



**T.C.
OSMANIYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

Canan ALADAĞ

**TRANSFORMATÖRLERDE DURUM
İZLEME VE ARIZALARIN ERKEN
TESPİTİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OSMANIYE – 2025

**T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ**

**TRANSFORMATÖRLERDE DURUM İZLEME VE
ARIZALARIN ERKEN TESPİTİ**

Canan ALADAĞ

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**OSMANİYE
ŞUBAT-2025**

TEZ ONAYI

TRANSFORMATÖRLERDE DURUM İZLEME VE ARIZALARIN ERKEN TESPİTİ

Canan ALADAĞ tarafından Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ danışmanlığında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Enerji Sistemleri Mühendisliği** Ana Bilim Dalı'nda hazırlanan bu çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından oy birliği/çokluğu ile **Doktora Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İNÜ

Üye: Prof. Dr. Bülent YANIKTEPE
Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, OKÜ

Üye: Doç. Dr. Murat KÖSEOĞLU
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İNÜ

Üye: Doç. Dr. Mehmet SÖNMEZ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, OKÜ

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Cemal KELEŞ
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İNÜ

Yukarıdaki jüri kararı Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve /..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Eyyup TEL
Enstitü Müdürü, **Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, çizelge ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, bu çalışma sonucunda elde edilmeyen her türlü bilgi ve ifade için ilgili kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını ve bu tezin Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Canan ALADAĞ



ÖZET

TRANSFORMATÖRLERDE DURUM İZLEME VE ARIZALARIN ERKEN TESPİTİ

Canan ALADAĞ

Doktora, Enerji Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ

Şubat 2025, 126 sayfa

Bu tez çalışmasında, transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların tespiti ve durum izleme yöntemleri ele alınmıştır. Transformatörlerde sık karşılaşılan sarım-sarım kısa devre arızaları, kaynak gerilim dengesizliği ve laminasyon arızaları detaylı olarak incelenmiş ve bu arızaların erken aşamada tespiti için yenilikçi analiz yöntemleri kullanılmıştır. Sağlıklı durum ve arıza senaryolarına ilişkin sonuçlar ANSYS® Maxwell yazılımından elde edilen elektriksel ve manyetik parametrelerdeki değişimlerin incelenmesi ile değerlendirilmiştir. Özellikle faz akımları ve kaçak akı dağılımları incelenmiş; bu parametrelerdeki değişimlerin arızaların tespitinde kritik bir rol oynadığı belirlenmiştir. Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) yöntemi kullanılarak arıza sinyalleri frekans ekseninde analiz edilmiş ve sağlıklı ile arızalı durumlar arasındaki farklılıklar net bir şekilde ortaya konulmuştur. Analiz sürecinde, simetrik bileşenler yöntemi ile uzay vektör analizi ve faz açısı spektrumlarının analizi gibi teknikler kullanılarak arızalar hassas bir şekilde tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların erken aşamada tespit edilmesinin mümkün olduğunu ve farklı arıza türlerinin birbirlerinden ayrıştırılabileceğini göstermektedir. Bu çalışma, enerji iletim ve dağıtım süreçlerinin sürdürülebilirliğine katkı sağlayan hızlı ve etkin arıza tespit yöntemleri sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Transformatörlerde Elektriksel Arızalar, Arıza Tespiti, Simetrik Bileşenler, Uzay Vektör Analizi, Faz Açısı Analizi

ABSTRACT

EARLY FAULT DETECTION AND CONDITION MONITORING OF TRANSFORMERS

Canan ALADAĞ

Ph. D., Department of Energy Systems Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Salih MAMİŞ

February 2025, 126 pages

In this thesis, the detection of electrical faults in transformers and condition monitoring methods are discussed. Turn-to-turn short circuit faults, unbalanced supply voltage, and lamination faults, which are frequently encountered in transformers, are investigated in detail, and innovative analysis methods are used for the early detection of these faults. The thesis evaluates both healthy and faulty conditions by analyzing changes in electrical and magnetic parameters obtained using ANSYS® Maxwell software. Phase currents and stray flux distributions were analyzed, revealing that variations in these parameters play a crucial role in fault detection. Fault signals were examined in the frequency domain using the Fast Fourier Transform (FFT) method, which effectively differentiates between healthy and faulty conditions. Additionally, techniques such as space vector analysis, symmetrical component analysis, and phase angle spectrum analysis were utilized to achieve precise fault identification. The results show that electrical faults in transformers can be detected at an early stage, and different types of faults can be distinguished from one another. This thesis provides fast and efficient fault detection methods that contribute to the sustainability of electric transmission and distribution processes.

Key Words: Electrical Faults in Transformers, Fault Detection, Symmetrical Components, Space Vector Analysis, Phase Angle Analysis



Çocuklarıma...

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım boyunca desteği ve anlayışıyla yanımda olan, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, değerli danışman hocam Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ'e, teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca tecrübeleri ve bilgileriyle katkı sağlayan kıymetli hocam Prof. Dr. Müslüm ARKAN'a teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde yer alan, bilgilerini ve motivasyonunu esirgemeyen Prof. Dr. Bülent YANIKTEPE'ye teşekkür ederim.

Değerli jüri üyelerim Doç. Dr. Mehmet SÖNMEZ'e, Doç. Dr. Murat KÖSEOĞLU'na ve Dr. Öğretim Üyesi Cemal KELEŞ'e teze olan katkılarından ve emeklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda emeği olan, hayatım boyunca mesleki etiğini ve çalışkanlığını kendime örnek almaya çalıştığım Doç. Dr. Taner GÖKTAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bana gösterdiği sabrın yanısıra akademik desteği için eşim İlyas ALADAĞ'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her aşamada olduğu gibi bu süreçte yanımda olduklarını hep hissettiğim annem ve babama, çalışmalarım boyunca sürece dahil olan oğlum ve kızıma teşekkürü bir borç bilirim.

Tez sürecimde beni manevi yönden destekleyen ve motive eden çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI	
TEZ BİLDİRİMİ	
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Genel Bakış	1
1.2 Tezin Amacı	7
1.3 Tezin İçeriği	7
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	9
3. TRANSFORMATÖRLER VE ELEKTRİKSEL ARIZALAR.....	23
3.1 Transformatörlerin Yapısı ve Modelleri.....	23
3.1.1 Manyetik Nüve	23
3.1.2 Sargılar	25
3.1.3 Transformatörlerin Sınıflandırılması.....	25
3.1.4 Transformatörün Çalışma Prensibi.....	28
3.1.5 Transformatörün Eşdeğer Devre Modeli.....	31
3.1.6 Transformatörlerde Kayıplar	37
3.1.6.1 Çekirdek Kayıpları	37
3.1.6.2 Bakır Kayıpları	39
3.1.6.3 Stray Kayıpları	39
3.1.6.4 Dielektrik Kayıpları.....	40
3.2 Transformatörlerde Meydana Gelen Elektriksel Arızalar	40
3.2.1 Sargı Kısa Devre Arızaları	41
3.2.2 Kaynak Gerilimi Dengesizliği.....	47
3.2.3 Laminasyon Arızaları	51
3.2.3.1 Kenar Çapak Arızası (Edge Burr Fault)	52
3.2.3.2 Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızası.....	54

4. TRANSFORMATÖRÜN VE ELEKTRİKSEL ARIZA SENARYOLARININ MODELLENMESİ	55
4.1 ANSYS® Maxwell Programına Genel Bakış	55
4.2 Transformatörün Modellenmesi	57
4.3 Sarım-Sarım Kısa Devre Arızasının Oluşturulması	64
4.4 Kaynak Gerilimi Dengesizliğinin Oluşturulması	66
4.5 Laminasyon Arızasının Oluşturulması	67
5. KAÇAK AKI TABANLI SİMETRİK BİLEŞENLER METODU VE AÇI SPEKTRUMLARI	70
5.1. Kaçak Akı Analizi ile Simetrik Bileşenler Metodu.....	70
5.2. Açık Spektrumları Analizi.....	74
6. BENZETİM SONUÇLARI	79
6.1 Sarım-Sarım Kısa Devre Arızası Sonuçlarının Analizi.....	80
6.1.1 Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi- Kısa Devre Arızası ..	80
6.1.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Kısa Devre Arızası.....	89
6.2 Faz Gerilimi Dengesizliği Altında Kısa Devre Arızalarının Analizi ve Ayrıştırılması.....	96
6.2.1 Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi-Gerilim Dengesizliği	96
6.2.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Gerilim Dengesizliği.....	99
6.3 Laminasyon Arıza Sonuçlarının Analizi	101
6.3.1 Kenar Çapak Arızasının Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi	101
6.3.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Kenar Çapak Arızası.....	106
6.3.3 Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızasının Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi.....	109
6.3.4 Faz Açısı Spektrumu Analizi- Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızası...	114
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	116
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Güç transformatörü ve dağıtım transformatörü karşılaştırması	26
Çizelge 3.2 Transformatörde soğutma şekillerinin gösterimi	27
Çizelge 4.1 Transformatörün teknik özellikleri	58
Çizelge 6.1 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için faz akımları açısı değişimleri	93
Çizelge 6.2 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için kaçak akı açısı değişimleri	93
Çizelge 6.3 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı açısı değişimleri	94



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Transformatörlerin sınıflandırılması	1
Şekil 1.2. Transformatör bileşenleri için istatistiksel arıza sonuçları	3
Şekil 1.3. Transformatör arıza tespit yöntemlerinin sınıflandırılması	5
Şekil 1.4. Akım imza analizi metodu	6
Şekil 3.1. Transformatörün yapısı	23
Şekil 3.2. Transformatördeki sac yapıları	24
Şekil 3.3. Nüve tipleri a) Çekirdek tipi b) Mantel tip	24
Şekil 3.4. a) Kuru tip transformatör b) Yağlı tip transformatör	28
Şekil 3.5. B-H histerezis eğrisi.....	30
Şekil 3.6. Tek faz transformatörün temel yapısı	31
Şekil 3.7. a) Yükseltici tip transformatör b) Düşürücü tip transformatör	32
Şekil 3.8. Bir transformatörün elektriksel eşdeğer devresi	34
Şekil 3.9. Üç fazlı transformatörün Yzn11 sargı bağlantısı ve dengeli yük durumu için basitleştirilmiş şematik gösterimi	34
Şekil 3.10. Üç fazlı transformatörün manyetik eşdeğer devresi	35
Şekil 3.11. Transformatördeki güç akış diyagramı	37
Şekil 3.12. Girdap akımlarının oluşması.....	39
Şekil 3.13. Transformatörde sargı ve çekirdek arızalarının etkilerini gösteren görseller	41
Şekil 3.14. (a) Faz-faz (b) Faz-toprak (c) Sarım-sarım kısa devre arızaları	42
Şekil 3.15. Sarım-sarım kısa devre arızasının şematik gösterimi	43
Şekil 3.16. Primer sargıda meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızasının elektriksel eşdeğer devresi.....	43
Şekil 3.17. Üç fazlı transformatörün sarım-sarım kısa devre arızası için manyetik eşdeğer devresi	44
Şekil 3.18. (a) Üç fazlı dengeli yük (b) Üç fazlı dengesiz yük	49
Şekil 3.19. Sac yığını üzerindeki kenar çapaklarından kaynaklanan laminasyon kısa devre arızaları	52
Şekil 3.20. Laminasyon saclarının kesilme işlemi ve çapak oluşumu	53
Şekil 3.21. Laminasyonlar arası kısa devre arızası gösterimi	54
Şekil 4.1. ANSYS® Maxwell ile tasarlanmış örnek bir modelin gösterimi	56

