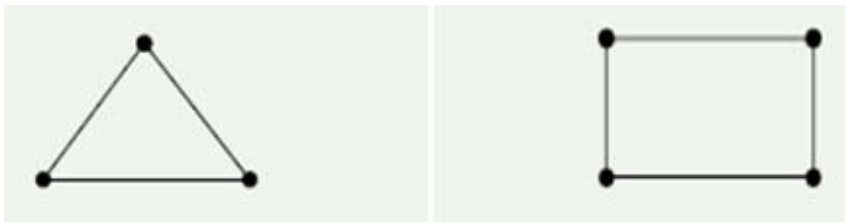
Analitik yöntemlerdeki sınırlılıklar ile bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler elektromanyetik problemlerin çözümü için sayısal yöntemlerin geliştirilmesini sağlamıştır. En önemli sayısal analiz teknikleri şunlardır [20]:

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

Sayısal yöntemler içerisinde manyeto-statik problemlerin çözümü için en popüler yöntem olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) tercih edilmektedir.

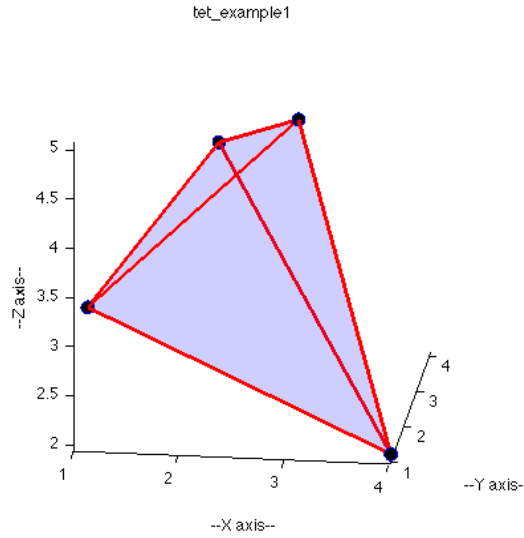
5.1.3. Sonlu elemanlar yöntemi

SEY, birçok disiplinde (elektromanyetik, manyeto-statik, ısı iletimi, katı ve yapısal mekanik, akışkan dinamiği ve akustik gibi) diferansiyel denklemlerin çözümü için sayısal bir tekniktir. SEY'in temel fikri, diferansiyel denklemlerle çözümü karmaşık olan fiziksel problemin yerine geçen ve denklemleri doğrusal sistemde daha kolay çözülebilen bir dizi alt problemlere bölünmesidir [20,28]. Sonuç olarak, problem yeterli sayıda alt problemlerle çözülebilmek yeteneğine sahip olmuştur. Alt problemler, Şekil 5.1'de verildiği gibi 2D için üçgen veya dikdörtgen gibi basit geometrik şekilli elemanlarla geometrik olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 5.1. İki boyutlu (2D) üçgen ve dikdörtgen biçimli elemanlar

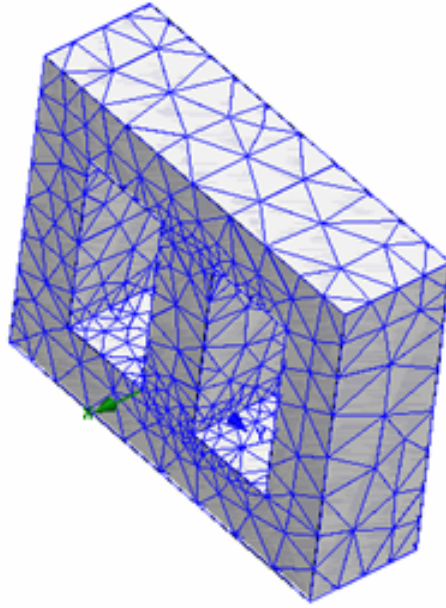
3D için de Şekil 5.2’de görüldüğü gibi üçgen prizma şekle sahip sonlu eleman olarak adlandırılan ağ (mesh) olarak geometriksel biçimde tanımlanmaktadır. Burada problemi tanımlayan diferansiyel denklem yerel olarak tahmini basit bir geometrik şekil fonksiyonudur.



Şekil 5.2. Üç boyutlu (3D) üçgen prizma biçimli eleman

Birinci derece üçgensel eleman üç düğümlü üçgen olarak bilinmektedir ve elektrik mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu elemanlar birbirlerine *düğüm noktası* adı verilen özel noktalardan bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır.

Birinci derece elemanlar kullanıldığında bütün düğümler Şekil 5.3’te görüldüğü gibi üçgenlerin köşeleri ile çakışmalıdır. Köşeleriyle çakışan üç düğümlü ve kenarların ortasında fazladan üç düğüm içeren altı düğümlü veya ikinci derece üçgen gibi diğer üçgensel elemanlar da kullanılmaktadır.



Şekil 5.3. Birinci derece üçgensel sonlu elemanların ayrıntılandırılması

Üç düğümlü üçgenler ağ oluşturulmasında kullanılır ve daha yüksek dereceli üçgensel elemanlarda bulunan ek düğümler problem tanımının bir parçası olarak konulmuştur. Yüksek dereceli sonlu elemanlar daha fazla doğruluk hassasiyeti elde etmek amacıyla gerekmektedir. Bununla birlikte birinci derece elemanlar optimum bir biçimde uygulandığında mükemmel sonuçlar vermekte ve bilgisayar ile hesaplama sürecini avantajlı hale getirmektedir.

SEY, fiziksel bir sistemin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Bu sistem alt parçalara ayrılabilen bir model olup, malzeme özelliklerine ve uygulanabilir sınır şartlarına sahiptir. Düzensiz ve karmaşık geometriye sahip sistemlerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlerde uygulanabilir. Son yıllarda bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sonucunda SEY analiz yöntemi etkin bir biçimde kullanılmaktadır [31]. Sonlu eleman paket yazılımları araştırma, geliştirme ve tasarım için güçlü araçlardır. Elektromanyetik CAD yazılımlarının çoğunluğunda güvenilir, esnek ve etkili olması sebebiyle sayısal analiz için SEY kullanılmaktadır [28].

SEY elektrik makinelerinin tasarımına uygulandığında; nüve akı dağılımı, indüklenen gerilimler, nüve kayıpları, sargı indüktansları, sargı kayıpları ve elektromanyetik tork gibi önemli tasarım parametrelerinin çok yüksek bir doğrulukla belirlenmesine olanak tanımaktadır.

Akı dağılımının tahmin edilmesi tasarım işlemi için çok kullanışlıdır. Bu, manyetik devrenin değişik bölgelerindeki kaçak ve faydalı akı dağılımını vermesinin yanı sıra nüvedeki manyetik doyum durumunu da vermektedir. Akı dağılımının resimlendirilmesi tasarımcıya öncelikle neleri inceleyeceği konusunda rehber olmaktadır. Yanlış atanmış malzeme kodları, uyarım akımı ve sınır şartlarının uygun olmayan bir şekilde konulması manyetik devrenin akı çizimlerinden kolaylıkla görülebilir.

Genel olarak, SEY kullanarak bir elektromanyetik alan problem çözme sürecinin prosedürü üç adıma ayrılmıştır [4,28]:

- **Ön İşlemci (*Pre-processing*);** elektromanyetik alan problemi tanımlanır ve çözüme hazırlanır. Tasarımcı tarafından problemin geometrisi ve sınır şartları, uyarım kaynaklarının belirtilmesine olanak sağlar. Modellenecek makinenin geometrisi 2D veya 3D olarak AutoCAD yazılımında çizilerek SEY yazılımına aktarılabilir ya da SEY yazılımının çizim özellikleri kullanılarak doğrudan çizilebilir. Geometrisi çizilen makine parçalarının malzemeleri atanır. Örneğin nüve laminasyon malzemesi, sargı detayları, iletken malzemesi ve uyarım şartları gibi. Eğer yazılımın kütüphanesinde tasarım için uygun malzeme yoksa istenilen malzemelerin özellikleri (mıknatıslanma eğrisi, kayıplar, kalınlık gibi) girilmelidir. Otomatik ağ işletimi için çizilen model bölgesinin üçgensel eleman sayısı ayarlanır.
- **Çözücü İşlemci (*Processing*);** fiziksel problemin matematiksel modeli yapılarak sayısal çözümü elde edilir. Çözümler çoğunlukla düğümsel potansiyel dizisi olarak verilir. Manyeto-statik, geçici durum, değişik frekanslarda ve girdap akımları gibi analizler yapılmaktadır. SEY yazılımı

önceki adımda tanımlanan modeli otomatik olarak çözecektir. Ancak tasarımcı tarafından istenilen çözücünün (manyeto-statik, elektro-statik, geçici durum gibi) atanması gereklidir.

- Son İşlemci (*Post-processing*); elde edilen çözüm, istenilen elektromanyetik miktarlarını hesaplamak veya kuvvetleri ve diğer makroskopik miktarları analiz etmek için sonuçların alınmasına izin verir. Çözülen modelin sonuçlarına bu adımda ulaşılabilir. Yani, modellenen manyetik devrelerin akı yoğunlukları ve akı dağılımı modelin istenilen kısımlarında renkli olarak çizdirilerek görsel hale getirilmektedir. Böylece doyum etkileri incelenebilir. İndüktans, akı seviyesi, kayıplar, tork gibi makine parametreleri farklı doyum seviyeleri için hesaplatılabilir.

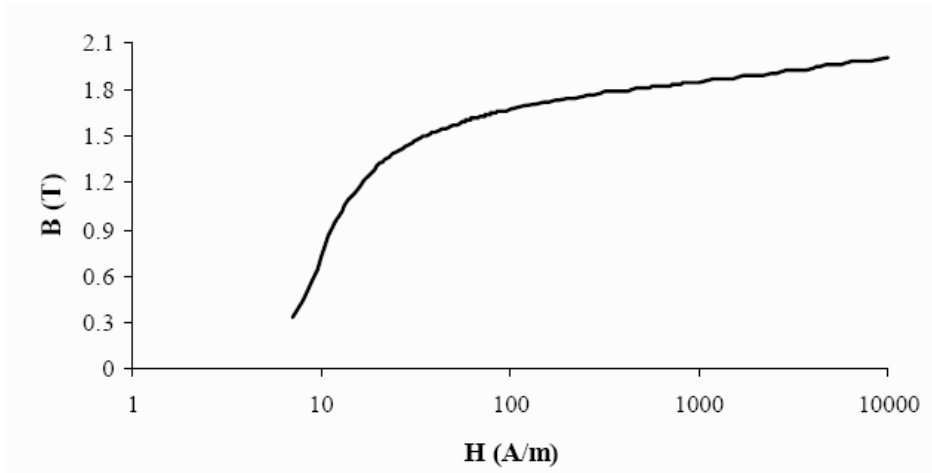
Sonlu eleman yönteminin çok güçlü bir avantaj ve birçok mühendislik dallarında favori yöntem olmasının başlıca sebebi, karmaşık geometrilerin üstesinden gelebilme yeteneğidir. Sonlu elemanlar yönteminin diğer avantajları şunlardır [20]:

- Kararlı ve doğru çözümler sağlaması,
- Doğrusal olmayan problemleri ve girdap akımlarını iyi işleyebilmesi,
- Doğal sınır koşullarının fonksiyonel formülasyonlarla örtük olmasıdır.

5.2. SEY ile Doğrusal Olmayan Manyeto-Statik Problemlerin Çözümü

Sonlu elemanlar yönteminde, karmaşık ana problem domenini belli bir sayıda alt domenlere veya elemanlara bölünmektedir. Her bir elemandaki potansiyel dağılım daha sonra bir deneme fonksiyonu ile yakınlştırılarak uygun olan kriterlere göre esas problemin sayısal çözümü elde edilir [4]. Transformatörlerde olduğu gibi manyeto-statik problemlerin çoğunluğu doğal olarak doğrusal değildir. Transformatör manyetik devresinin analizi, nüve yapımında kullanılan manyetik materyallerin fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir. Manyetik

materyal üreticileri, Şekil 5.4'te görüldüğü gibi B-H eğrisi formunda ürettikleri manyetik materyallerin karakteristiklerini sunarlar [19].



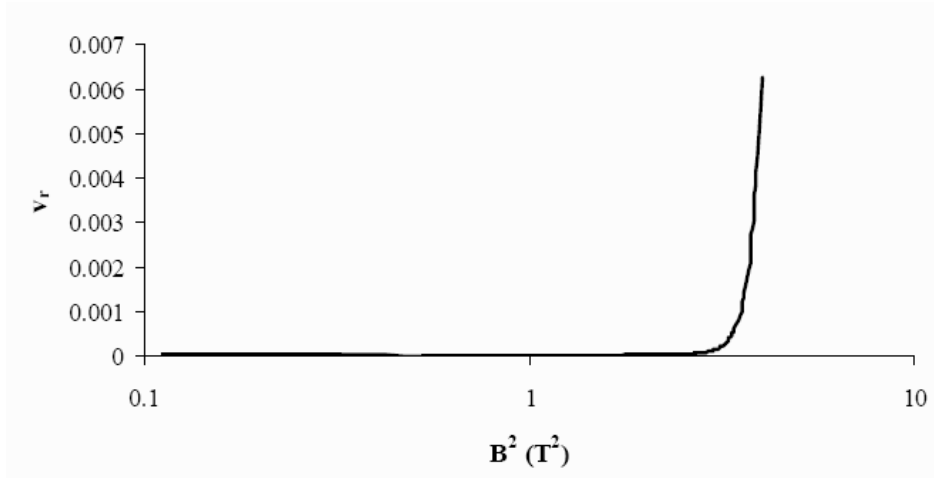
Şekil 5.4. Manyetik materyalin B-H eğrisi

Eşitlik 5.1 ve 5.2'de diferansiyel formda verilen Maxwell denklemleri manyetik devre problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır [20,28].

$$\nabla \times H = J \quad (5.1)$$

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

Doğrusal olmayan problemlerin çözümünde kullanılan Newton'un yinelemeli yöntemine göre manyetik materyalin özelliklerinin matematiksel bir model ile tanımlanması gerekmektedir. Bu modelleme için klasik B-H eğrisi iyi bir seçenek değildir. Sonlu eleman yönteminde ferromanyetik malzeme özelliklerini tanıtmak için $\mu_r = \mu_r(B)^2$ eğrisi pratikte ortak kullanım için uygundur. Manyetik malzeme üreticileri tarafından verilen klasik B-H eğrisinden Şekil 5.5'te verilen $\mu_r - B^2$ eğrisi kolaylıkla çizilebilir.



Şekil 5.5. Manyetik malzemenin $v_r - B^2$ eğrisi

Transformatörlerin manyetik devrelerinin yapımında kullanılan manyetik materyallerin B-H eğrileri doğrusal olmadığından manyetik alan şiddetinin bir fonksiyonu olarak geçirgenlik, eşitlik 2.1’de yerine tekrar yazılarak eşitlik 5.3 elde edilir.

$$B = \mu \cdot H = \mu(H) \cdot H \quad (5.3)$$

Eşitlik 5.2’deki vektör eşitliği kullanılarak 5.4’de verilen kısmi diferansiyel eşitlik tanımlanabilir.

$$\nabla \cdot (\nabla \times P) = 0 \quad (5.4)$$

Burada P manyetik vektör potansiyelidir ve manyeto-statik problem için depolanan doğrusal enerji 5.5’teki gibi ifade edilebilir.

$$W_M = \frac{\mu}{2} \int (\nabla \cdot P)^2 dv \quad (5.5)$$

Manyetik vektör potansiyeli pozisyonun bir fonksiyonu olarak 2D analiz için 5.6’daki eşitlik ile gösterilebilir.

$$P = P(x, y) \quad (5.6)$$

Manyetik bir problemin bağımlı değişkenleri ile ortaya çıkan 5.5'deki eşitlik, problem bölgesi üzerinde hacim integrali, $\int dv$ olarak ifade edilir. P fonksiyonu ve kısmi türevleri P'_x , P'_y ve P'_z için bir F fonksiyonu eşitlik 5.7'de verildiği gibi tanımlanabilir [4].

$$F(P) = \int f(P, P'_x, P'_y, P'_z) dv \quad (5.7)$$

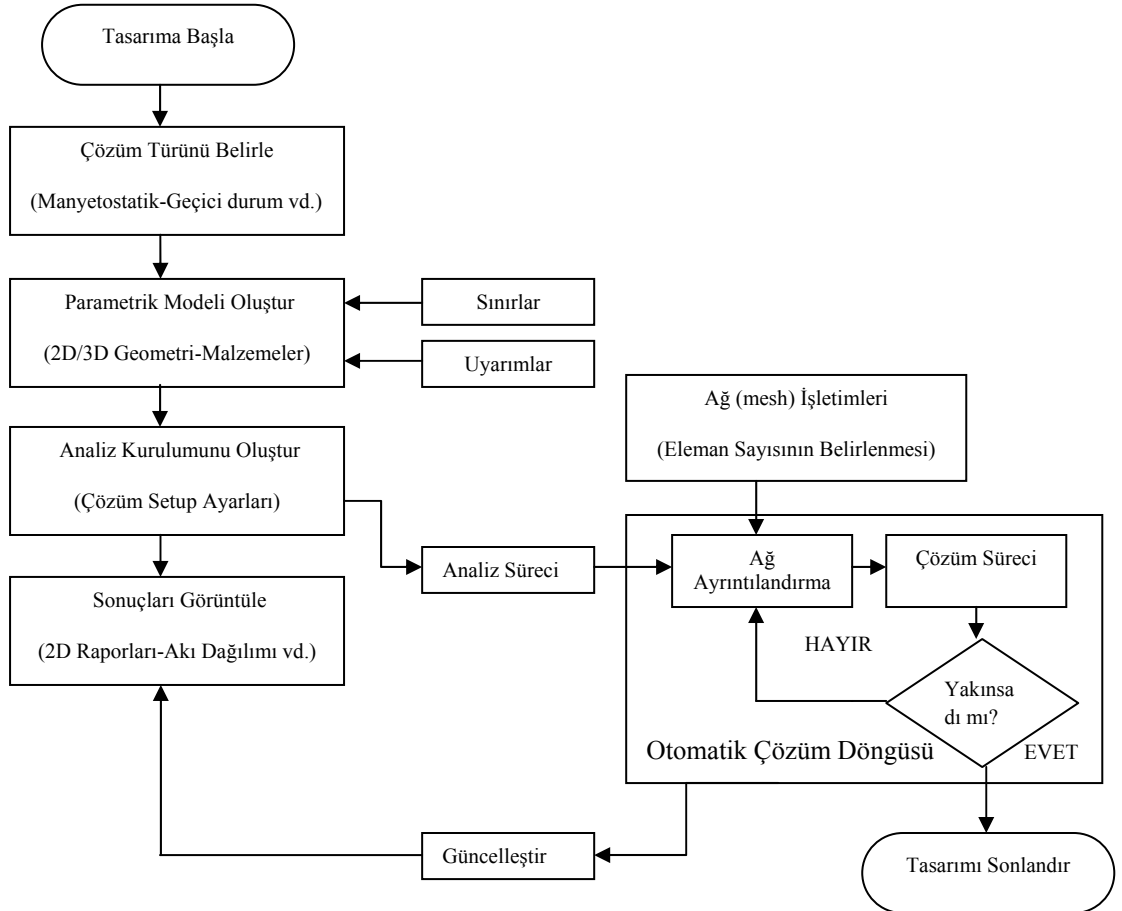
Burada; $P'_x = \frac{\delta P}{\delta x}$; $P'_y = \frac{\delta P}{\delta y}$; $P'_z = \frac{\delta P}{\delta z}$ 'dir.