Şekil 4.2. Transformatörün geometrik büyüklükleri.....	58
Şekil 4.3. Transformatör modelleme aşamaları	59
Şekil 4.4. ANSYS® Maxwell ile uyartım devresi oluşturma	61
Şekil 4.5. ANSYS® Maxwell’de analiz ayarlarının yapıldığı arayüz	61
Şekil 4.6. Kaçak akıları tespit etmek için kullanılan sensörlerin konumları.....	62
Şekil 4.7. Bx, By ve Bz denklemlerinin oluşturulması	63
Şekil 4.8. Bx, By ve Bz grafiklerinin oluşturulması	63
Şekil 4.9. ANSYS® Maxwell -3D programında tasarlanan transformatörün sağlıklı durumu için a) Manyetik alan dağılımı b) Manyetik akı vektörü dağılımı	64
Şekil 4.10. Sarım-sarım kısa devre arızasının modeli ve harici eşdeğer devre modeli	65
Şekil 4.11. ANSYS® Maxwell-3D programında tasarlanan transformatörün %1 sarım-sarım kısa devre arızası durumu için manyetik akı vektör dağılımı	66
Şekil 4.12. Kaynak gerilimi dengesizliği için harici eşdeğer devre modeli.....	66
Şekil 4.13. Transformatör çekirdeği modelinin sağlıklı durumu için üstten görünümü ve laminasyon içerisinde akacak olan olası girdap akımı yolu	67
Şekil 4.14. Kenar çapak arızası modeli: a) Karşı perspektif görünüm b) Sağ yandan görünüm c) Arızalı kısmın geometrisi.....	68
Şekil 4.15. Laminasyonlar arası kısa devre arızası modeli ve arızalı kısmın geometrisi	68
Şekil 4.16. ANSYS® Maxwell-3D programında tasarlanan transformatörün laminasyonlar arası kısa devre arıza durumu için a) Manyetik alan dağılımı b) Manyetik akı vektörü dağılımı	69
Şekil 5.1. Simetrik bileşenlerin gösterimi a)Pozitif b) Negatif c) Sıfır.....	71
Şekil 5.2. Dengeli ve dengesiz sistemlerde simetrik bileşenlerin vektörel gösterimleri	72
Şekil 5.3. Açık spektrumu bileşenlerinin vektörel gösterimi.....	76
Şekil 6.1. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için faz akımları-zaman grafikleri a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	81
Şekil 6.2. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için i_a faz akımları-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	82

Şekil 6.3. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için kaçak akı-zaman grafikleri a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	84
Şekil 6.4. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için B_z kaçak akı-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	85
Şekil 6.5. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör akım-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	86
Şekil 6.6. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti.....	88
Şekil 6.7. Sağlıklı durum ve %10 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu	89
Şekil 6.8. Sağlıklı durum ve %10 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	90
Şekil 6.9. Sağlıklı durum ve %2 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu	90
Şekil 6.10. Sağlıklı durum ve %2 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	91
Şekil 6.11. Sağlıklı durum ve %1 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu	92
Şekil 6.12. Sağlıklı durum ve %1 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	92
Şekil 6.13. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti	95
Şekil 6.14. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği durumu için i_a faz akımı-frekans spektrumu	96
Şekil 6.15. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği durumu için kaçak akı-frekans spektrumu	97
Şekil 6.16. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için uzay vektör akım-frekans spektrumu	98

Şekil 6.17. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu	98
Şekil 6.18. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için akım faz açıları-frekans spektrumu	99
Şekil 6.19. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	99
Şekil 6.20. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	100
Şekil 6.21. Kenar çapak arızası için faz akımları-zaman grafiği	101
Şekil 6.22. Sağlıklı durum ve arızalı durum için faz akımları-frekans spektrumları a) i_a -frekans spektrumu b) i_b -frekans spektrumu c) i_c -frekans spektrumu...	102
Şekil 6.23. Kenar çapak arızası için kaçak akı-zaman grafiği	103
Şekil 6.24. Sağlıklı durum ve arızalı durum için kaçak akı-frekans spektrumları a) B_{za} -frekans spektrumu b) B_{zb} -frekans spektrumu c) B_{zc} -frekans spektrumu	104
Şekil 6.25. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için uzay vektör akım-frekans spektrumu	105
Şekil 6.26. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu	106
Şekil 6.27. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için akım faz açıları-frekans spektrumu	106
Şekil 6.28. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	107
Şekil 6.29 Kenar çapak arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	108
Şekil 6.30. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için faz akımları-zaman grafiği	109
Şekil 6.31. Sağlıklı durum ve arızalı durum için faz akımları-frekans spektrumları a) i_a -frekans spektrumu b) i_b -frekans spektrumu c) i_c -frekans spektrumu...	110
Şekil 6.32. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akı-zaman grafiği....	111
Şekil 6.33. Sağlıklı durum ve arızalı durum için kaçak akı-frekans spektrumları a) A fazı kaçak akı-frekans spektrumu b) B fazı kaçak akı-frekans spektrumu c) C fazı kaçak akı-frekans spektrumu	112

Şekil 6.34. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör akım-frekans spektrumu	113
Şekil 6.35. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu	113
Şekil 6.36. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için akım faz açıları-frekans spektrumu	114
Şekil 6.37. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	114
Şekil 6.38. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu	115



SİMGELER VE KISALTMALAR

AA	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
ANN	Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Network)
CSA	Akım İmza Analizi
DA	Doğru Akım
DGA	Yağda Çözülmüş Gaz Analizi (Dissolved Gas Analysis)
DT	Karar Ağaçları (Decision Tree)
DWT	Ayrık Dalgacık Dönüşümü (Discrete Wavelet Transform)
EMK	Elektromotor Kuveet
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FRA	Frekans Tepki Analizi
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
KNN	k-en yakın komşu ağı
MMK	Manyetomotor Kuvvet
OG	Orta Gerilim
PD	Kısmi Deşarj
PNN	Olasılıksal Sinir Ağı (Probabilistic Neural Network)
PST	Faz Kaydırıcı Transformatör
RVM	Uygun Vektör Makinesi (Relevance Vector Machine)
SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
SVM	Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine)
TTF	Sarım-Sarım Kısa Devre Arızası (Turn to Turn Fault)

İndisler

$\mathfrak{R}_{TTF}$	Toplam eşdeğer relüktans	(A.sarım/metre)
$\mathfrak{R}_a$	A fazının relüktansı	(A.sarım/metre)
$\mathfrak{R}_b$	B fazının relüktansı	(A.sarım/metre)
$\mathfrak{R}_c$	C fazının relüktansı	(A.sarım/metre)
ϕ_{aTa}	A bacağındaki toplam akı	(weber)
ϕ_{af}	A fazının MMK ile üretilen çekirdek akısı	(weber)
a	Transformatör dönüştürme oranı	(-)
B_x	X eksenindeki manyetik akı yoğunluğu	(T)
B_y	Y eksenindeki manyetik akı yoğunluğu	(T)
B_z	Z eksenindeki manyetik akı yoğunluğu	(T)
D	Elektriksel akı yoğunluğu	(C/m ²)
E	Elektrik alan şiddeti	(V/m)
E_p	Primer EMK	(V)
E_s	Sekonder EMK	(V)
f_0	Temel frekans	(Hz)
f_n	n'inci harmonik frekansı	(Hz)
$-f_s$	Negatif sıralı harmonik bileşeni	(Hz)
H	Manyetik alan şiddeti	(A/m)
I_0	Sıfır bileşen akımı	(A)
I_1	Pozitif dizi akımı	(A)
I_2	Negatif dizi akımı	(A)
I_a	A fazı akımı	(A)
I_b	B fazı akımı	(A)
I_c	C fazı akımı	(A)

I_d	d eksenî akımı (doğrudan eksen)	(A)
I_{oc}	Açık devre testindeki akım	(A)
I_p	Primer akım	(A)
I_q	q eksenî akımı (kuadratür eksen)	(A)
I_s	Sekonder akım	(A)
I_{ua}	A fazına ait uyarma akımı	(A)
I_{ub}	B fazına ait uyarma akımı	(A)
I_{uc}	C fazına ait uyarma akımı	(A)
I_α	Alfa eksenî akımı	(A)
I_β	Beta eksenî akımı	(A)
i_f	Arıza yolundan geçen akım	(A)
J	Akım yoğunluğu	(A/m ²)
L_{a_kd}	A fazı üzerindeki kısa devrenin öz indüktansı	(H)
M_{as_kd}	A fazı indüktansı ve kısa devre indüktansının karşılıklı indüktansı	(H)
M_{b_kd}	B fazı indüktansı ve kısa devre indüktansının karşılıklı indüktansı	(H)
M_{c_kd}	C fazı indüktansı ve kısa devre indüktansının karşılıklı indüktansı	(H)
N_a'	Sağlıklı durum için sarım sayısı	(-)
N_{kd}	Kısa devre durumundaki sarım sayısı	(-)
P_{in}	Giriş gücü	(W)
P_{out}	Çıkış gücü	(W)
R_c	Çekirdek direnci	(Ω)
R_{eq}	Eşdeğer direnç	(Ω)
r_f	Akım sınırlayıcı direnç	(Ω)
R_{kd}	Kısa devre empedansı	(Ω)
R_p	Primer direnç	(Ω)

R_s	Sekonder direnç	(Ω)
t_0	Başlangıç zamanı	(s)
t_n	n'inci zaman büyüklüğü	(s)
V_0	Sıfır bileşen gerilimi	(V)
V_1	Pozitif dizi gerilimi	(V)
V_2	Negatif dizi gerilimi	(V)
V_a	A fazı gerilimi	(V)
V_{an}	B fazına ait faz-nötr gerilimi	(V)
V_b	B fazı gerilimi	(V)
V_{bn}	B fazına ait faz-nötr gerilimi	(V)
V_c	C fazı gerilimi	(V)
V_{cn}	C fazına ait faz-nötr gerilimi	(V)
V_d	d eksen gerilimi	(V)
V_{oc}	Açık devre testindeki gerilim	(V)
V_p	Primer gerilim	(V)
V_q	q eksen gerilimi	(V)
V_s	Sekonder gerilim	(V)
V_α	Alfa eksen gerilimi	(V)
V_β	Beta eksen gerilimi	(V)
X_{eq}	Eşdeğer reaktans	(Ω)
X_m	Mıknatıslanma reaktansı	(Ω)
X_p	Primer reaktans	(Ω)
X_s	Sekonder reaktans	(Ω)
Y_e	Uyartım admitansı	($\mathcal{U}$)
Z_{eq}	Eşdeğer empedans	(Ω)

Z_p	Primer empedans	(Ω)
Z_s	Sekonder empedans	(Ω)
Z_{SEH}	Toplam seri empedans	(Ω)
ρ	Yük yoğunluğunu	(C/m ³)

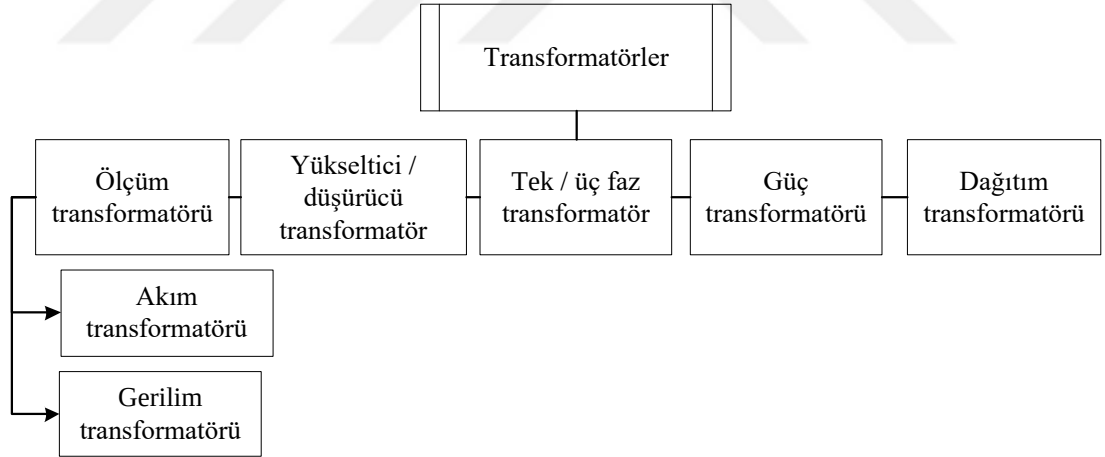


1. GİRİŞ

1.1 Genel Bakış

Elektrik enerjisinin üretim noktalarından tüketim merkezlerine güvenli, verimli ve kesintisiz bir şekilde iletilmesi ve dağıtılması amacıyla oluşturulan; iletim ve dağıtım hatları, trafo merkezleri, anahtarlama ekipmanları ve kontrol sistemlerini içeren entegre altyapıya elektrik şebekesi denir. Elektrik şebekesinin güvenilir ve kesintisiz olması için enerjinin değişken olmayan gerilim ve frekansta iletilmesi gerekmektedir.

Transformatörler, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımında kullanılan hayati bir öneme sahip elektromanyetik cihazlardır. Transformatörler, elektrik enerjisini yüksek gerilim seviyesinden düşük gerilim seviyesine ya da tam tersi yönde dönüştürme işlemini gerçekleştirmektedir. Alternatif akımın (AA) güvenli ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi için transformatörlerin kullanımı vazgeçilmezdir. Şekil 1.1’de transformatör türleri ana hatlarıyla gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Transformatörlerin sınıflandırılması

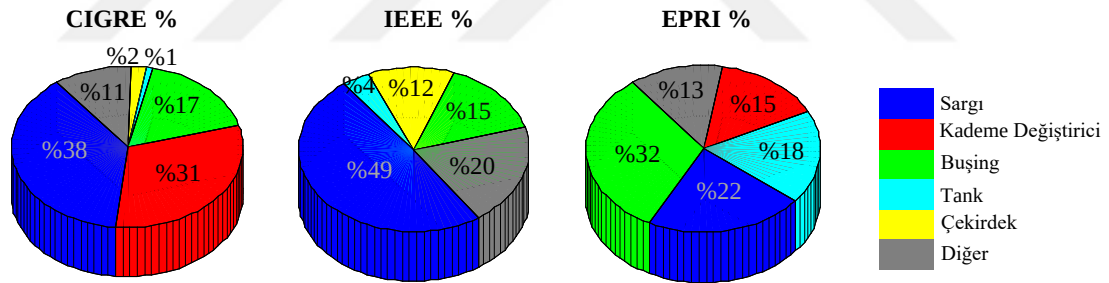
Transformatörler, soğutma sistemlerine göre yağlı ve kuru tip olarak ikiye ayrılır. Yağlı tip transformatörler, yalıtım ve soğutma amacıyla mineral yağlar ya da sentetik sıvılar kullanılmaktadır. Bu durum, transformatörlerin soğutma kapasitelerini artırarak enerji verimliliğini artırmalarına imkân tanımaktadır. Ancak yangın ve çevresel kirlilik riski taşımaları, güvenlik ve çevre yönetimi açısından dikkat gerektirir. Buna

karşılık, kuru tip transformatörler yalıtım ve soğutma için sıvı yerine hava veya özel reçineler gibi katı malzemeler kullanır. Bu özellikleri sayesinde yangın riski düşük, çevreye daha duyarlı ve bakım gereksinimleri azdır. Yağlı tip transformatörler genellikle açık hava koşullarında ve yüksek güçlü enerji ihtiyaçlarında tercih edilirken, kuru tip transformatörler kapalı alanlarda ve hassas uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Her iki tipin seçiminde maliyet, güvenlik ve çevresel etkiler dikkate alınmalıdır.

Transformatörlerin kullanım alanları giderek genişlemekte ve bu cihazlarla ilgili araştırmalar artmaktadır. Ancak, transformatörlerde ortaya çıkabilecek arızalar hem teknik hem de ekonomik boyutlarıyla kritik bir öneme sahiptir. Transformatördeki bir arıza, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin kesintiye uğramasına neden olabilir; bu da geniş çaplı elektrik kesintileriyle sonuçlanabilir. Bu tür kesintiler, sanayi tesislerinde üretim kaybına, ticari işletmelerde ekonomik zarara ve günlük yaşamda aksamalara yol açabilir. Ayrıca arızaların giderilmesi genellikle yüksek maliyet gerektirdiğinden, işletme bütçelerine ciddi bir ekonomik yük bindirebilir. Bunun yanı sıra, transformatörlerdeki arızalar yangın veya patlama gibi tehlikelere neden olabilir; bu da güvenlik açısından ciddi sonuçlar doğurabilir. Bu nedenle, transformatörlerin düzenli bakım ve izleme süreçleriyle arızalardan korunması oldukça önemlidir.

Transformatörler, dayanıklı bir yapıya ve güvenilir çalışma şartlarına sahiptir. Ancak, zorlu işletme koşulları, yüksek gerilim değişimleri, aşırı yüklenme ve elektriksel bozulmalar gibi faktörler transformatörlerde beklenmedik arızalara yol açabilmektedir. Bu arızalar, özellikle kısa devre ve izolasyon problemleri şeklinde ortaya çıkmakta ve transformatörlerin performansını olumsuz etkilemektedir. Transformatörlerde oluşabilecek bu tür arızaların önceden tespit ve analiz edilmesi, enerji iletiminde sürekliliğin sağlanması, sistem güvenilirliğinin artırılması ve ekonomik kayıpların önlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Transformatörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için sargılar, yalıtımlar, çekirdek, tank, burçlar, yağ ve yük altında kademe değiştiricileri gibi temel bileşenlerin düzenli olarak izlenmesi gerekmektedir.

Transformatörlerde meydana gelen arızalar genel olarak dahili ve harici olmak üzere iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bu arızaların temel nedenleri arasında yıldırım, anahtarlama geçişleri, yalıtım bozulmaları, nem, aşırı yüklenme, hat arızaları, elektriksel ve mekanik stresler, tesisler ve fabrikalar arasında dikkatsiz taşıma, depremler ve transformatör yağ tankında meydana gelen patlamalar yer almaktadır. Şekil 1.2’de verilen istatistiksel veriler, transformatör arızalarının büyük bir kısmının dahili sorunlardan kaynaklandığını göstermektedir [1, 2]. Dahili arızalar; elektriksel, manyetik, mekanik, kimyasal ve çevresel kaynaklı olabilmektedir. Dahili arızalar genellikle geçici bir durum olarak başlamakta ve ilk aşamada tank içerisinde küçük bir elektriksel deşarj şeklinde ortaya çıkmaktadır. Ancak, bu tür bir arıza erken tespit edilmediğinde, deşarj akımları transformatöre ciddi ve kalıcı zararlar verebilmektedir [3]. Dahili arızalar; sargı kısa devre arızaları, kaçak akı problemleri, aşırı ısınma, çekirdek veya sargıların mekanik olarak yer değiştirmesi, yük altında kademe değiştiricisi arızaları ve laminasyon arızaları gibi sorunlar şeklinde sıralanabilir [1, 5]. Harici arızalar ise güç sisteminde; harici kısa devreler, nem, aşırı ısı, aşırı yüklenme ve aşırı gerilim gibi uygunsuz koşullardan kaynaklanır.



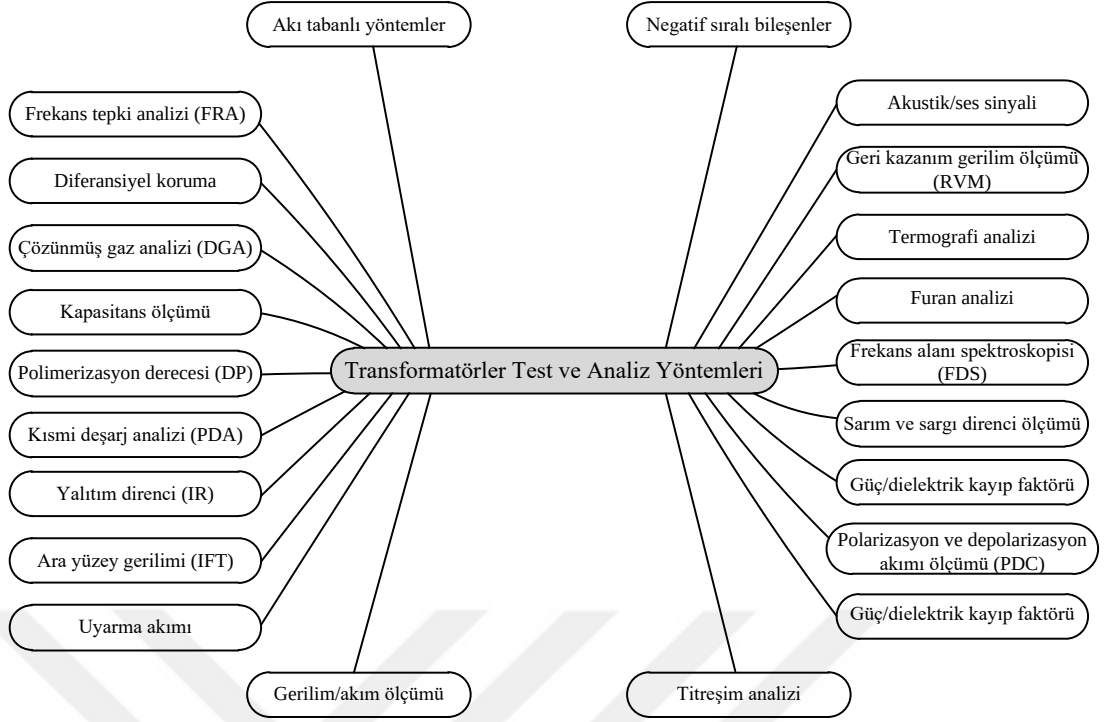
Şekil 1.2. Transformatör bileşenleri için istatistiksel arıza sonuçları [1,2]

Transformatörlerde meydana gelen arızalar, türüne ve şiddetine bağlı olarak farklı fiziksel, elektriksel ve termal problemlere sebep olabilir. Örneğin, sargılarda meydana gelen arızalar kısa devre akımlarını artırarak sistemin aşırı yüklenmesine yol açabilir. Termal etkiler, transformatörün aşırı ısınmasına ve izolasyon malzemelerinin bozulmasına neden olabilmekte ve bu durum trafonun ömrünü kısaltabilmektedir. Ayrıca, aşırı sıcaklık artışı yangın riskini de beraberinde getirir. Çekirdek arızaları ise manyetik akının dağılımını etkileyerek enerji kayıplarını artırabilir. Yüksek şiddetli arızalar transformatör sargılarında mekanik stres

oluşturarak yapısal bozulmalara yol açabilir. Bu nedenle, arızaların erken tespiti ve uygun müdahale yöntemlerinin devreye alınması transformatörün ve enerji sisteminin güvenilirliği açısından büyük önem taşır. Erken arıza tespitinin temel amacı, arızayı erken aşamada belirleyerek daha büyük sonuçlar doğurabilecek olumsuz etkilerin önüne geçmektir. Bunun yanı sıra, ciddi hasarları önlemek ve gerekli işlemleri yapabilmek için zaman kazandırmaktadır. Bu işlemler arasında yeniden yapılandırma, planlı bakım ya da acil onarımlar yer alır. Arıza tespitinde çevrimiçi ve çevrimdışı yöntemler arasında belirgin bir ayrım bulunmaktadır. Çevrimiçi testler, transformatör çalışır durumdayken gerçekleştirilmekte ve belirli fiziksel parametrelerin gerçek zamanlı izlenmesi yoluyla transformatörün anlık teşhisini mümkün kılmaktadır. Diğer yandan çevrimdışı testler, transformatörün programlı bir durdurma sırasında ya da herhangi bir nedenle devre dışı bırakılması durumunda uygulanır. Bu testler, en yaygın kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır. Güç transformatörleri için teşhis teknikleri, geleneksel yöntemler ile yenilikçi veya modern yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilir. Geleneksel yöntemler, uzun süredir sistematik olarak kullanılan, etkinlikleri kapsamlı bir şekilde test edilmiş ve kesin standartlarla desteklenen uygulama ve tespit prosedürleridir. Buna karşılık, modern teknikler geliştirilmekte veya deneysel aşamada olan yeni yöntemleri kapsar. Genel olarak, bu modern yaklaşımlar çevrimiçi uygulamaya uygun olup sonuçların kolayca yorumlanabilmesini sağlar ve nispeten düşük maliyetlidir.

Yük altında kademe değiştiricisi olmayan transformatörlerde arızaların yaklaşık %40'ı sargılar ve çekirdeğin yer aldığı aktif kısımda meydana gelmektedir. Aktif kısımdaki arızaların yaklaşık %75'ine ise sargı kısa devre arızaları neden olmaktadır [6, 7]. Bu nedenle transformatörlerdeki sargı arızalarının tespiti, cihazın güvenli ve verimli çalışmasının sağlanması için kritik öneme sahiptir. Bu tür arızalar genellikle mekanik, termal ya da elektriksel stresler sonucunda meydana gelir ve zamanında tespit edilmemesi durumunda ciddi hasarlara yol açabilir.