6. EVİRİCİ TRANSFORMATÖRLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ

Ansoft firmasının Maxwell ve Simplorer yazılımları, elektrik makineleri tasarımı için sezgisel olarak kolaylıkla kullanılabilen arayüzler geliştirmiştir. Tasarım oluşturmak için aşağıdaki adımlar sistematik olarak izlenmiştir [32]:

- *Parametrik Model Üretimi*; üç boyutlu olarak geometrik modelin çizilmesi, sınırlar ve uyarım şartlarının tanımlanması,
- *Analiz Kurulumu*; çözüm kurulumunun tanımlanması,
- *Sonuçlar*; 2D raporları ve manyetik alan çizimleri oluşturulmasıdır.

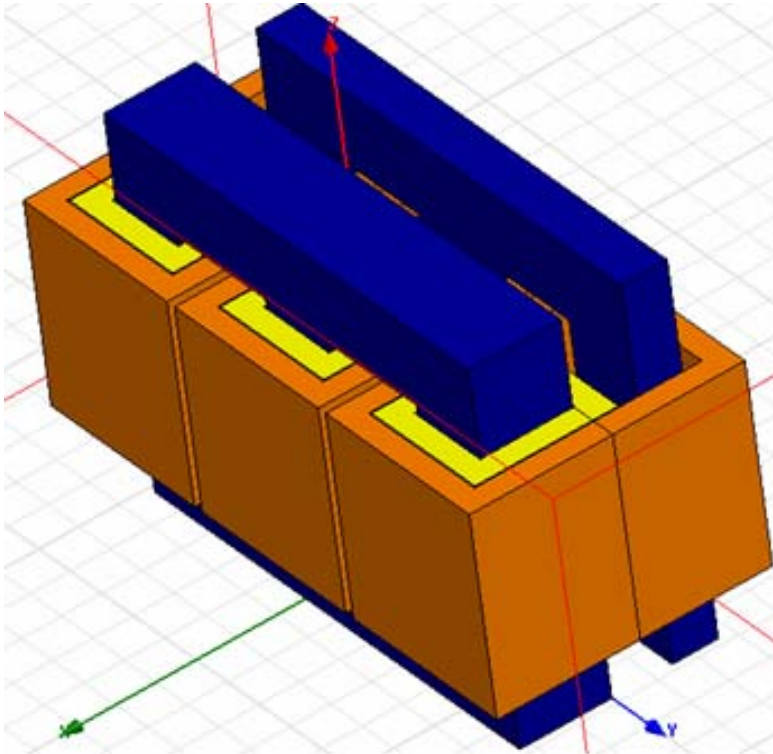
Otomatik olarak işleyen çözüm sürecinin daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 6.1’de SEY yazılımı ile modelleme akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.1. SEY yazılımı ile modelleme ve analiz süreci akış diyagramı [32].

Bu çalışmada Şekil 6.2’de verilen evirici transformatörü örneklem olarak alınmış ve eviriciler için ayırık nüve tasarımından önce klasik tasarımlı bir transformatör modellenerek elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayırık nüve geometrisi kullanıldığında çıkış geriliminin harmoniksiz sinüsel olması için filtre indüktörlerine gereksinimin kalmadığı ispatlanmaya çalışılmıştır.

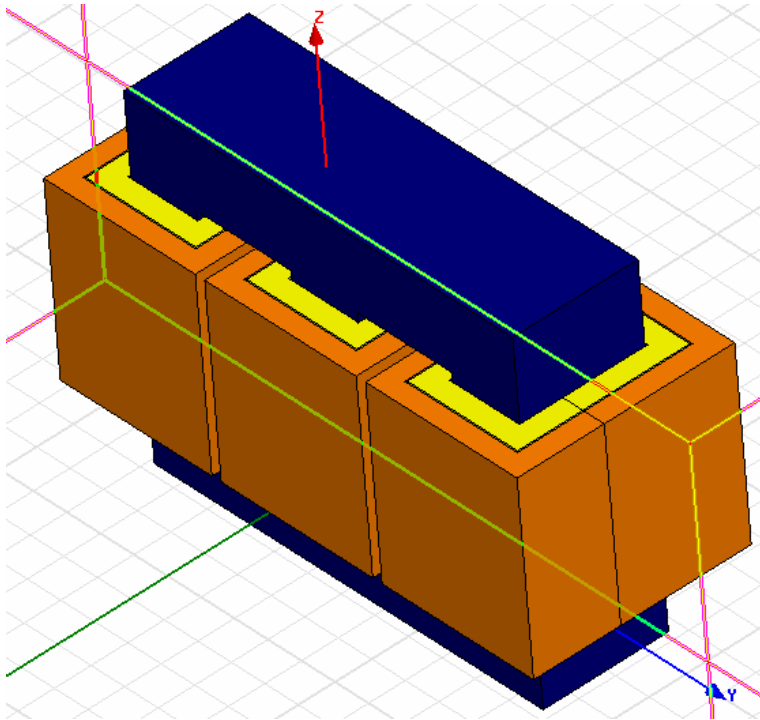
Modellemede kullanılan SEY yazılımının diğer arayüzleri, eviricilerde PWM uyarım şartlarında transformatörün parametrelerinin kontrol edilmesi sağlayan sanal bir laboratuvar sunmaktadır. Böylece değişik PWM darbelerinde evirici çıkışı analiz raporlarından gözlenebilmektedir. Ayrıca nüve ve sargı kayıplarının modelleme yazılımının raporlarından elde edilebilmesi olanağının tasarım aşamasında üretilecek transformatörün manyetik malzeme ile sargı yapılarının belirlenmesinde tasarımcıya rehber olacağı vurgulanmaktadır.



Şekil 6.2. Ayırık nüveli evirici çıkış transformatörü

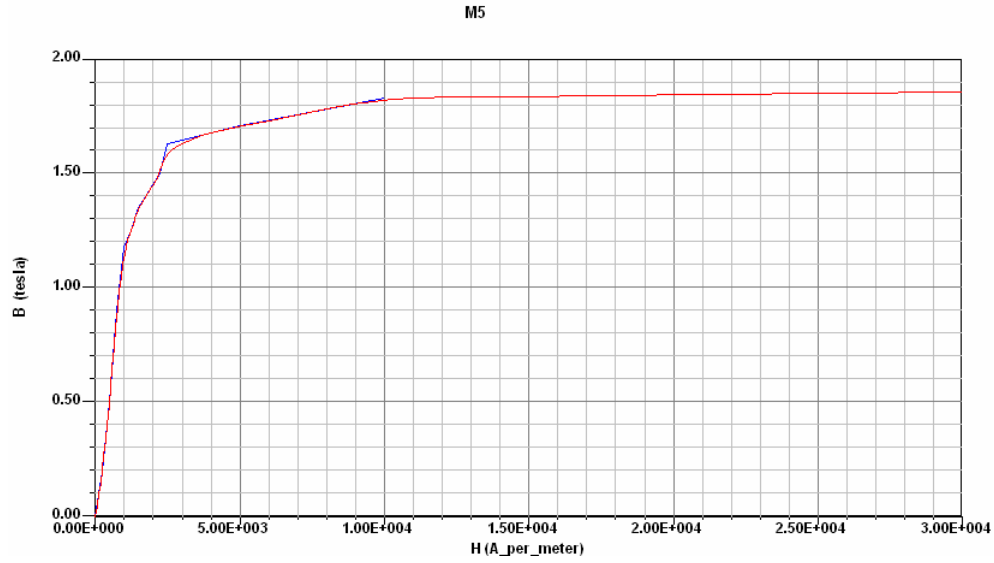
6.1. Klasik Tasarımlı Transformatörde Analiz Sonuçları

PWM tekniği ile uyarılan eviricilerin çıkışında minimum kaçak reaktansa sahip olan klasik tasarımlı bir transformatör kullanıldığı durumda elde edilen AA çıkış gerilimi şok indüktörleri aracılığıyla filtrelenmelidir. Aksi takdirde çıkış gerilimindeki harmonikler beslenecek cihazlara zarar verebilirler. Bu transformatörün 3D modeli Şekil 6.3’de görülebileceği gibi SEY yazılımının çizim özelliklerinden yararlanılarak üç fazlı çekirdek tipi nüve olarak tasarlanmış ve faz başına her bir bacağa primer-sekonder sargılar üst üste yerleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Klasik tasarımlı üç fazlı transformatör

Transformatörün nüve laminasyonunda manyetik malzeme olarak, 0,30 mm kalınlığında M5 tipi silikon alaşımlı çelik sac kullanılmıştır. B-H eğrisi Şekil 6.4’de gösterilen bu manyetik malzemenin doyma akı yoğunluğu yaklaşık olarak 1,8 Tesla’dır.



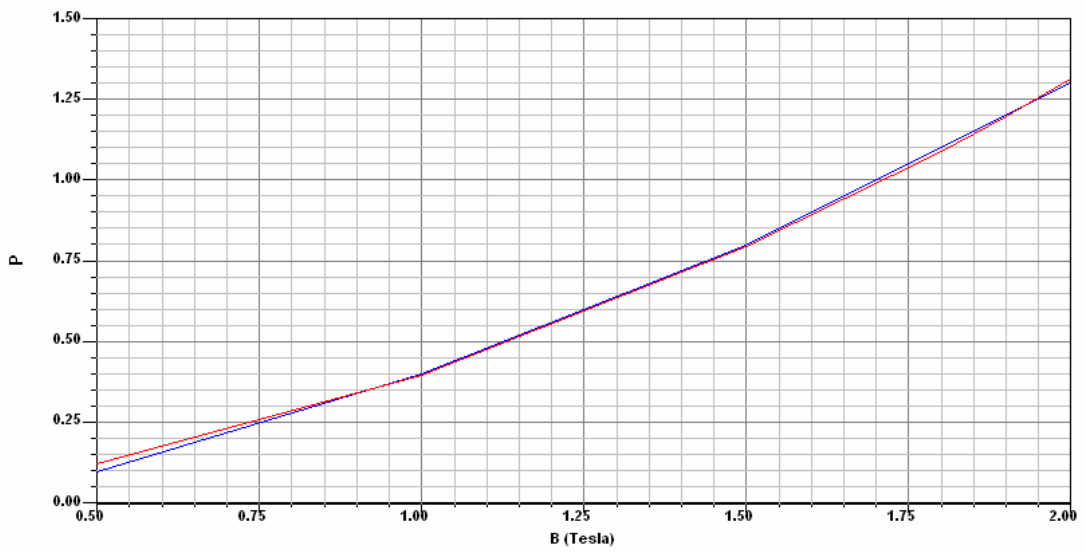
Şekil 6.4. M5 tipi laminasyon malzemesinin mıknatıslanma (B-H) eğrisi

SEY yazılımının analiz ve hesaplamaları yaparken kullandığı diğer parametreler (nüve paketlenme faktörü, nüve kayıplarının hesaplanması için gerekli sabiteler), Şekil 6.5'te verilen malzeme özelliklerine ilişkin pencerede görülebilmektedir. Burada nüve kayıpları, histerezis, girdap akım ve anormal girdap akım kayıpları olarak hesaplanmaktadır.

Properties of the Material				
	Name	Type	Value	Units
	Relative Permeab...	Nonlinear	BH Curve...	
	Bulk Conductivity	Simple	1960000	siemens/m
	Magnetic Coercivity	Vector		
	- Magnitude	Vector ...	0	A_per_me...
	Core Loss Type		Electrical Steel	w/m^3
	- Kh	Simple	214.823394448577	
	- Kc	Simple	0.290166369392...	
	- Ke	Simple	13.0818814596039	
	- Kdc	Simple	0	
	Mass Density	Simple	7650	kg/m^3
	Composition		Lamination	
	- Stacking Factor	Simple	0.95	
	- Stacking Direction		V[1]	

Şekil 6.5. Yazılımın malzeme özelliklerine ilişkin penceresi

SEY yazılımları makinede oluşan nüve kayıplarını da hesaplamakta ve grafik olarak çizmektedir. Ancak bunu yapabilmesi için, kullanılan manyetik malzemenin özgül nüve kayıplarının çalışma frekansına göre yazılımın kütüphanesine veri olarak girilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde SEY yazılımı kayıpları hesaplamamaktadır. 0,30 mm kalınlığındaki M5 laminasyon malzemesinin 50 Hz frekanstaki özgül nüve kayıpları Şekil 6.6’ da grafik ve değer olarak verilmiştir.



Şekil 6.6. M5 tipi laminasyon malzemesinin 50 Hz frekans değerindeki özgül nüve kayıpları

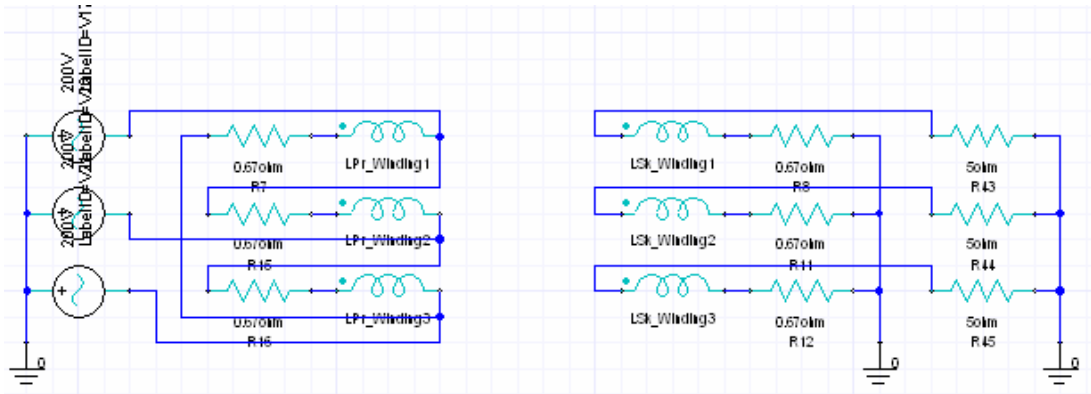
Özgül nüve kayıp verileri yazılım kütüphanesine girilirken Şekil 6.7’deki pencereden hesaplanacak nüve kayıp birimi W/kg olarak seçilmeli, malzeme kütle yoğunluğu, frekans, malzeme kalınlığı ve iletkenlik değerleri kaydedilmelidir.