Transformatörlerde oluşan arızaların belirlenmesi amacıyla çeşitli durum izleme ve arıza tespit teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler Şekil 1.3'te gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Transformator arıza tespit yöntemlerinin sınıflandırılması

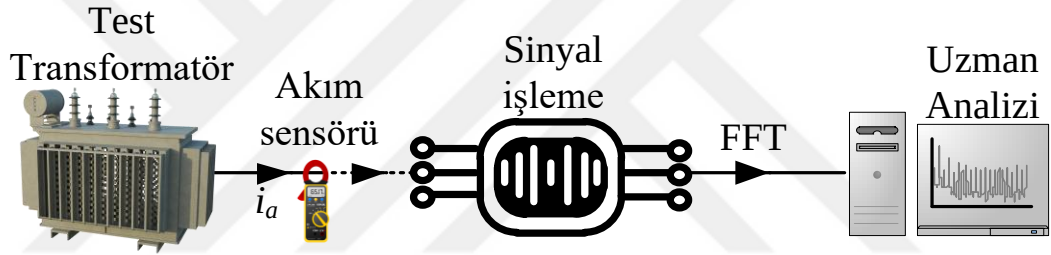
Sargı arızalarının tespitinde kullanılan yöntemler üç ana kategoriye ayrılabilir:

- Frekans karakteristiklerine dayalı inceleme,
- Akım veya gerilim bileşenlerine dayalı inceleme,
- Akı bileşenlerine dayalı inceleme.

Bu arıza tespit yöntemlerinin kullanım yerlerine göre çeşitli üstünlükleri olabilmektedir. Arızanın türüne göre en erken tespit yöntemi tercih edilmelidir.

Elektriksel büyüklüklerin analizinde, transformatorün sargı akımları, gerilimleri ve manyetik akıları gibi elektriksel ve manyetik değişkenler incelenir. Herhangi bir elektriksel arıza durumunda, bu değişkenler karakteristik hata sinyalleri barındırmaktadır. Özellikle sargı akımının analizi, düşük maliyetli olması ve gerçek zamanlı izleme imkânı sunması nedeniyle en yaygın kullanılan analiz çeşididir. Ancak sargı akımı; besleme kaynağı harmonikleri, statik ve dinamik yük koşulları ile çeşitli arıza türlerinden etkilenebilir. Elektriksel büyüklüklerin zaman ekseninde doğrudan incelenmesi, hata tespiti açısından zorluklar içermektedir. Bu nedenle, söz

konusu değişkenler frekans eksenine dönüştürülerek frekans spektrumu oluşturulur ve bu spektrum üzerinden arıza tespiti gerçekleştirilir. Transformatörlerde sargı akımının spektrum analizi, akım imza analizi yöntemine benzer şekilde yapılmaktadır. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi, bu yöntem temel olarak üç aşamadan oluşur: İlk olarak sargı akımı, sensörler yardımıyla ölçülerek analog veri toplanır ve belirli bir örnekleme frekansında dijital bilgiye dönüştürülür. Daha sonra bu dijital verilere, sinyal işleme teknikleri uygulanarak frekans spektrumu elde edilir. En yaygın kullanılan sinyal işleme yöntemi Hızlı Fourier Dönüşümü'dür. Oluşturulan frekans spektrumu, transformatör sargılarındaki karakteristik arıza harmoniklerini ortaya çıkarır. Bu harmonikler, arızanın türü, şiddeti ve diğer arıza bilgileri hakkında kapsamlı veriler sunar. Böylelikle transformatörlerin durum izleme ve arıza tespiti, etkin bir şekilde yapılabilir.



Şekil 1.4. Akım imza analizi metodu [8]

Son yıllarda transformatör sargı arızalarından sarım-sarım arası arızayı (TTF) tespit etmek için manyetik akının kullanımı sıklıkla tercih edilmeye başlanmıştır. Manyetik akı, transformatörün çekirdeğinden geçen çekirdek akısı ve manyetik olmayan ortamdan (örneğin yağ ve tank) geçen kaçak akı olmak üzere ikiye ayrılır. Sağlıklı bir transformatörde manyetik akı çizgileri çekirdek ile sınırlıdır. Ancak bir TTF meydana geldiğinde manyetik akının dağılımı değişir ve akının bir kısmı, kaçak akı olarak sargı eksenine yönelir. Kaçak akı, transformatör sargılarından birinden geçerken diğerinden geçmeyen akı olarak tanımlanır ve bu akının davranışı, manyetik devrenin relüktansı ile kaçak yolun relüktansı arasındaki orana bağlıdır. Transformatör çekirdeğine veya sargıların çevresine yerleştirilen akı sensörleri, araştırma bobinleri sayesinde kaçak akı verileri analiz edilerek arıza tespiti gerçekleştirilebilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışması, transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların erken ve hassas tespitine yönelik yöntemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Tezde hedeflenen çalışmalar:

- ✓ Sarım-sarım kısa devre, kaynak gerilimi dengesizliği ve laminasyon arızaları gibi farklı arıza senaryolarının incelenmesi ve arıza tespitlerinin gerçekleştirilmesi,
- ✓ İlgili arıza durumlarında akım ve kaçak akı gibi elektriksel parametrelerin hem zaman hem de frekans eksenlerinde incelenerek, arıza karakteristiklerinin detaylı olarak ortaya konması,
- ✓ Arızaları erken aşamada ve hassas bir şekilde tespit edebilmek amacıyla simetrik bileşenler, faz açısı spektrumları ve uzay vektör analizlerine dayalı yaklaşımların geliştirilmesi,

şeklinde sıralanabilir.

1.3 Tezin İçeriği

Bu tez çalışması 7 bölümden meydana gelmektedir. Bölüm 2’de kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde sırasıyla sarım-sarım kısa devre arızası, kaynak gerilimi dengesizliği ve laminasyon arızalarının tespitine yönelik çalışmalar incelenmiştir.

Bölüm 3’te transformatörlerde meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızası, kaynak gerilim dengesizliği ve laminasyon arızaları hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Bölüm 4’te ANSYS® Maxwell programında transformatörün nasıl modellendiği, sağlıklı durumda ve bahsedilen arıza senaryolarında elde edilen sonuçların nasıl analiz edildiği detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Bölüm 5’te simetrik bileşenler yönteminin transformatörler için arıza tespitinde kullanımı matematiksel denklemlerle sunulmuştur.

Bölüm 6’da, benzetim sonuçlarından elde edilen sinyaller kullanılarak geliştirilen metotların, arıza tespitinde ve arıza türünü ayırtmada etkin sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Bölüm 7’de ise, bu tezde elde edilen sonuçlar, bu sonuçların literatüre katkısı ve yapılması planlanan sonraki çalışmalar için öneriler sunulmaktadır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Transformatörlerin arıza tespitinde, geçmişten günümüze kısmi deşarj ölçümü (PD) [9], yağda çözünmüş gaz analizleri (DGA) [9, 10], frekans tepki analizi (FRA) [11, 12] gibi geleneksel teknikler kullanılmaktadır. Geleneksel olarak çevrimdışı gerçekleştirilen bu tekniklerden bazıları, örneğin DGA ve FRA, son zamanlarda çevrimiçi olarak da uygulanabilmektedir. Ancak bu çevrimiçi uygulamaların genellikle çevrimdışı yöntemler kadar güvenilir sonuçlar sağlamadığı, yüksek maliyetli olduğu ve çoğunlukla yüksek güçlü transformatörler ile sınırlı kaldığı gözlemlenmektedir.

Günümüzde, transformatör arızalarının tespiti ve teşhisine yönelik geliştirilen yeni tekniklerin büyük bir bölümü diferansiyel rölelerin kullanımına dayanmaktadır. Hâlihazırda yaygın olarak kullanılan bu tür röleler ile arızaya müdahale edilmesi için anlık gerilim ve akım değerlerinin ölçülmesi gerekmektedir. Bu sayede, transformatöre ek sensörler yerleştirilmesine ihtiyaç duyulmaksızın bu ölçüm verileri kullanılarak yeni stratejiler veya algoritmalar geliştirilebilmekte ve uygulanabilmektedir. Diferansiyel röleler, transformatörün primer ve sekonder sargı akımlarını aynı referans seviyesine dönüştürerek aralarındaki farkı hesaplamakta ve bu farkı temel alarak arızaları başlangıç aşamasından itibaren tespit etmektedir. Ancak diferansiyel koruma sistemi, geçici çalışma koşullarında, güç şebekesine bağlantı sırasında veya akım transformatörlerinin doyuma ulaşmasına neden olan harici arızalarda yanlış alarmlar üretebilir [13, 14]. Bu yanlış sinyallerin etkilerinden kaçınmak amacıyla $\Delta V-I$ diyagramı, park bileşenlerinin analizi ve negatif sıralı akımların analizi gibi birçok kısıtlama algoritması ve yöntem uygulanmaktadır.

Son yıllarda, makine öğrenimi ve yapay zeka, transformatör arızalarının tespiti ve sınıflandırılmasında etkin bir şekilde kullanılmıştır. Olasılıksal Sinir Ağı (PNN), transformatörlerdeki farklı çalışma koşullarını ayırt etmek için kullanılmıştır [16]. Balaga, vd. (2015), Genetik algoritma ile eğitilmiş Yapay Sinir Ağları'nı (ANN) kullanarak arızaların tespiti ve sınıflandırılmasını sağlamıştır [17]. Destek Vektör Makineleri (SVM), transformatör sargılarındaki mekanik ve kısa devre arızalarını belirlemek için tercih edilmiştir [18]. Uygun Vektör Makinesi (RVM), PNN ve

SVM'ye kıyasla daha iyi performans sunduğu belirtilerek, arıza tespiti ve sınıflandırma amacıyla önerilmiştir [19]. Shin, vd. (2003), geleneksel diferansiyel rölelerin arıza tespit hassasiyetini artırmak ve yanlış işlemleri önlemek için bulanık mantık tabanlı bir yöntem kullanmışlardır [20]. Segatto, vd. (2006), transformatör koruması için ANN tabanlı iki farklı alt program geliştirmiştir [21]. Shah, vd. (2013), Ayrık Dalgacık Dönüşümleri (DWT) ile SVM'yi birleştirerek diferansiyel koruma sağlamışlardır [22]. Rastgele Orman (RF) sınıflandırıcısı, dahili arızalar ile demeraj (inrush) akımları arasındaki farkı belirlemek için uygulanmıştır [23]. DWT ve ANN, dahili transformatör arızalarının tespiti ve sınıflandırılması için birlikte kullanılmıştır [24]. Dalgacık tabanlı koruma ve arıza sınıflandırması, özel bir transformatör türü olan Faz Kaydırıcı Transformatörler (PST) üzerinde gerçekleştirilmiştir [24,25]. Topluluk tabanlı öğrenme, PST'lerdeki 40 iç arızayı sınıflandırmak ve ANN ile SVM'nin performansını karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır [27]. Karar Ağaçları (DT) tabanlı algoritmalar, PST'ler ve transformatörlerle iç içe geçmiş güç sistemlerinde dahili arızaları ve geçici bozulmaları ayırt etmek için tercih edilmiştir [28]. Yedi farklı makine öğrenimi algoritmasının çeşitli özellik setleriyle arıza tespiti ve yerleştirme konusundaki uygulanabilirliği araştırılmıştır [29]. Son olarak, kenar çapakları ve laminasyon yalıtım arızalarının tespiti ve sınıflandırılması için SVM, K-en yakın komşu (KNN) tekniği ve DT algoritmalarını kullanılmıştır [30]. Bu çalışmalar, transformatör arızalarının tespiti ve korunmasında makine öğrenimi tekniklerinin etkinliğini ve esnekliğini göstermektedir.

Leal, vd. (2024), yaptıkları çalışmada güç transformatörlerinde meydana gelen sarımlar arası kısa devrelerin tespitine yönelik yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını aşmak amacıyla, diferansiyel admitans izleme yöntemi önerilmiş ve bu yöntemle kısa devrelerin erken tespitine olanak sağlanmıştır. Çalışmada, transformatör sargılarındaki elektriksel değişimlerin admitans parametreleri üzerindeki etkileri teorik olarak modellenmiş ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen deneylerle doğrulanmıştır. Deneysel çalışmalar, sargıların farklı kısımlarında meydana gelen kısa devre durumlarının admitans profillerinde belirgin değişimlere yol açtığını göstermiştir. Bu değişimlerin analizi için sinyal işleme teknikleri kullanılarak hata türleri sınıflandırılmış ve hassas tespit algoritmaları geliştirilmiştir. Önerilen yöntem diğer mevcut tekniklerle

karşılaştırılarak, özellikle düşük arızalı durumlarda daha yüksek doğruluk ve daha hızlı yanıt süreleri elde edildiğini belirtmektedir. Ancak yöntemin uygulanmasında yüksek veri işleme maliyeti ve algoritma karmaşıklığı bulunmaktadır. Ek olarak, gerçek saha koşullarında yöntemin uygulanabilirliği bilinmemektedir [31].

Solak, vd. (2022), güç transformatörlerinde iki paralel iletken arasındaki sarım-sarım kısa devrelerin tespiti için negatif sıralı akım integral yöntemini önermektedir. Araştırma, düşük şiddetli arızaların belirlenmesinde yüksek hassasiyet sağladığını ve geleneksel diferansiyel koruma yöntemlerine göre daha hızlı sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Yöntemin temel avantajlarından biri, sistemde meydana gelen hataların yarattığı asimetrielerin negatif sıralı bileşenler oluşturması sayesinde, arızanın yük dengesizliklerinden etkilenmeden tespit edilebilmesidir. Bununla birlikte, çok düşük seviyeli arızalarda gürültülere duyarlılık ve transformatör topolojisine bağlı değişken arıza eşiği, yöntemin olası dezavantajları arasında yer almaktadır. Ayrıca, yük akımlarındaki yüksek harmonikli bileşenler yöntemin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir ve bu durum ek filtreleme gereksinimlerini ortaya çıkarabilir [32].

Cabanas, vd. (2007), yüksek gerilim sargılarının yakınına araştırma bobinleri yerleştirerek kaçak akı tabanlı sarım-sarım kısa devre arızasını tespit etmişlerdir. Çalışmada transformatör, önce sağlıklı ve arızalı durumlar için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Daha sonra önerilen tekniğin geçerliliği deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Sensörlerin yerleştirilmesinde, yüksek gerilim sargısından belirli bir mesafenin korunması gerekliliği, transformatörün tasarımının ve tank boyutlarının değiştirilmesini zorunlu kıldığından, yöntemin uygulanabilirliğini sınırlamaktadır. Ayrıca, sensör uçlarına bağlı TTF tespit devresinin, çevrimiçi çalışma koşullarında yüksek gerilim sargısındaki geçici dalgalanmalardan korunması gerekmekte olup arızalı sargıdaki arıza konumunun belirlenmesi mümkün değildir [33].

Haghjoo ve Mostafaei (2016), yaptıkları çalışmada transformatörlerde sarım-sarım kısa devre arızası tespitini ve arıza konumunun belirlenmesini amaçlayan manyetik akı tabanlı bir yöntem sunmuşlardır. Yöntem, manyetik devrede meydana gelen

anormal akı dağılımlarını analiz ederek arızayı ve arızanın konumunu tespit etmektedir. Bu sayede transformatör sargılarındaki fiziksel konuma bağlı olarak farklı arıza türleri tanımlanabilmekte ve geleneksel elektriksel parametre ölçümüne kıyasla daha doğrudan bir arıza teşhis süreci sunulmaktadır. Ancak yöntemle ilgili bazı sınırlamalar bulunmaktadır. Araştırma bobini olarak adlandırılan manyetik sensörlerin konumlandırılması ve kalibrasyonu, yöntemin hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu sensörlerin transformatör yapısına uygun şekilde monte edilmesi, yalnızca transformatörün üretim sürecinde mümkün olup, bu durum karmaşık bir mühendislik sorunu olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, yöntemin doğru bir şekilde çalışması için transformatörün ayrıntılı manyetik modelinin çıkarılması gerekliliği, uygulama maliyetlerini artırabilmektedir [34].

Haghjoo, vd. (2018), transformatörün farklı konumlarındaki akıları ölçmek amacıyla nüve bacalarına araştırma bobinleri yerleştirmişlerdir. Tasarladıkları kaçak akı sensörü yapısı, transformatörün arızalı fazını anında tespit ederek arızanın türünü belirleyen bir teknik sunmaktadır. Normal çalışma koşullarında, nüve bacağından geçen akılar araştırma bobinlerinde simetrik bir gerilim indüklemektedir. Ancak, sargıda bir arıza oluştuğunda akı simetrisi bozularak bobinlerde farklı gerilimler indüklenir. TTF arızası meydana geldiğinde sensör çıkışlarındaki gerilim değişimi, kaçak akı dağılımının bozulduğunu göstermektedir. Bir dağıtım transformatörü üzerinde yapılan deneyler, tüm sargılardaki TTF'lerin %1'den daha azının tespit edilebilir olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, önerilen tekniğin, kademe değiştiricisi, dengesiz yük durumu, simetrik olmayan kaynak gerilimleri ve asimetrik harici kısa devre koşulları gibi faktörlerden bağımsız olduğu vurgulanmıştır. Bu yöntem, transformatörün üretim sürecinde uygulanabilir veya mevcut transformatörlere araştırma bobinleri monte edilebilmesi için sargıların sökülmesini gerektirir. Bununla birlikte, yöntem karmaşık bir sargı yapısının tasarlanmasını da zorunlu kılmaktadır [35].

Venikar, vd. (2017), yaptıkları çalışmada, transformatörlerde dahili arızaların çevrimiçi olarak tespit edilmesine yönelik, kaçak akı analizi tabanlı bir teşhis yöntemi sunmuşlardır. Çalışmada, transformatör sargılarına ek olarak yerleştirilen araştırma bobinleri ile sarımlar arası kısa devre arızası ve mekanik bir arıza olan

sargı yer değişimi arızası tespit edilmiştir. Ek olarak, sonuçların transformatörün yk koşullarından, vektör grubundan, sargı yapısından, dengesiz besleme geriliminden, kaynak gerilimi harmoniklerinden, manyetik doyumdan ve demeraj akımı gibi ekstrem koşullardan bağımsız olarak güvenilir arıza tespiti yapabildiği vurgulanmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, araştırma bobini tabanlı yöntemlerin dezavantajı; transformatörün yapım aşamasında uygulanabilir olması, karmaşık bir devre yapısına sahip olması ve transformatörün fiziksel yapısına müdahaleci bir yapıda olmasıdır [36].

Venikar, vd. (2016), transformatörlerin sarımlar arası kısa devre arızalarını erken aşamada tespit etmek amacıyla pozitif sıralı empedans farkı ve negatif sıralı akım farkı hesaplamalarına dayalı bir yöntem önermişlerdir. Bu parametrelerin analizi ile transformatörün plaka bilgileri ve test sonuçları kullanılarak yeni bir karakteristik eğri oluşturulmuştur. Yapılan testler neticesinde ticari olarak kullanılan çift eğimli diferansiyel koruma şemalarına kıyasla önerilen yöntemin önemli ölçüde hassasiyet sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca nerilen yöntem, transformatörün işletme koşullarından bağımsız olarak hassas arıza tespiti yapabilmektedir ve yük altında ayarlanabilir algoritması sayesinde dinamik sistemlere uyum sağlayabilmektedir. Ancak yöntemin hassasiyeti, transformatörün pozitif ve negatif sıralı parametrelerinin sürekli izlenmesine ve algoritmanın doğru kalibrasyonuna bağlıdır [37].

Xian, vd. (2024), yaptıkları çalışmada bir dağıtım transformatörünün sarımlar arası kısa devre arızasını tespit etmek için güç kaybı değişimlerine dayalı yeni bir yöntem önermişlerdir. Transformatörlerde sarımlar arası kısa devrelerin, elektriksel özelliklerde ve güç kaybı değerlerinde gözle görülür değişikliklere neden olduğu ve aktif ile reaktif güç kayıplarının izlenmesiyle potansiyel arıza senaryolarının tespit edilebileceği belirtilmiştir. Yük altındaki transformatörün g kaybındaki değişimleri analiz eden algoritmalar geliştirilmiş ve kısa devre seviyelerindeki farklı durumlarda sistem performansı test edilmiştir. Yöntemin avantajları arasında, geleneksel ölçüm sistemlerine bağımlı olmaması, farklı yük koşullarına uyum sağlayabilmesi ve harici sensörlere ihtiyaç duymadan doğrudan veri işleyebilmesi yer almaktadır. Dezavantajları ise yük değişimlerine ve elektriksel dengesizliklere karşı hassasiyet

göstermesidir. Özellikle şebekelerde yüksek dinamik yük değişimlerinin meydana geldiği durumlarda güç kaybı ölçümleri yanlış pozitif alarmlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, güç kaybı analizinin doğru ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için yüksek çözünürlüklü ölçüm cihazlarının gelişmiş veri işleme algoritmaları ile birlikte kullanılması gerekmektedir [38].

Hajiaghasi, vd. (2021), yaptıkları çalışmada güç transformatörlerinde sarımlar arası kısa devre arızalarının tespitine yönelik olarak kaçak akı analizi ve titreşim tabanlı izleme tekniklerini değerlendirmişlerdir. Kaçak akı analizi için araştırma bobini, titreşim analizi için ise düşük maliyetli bir ivmeölçer kullanılmıştır. Transformatör sargılarının alt ve üst bölgelerine yerleştirilen araştırma bobinleri ve titreşim sensörleri sayesinde gerekli veriler elde edilmiştir. Sağlıklı ve arızalı durumlara ilişkin sonuçların FFT analizi yapılmış ve böylece arızanın varlığı hem şiddet hem de konum açısından belirlenmiştir. Çalışmada iki yöntemin hibrit olarak incelenmesiyle arıza tespitinin daha etkin ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Kaçak akı ve titreşim sensörlerinin doğru şekilde konumlandırılması ve uygun şekilde kalibre edilmesi çalışmanın sınırlamaları olarak ifade edilebilir [39].

Asadi ve Kelk (2015), yüksüz bir transformatörde sarım-sarım arızasını erken aşamada tespit etmek amacıyla, primer sargının gerilimi ile akımı arasındaki faz farkının ölçümüne dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar için, özel olarak tasarlanan ve laboratuvarında üretilen 3 kVA, 50 Hz, 380/220 V değerlerinde üç fazlı bir transformatör kullanılmış ve sürekli durum koşulları altında incelenmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin etkin sonuçlar verdiğini ve dağıtım ile düşük güçlü transformatörlerde dahili arızaların erken teşhisini mümkün kıldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, transformatörün yüklü senaryoları için herhangi bir inceleme yapılmamıştır [40].

Oliveira ve Cardoso (2017), yaptıkları çalışmada güç transformatörlerinde sarım-sarım kısa devre arızalarının tespiti için kullanılan negatif sıralı bileşen analizi ve uzay vektör algoritması yöntemlerini karşılaştırmaktadır. Çalışmanın amacı, her iki yöntemin algılama hassasiyeti, yanıt süresi, sistem maliyeti ve uygulama kolaylığı gibi performans kriterlerine göre güçlü ve zayıf yönlerini belirlemektir. Negatif sıralı

bileşen yöntemi, sargılar arasındaki faz dengesizliğini analiz ederek arızaların erken tespitini sağlamaktadır. Uzak vektör algoritması ise transformatörün manyetik durumunu daha kapsamlı bir şekilde analiz ederek daha yüksek doğruluk ve düşük yanlış alarm oranı sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, negatif sıralı bileşen yönteminin düşük maliyetli sensörler ile kolayca uygulanabilir olduğunu ve elektriksel dengesizliklere duyarlı olduğu için yüksek hassasiyete sahip olduğunu göstermiştir. Ancak bu yöntem, yük değişimlerine ve dış manyetik etkilere karşı zayıftır ve yüksek harmonikli sistemlerde yanlış alarmlar üretebilmektedir. Diğer taraftan uzak vektör algoritması yükten bağımsız olmakla beraber farklı arıza türlerini algılama kapasitesine sahiptir. Ancak hesaplama karmaşıklığı ve yüksek işlem gücü gerektirmektedir. Ayrıca, uzak vektör algoritmasının düşük seviyeli sarım-sarım kısa devre arızalarının tespitinde daha etkin olduğu, daha şiddetli arızalarda ise iki metodun da benzer sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [41].