Core Loss Unit:	w/kg			
Mass Density:	7650	kg/m ³	w/m ³	w/kg
Frequency:	50	Hz	Kh:	214.823
Thickness:	0.3	mm	Kc:	0.290166
Conductivity:	1960000	S/m	Ke:	13.0819
				0.0280815
				3.79302e-005
				0.00171005

Şekil 6.7. Yazılımın nüve kayıp parametrelerine ilişkin penceresi

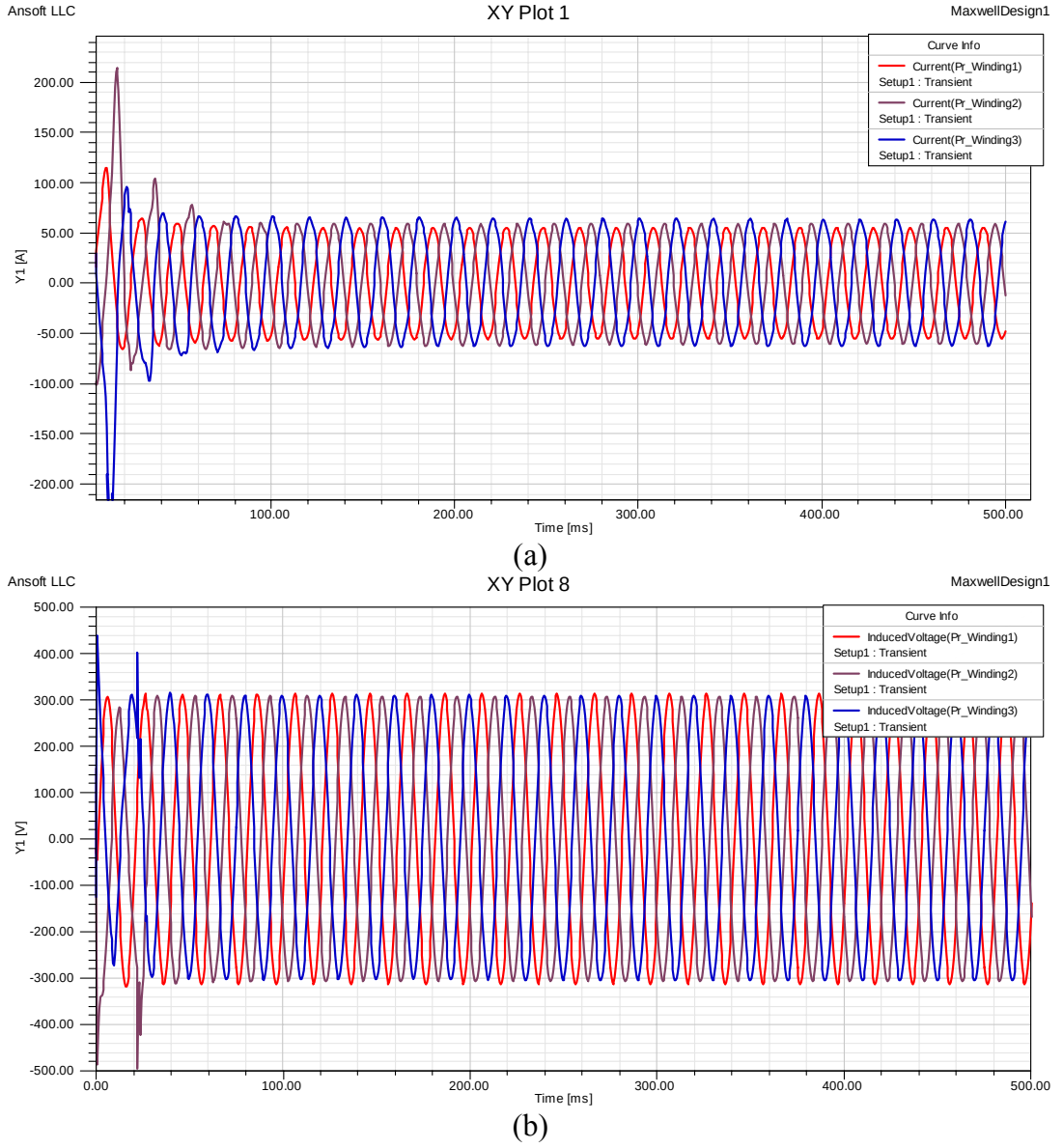
6.1.1. Sinüsoidal uyarım durumunda analiz sonuçları

Klasik tasarımı Δ/Y bağlı transformatörün üç fazlı 50 Hz’lik sinüsoidal kaynaktan beslenmesi durumunun simüle edilebilmesi için Şekil 6.8’de verilen devre şeması SEY yazılımının devre parametrelerinin ve eleman bağlantılarının oluşturulduğu arayüzüdür.



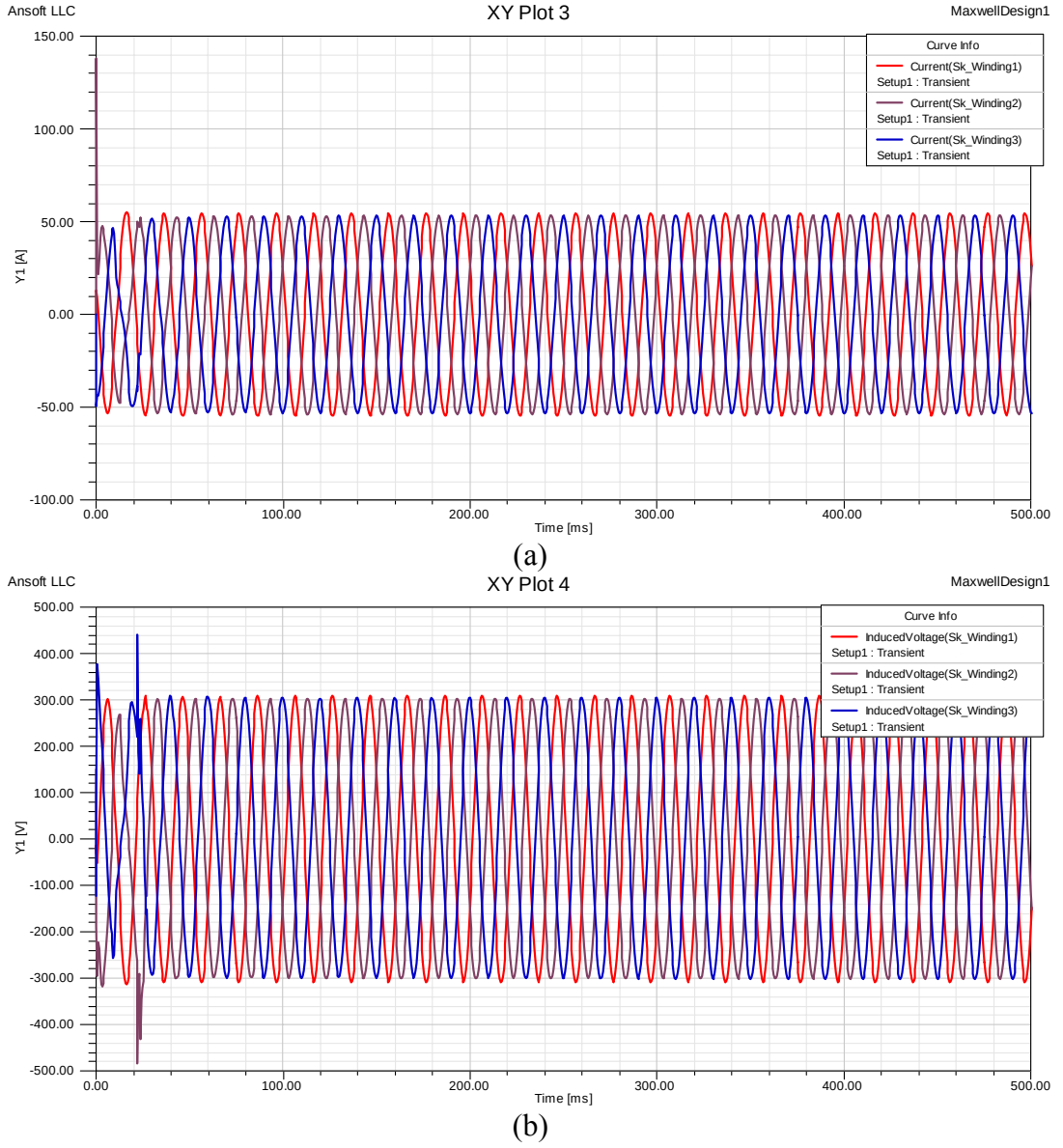
Şekil 6.8. Klasik tasarımı Δ/Y bağlı transformatörün simülasyonundaki devre şeması

Simülasyon 500 ms’lik sürede ve 0,5 ms’lik adımlarla geçici durum analizi ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen raporlara göre Şekil 6.9’da transformatörün primer sargı gerilimleri ile akımların grafikleri verilmiştir. Transformatörler, güç kaynağına bağlandığı ilk anda primer tarafında çekilen akımın değeri normal akım değerinin 8-12 katı kadar olabilir ve “aşırı başlangıç akımı” olarak bilinmektedir [2]. SEY yazılımı, transformatörün birkaç saykıl boyunca çekmiş olduğu aşırı başlangıç akımını da gösterebilmektedir. Aşırı başlangıç akımı yaklaşık olarak 100. ms’de normal değerine düşmektedir.



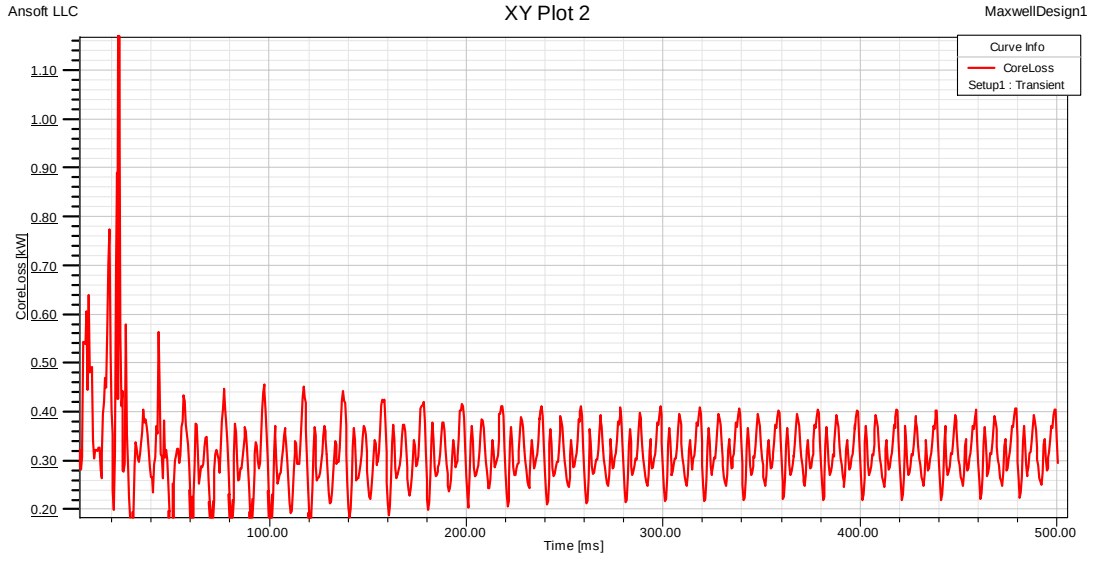
Şekil 6.9. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları

Sekonder tarafında indüklenen gerilim ve akımların dalga formları Şekil 6.10'da verilmiştir. Bu tür tasarımlarda kaçak akılar minimum seviyede olduğundan transformatörün regülasyonunun da yaklaşık olarak %5'in altında olduğu görülmektedir.



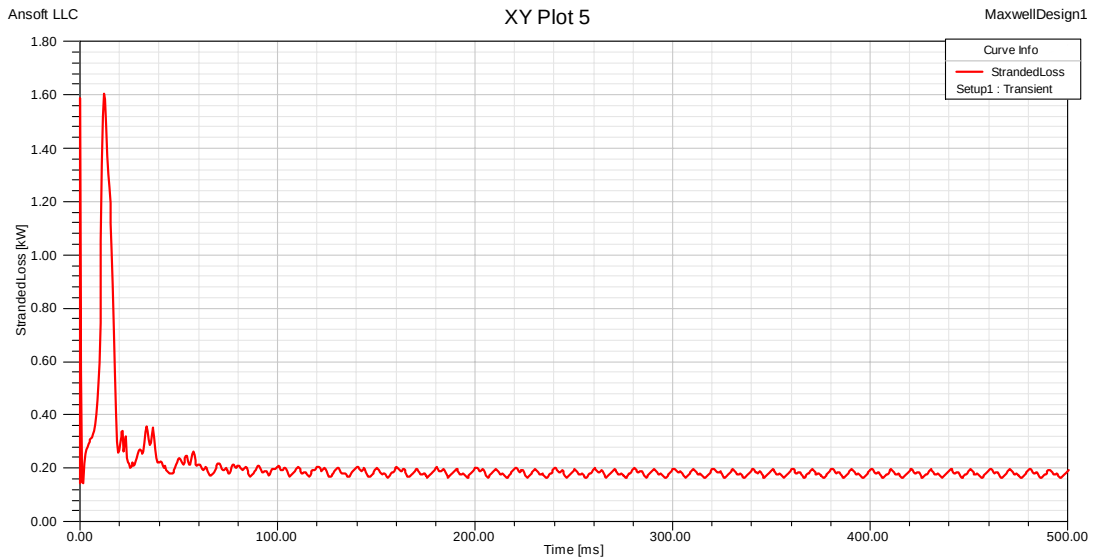
Şekil 6.10. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları

SEY ile modellenen transformatörün nüve kayıpları Şekil 6.11'deki grafikte verilmiştir. Bu grafikte histerezis kaybı ile girdap akım kaybının toplamı hesaplanmıştır. SEY analizi sonucunda elde edilen verilerin ortalaması alınarak değersel olarak da sonuç elde edilebilmektedir.



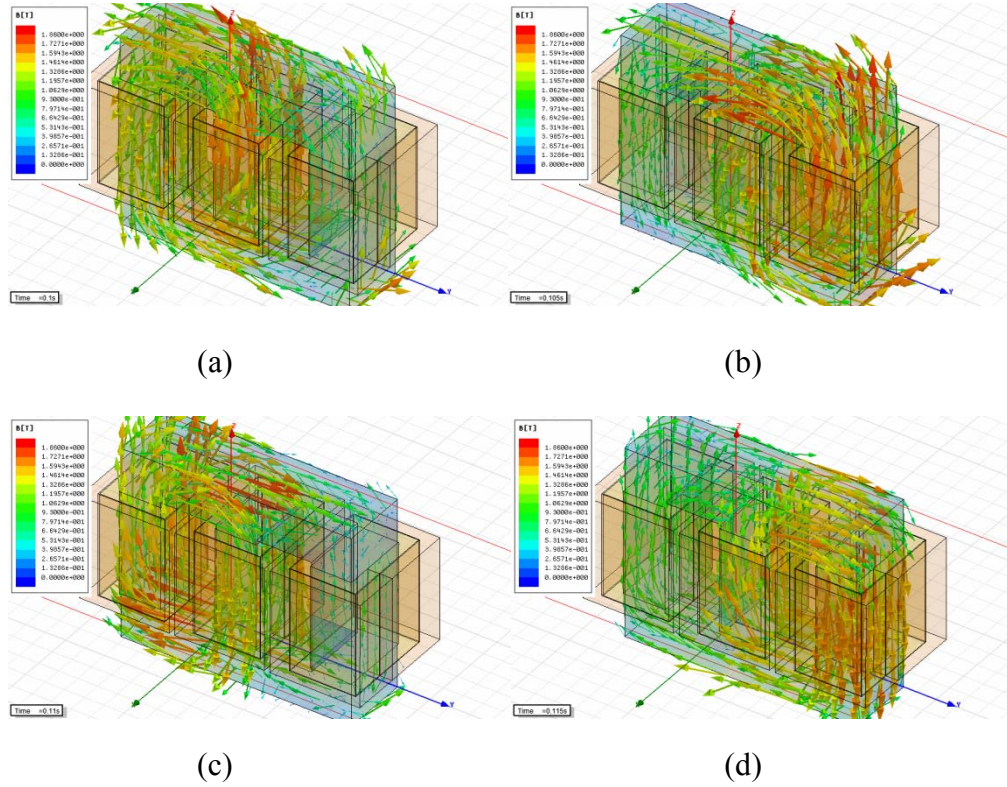
Şekil 6.11. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda nüve kayıpları

Primer ve sekonder sargıların iç dirençleri sonucunda oluşan sargı (bakır) kayıpları da analiz sonucunda hesaplanmıştır. Sargı kayıpları, birkaç sayıklık sürede aşırı başlangıç akımlarından dolayı büyük değerler almıştır. Şekil 6.12’de transformatörün sargı kayıplarını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 6.12. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sargı kayıpları

Transformatörün nüvesinde oluşan akı dağılımı 50 Hz'lik frekans değeri için bir sayıklılık sürede sırasıyla 5'er ms'lik adımlar halinde Şekil 6.13'te görülmektedir.

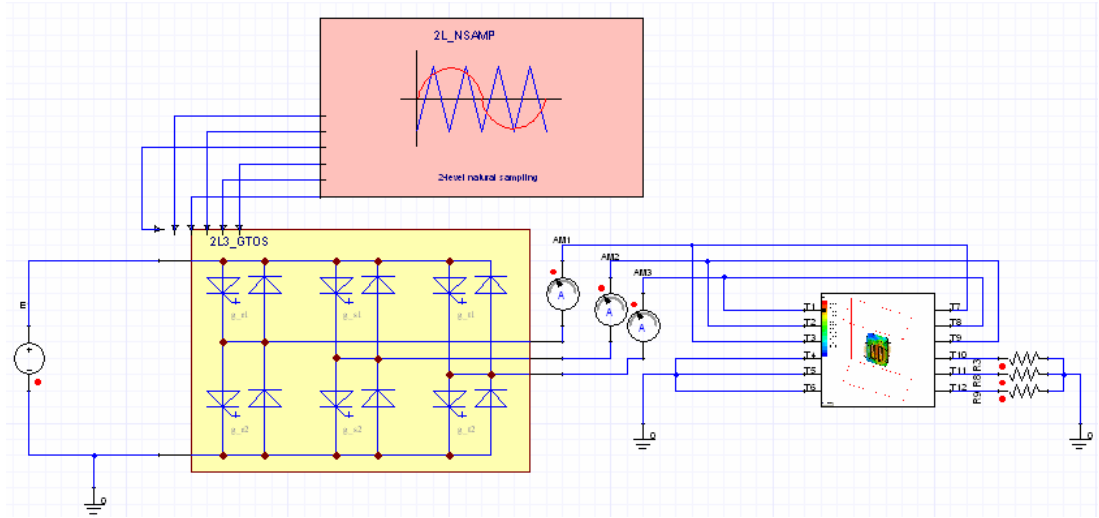


Şekil 6.13. Klasik tasarımlı transformatörün sinüsoidal uyarım durumu

(a) 5. ms'deki akı dağılımı (b) 10. ms'deki akı dağılımı
(c) 15. ms'deki akı dağılımı (d) 20. ms'deki akı dağılımı

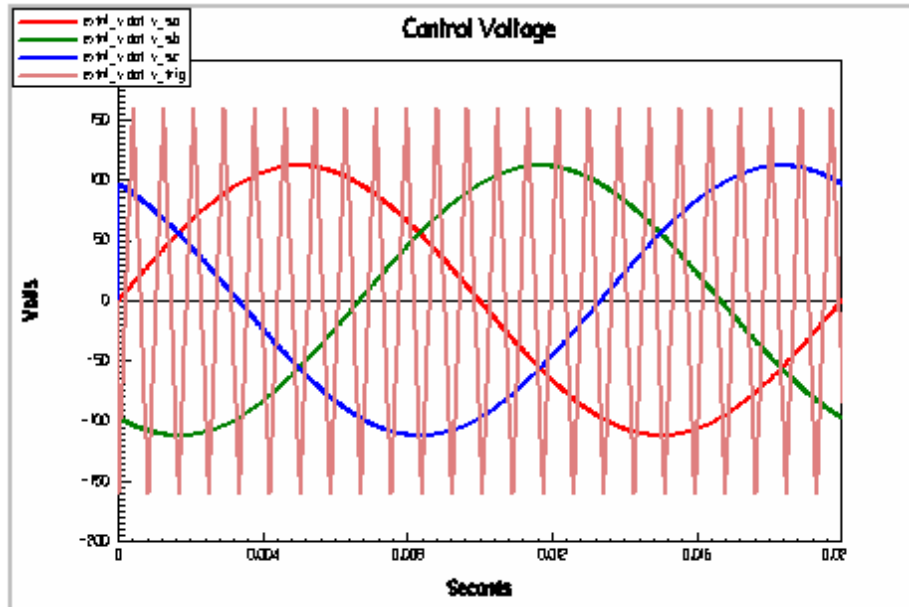
6.1.2. PWM ile uyarım durumunda analiz sonuçları

Modellenen transformatörün primer tarafı üçgen ve sekonder tarafı yıldız olarak bağlanmıştır. Simülasyon 100 ms'lik sürede ve 0,1 ms'lik adımlarla geçici durum analizi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.14'te görülen simülasyon devesinde üç fazlı iki seviyeli evirici devresinin çıkışında klasik tasarımlı bir transformatör bulunmaktadır. Bu evirici devresinde herhangi bir filtre indüktörü kullanılmamıştır.