Arehanahi, vd. (2024), tek fazlı transformatörlerde küçük çaplı sargı arızalarının çevrimiçi tespiti üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yöntem, primer ve sekonder sarımlardaki anlık indüklenen gerilim farkının primer akımla ilişkisini analiz ederek arıza tespitini gerçekleştirmektedir. Bu ilişki, sağlıklı transformatörler için referans bir geometri olarak kabul edilirken, küçük çaplı sargı arızaları meydana geldiğinde belirgin geometrik değişiklikler göstermektedir. Arıza şiddeti, sağlıklı ve arızalı transformatörlerin geometrik yapılarının karşılaştırılmasıyla belirlenmektedir. Simülasyon ve deneysel bulgular, yöntemin doğruluğunu ve etkinliğini desteklemiştir. Kullanılan yöntem, yalnızca temel akım ve gerilim bileşenlerine ihtiyaç duyması nedeniyle maliyet açısından avantaj sağlar. Bununla birlikte, yöntemin uygulanması yalnızca tek fazlı transformatörlerle sınırlı kalmış ve daha yaygın kullanım alanına sahip üç fazlı transformatörler üzerinde bir inceleme yapılmamıştır. Ayrıca, yük değişimi durumu için herhangi bir analiz gerçekleştirilmemiştir [42].

Athikessevan, vd. (2019), kuru tip transformatörlerde düşük seviyeli sarımlar arası kısa devre arızalarının tespiti için çekirdek kaçak akı sensörlerini kullanan bir yöntem sunmuştur. Bu yöntem, geleneksel diferansiyel akım tabanlı tekniklere kıyasla sensör sayısını %78 oranında azaltarak donanım maliyetlerini önemli ölçüde

düşürmektedir. Ayrıca, 150 sarımdan yalnızca iki sarımda meydana gelen arızaları dahi üç temel döngü içinde tespit edebilmesi, yüksek algılama hassasiyetini ortaya koymaktadır. Yük ve besleme gerilimi dengesizlikleri gibi dış etkenlerden etkilenmemesi, farklı çalışma koşullarında güvenilirlik sağlamaktadır. Ancak yöntemin başarısı, sensörlerin doğru yerleştirilmesine ve manyetik akı yollarının doğru tahmin edilmesine bağlıdır. Özellikle karmaşık çekirdek geometrilerine sahip transformatörlerde uygulanabilirliği sınırlı olabilir ve çevresel elektromanyetik parazitler ölçüm hassasiyetini olumsuz etkileyebilir [43].

Kakolaki, vd. (2023), yaptıkları çalışmada transformatörlerin farklı frekanslardaki davranışlarını doğru bir şekilde modelleyerek FRA yönteminin uygulanması için gerekli koşulları incelemişlerdir. FRA sonuçlarının analizine yönelik çeşitli yöntemler tanıtılmış ve tartışılmıştır. Bu kapsamda, FRA yönteminin zayıf yönlerini ve sınırlamalarını gidermek için ileri düzey tamamlayıcı yöntemler önerilmiştir. Ancak, FRA'nın uygulanmasında referans verilerin elde edilmesi ve sonuçların yorumlanması karmaşık olabilmektedir. Özellikle, farklı tasarımlara sahip transformatörler için referans verilerinin eksikliği, analizlerin doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Sonuç olarak, çalışma FRA'nın transformatör arıza tespitindeki potansiyelini vurgulamakta ve bu alanda gelecekteki araştırmalar için öneriler sunmaktadır [44].

Ehsanifar, vd. (2021), yaptıkları çalışmada transformatörlerdeki sarımlar arası arızaların tespiti için, boşta aktif ve reaktif güç ölçümlerine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntem, transformatörün boşta çalışma durumunda güç değişimlerini izleyerek arızaları erken ve doğru şekilde tanımlamayı hedeflemektedir. Avantajları arasında mevcut güç ölçüm sistemleriyle kolay entegrasyon ve ek sensör ihtiyacını ortadan kaldırarak maliyet tasarrufu sağlaması yer almaktadır. Ayrıca, boşta çalışma koşullarında yapılan ölçümler, yük altındaki karmaşık dinamiklerin etkilerinden arındırıldığı için daha hassas sonuçlar sunmaktadır. Ancak, yöntemin doğruluğu transformatörün tasarımı ve çalışma koşullarına bağlı olarak değişebilir; bu da farklı tip ve boyutlardaki transformatörler için kalibrasyon ve adaptasyon gerektirmektedir. Ayrıca, boşta çalışma testlerinin

uygulanabilirliği, enerji sisteminin operasyonel gereksinimleriyle sınırlı olabilmektedir [45].

Haghjoo ve Mohammadi, (2017), transformatörlerdeki sarım-sarım kısa devre arızalarının çevrimiçi tespiti ve arıza bölgesinin belirlenmesi için yenilikçi bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntemde, transformatör çekirdeği ile ilk yalıtım katmanı arasında bulunan mevcut boşluğa yerleştirilen düzlemsel manyetik akı alt sensörlerinden oluşan küçük boyutlu bir araştırma bobini temelli sensör aracılığıyla kaçak akı dağılımı elde edilmektedir. Bu yaklaşımın avantajları arasında, sensörlerin kompakt boyutları sayesinde transformatörün mevcut yapısına entegre edilebilmesi ve çevrimiçi izleme imkânı sunarak arızaların erken tespitine (toplam sarımın %1'i kadar kısa devre arızalarını tespit edebilme) olanak sağlaması bulunmaktadır. Ayrıca, arıza bölgesinin belirlenmesi, bakım süreçlerinin daha hedefli ve verimli bir şekilde yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Ancak, bu yöntemin etkinliği, sensörlerin doğru yerleştirilmesine ve transformatörün tasarım özelliklerine bağlıdır. Farklı transformatör tasarımlarında sensörlerin optimal konumlandırılması zor olabilmektedir ve bu da algılama hassasiyetini etkileyebilir. Ayrıca, sensörlerin yerleştirilmesi sırasında transformatörün yapısına doğrudan müdahale edilmektedir; bu da uygulama sürecini karmaşıklaştırmaktadır [46].

Cabanas, vd. (2011), yaptıkları çalışmada yüksek gerilim güç transformatörlerinde yalıtım hatalarının tespiti için kaçak akı analizine dayalı çevrimiçi bir yöntem sunmuşlardır. Bu yaklaşım, transformatörün manyetik kaçak akısını izleyerek yalıtım hatalarını erken aşamalarda tespit etmeyi hedeflemektedir. Kaçak akı analizi, transformatörün normal işlemini sırasında uygulanabilir olup, ek donanım veya karmaşık elektronik sistemler gerektirmemesi nedeniyle maliyet etkin bir çözüm sunabilmektedir. Ayrıca, bu yöntem, mevcut çevrimiçi ve çevrimdışı izleme sistemlerine göre daha basit ve ekonomik bir alternatif sunmaktadır. Ancak, kaçak akı sinyallerinin doğru yorumlanması, transformatörün tasarım özelliklerine ve işletim koşullarına bağlıdır; bu da yöntemin genelleştirilmesini sınırlayabilmektedir [47].

Battulga, vd. (2024), yaptıkları çalışmada rüzgâr enerjisi uygulamalarında kullanılan yükseltici tip transformatörlerin nüvesindeki laminasyonlar arası yalıtım arızası için DA-DA dönüştürücüye entegre edilmiş yeni bir çevrimdışı yöntemin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Yöntemin etkinliği, mevcut çekirdek kaybı testi ve FRA ekipmanları gibi geleneksel tekniklerle karşılaştırılarak test edilmiştir. Bu yöntem, transformatörün mevcut dönüştürücü yapısını kullanarak ek donanım ihtiyacını ortadan kaldırmakta ve test sürecini basitleştirmektedir. Ayrıca, dönüştürücüye entegre test, transformatörün normal işletim koşullarına daha yakın bir ortamda yalıtımın durumunu değerlendirmeyi mümkün kılmakta, böylece daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak, bu yöntemin etkinliği, dönüştürücünün tasarımına ve kontrol stratejilerine bağlı olup, farklı sistemlerde uygulanabilirliği sınırlı olabilmektedir. Ayrıca, dönüştürücünün test sırasında normal işletim modundan farklı bir şekilde çalıştırılması gerekebilir; bu da ek kontrol ve güvenlik önlemleri gerektirebilmektedir [48].

Moses ve Aimonitois (1989), yaptıkları çalışmada tek fazlı bir transformatör çekirdeğinde kenar çapak hatalarının güç kayıpları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla %3 silikon demirden yapılmış çekirdek laminasyonlarının kenarlarına 0.3 mm çapında delikler açılarak çelik çubuklar yerleştirilmiş ve çeşitli çapak konfigürasyonları oluşturulmuştur. Yerel sıcaklık artış hızı yöntemini kullanarak, 32 termistörlü bir ölçüm sistemiyle laminasyonların belirli noktalarındaki yerel kayıplar tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çapakların varlığının laminasyonlar arasında kısa devre yolları oluşturduğunu ve bu durumun yerel güç kayıplarını önemli ölçüde artırdığını göstermiştir [49].

Schulz, vd. (2010), manyetik saclarda kısa devre arızalarının güç kayıpları üzerindeki etkilerini basit bir deneysel düzenekle incelemişlerdir. Çalışmada, karşılıklı iki manyetik sacın yüzeylerine izolasyon arızası uygulanarak kısa devre etkileri değerlendirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, yalnızca bir yüzeye uygulanan izolasyon arızasının toplam güç kayıpları üzerinde belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir. Bunun nedeni, tek taraflı bir arızanın, manyetik akı yoğunluğu (B vektörü) bileşenine dik indüklenen akım için kapalı bir devre yolu oluşturamamasıdır. Ancak, iki yüzeyde de arıza bulunması durumunda, akım taşıyan kapalı bir yol oluşarak güç

kayıplarında artış beklenmektedir. Çalışma, endüstriyel transformatörler gibi karmaşık yapılar yerine yalnızca iki manyetik sac üzerinde temel bir deneyle sınırlı kaldığı için, sonuçların geniş kapsamlı uygulamalarda nasıl bir yanıt vereceği bilinmemektedir. [50].

Mazurek, vd. (2010), yaptıkları çalışmada üç fazlı, 350 kVA'lık bir transformatörde laminasyonlar arası arıza etkilerini değerlendirmek amacıyla birtakım deneyler gerçekleştirmişlerdir. Bu deneylerde, laminasyonlar arasındaki yapay çapaklar, özel bir sıkıştırma aleti kullanılarak oluşturulmuş ve farklı uzunluklara sahip (10, 15 ve 20 mm) çapaklar, sırasıyla 33, 50 ve 66 laminasyonu kısa devre edecek şekilde simüle edilmiştir. Ayrıca, kenar çapaklarını oluşturmak için, 8 μ m kalınlığındaki bir bakır bant ahşap bir blok yardımıyla laminasyon yığınlarının kenarlarına bastırılarak tork metreli bir kelepçe ile sıkıştırılmıştır. Bu şekilde, çekirdek bacağına çapaklar uygulanmıştır. Yapılan ölçümlerde kelepçenin toplam güç kayıpları üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür. Güç kayıpları, bir güç analizörü kullanılarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, çapakların varlığında ve yokluğunda lokalize kayıplar, sıcaklık artışının başlangıç hızı hesaplanarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, laminasyonlar arası kısa devre arızalarının transformatörün güç kaybı üzerinde önemli etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur [51].

Hamzehbahmani, vd. (2013), yaptıkları çalışmada transformatör çekirdek laminasyonlarındaki yerel güç kayıplarını ölçmeye yönelik olarak, başlangıç sıcaklık artış hızı tekniğine dayalı yenilikçi bir ölçüm sistemi geliştirmişlerdir. Bu sistem ile, 300 kVA gücündeki üç fazlı transformatör çekirdeğinde, laminasyon cıvata deliklerinin çevresi ve kenar çapakları gibi belirli bölgelerde yerel güç kayıpları %2'nin altındaki bir hassasiyetle belirlenebilmiştir [52].