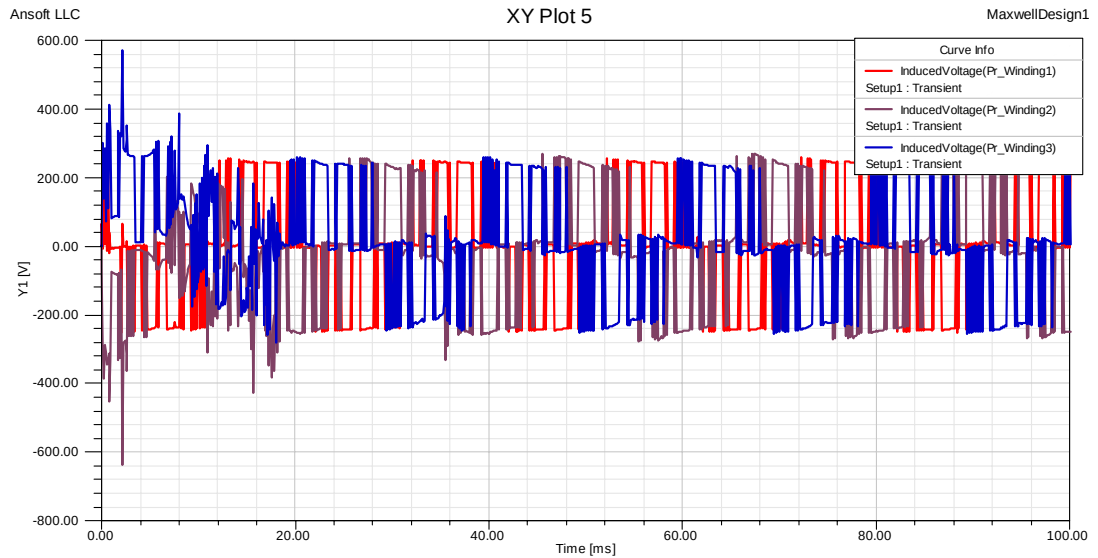
Şekil 6.14. Üç fazlı iki seviyeli evirici için simülasyon devresi

PWM tekniği kullanılarak iki seviyeli evirici Şekil 6.15'te verildiği gibi anahtarlanmaktadır. Burada temel dalga frekansı 50 Hz, modülasyon oranı 0,8 ve darbe sayısı 15 olarak görülmektedir. Ancak bu çalışmadaki analizler 96 darbeleri olarak yapılmıştır.

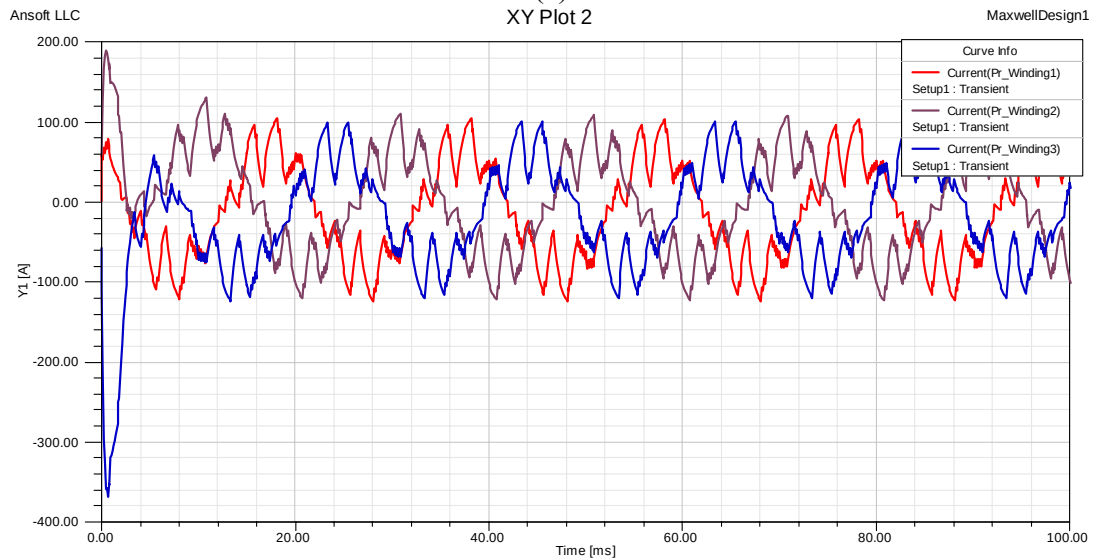


Şekil 6.15. Üç fazlı PWM referans sinyali

Simülasyon devresi çalıştırılarak gerekli analizler elde edildikten sonra evirici çıkışında bulunan transformatörün primer sargı gerilimleri ile akımları Şekil 6.16'da verilmiştir.



(a)

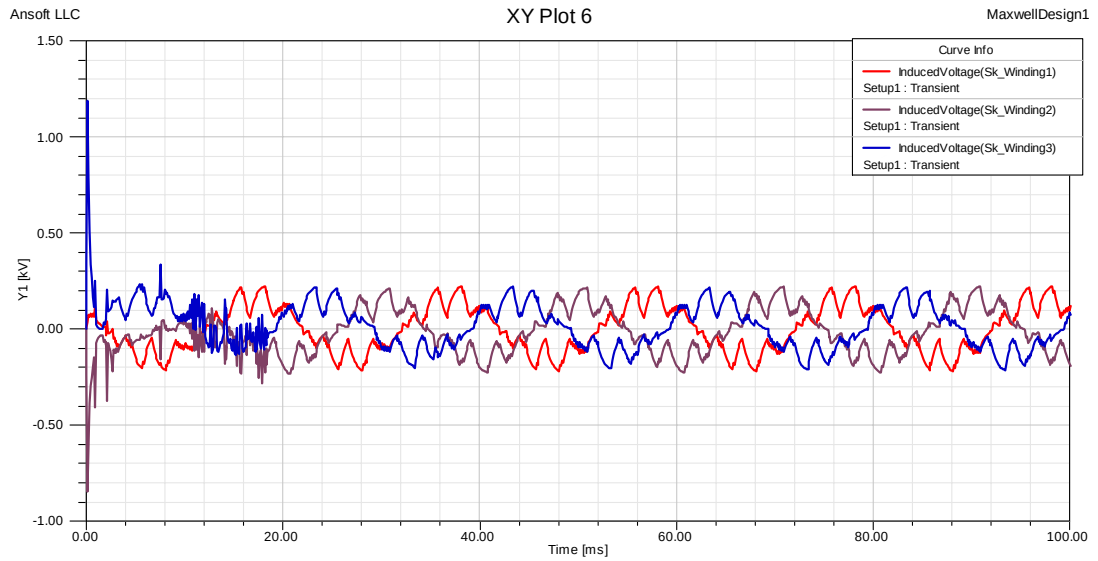


(b)

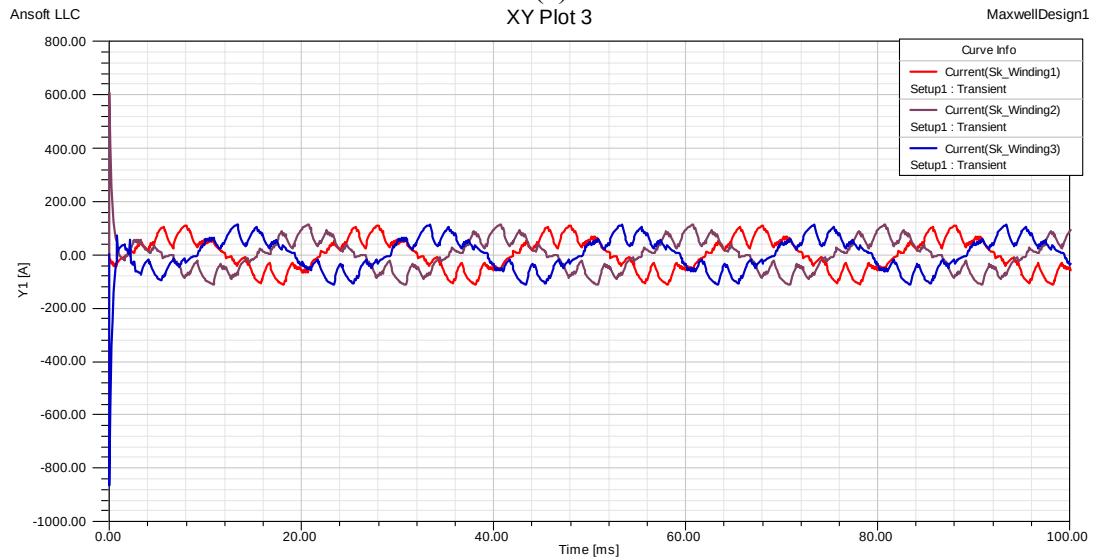
Şekil 6.16. Klasik tasarımlı transformatörün PWM uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları

Burada gerilim ve akım dalga formlarında görülebileceği gibi transformatör, anahtarlamının yapıldığı ilk andan itibaren yaklaşık olarak bir periyotluk süreçte normal akımının 2-3 katı kadar aşırı başlangıç akımı çekmektedir. Ayrıca primer

tarafı akımlarının dalga formu filtre devresi kullanılmadığından aşırı derecede harmonikler nedeniyle düzgün olmayan sinüs biçimindedir. Bundan dolayı transformatörün sekonder tarafında indüklenen gerilimin de sinüsoidal olmadığı görülmektedir. Analiz sonucundaki sekonder tarafında elde edilen gerilim ve akımın dalga formları Şekil 6.17’de görülmektedir.



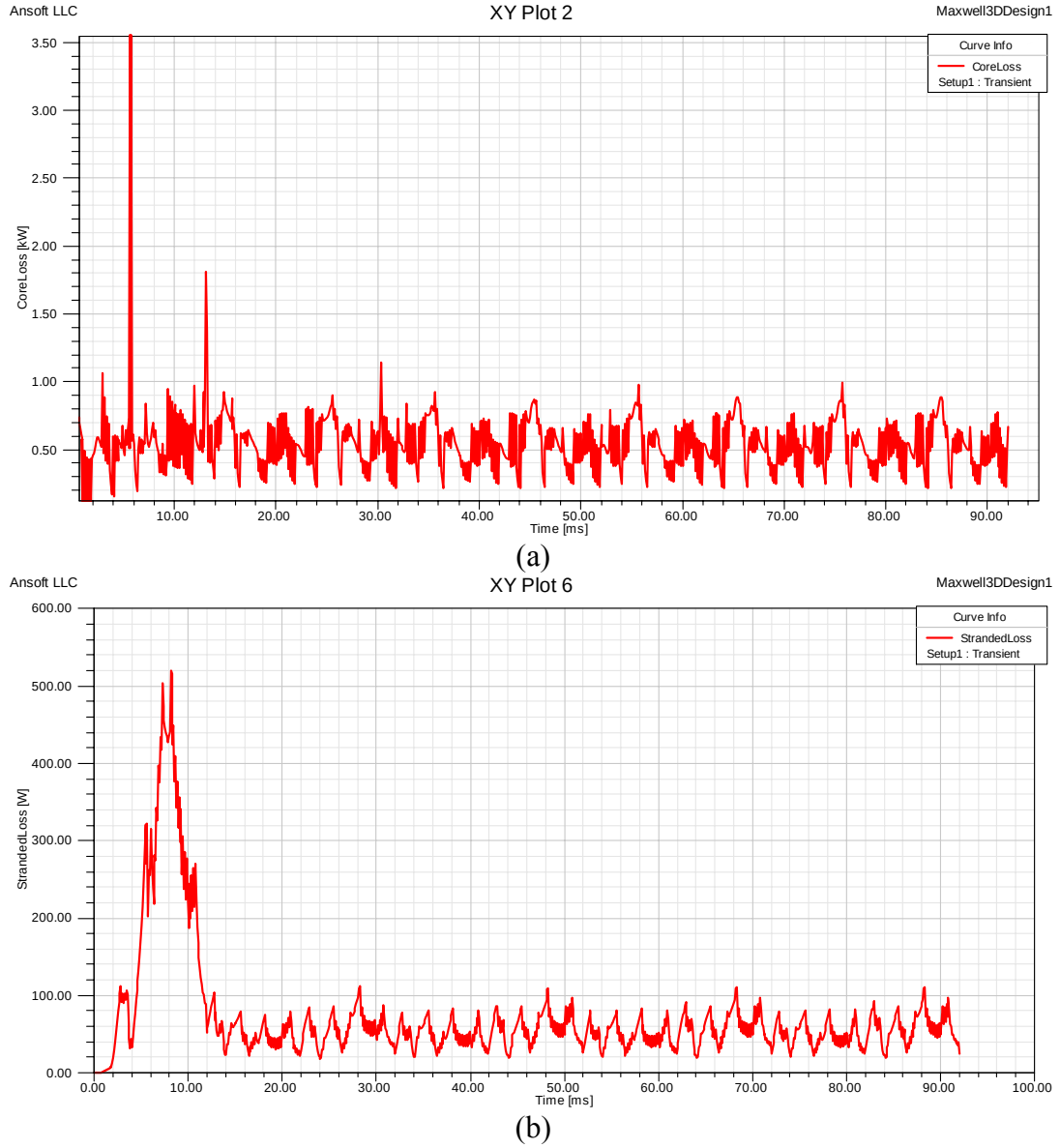
(a)



(b)

Şekil 6.17. Klasik tasarımlı transformatörün PWM uyarım durumunda sekonder sargı akım ve gerilim dalga formları

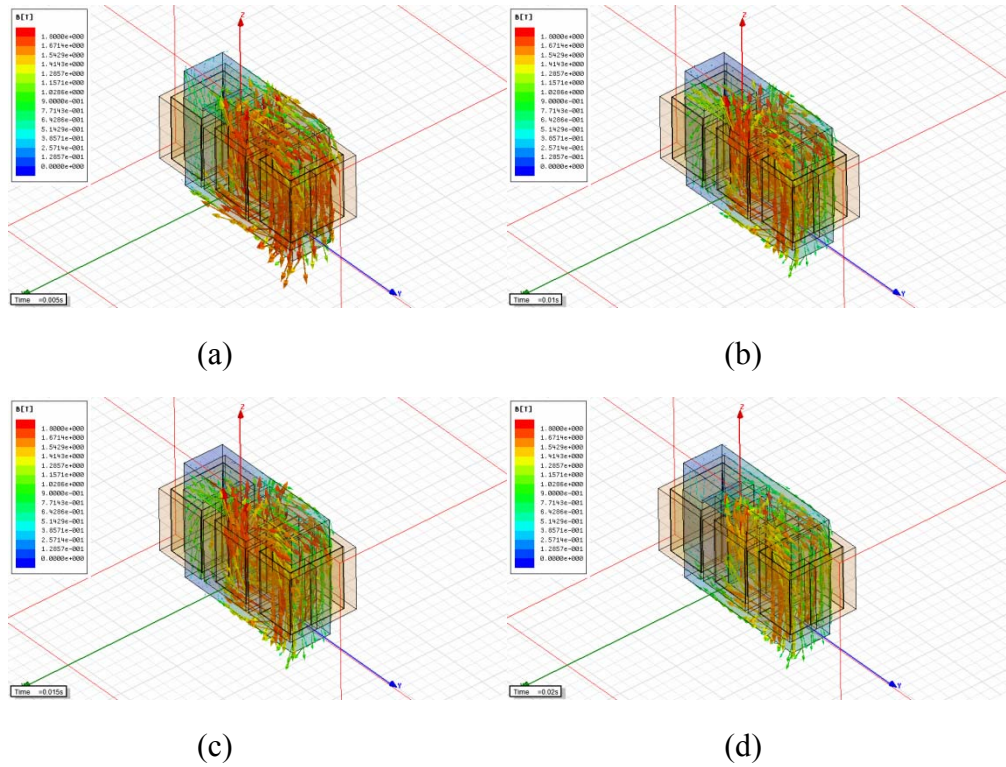
PWM uyarım durumunda klasik tasarımı transformatörün nüve kayıpları ile bakır kayıpları Şekil 6.18’de görülmektedir. Bu durumda nüve kayıplarındaki artış miktarı sinüsoidal uyarım durumunda oluşan nüve kayıpları ile karşılaştırıldığında kolaylıkla anlaşılabilmektedir.



Şekil 6.18. Klasik tasarımı transformatörün PWM uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları

PWM uyarım analiz sonucunda klasik tasarımı transformatörün nüvesinde oluşan akı dağılımı, bir periyotluk süreç için 5'er ms.'lik adımlar halinde sırasıyla Şekil

6.19’da verilmiştir. Buradaki akı dağılımı, aynı transformatörün sinüsoidal uyarım durumundaki akı dağılımı ile karşılaştırıldığında nüvedeki doyma miktarı daha fazla kızarıklık ile göze çarpmaktadır. Sonuç olarak tasarım aşamasında eviricilerde kullanılacak transformatörlerde nüve laminasyon malzemesinin seçimi büyük ölçüde önem arz etmektedir.



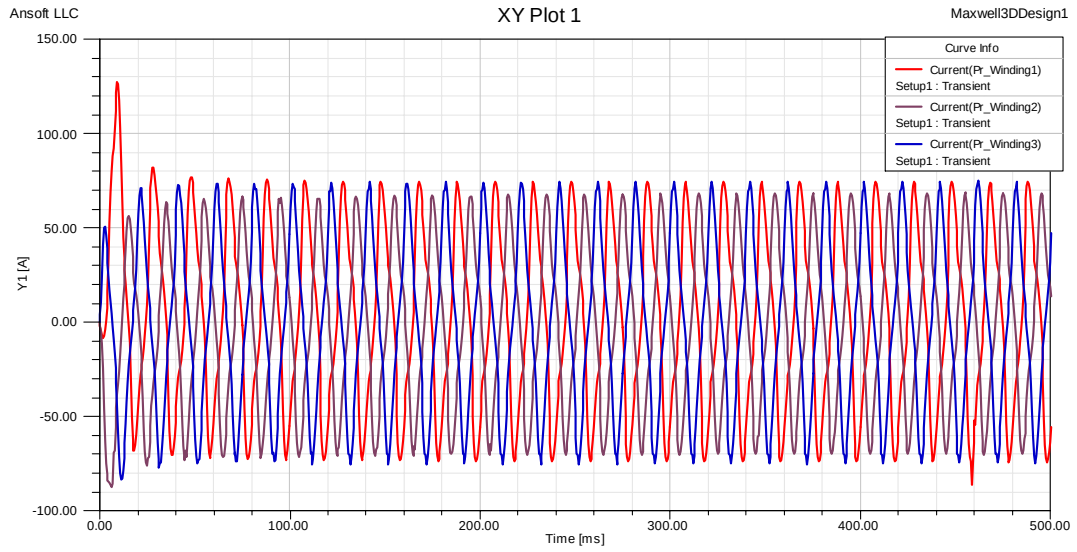
Şekil 6.19. Klasik tasarımlı transformatörün PWM uyarım durumu
 (a) 5. ms’deki akı dağılımı (b) 10. ms’deki akı dağılımı
 (c) 15. ms’deki akı dağılımı (d) 20. ms’deki akı dağılımı

6.2. Ayrık Nüve Tasarımlı Transformatörde Analiz Sonuçları

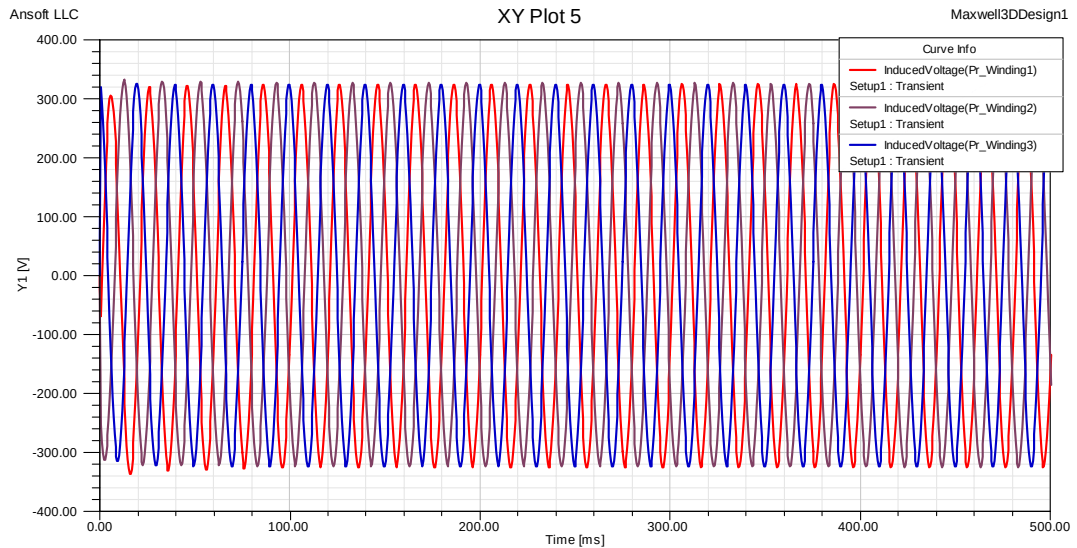
Klasik tasarımlı transformatör için yapılan modelleme ve analiz aynı şartlarda ayrık nüveli transformatör için de tekrarlanmıştır. Aynı şekilde transformatörün sinüsoidal ve PWM uyarım şartlarında analizleri gerçekleştirilmiştir. Böylece eviriciler için ayrık nüve tasarımının uygun olacağı fikri ispatlanmaya çalışılmıştır.

6.2.1. Sinüsoidal uyarım durumunda analiz sonuçları

Ayrık nüve tasarımlı transformatörün üç fazlı 50 Hz'lik bir sinüsoidal kaynaktan beslendiği durumun simülasyonu sonucunda elde edilen analiz raporlarına göre primer tarafı akım ve gerilimlerinin dalga formları Şekil 6.20'deki grafiklerde verilmiştir.



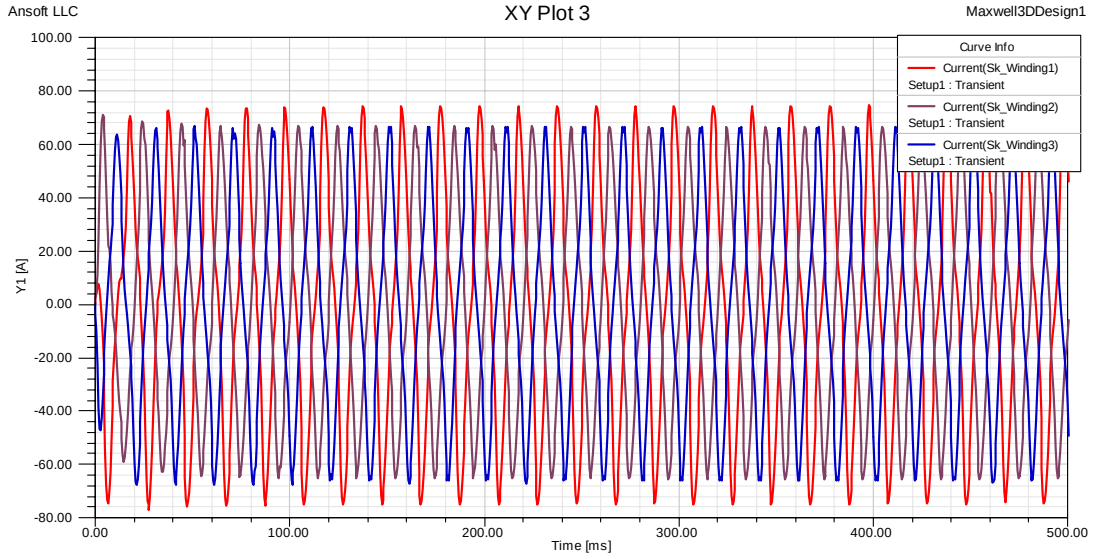
(a)



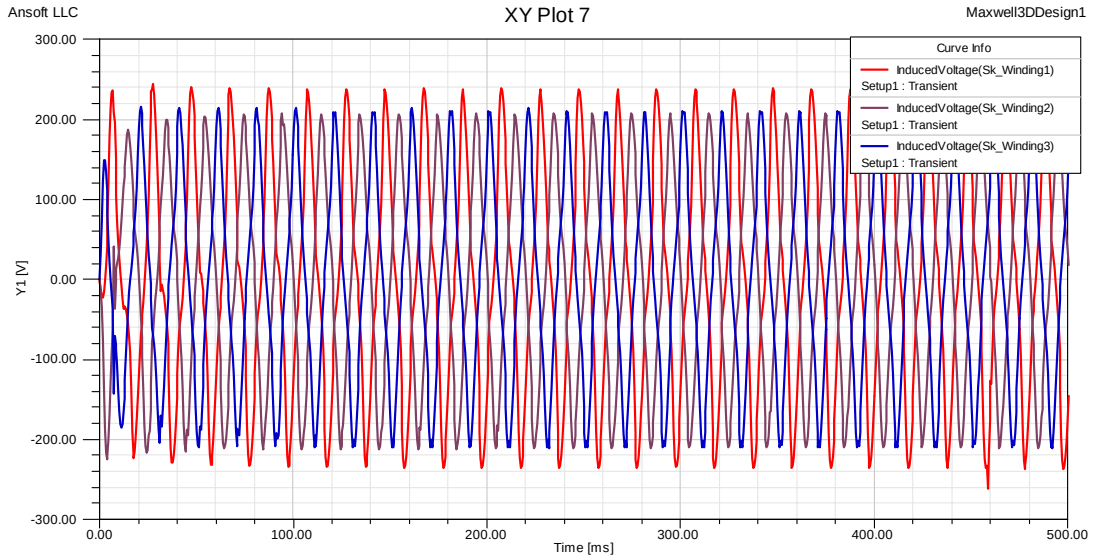
(b)

Şekil 6.20. Ayrık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda primer sargı akım ve gerilim dalga formları

Bu grafikler incelendiğinde aşırı başlangıç akımı klasik tasarımlı transformatöre göre oldukça azalmıştır. Sekonder tarafında indüklenen gerilim ve akımların dalga formları Şekil 6.21’de verilmiştir. Bu tür tasarımlarda kaçak akılar çok fazla olduğundan transformatörün regülasyonunun da yaklaşık olarak %20’nin üzerinde olduğu görülmektedir.



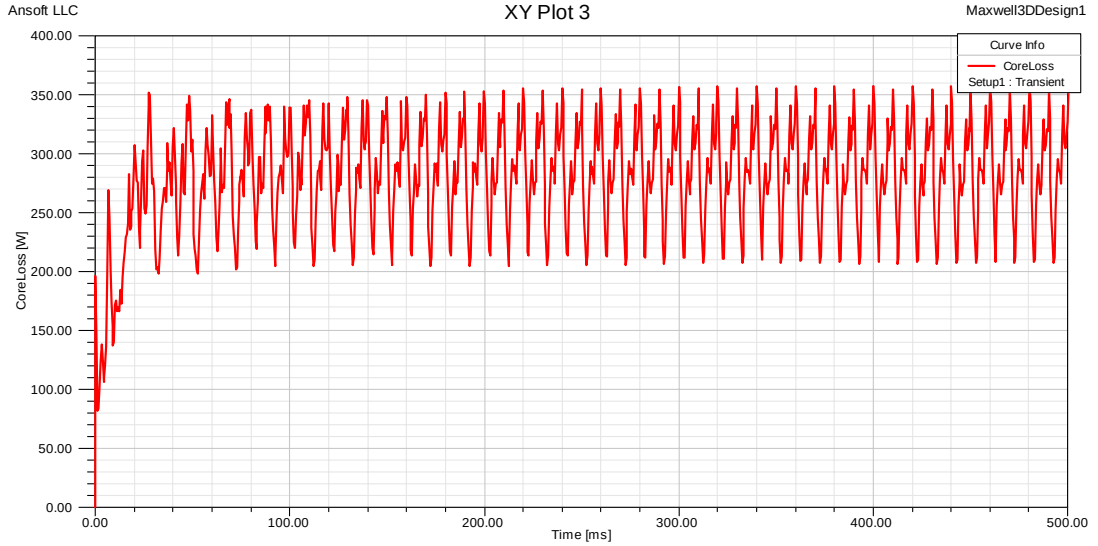
(a)



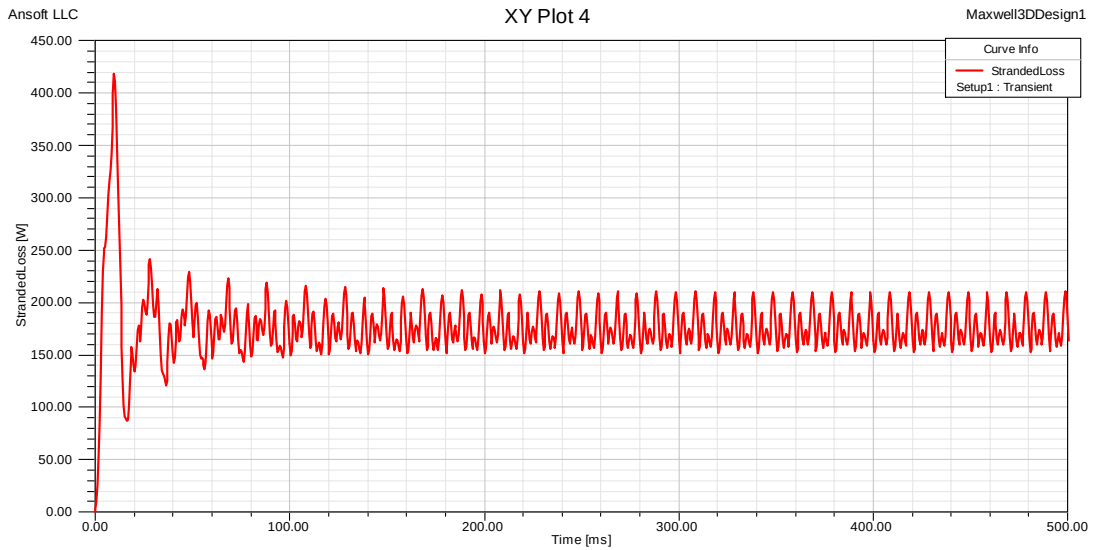
(b)

Şekil 6.21. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda sekonder akım ve gerilim dalga formları

Ayrık nüveli olarak tasarlanmış transformatörün analiz sonuçlarına göre elde edilen grafik raporlarından nüve kayıpları ve sargı kayıpları Şekil 6.22’de görülmektedir.



(a)

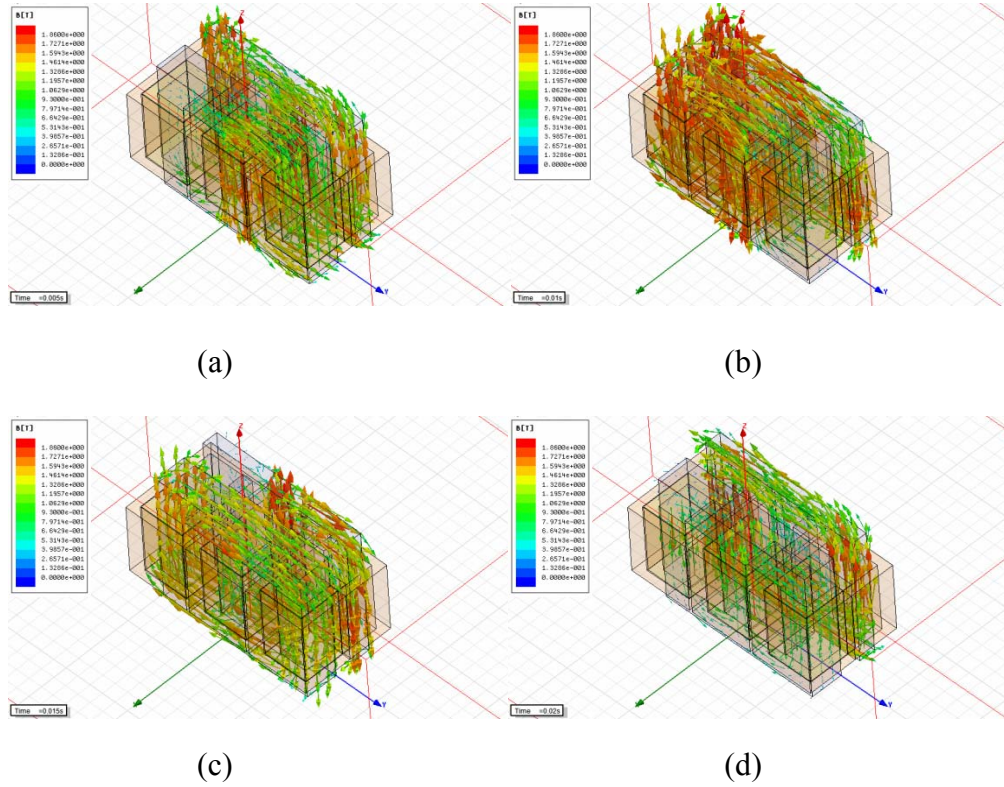


(b)

Şekil 6.22. Ayrık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları

Ayrık nüveli transformatörün çekirdeğinde oluşan akı dağılımı 50 Hz frekans değerinde bir sayıklılık süreçte Şekil 6.23’te verilmiştir. Burada yardımcı nüve olarak

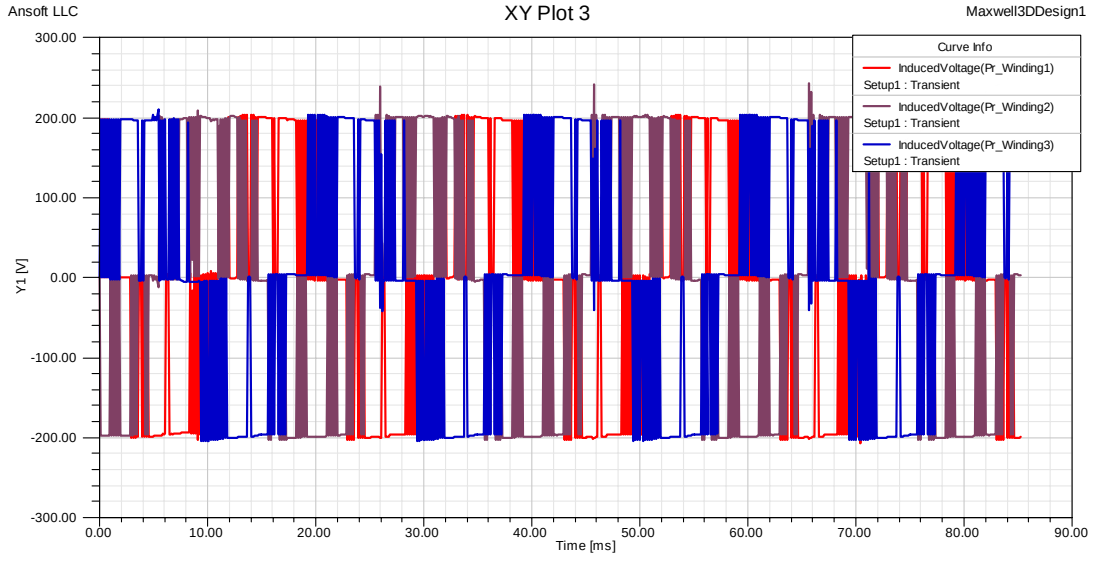
tanımlanan ayırık durumdaki nüve ana nüveden daha önce doyuma ulaşmakta ve doğal olarak bir şok filtresi gibi davranmaktadır.