Hamzehbahmani, vd. (2014), iki kısımdan meydana gelen çalışmalarının ilkinde elektriksel laminasyonların kesme ve delme işlemleri sırasında meydana gelen kenar çapaklarının laminasyonlar arası kısa devrelere neden olabileceğini ve bunun transformatör çekirdeklerinde güç kayıplarını artırabileceğini araştırmışlardır. Bu etkiyi analiz etmek için, eşdeğer elektrik devrelerine dayalı bir yöntem geliştirilmiş ve girdap akımı yolları üzerinden çekirdekteki güç kayıpları geniş bir manyetik akı

yoğunluğu ve manyetizasyon frekansı aralığında tahmin edilmiştir. Çalışma, daha önceki çalışmalarda yeterince ele alınmayan deri etkisi (skin effect), akı yoğunluğundaki düzensizlikler, doğrusal olmayan B-H ilişkileri ve karmaşık bağlı geçirgenlik gibi değişkenleri içeren kapsamlı bir analiz sunmuştur. Elde edilen sonuçlar, 2 boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile doğrulanmış ve girdap akımı yollarının laminasyonların kalınlığı boyunca nasıl ilerlediği görselleştirilmiştir [53]. Çalışmanın ikinci bölümünde yapay olarak kısa devre edilmiş 2, 3 ve 4 Epstein boyutundaki laminasyon katman yığınları kullanılarak ek güç kayıpları ölçülmüş ve modelin geçerliliği deneysel olarak doğrulanmıştır. Ancak eşdeğer elektrik devre modelinin, gerçek transformatör çekirdek konfigürasyonlarındaki karmaşık manyetik etkileşimleri tam olarak temsil etmemesi ve mekanik gerilmeler ile manyetik doyma etkilerinin ihmal edilmesi çalışmanın eksiklikleri olarak ifade edilebilir [54].

Eldieb, vd. (2015), makine laminasyonlarındaki kenar çapaklarının etkilerini farklı manyetizasyon frekanslarında deneysel olarak incelemişlerdir. Deneyler, güç kayıplarının ayrıştırılması ve eddy current kaynaklı kayıpların belirlenmesi amacıyla bir şerit test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, kenar çapaklarının çekirdek manyetik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini ve eddy current kayıplarının temel olarak çapakların konumuna ve kısa devre edilen laminasyon sayısına bağlı olduğunu göstermektedir. Çalışma, eddy current kayıplarının, kısa devre edilen laminasyon sayısının artmasıyla belirgin şekilde yükseldiğini ortaya koymuştur. Bununla birlikte, bazı sınırlamalar mevcuttur. Deneyler, yalnızca şerit test cihazı ile sınırlı kalmış olup gerçek transformatör veya makine çekirdeklerindeki daha karmaşık geometrik etkileri kapsayamamaktadır [55].

Hamzeshbahmani (2020), elektriksel çelik sacların enerji kayıplarını ve bileşenlerini, laminasyonlar arasında çeşitli arızaların oluşturulduğu koşullar altında, sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan besleme gerilimi altında analitik olarak incelemiştir. Çalışma, manyetik çekirdek kalitesinin dinamik ve statik histerezis döngüsü ölçümlerine dayalı olarak izlenmesi için pratik bir yöntem önermiştir. Bulgulara göre, laminasyonlar arası arızaların, çekirdeğin dinamik enerji kayıplarını ve performansını önemli ölçüde etkilediği, ancak histerezis kayıpları üzerinde minimal bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle, sinüzoidal olmayan koşullarda bu tür arızaların

neden olduğu olumsuz etkinin daha belirgin olduğu ve bu durumda manyetik çekirdeklerin izlenmesinin daha kritik olduğu vurgulanmıştır [56].

Altayef, vd. (2022), yaptıkları çalışmada, transformatör çekirdeklerinde yapay olarak oluşturulan laminasyon arızalarının etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, 15 kVA üç fazlı bir transformatör çekirdeğinde meydana gelebilecek laminasyon kusurlarının manyetik, termal ve elektriksel performans üzerindeki etkileri deneysel ve analitik yöntemlerle değerlendirilmiştir. Farklı arıza senaryoları ve manyetik akı yoğunlukları altında, kısa devrelerin sayısı ve konumlarının transformatörün performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar, laminasyonlar arasındaki kısa devre sayısının artmasıyla birlikte transformatör akımının da arttığını göstermektedir; bu artış, akı yoğunluğuna ve kısa devrelerin konumuna bağlıdır. Bu bulgular, transformatör çekirdeğindeki kısa devrelerin ciddiyetini anlamak ve güç kayıplarını değerlendirmek için önemli bilgiler sunmaktadır [57].

Yapılan çalışmaların çoğunda görüldüğü gibi sargı arızalarının tespiti, akım/gerilim tabanlı analizler, manyetik akı analizi ve negatif sıralı akım yöntemleri gibi tekniklerle gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemlerde, akım ve gerilim bileşenlerinden türetilen ek parametreler kullanılarak kısa devre arızaları erken aşamada tespit edilmiştir. Mevcut metotların çoğunda, sensör verileri ve algoritmalarla elde edilen bilgiler, transformatörün çalışma koşullarından bağımsız olarak arızayı doğru bir şekilde tespit etmeyi amaçlamaktadır. Ancak, bazı yöntemlerde sensör yerleşimi ve veri işleme karmaşıklığı gibi sınırlamalar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, gerilim ve yük dengesizliklerinden kaynaklanan gürültü ve harmonik etkiler, bu yöntemlerin performansını sınırlayarak arıza tespitini zorlaştırabilmektedir.

Laminasyon arızalarının tespitinde ise, yerel güç kayıpları ve manyetik akı analizi üzerine odaklanılmıştır. Çalışmalarda, laminasyonlardaki izolasyon kusurları ve kenar çapaklarının oluşturduğu girdap akımı kayıpları detaylı şekilde incelenmiştir. Mevcut metotların çoğu, sıcaklık artış hızı veya uzay vektör algoritması gibi yöntemlerle laminasyon arızalarını doğru şekilde sınıflandırmayı amaçlamaktadır. Bununla birlikte, yöntemlerin uygulanmasında yüksek maliyetli donanım gereksinimleri, karmaşık analiz süreçleri ve transformatör tasarımına müdahale

gerekliliği gibi sınırlamalar bulunmaktadır. Bu durum, bazı yöntemlerin geniş kapsamlı saha uygulamalarında kullanılmasını zorlaştırmaktadır.

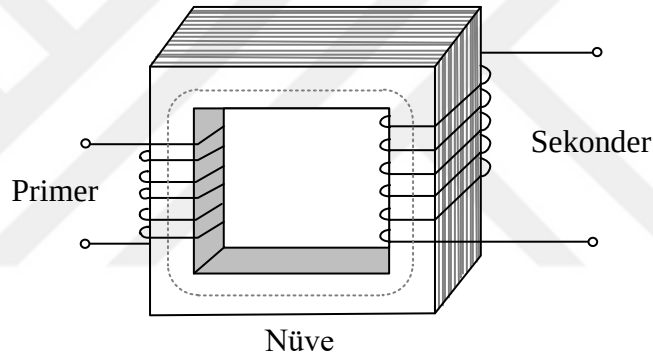
Bu tez çalışması, düşük şiddetli sarım-sarım kısa devre, kaynak gerilimi dengesizliği ve laminasyon arızalarında kaçak akı tabanlı simetrik bileşenler ve faz açısı spektrumlarını analiz ederek mevcut yöntemlere bir alternatif sunmaktadır. Bu sayede erken aşamada arıza tespiti ve farklı arıza türlerinin güvenilir şekilde belirlenmesi sağlanmakta, literatürdeki mevcut kısıtları aşan daha hassas ve uygulanabilir bir yaklaşım sunulmaktadır.



3. TRANSFORMATÖRLER VE ELEKTRİKSEL ARIZALAR

3.1 Transformatörlerin Yapısı ve Modelleri

Manyetik alan etkisi altında çalışan transformatörler, elektromanyetik indüksiyon prensiplerine dayanarak bir sargıdaki alternatif akımı (AA) aynı frekansta başka bir sargıya ileten, hareketli parçası olmayan statik elektrik makineleridir. Enerji transferi, primer sargıya uygulanan alternatif akımın oluşturduğu zamanla değişen manyetik akının, çekirdek vasıtasıyla sekonder sargıya aktarılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Transformatörler, gerilim seviyesini artırma ya da azaltmada yüksek verimlilikle çalışan temel elektrik cihazlarıdır. Transformatörler genel anlamda Şekil 3.1’de gösterildiği gibi sargı ve nüveden meydana gelmektedir.

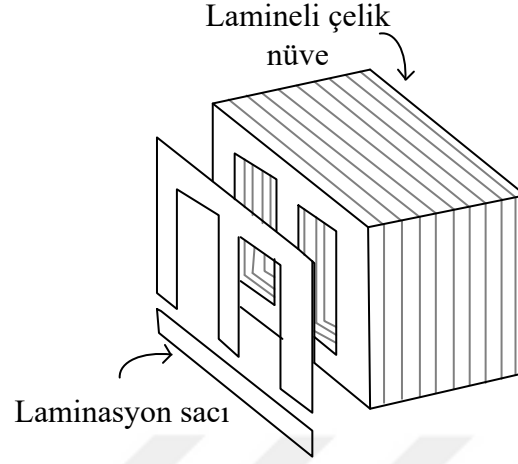


Şekil 3.1. Transformatörün yapısı

3.1.1 Manyetik Nüve

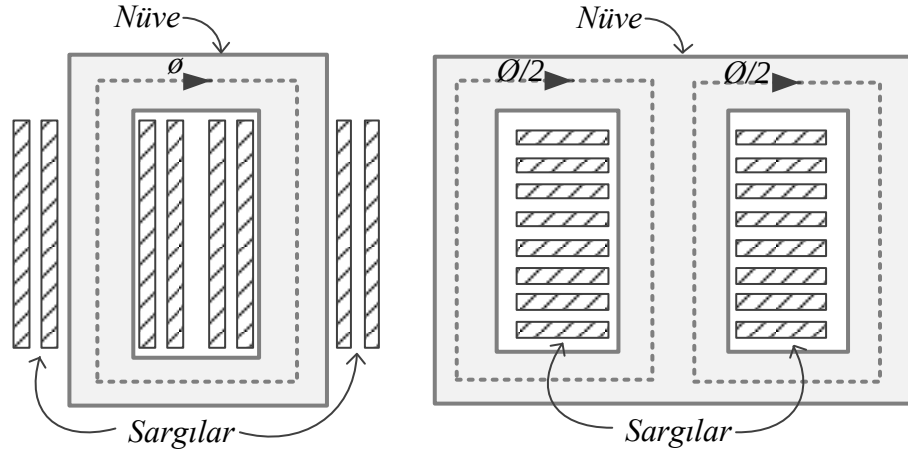
Transformatörün ana gövdesini oluşturan ve sargıların sarıldığı yapıdır. Nüvede sargıları taşıyan kısımlara bacak, bacakları birleştiren kısımlara da boyunduruk denir. Boyunduruk kısmı metal bir aksamla sıkıştırılıp titreşimlerin en aza indirilmesi sağlanır. Manyetik nüvelerin daha az kayıpla enerji aktarabilmesi için genellikle 0.2-0.5 mm kalınlığında ince saçlar şeklinde silisyumlu demir ve çelikten üretilmesi gerekmektedir. Saclarda yalıtım malzemesi olarak vernik ve kâğıt gibi malzemeler kullanılmaktadır. Nüve kesitleri transformatörlerin gücüne göre belirlenmektedir. Kayıpların azaltılmasını sağlamak için selülozdan yapılmış kâğıt levhalardan saç

paketleri oluşturulmaktadır. İyice sıkıştırılan sac lar elyaf bantlarla sarılıp gerdirilmektedir. Şekil 3.2’ de nüve sac larının dizilimi görülmektedir.