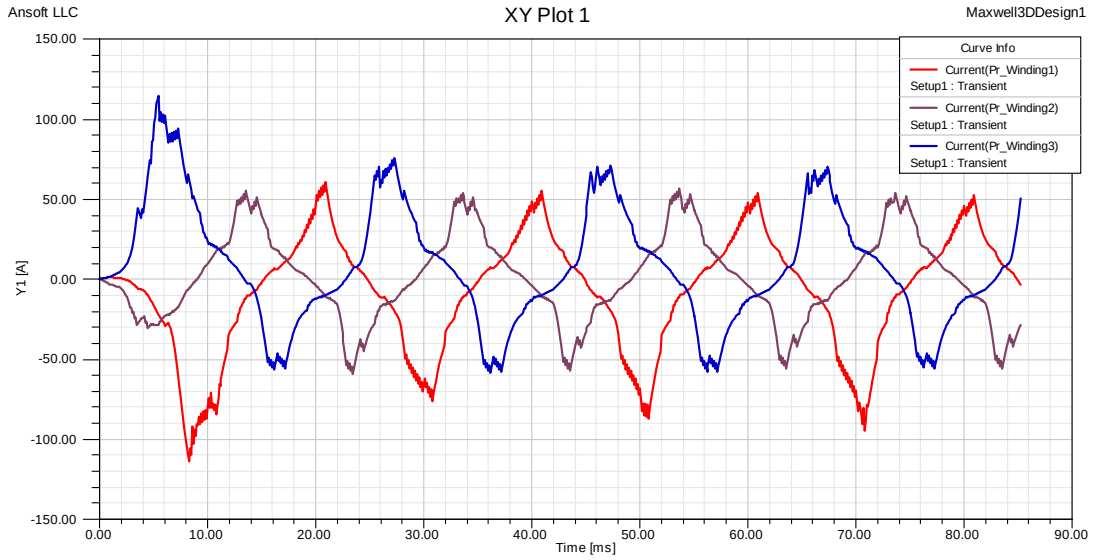
Şekil 6.23. Ayırık nüveli transformatörün sinüsoidal uyarım durumu
 (a) 5. ms'deki akı dağılımı (b) 10. ms'deki akı dağılımı
 (c) 15. ms'deki akı dağılımı (d) 20. ms'deki akı dağılımı

6.2.2. PWM ile uyarım durumunda analiz sonuçları

Klasik tasarımı transformatörde olduğu gibi 96 darbeli ve 50 Hz frekans değerinde anahtarlanan üç fazlı evirici çıkışına bağlı olan ayırık nüveli transformatörün PWM referans sinyallerle uyarım durumunda elde edilen analiz sonuçlarına göre primer sargı gerilimleri ile akımları Şekil 6.24'de verilmiştir. Burada, ayırık nüve tasarımı ile kaçak reaktansın artırılması sonucu filtrelemenin etkisi görülebilmektedir.



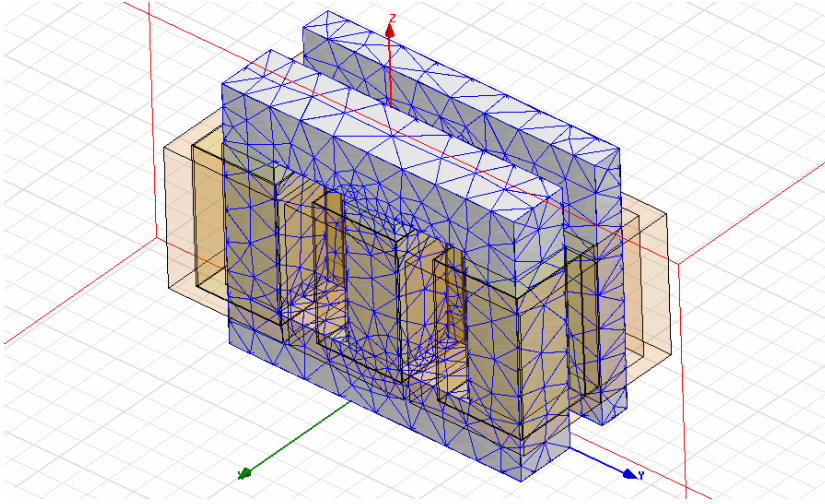
(a)



(b)

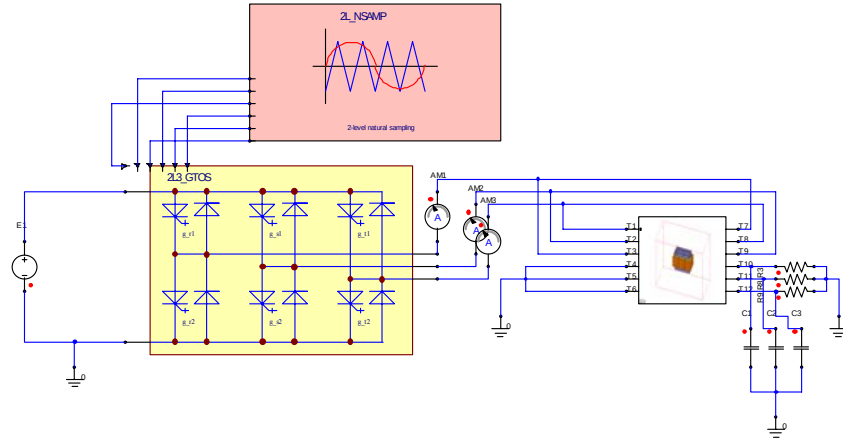
Şekil 6.24. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda primer sargı gerilim ve akım dalga formları

SEY yazılımı, analiz sürecini problem bölgesini sonlu elemanlara bölerek otomatik olarak işletmektedir. Modellenen evirici transformatörün nüvesinin sonlu elemanlara ayrılmış hali Şekil 6.25’te verilmiştir.



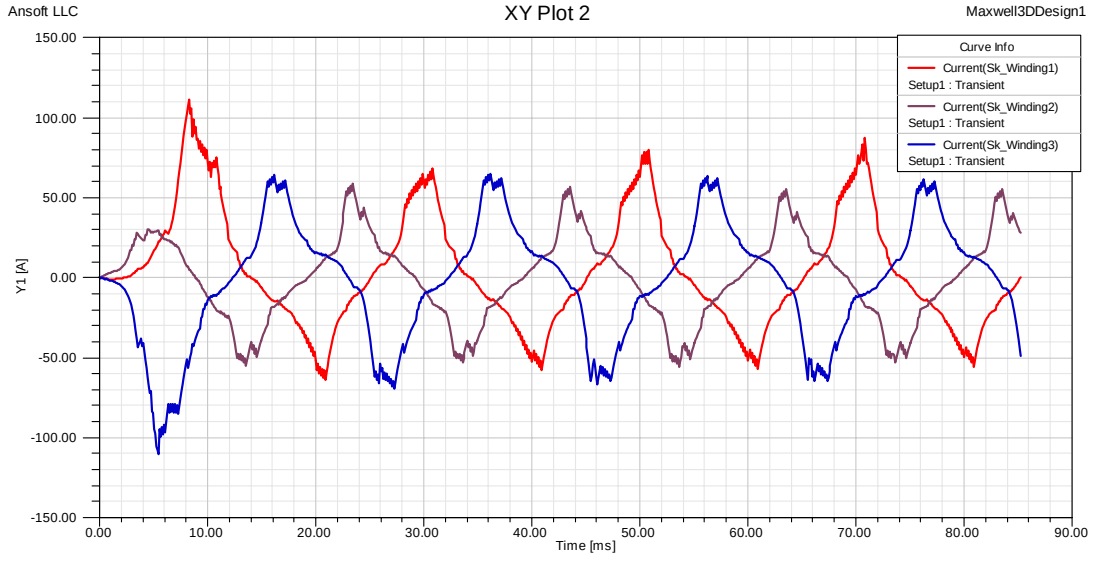
Şekil 6.25. Transformör nüvesinin SEY yazılımı ile sonlu elemanlar ağ ayrıntısı

Şekil 6.26'daki geçici durum analiz devresinde sekonder tarafına kapasitör bağlandığında yük üzerinde daha düzgün sinüsoidal gerilim oluşturulabilecektir.

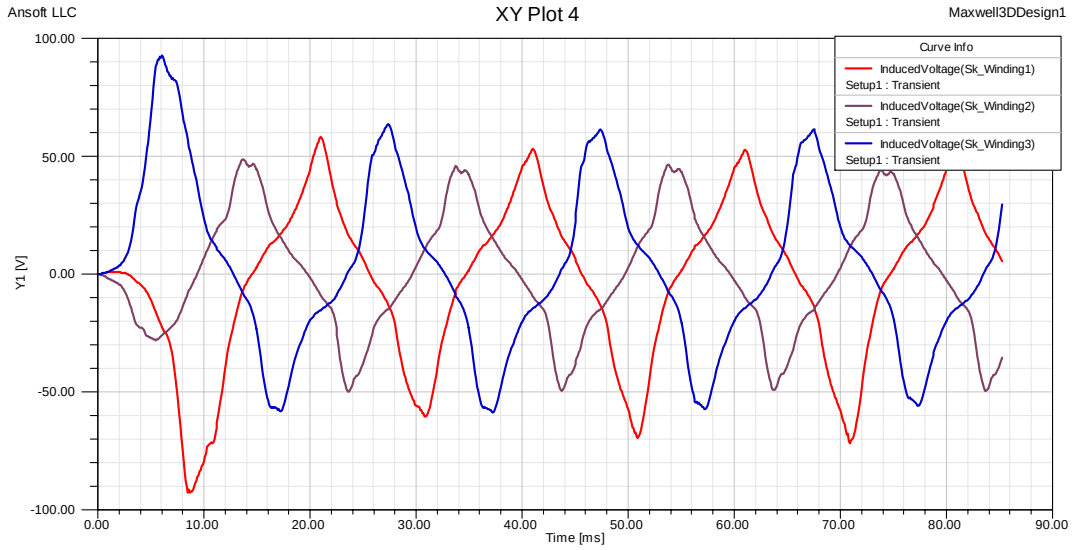


Şekil 6.26. Kapasitör filtreli PWM geçici durum simülasyon devresi

Kapasitörlerin bağlı olduğu durumda analiz raporlarına göre Şekil 6.27'de sekonder tarafındaki akım ve gerilimin dalga formları görülmektedir.



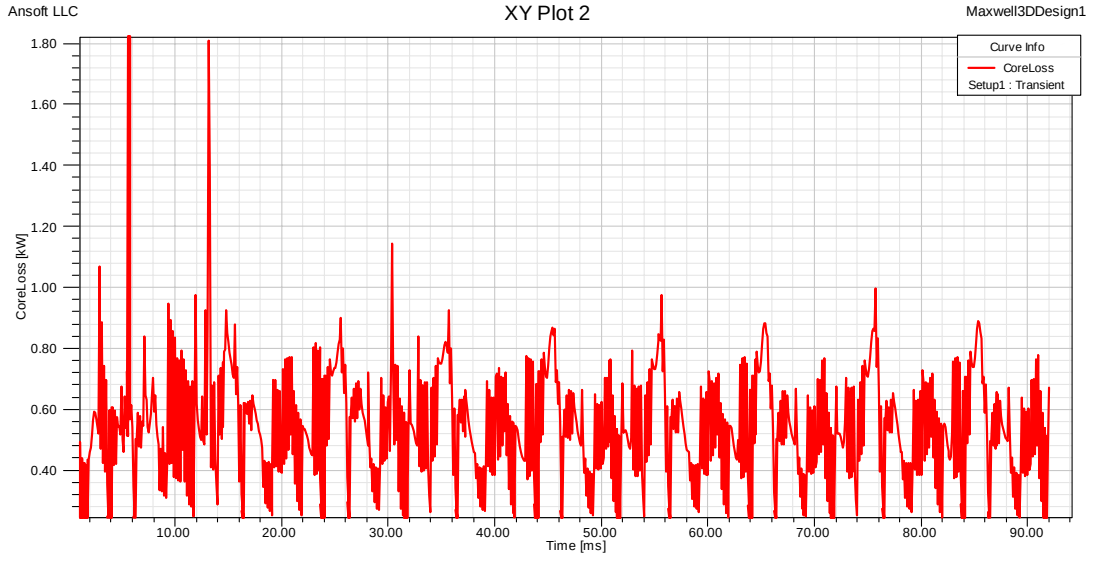
(a)



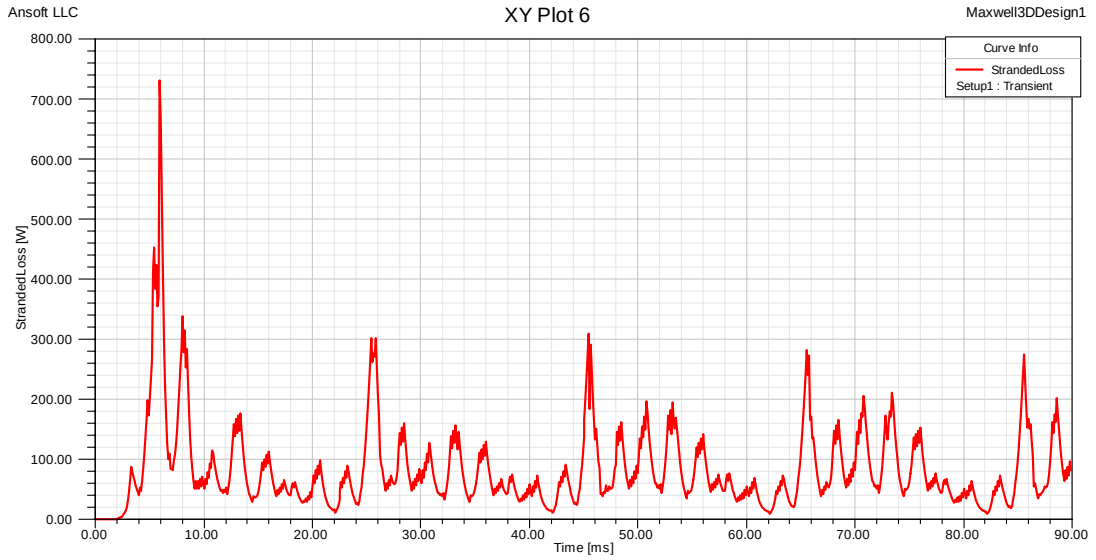
(b)

Şekil 6.27. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda sekonder gerilim ve akım dalga formları

Ayrık nüveli transformatörün nüve ve sargı kayıplarını gösteren grafikler analiz sonuçlarına göre Şekil 6.28’de verilmiştir.



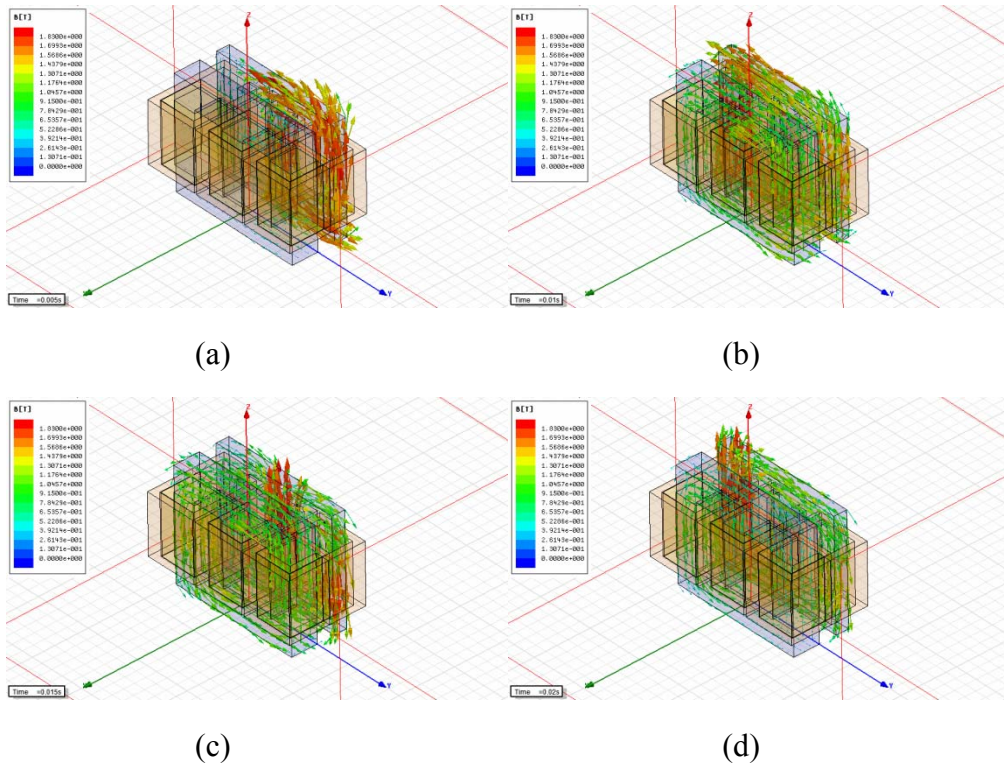
(a)



(b)

Şekil 6.28. Ayırık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda nüve ve sargı kayıpları

Ayrık nüveli transformatörün PWM uyarım durumunda bir periyotluk süreç için akı dağılımı Şekil 6.29’da verilmiştir. Bu durumda nüvedeki doymanın aynı laminasyon malzemesi ile tasarlanan klasik transformatör ile karşılaştırıldığında daha az olduğu görülebilmektedir.



Şekil 6.29. Ayırık nüve tasarımlı transformatörün PWM uyarım durumu
 (a) 5. ms'deki akı dağılımı (b) 10. ms'deki akı dağılımı
 (c) 15. ms'deki akı dağılımı (d) 20. ms'deki akı dağılımı

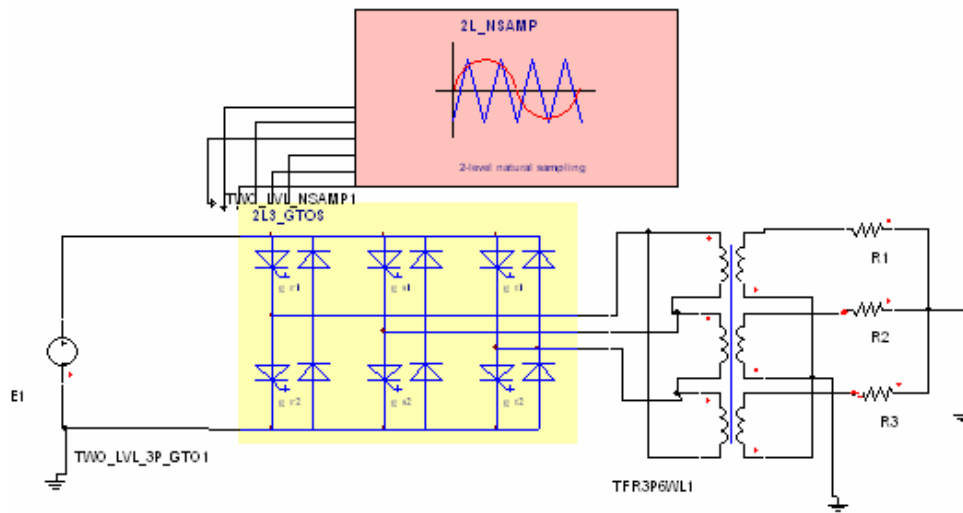
Elde edilen analiz raporlarından değersel olarak da veri alınabilmektedir. Yazılım özelliklerinden 2D analiz raporları txt uzantılı olarak kaydedilmektedir. Klasik tasarımlı transformatör ile ayırık nüve tasarımlı transformatörün şebeke frekanslı sinüsoidal uyarım durumunda ve yüksek frekansta PWM uyarım durumunda oluşan nüve kayıpları değer olarak Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Transformatörlerin tasarım biçimi ve uyarım durumuna göre nüve kayıplarının karşılaştırılması

Tasarım Biçimi	Nüve Kayıpları (W)	
	Sinüsoidal Uyarım Durumu (50 Hz)	PWM Uyarım Durumu (4,8 kHz)
Klasik Tasarımlı Transformatör	310 W	442 W
Ayrık Nüve Tasarımlı Transformatör	290 W	518 W

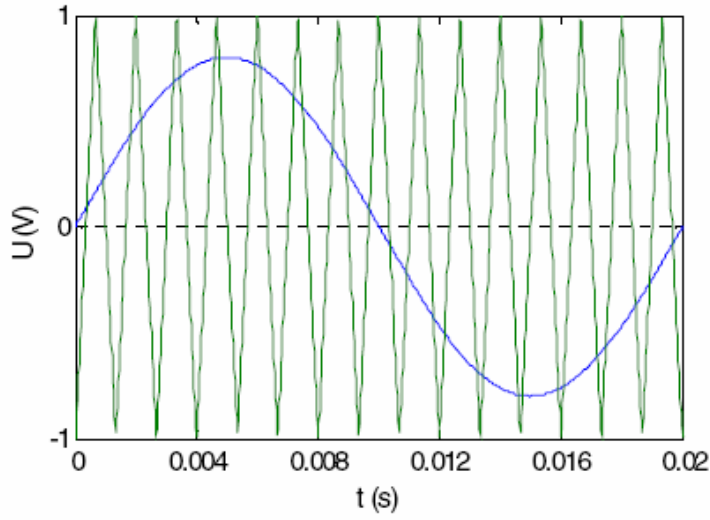
6.3. Evirici Çıkış Transformatörlerinde Kaçak Akıların Öneminin Simülasyonu

Ansoft-Simplorer yazılımının kütüphanesindeki iki seviye doğal örnekleme sinyalleri üretici tarafından anahtarlanan üç fazlı iki seviyeli evirici devresi ile birlikte üç fazlı bir transformatör modeli Şekil 6.30'da verilmiştir. Evirici çıkışındaki transformatörün primer tarafı üçgen, sekonder tarafı ise yıldız bağlanmıştır. Analiz sonuçlarının kolaylıkla karşılaştırılabilmesi için omik yük kullanılmış ve transformatörün dönüştürme oranı 1 olarak alınmıştır.



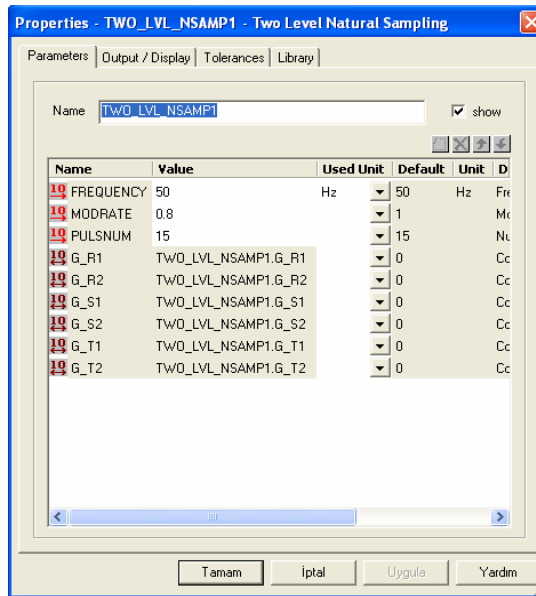
Şekil 6.30. Üç fazlı PWM evirici simülasyon devresi

Üç fazlı iki seviyeli evirici Şekil 6.31'de verildiği gibi PWM tekniği kullanılarak anahtarlanmaktadır. Burada temel dalga frekansı 50 Hz, modülasyon oranı 0,8 ve darbe sayısı 15 olarak görülmektedir.



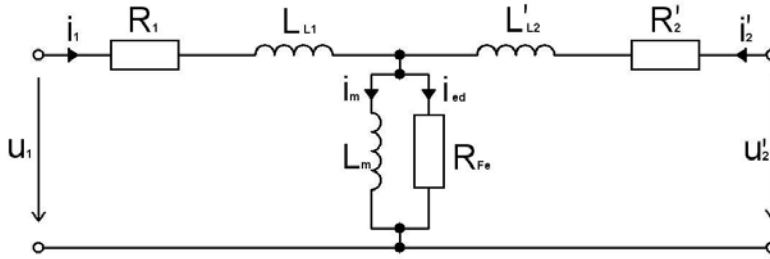
Şekil 6.31. PWM referans sinyali

PWM eviricinin anahtarlama darbe sayısı, temel dalga frekansı ve modülasyon oranı Şekil 6.32’de verilen iki seviye doğal örnekleme üretici özelliklerine ilişkin pencereden değiştirilebilmektedir. Dolayısıyla değişik darbe sayılarında elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılabilir. Bilindiği üzere, eviricilerde darbe sayısı arttıkça daha düzgün bir çıkış gerilimi elde edilmektedir.



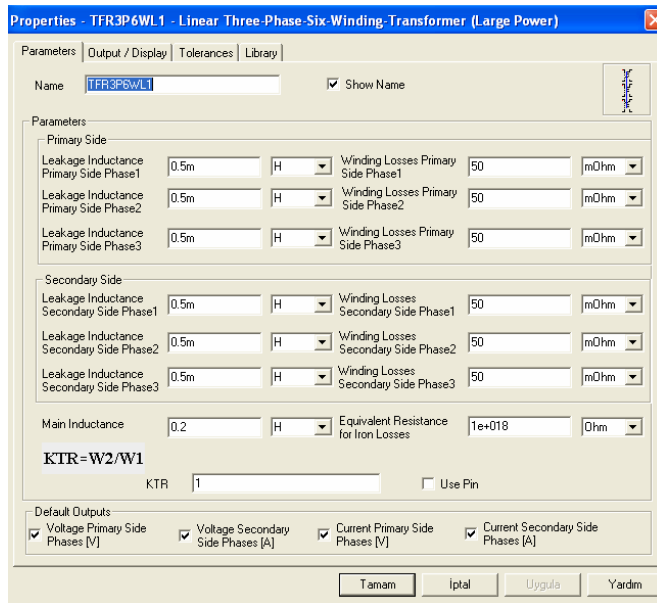
Şekil 6.32. İki seviyeli PWM sinyalleri üretici özelliklerine ilişkin pencere

Simplorer arayüzünün transformatör modelinin özelliklerine ilişkin penceresinden Şekil 6.33'teki eşdeğer devre parametreleri (kaçak akılar, sargı dirençleri gibi) değiştirilebilmektedir. Böylece eviricilerde filtre gerekliliğini ortadan kaldıran ve kaçak akıların büyük olması için özel olarak tasarlanmış ayrık nüveli transformatör davranışının simülasyonu gerçekleştirilebilmektedir.



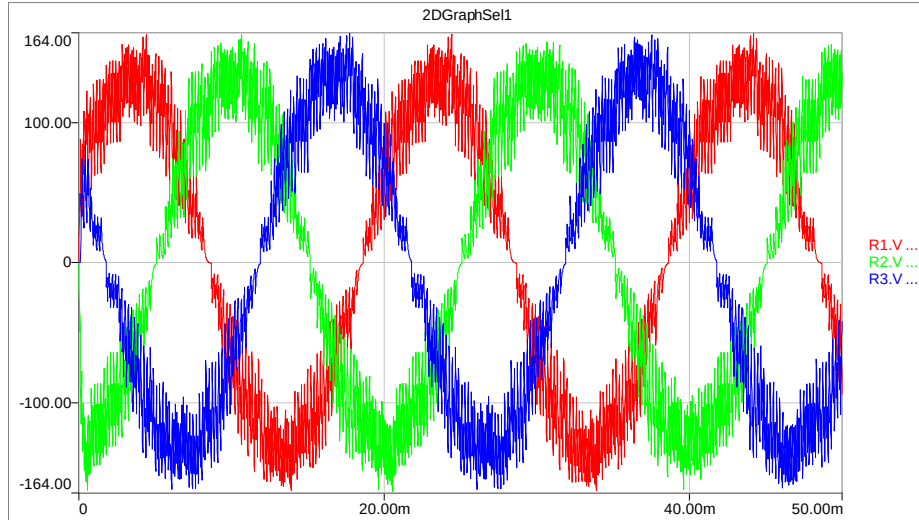
Şekil 6.33. Transformatör eşdeğer devresi

Simülasyon devresindeki transformatörün kaçak indüktansı Şekil 6.34'te verilen pencereden 0,5 mH olarak belirlenmiştir. Güç dağıtım transformatörleri gibi klasik tasarımı transformatörlerde kaçak akıların minimum değerde olması istenildiği bilinmektedir. Eğer evirici çıkışında klasik bir güç dağıtım transformatörü kullanılacaksa düzgün sinüsoidal çıkış için filtre gereksinimi bulunmaktadır.



Şekil 6.34. Transformatör eşdeğer devre parametrelerine ilişkin pencere

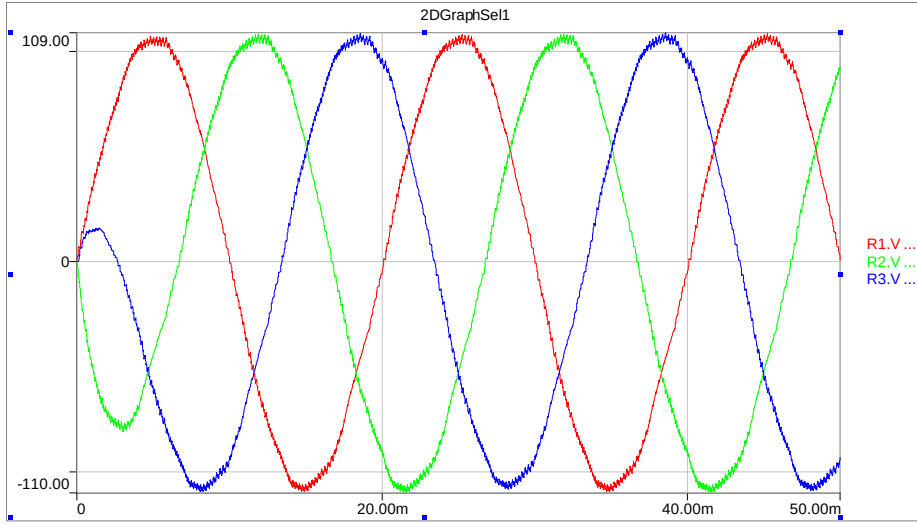
Simülasyon devresi çalıştırıldığında yük üzerinde elde edilen çıkış gerilim dalga formları Şekil 6.35'te görülmektedir. Burada kaçak akıları minimum değerde olan bir transformatör evirici çıkışında kullanıldığında harmoniklerin etkisi ile oldukça bozuk bir sinüs çıkış geriliminin oluşması kaçınılmazdır.



Şekil 6.35. Yük üzerindeki evirici çıkış gerilimi dalga formu

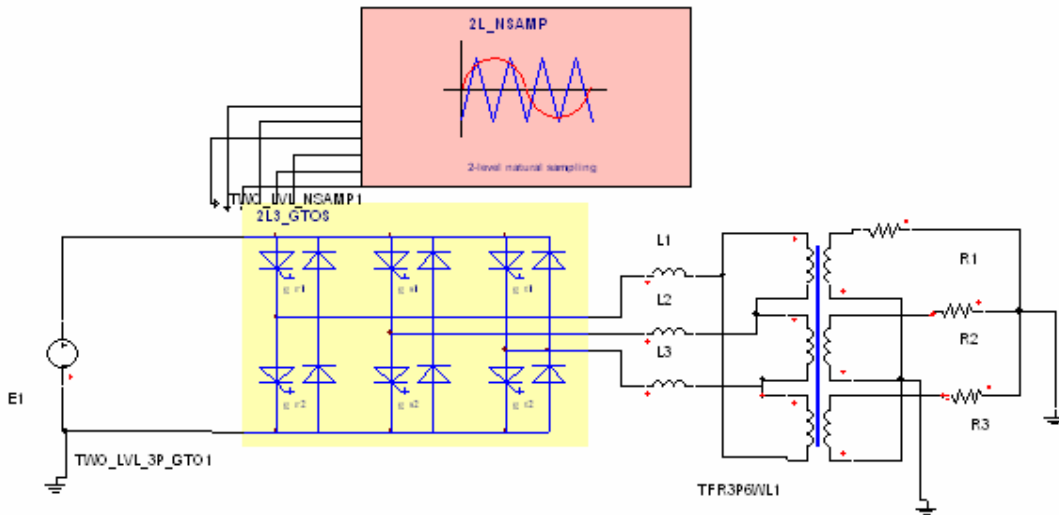
Evirici çıkışındaki transformatörün kaçak indüktans değeri ayırık nüve tasarımlı transformatörlerde olduğu gibi çok büyük varsayılarak değeri Şekil 6.34'deki pencereden 10 mH olacak şekilde değiştirilmiştir.

Kaçak akılar artırıldığında, yük üzerinde oluşan gerilim dalga formları Şekil 6.36'da görüldüğü gibi ortaya çıkmaktadır. Kaçak akıların oldukça küçük olduğu klasik tasarımlı transformatör ile kaçak akıların özellikle büyük olması istenilen ayırık nüveli olarak tasarlanmış transformatörden elde edilen çıkış gerilimlerinin dalga formları karşılaştırıldığında, ayırık nüve tasarımında filtre indüktörlerine gerek duyulmadan yük üzerindeki çıkış gerilimi doğal olarak filtrelenmektedir.



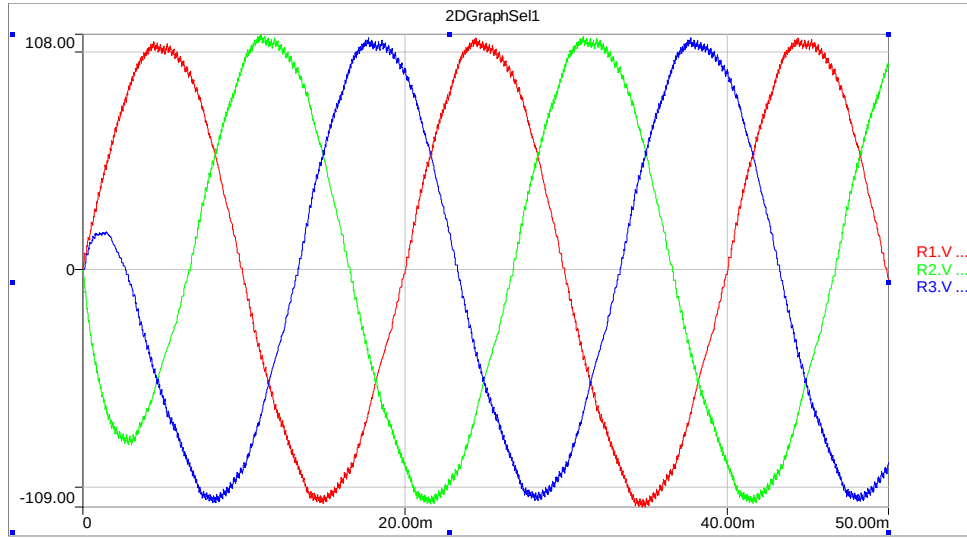
Şekil 6.36. Kaçak akıların büyük olduğu durumda evirici çıkış gerilim dalga formu

Eğer klasik tasarımı bir transformatör eviricide kullanılacaksa Şekil 6.37’de görülebileceği gibi primer tarafına her faz için indüktansı 6 mH olan birer indüktör filtresi bağlanmalıdır. Aksi takdirde yük üzerinde aşırı derecede harmoniklere sahip düzgün olmayan bir sinüsoidal gerilim oluşur.



Şekil 6.37. Evirici çıkışında filtre indüktörlerinin kullanılması

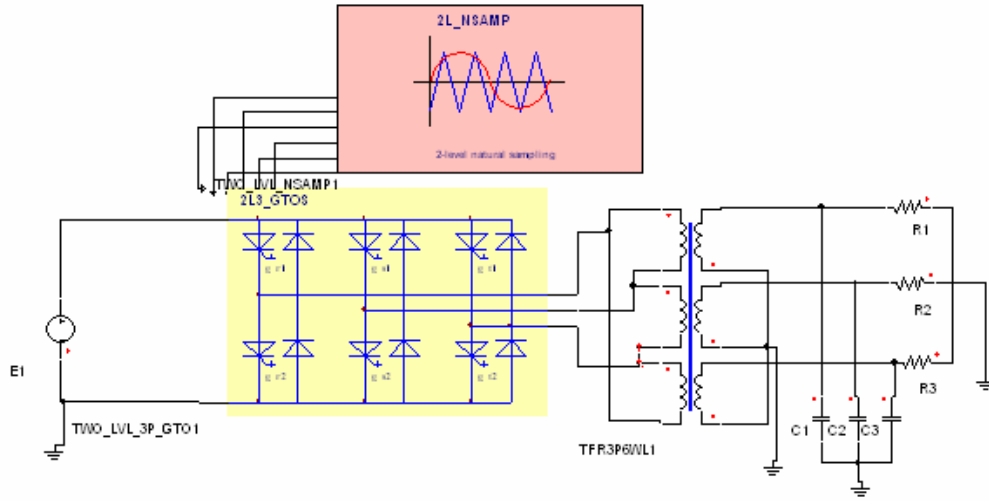
Filtre amacıyla 6 mH'lik indüktans değerindeki indüktörler kullanıldığı durum için simülasyon devresi çalıştırıldığında yük üzerinde elde edilen gerilimin dalga formları Şekil 6.38'de verilmiştir.



Şekil 6.38. Filtre indüktörleri kullanıldığı durumda evirici çıkış gerilim dalga formu

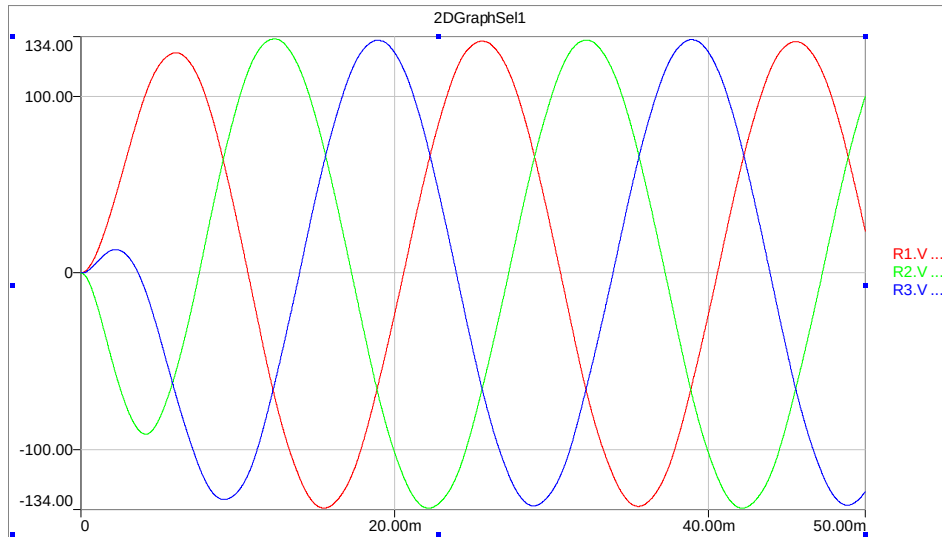
Burada açıkça görülebileceği gibi klasik tasarımlı transformatörde filtre indüktörleri kullanılarak elde edilen çıkış gerilimi, hemen hemen ayırık nüve tasarımlı transformatörde elde edilen çıkış gerilimi ile aynıdır. Sonuç olarak, ayırık nüve tasarımı ile kaçak akılar arttırıldığında filtre indüktörlerine gereksinim kalmamaktadır.

Şekil 6.39'da görülebileceği gibi filtre amacıyla sekonder tarafına her faz için uygun değerde kapasitör bağlandığında yük üzerinde daha düzgün sinüsoidal bir gerilim elde edilebilmektedir.



Şekil 6.39. Evirici çıkışında filtre kapasitörlerinin kullanılması

Filtre kapasitörleri ile birlikte kaçak akı değeri büyük olan ayırık nüveli transformatörden elde edilen çıkış geriliminin düzgün sinüsoidal formda en iyi biçimde filtrelendiği Şekil 6.40'da verilen gerilim dalga formlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 6.40. Filtre kapasitörlü durumda evirici çıkış gerilim dalga formu

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kesintisiz güç kaynakları ile yenilenebilir enerji kaynaklarının DA/AA formunda enerji dönüşümü yapması halinde evirici çıkışlarında transformatörler kullanılabilir. Bu transformatörler gerilim uygunlaştırma, izolasyon sağlama ve evirici çıkışında oluşabilecek DA bileşenin şebekeye aktarılmaması gibi görevleri üstlenirler.

Evirici transformatörlerinin şebeke frekansında çalışan standart transformatörlerden doyma ve giriş empedansı gibi özellikleri dikkate alındığında, yapısal özellikleri bakımından önemli farkları olduğu görülür. Ayrıca, evirici transformatör tasarımı hem güç elektroniği hem de transformatör tasarım bilgilerini gerektiren karmaşık bir konudur. Klasik transformatör tasarım teknikleri ile evirici transformatörlerinin yüksek frekans davranışları, kayıpları ve bölgesel ısı etkisi hesaplanamaz. Bu tez ile SEY kullanılarak endüstrinin ihtiyacı olan bu boşluğu dolduracak ve üretim sürecini kısıltacak bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada, öncelikle transformatör teorisi anlatılmış ve klasik tasarım metotları kısaca incelenmiştir. Daha sonra modelleme yazılımlarının yoğun olarak kullanıldığı modern transformatör tasarım yöntemleri üzerinde durulmuştur.

Elektrik makineleri tasarımında, SEY ile modelleme ve analize olanak veren Ansoft-Maxwell-PExpert-Simplorer, Cedrat-Flux, Infolytica-Magnet, Comsol, FEM-Lab gibi yazılımlar kullanılmaktadır.

Burada, klasik tasarımlı transformatör ile ayırık nüve tasarımlı transformatör Ansoft-Maxwell-Simplorer yazılımı kullanılarak modellenmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen analiz raporlarına göre transformatörlerin akım, gerilim, nüve ve sargı kayıpları grafikler halinde 6. bölümde verilmiştir. Aynı zamanda modellenen transformatörlerin manyetik devrelerindeki akı dağılımı da görselleştirilmiştir.

Tasarım sürecinde akıların görselleştirilmesi, manyetik devrenin değişik bölgelerindeki kaçak ve faydalı akı dağılımını ortaya çıkarmakta, ayrıca nüvedeki manyetik doyum durumunu da vermektedir. Buna göre yazılım özellikleri ile nüve geometrik biçimi, laminasyon malzeme türü ve sargı yapıları kolaylıkla değiştirilerek transformatörler test edilebilmekte ve optimizasyonu sağlanmaktadır.

Transformatör tasarımında nüve laminasyonu için uygun malzeme seçimi, geometrik biçim ve doyma akı yoğunluğu büyük önem taşımaktadır. Transformatörler 3. bölümde verilen tasarım akış diyagramındaki basamaklara göre tasarlandığında ve gerekli kontroller yapıldığında üretim aşamasında oluşabilecek hatalar ortadan kalkmaktadır.

SEY yazılımlarında modelleme ve analiz akış diyagramına göre tasarım işlemleri yapıldığında çok sayıda prototip model oluşturulmasına gerek kalmadan hızlı bir şekilde optimum tasarım elde edilerek üretim aşamasına geçilmektedir.

Güncel nüve kayıp hesaplamalarında olduğu gibi girdap akım kayıpları, klasik girdap akım kaybı ve anormal girdap akım kaybı olarak sınıflandırılmaktadır. SEY yazılımı nüve kayıplarını bu formatta hesaplamakta ve grafik veya veri olarak sonuçlar alınabilmektedir. Elde edilen analiz sonuçlarına göre 6. bölümde verilen çizelgede, tasarım biçimine göre modellenen transformatörlerin PWM kaynak ile uyarımı durumunda elde edilen nüve kayıpları, akı dağılımı ve manyetik doyum durumu sinüsoidal kaynak ile uyarım durumuna göre farklılık göstermektedir. Buna göre PWM uyarımda nüve kayıplarındaki artma paralel olarak sıcaklık değerinde de artışa sebep olmaktadır.

Evirici transformatörlerinde ayırık nüve tasarımı tercih edildiğinde, filtre indüktörlerine gereksinim kalmadığı, yapılan modelleme ve simülasyon sonucu elde edilen analiz raporlarına göre doğrulanmıştır.

Eviricilerde anahtarlama darbe sayısı, modülasyon oranı gibi parametrelerin seçiminin önemli olduğu açıklanmış ve bu çalışmadaki simülasyon devrelerinde üç

fazlı iki seviyeli evirici topolojisi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak üç fazlı üç seviyeli evirici topolojisi tercih edildiğinde harmonik eliminasyonu açısından daha uygun olacağı belirtilmiştir.

PWM ile yapılan anahtarlama pozitif ve negatif alternansların eşit olmaması durumunda, evirici çıkışında bulunan transformatörün doyuma giderek ısısı artacaktır. Bu etkinin fazla olması, transformatör yüksüz iken dahi aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Doyma etkisi PWM ile tamamen engellenememektedir. Kontrol sistemindeki olumsuzluklar, anahtarların gecikmesi, doğrusal olmayan davranışlar bu etkiyi artırmaktadır. Transformatörün nüve yapısı ile doyma etkisi kısmen engellenebilmektedir.

Farklı elektrik makinelerinin ve hatta transformatörlerin benzer SEY yazılımları ile tasarımı ve analizine yönelik çalışmalar uluslar arası literatürde bulunmaktadır. Ancak evirici transformatörünün tasarımına yönelik çalışmaların literatürde az sayıda olduğu görülmektedir.

Evirici transformatörü çekirdeğinin amorf malzemeden oluşması halinde maliyet, kayıp ve çıkış kalitesinin SEY yazılımları kullanılarak incelenmesi, ayrıca bu yazılımların elektrik makineleri tasarımı ve manyetik alan gibi anlaşılması güç konuları görselleştirerek eğitimi kolaylaştırmasına ilişkin olarak ilgili derslerin içeriklerinde SEY yazılımları ile transformatör tasarımına yönelik olarak bir modül hazırlanması, gelecekte yapılabilecek çalışmalar olarak önerilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Ateş, H, Peşint, M.A., “Elektrik Makinalarının Esasları”, **Gazi Üniversitesi Basın-Yayın Yüksekokulu Matbaası, Teknik Eğitim Fakültesi Yayınları**, Ankara, 535,538-541,543 (1990).
2. Bal, G., “Transformatorlar”, Birinci Baskı, **Seçkin Yayıncılık San. ve Tic.**, Ankara, 26, 33, 152 (2008).
3. Altıntaş, A., “Bir Fazlı Mantel Tipi Transformator Tasarımı İçin Bir Arayüz Programı”, **Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, Elazığ, 20 (4): 579-586 (2008).
4. Gürdal, O., “Elektrik Makinalarının Tasarımı”, **Atlas Yayın Dağıt. Ltd. Şti.**, İstanbul, 2-19, 273, 278, 328, 335, 344, 349-352, 362, 363, 382-389, 405-413 (2001).
5. Warne, D.F., “Electrical Engineer’s Handbook”, **Newnes Publications**, England, 39-41 (2000).
6. Tsai, W.C., “A study on core losses of non-oriented electrical steel laminations under sinusoidal, non-sinusoidal and PWM voltage supplies”, **IEEE Region 10 Conference**, Tencon 2007 Volume, 1-5 (2007).
7. Xiao G.Y., Anthony J.M., Juan S., Fatih J.A., “Influence of Switching Frequency on Eddy-Current Losses in a Three-Phase, Three-Limb Transformer Core Subjected to PWM Voltage Excitation”, **IEEE Powereng Conference**, Setubal-Portugal, 324-329 (2007).
8. Zhu, J.G.,Hui, S.Y.R.,Ramsden, V.S., “Discrete modelling of magnetic cores including hysteresis eddy current and anomalous losses”, **IEE Proceedings-A**, 140(4): 317- 322 (1993).
9. Ruifang L., Chris C.M., David W.G, “Modeling of Eddy-Current Loss of Electrical Machines and Transformers Operated by Pulsewidth-Modulated Inverters” **IEEE Transactions On Magnetics**, Washington DC-USA, Volume 44, 2021-2028 (2008).
10. Ionel, D.M., Popescu, M., McGilp, M.I., Miller, T.J.E., Dellinger, S.J., Heideman, R.J., “Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel”, **IEEE Transactions on Industry Applications Conference**, Volume 2, Tampa, FL, 827-835 (2006).

11. Ionel, D.M. Popescu, M., McGilp, M.I., Miller, T.J.E., Dellinger, S.J., Heideman, R.J., “Computation of Core Losses in Electrical Machines Using Improved Models for Laminated Steel”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, 43(6): 1554-1564 (2007).
12. Lin, D., Zhou, P., Fu, W.N., Badics, Z., Cendes, Z.J., “A Dynamic Core Loss Model for Soft Ferromagnetic and Power Ferrite Materials in Transient Finite Element Analysis”, **IEEE Transactions On Magnetism**, Vol. 40, No. 2, **Saratoga Springs** New York, 1318 – 1321 (2004).
13. Chen, Y., Pillay, P., “An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation”, **IEEE Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting**, Volume: 2, 759 – 766 (2002).
14. Zorlu, S., Enayati, B., Mthombeni, T.L., Pillay, P., “Integration of a Separated Core Loss Measurement Method into Finite Element Analysis Software”, **IEEE International Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07**, 353-357 (2007).
15. Mohan, N., Undeland, T.M., Robbins W.P., “Güç Elektroniği Çeviriciler, Uygulamalar ve Tasarım”, Çeviri, Tuncay N., Gökaşan M., Boğosyan S., **İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi**, İstanbul, 214-219, 242-244, 261, 806-852 (2003).
16. Lin, K.C., Hsu, J.S., “Selection of silicon steel for transformer cores”, **IEEE Electrical Electronics Insulation Conference**, Rosemont, IL, USA, 147-152 (1995).
17. Laughton M. A., Warne, D.F., “Electrical Engineer’s Reference Book”, Sixteenth Edition, **Newnes Publications**, Great Britain, 8/4, 8/5 (2003).
18. Fiorillo, F., “Measurement and Characterization of Magnetic Materials”, Editör, **Isaak Mayergoyz**, Italy, 31-33, 58 (2004).
19. Dasgupta, I., “Power Transformers (Quality Assurance)”, **New Age International Publishers**, NewDelhi, 41, 42 (2009).
20. Georgilakis, P.S., “Spotlighting on Modern Transformer Design”, **Springer is part of Springer Science+Business Media**, Greece, 75, 125-129, 146-148, 267-269 (2009).
21. Flanagan, W.M., “Handbook of Transformer Design&Applications”, 2nd edition, **Mc Graw Hill**, USA, 6.1-6.12, 7.17, 7.21, 7.23, 7.28, 7.30-7.35, 8.9, 8.10, 10.6, 13.10, 13.11 (1992).

22. Gottlieb, I. M., "Practical Transformer Handbook", *Newnes Publications*, England, 122-124 (1998).
23. Wells, B.M., "Magnetic Components in UPS", *IEE UPS Colloquium*, London, 4/1-4/7 (1994).
24. De Gersem, H. ve Hameyer, K., "A Finite Element Model for Foil Winding Simulation", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 37, NO. 5, Milwaukee, WI, 3427-3432 (2001).
25. Altın, N., "Bulanık Sinirsel Denetimli Şebeke Etkileşimli Evirici Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi", (Doktora), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 24, 27, 30-33, 42 (2009).
26. Hirachi K., Tomokuni Y., "Improved Control Strategy to Eliminate The Harmonic Current Components for Single Phase PWM Current Source Inverter", *19th International Telecommunications Energy Conference*, 189-194 (1997).
27. Baker D.M., Agelidis V.G., Nayer C.V., "A Comparison Of Tri-Level and Bi-Level Current Controlled Grid-Connected Single-Phase Full-Bridge Inverters", *Proceedings of the IEEE International Symposium on Volume 2*, 463-468 (1997).
28. Beckley, P., "Electrical Steels: for Rotating Machines", IET Power and Energy Series 37, *Johns, A.T. and Warne, D.F.* UK, 104-110 (2002).
29. Çanakoğlu, A.İ., "Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Tek Fazlı Transformatörün Çalışma Noktasının Belirlenmesi", *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Kütahya, (17), 65-73 (2008).
30. Booker, H. G., "Is the Teaching of Electricity and Magnetism in Need of Change?", *IEEE Transactions on Education*, vol. 20, issue 3, pp. 126-130 (1977).
31. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, "Sonlu Elemanlar Yöntemi" http://www.gyte.edu.tr/Dosya/328/EngCourses/Gebze2008/FahjanIMO Gebze 2008-SonluElemanlar_01.pdf (2008).
32. Ansoft Corporation, "Maxwell 3D Field Simulator v11 Student Version User's Guide", Ansoft Korea, <http://ansoft.co.kr> (2005).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BALCI, Selami
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 30.01.1977 Konya
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (505) 378 48 12
e-mail : selamibalci@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Ünv./ Elektrik Eğitimi Bölümü	1997
Lise	Afşin Endüstri Meslek Lisesi	1993

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1997-...	Türközü Oğuzhan T. E. M. L.	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

İzcilik, Kamp, Dağcılık, Trekking, Orienteering, Amatör telsizcilik