Şekil 3.2. Transformatördeki sac yapıları

Transformatör çekirdekleri, enerji dönüşümü sırasında manyetik akının etkin ve verimli bir şekilde iletilmesini sağlamak üzere tasarlanmış olup, genellikle iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar çekirdek tipi (core type) ve mantel tipidir (shell type). Şekil 3.3’ te farklı nüve tipleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Nüve tipleri a) Çekirdek tipi b) Mantel tip

3.1.2 Sargılar

Transformatörlerde, gerilim uygulanan primer sargılar ve yük ile bağlantılı olan sekonder sargılar bulunmaktadır. Bu sargılar genellikle alüminyum veya bakır iletkenlerden yapılmaktadır. İletkenlerin birbirleriyle ve manyetik nüve ile temasını önlemek için yalıtkan malzemeler (örneğin, emaye, kağıt, polyester) kullanılmaktadır. Dönüştürme oranı ve sarım sayısı, sargının özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Düşürücü tip transformatörlerde sekonder sargı kalın kesitli ve az sarımlı iken, yükseltici tip transformatörlerde ince kesitli ve çok sarımlıdır. Genel olarak silindirik ve disk tipinde sargı yapıları mevcuttur. Silindirik sargılar düşük güçlü transformatörlerde kullanılmaktadır ve alçak gerilime sahip olan sargı altta, yüksek gerilime sahip olan sargı ise üstte yer almaktadır. Disk tipindeki sargılar ise disk şeklinde sarılmaktadır ve bu diskler birbirine seri veya paralel bağlanmaktadır. Disk tipi sargılar, yüksek gerilimli ve büyük güçlü transformatörlerde kullanılmaktadır. Güç değerlerine göre yuvarlak ya da dikdörtgen şeklinde sarılmaktadır. Sargı bağlantı şekilleri ise yıldız, üçgen ve zigzag bağlantı olarak sınıflandırılabilir. Yıldız bağlantıda sargıların bir ucu ortak noktada birleştirilmektedir ve yüksek gerilimli sistemlerde kullanılmaktadır. Üçgen bağlantıda sargılar, birbirine seri olarak bağlanarak üçgen şekli oluşturulmaktadır ve alçak gerilimli sistemlerde tercih edilmektedir. Zigzag bağlantı ise özel bir bağlantı türüdür ve harmonikleri azaltmak için kullanılmaktadır.

3.1.3 Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatörler, faz sayılarına göre tek fazlı ve üç fazlı olarak sınıflandırılmaktadır. Tek fazlı transformatörler genellikle daha küçük güçlerde ve ev tipi şebeke beslemelerinde kullanılmaktadır. Yapı olarak, primer ve sekonder olmak üzere iki sargıdan oluşmakta ve tek fazlı bir gerilimi istenen başka bir tek fazlı gerilim seviyesine dönüştürmektedir. Üç fazlı transformatörler ise özellikle sanayi ve yüksek güç gerektiren tesislerde kullanılmaktadır. Üç fazlı sistemlerde üç ayrı fazdan oluşan gerilim, transformatör üzerinden istenen gerilim seviyesine düşürülmekte veya yükseltilmektedir. Bu transformatörler, tek fazlı üç ayrı transformatörün bir araya getirilmesiyle de oluşturulabilmekte veya tek bir gövde içerisinde üç faz sargılarına

sahip şekilde imal edilmektedir. Kullanım amaçlarına göre transformatörler, güç transformatörleri, dağıtım transformatörleri, oto transformatörler, ölçü transformatörleri ve izolasyon transformatörleri şeklinde gruplandırılmaktadır. Güç transformatörleri ve dağıtım transformatörleri, elektrik şebeke sistemlerinde kullanımı zaruri olan transformatörlerdir. Dağıtım transformatörleri, dağıtım sistemlerinde kullanılan Orta Gerilim (OG) / Alçak Gerilim (AG) dönüşümü yapan transformatörlerdir. Güç transformatörleri daha büyük güçlerde genelde gerilim yükseltici olarak görev yapan transformatörlerdir. Çizelge 3.1’de bu iki transformatör arasındaki farklar kısaca anlatılmıştır.

Çizelge 3.1 Güç transformatörü ve dağıtım transformatörü karşılaştırması

Özellik	Güç Transformatörü	Dağıtım Transformatörü
Kapasite	10 MVA ve üzeri	500 kVA - 10 MVA
Çalışma Gerilimi	33 kV ve üzeri	11 kV, 6.6 kV, 400 V
Kayıp Türü	Yük kayıpları daha önemli	Boşta kayıplar daha önemli
Verimlilik	%99 ve üzeri	%95-98
Çalışma Süresi	Sürekli tam yükte çalışabilir	Talebe bağlı, kısmi yükte çalışabilir
Soğutma Sistemi	Yağ veya su soğutmalı	Hava veya yağ soğutmalı
Boyut ve Ağırlık	Büyük ve ağır	Daha küçük ve hafif
Maliyet	Yüksek	Düşük
Kullanım Alanı	Enerji santralleri, büyük endüstriyel tesisler	Dağıtım şebekeleri, yerleşim yerleri
Bakım	Daha fazla bakım gerektirir	Daha az bakım gerektirir
Yük Değişimi	Yük altında ayar yapılabilir	Yük altında ayar genellikle yapılamaz
Güvenilirlik	Yüksek güvenilirlik	Orta seviyede güvenilirlik

Transformatörlerdeki en önemli sorunlardan biri sargıların aşırı ısınması ve bunun yol açtığı kayıplardır. Bu durumu en aza indirmek için soğutma sistemleri kritik bir role sahiptir. Soğutma yöntemlerine bağlı olarak transformatörler kuru tip, yağlı tip ve hermetik yapıda olabilir. Küçük güç kapasitesine sahip transformatörlerde hava soğutması tercih edilirken, yüksek güçlü transformatörlerde yağ soğutması kullanılmaktadır. Transformatörlerde yaygın olarak kullanılan soğutma sistemleri, Doğal Yağ Doğal Hava (ONAN - Oil Natural Air Natural) ve Doğal Yağ Cebri Hava (ONAF - Oil Natural Air Forced) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Soğutma sistemlerine ait harf kodları hakkında detaylı bilgiler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Transformatörde soğutma şekillerinin gösterimi

1.HARF	2.HARF	3.HARF	4.HARF
Sargılara temas eden soğutma ortamı		Dış soğutma sistemine temas eden soğutma ortamı	
Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü	Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü
$\frac{O}{\downarrow}$ yağ $\frac{N}{\downarrow}$ tabii $\frac{A}{\downarrow}$ hava $\frac{N}{\downarrow}$ tabii	$\frac{O}{\downarrow}$ yağ $\frac{N}{\downarrow}$ tabii $\frac{A}{\downarrow}$ hava $\frac{F}{\downarrow}$ cebri	$\frac{O}{\downarrow}$ yağ $\frac{F}{\downarrow}$ tabii $\frac{W}{\downarrow}$ su $\frac{F}{\downarrow}$ cebri	

ONAN tipi soğutmada, sıcak yağın doğal dolaşımı yoluyla hava ile teması sağlanır. Yağ ısındıkça kinetik enerjisi artar ve bu enerji transferiyle ısınıp atmosfere bırakır. Bu yöntem, düşük gürültü seviyesi ve az bakım gereksinimi gibi avantajları nedeniyle günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, en büyük dezavantajı geniş bir alan kaplamasıdır. ONAF tipi soğutmada, transformatörün soğutulması için fanlar kullanılır. Transformatör kazanına monte edilen radyatörler, kazanın yüzey alanını artırarak yağın daha hızlı soğumasını sağlamaktadır. Bu yöntem, genellikle güç transformatörlerinde tercih edilmektedir. Uzun ömürlü bir sistem olup, daha az yer kaplamaktadır. Ancak, fanların varlığı gürültü seviyesini artırmakta ve ek bakım ihtiyacı doğurmaktadır. Bunlara ek olarak, Zorlanmış Yağ Zorlanmış Hava (OFAF- Oil Forced Air Forced), Zorlanmış Yağ Cebri Su (OFWF- Oil Forced Water Forced), Yönlendirilmiş Yağ Cebri Hava (ODAF- Oil Directed Air Forced) ve Yönlendirilmiş Yağ Cebri Su (ODWF- Oil Directed Water Forced) soğutma tipleri de bulunmaktadır. Şekil 3.4'te, yağlı ve kuru tip transformatör örnekleri gösterilmektedir.



Şekil 3.4. a) Kuru tip transformatör b) Yağlı tip transformatör

Yağlı tip transformatörler, düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmekte ve özellikle yüksek güç ve gerilim seviyelerinde kullanılmaktadır. Ancak, bu transformatörlerde izolasyon arızaları, tasarım kaynaklı kayıplar ve bu kayıplardan doğan ısınma problemleri gibi çeşitli sorunlarla karşılaşılabilir. Kuru tip transformatörler, izolasyon için yağ yerine reçine veya hava kullanılan, güvenli ve çevre dostu cihazlardır. Yangın ve patlama riski düşük olduğundan genellikle bina içi uygulamalarda, endüstriyel tesislerde ve güvenliğin ön planda olduğu alanlarda tercih edilmektedir. Bu transformatörler, bakım gereksiniminin az olması ve uzun ömürlü yapısı sayesinde birçok avantaj sunsa da bazı dezavantajlara sahiptir. Özellikle nemli veya kirlili ortamlarda izolasyon yetersizlikleri ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, yüksek frekanslı harmonikler nedeniyle ısınma ve gürültü problemleri yaşanabilmektedir. Aşırı yüklenme veya yetersiz soğutma da performans kaybına yol açabilmektedir. Ancak, yangın güvenliği ve düşük bakım maliyetleri, kuru tip transformatörleri birçok uygulamada cazip bir seçenek haline getirmektedir.

3.1.4 Transformatörün Çalışma Prensibi

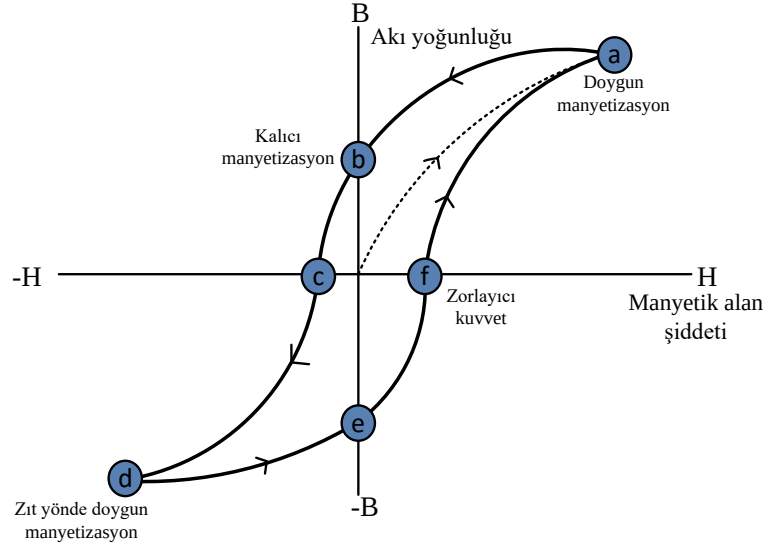
Transformatörler, ferromanyetik bir nüve ve bu nüvenin çevresine sarılı sargılardan meydana gelmektedir. Bu nedenle, bir transformatörün elektriksel davranışlarını tam olarak anlamak için, ferromanyetik malzemelerin etkilerinin de detaylı bir şekilde ele alınması gerekmektedir.

Faraday'ın indüksiyon yasası incelendiğinde, elektriksel bir bağlantı olmaksızın yalnızca manyetik alan aracılığıyla iki iletken sargı arasında enerji aktarımının

mümkün olduğu görülmektedir. Bu durum, transformatörlerin çalışma prensibinin Faraday yasasına dayandığını ortaya koymaktadır. Lenz yasasına göre, bir iletkende gerilim indüklenebilmesi için iletkenin sabit bir manyetik alan içinde hareket etmesi veya değişken bir manyetik alana maruz kalması gerekmektedir. Denklem (3.1)'de Lenz yasasını ifade eden temel eşitlik bulunmaktadır.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (3.1)$$

Ferromanyetik malzemelerin davranışlarını kavrayabilmek için demir ve çelik gibi yapıların incelenmesi gerekmektedir. Bu malzemeler, oldukça yüksek ve doğrusal olmayan bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Ferromanyetik malzemelerin atomlarındaki domenler manyetik alanlarını aynı hizaya getirme eğilimi göstermektedir. Normalde atomlar, kendi iç manyetik alanlarıyla aynı yönde fakat rastgele bir şekilde hizalanmıştır. Bu durum, malzemenin küçük bir mıknatıs gibi davranmasına yol açmaktadır. Harici bir manyetik alana maruz kalındığında, bu rastgele yönelmiş manyetik alanlar aynı doğrultuya yönelir ve manyetik alan gücü artar. Böylece, demir içindeki manyetik akı miktarı harici kuvvetlerle artış gösterir. Ancak, demir içindeki tüm domainlerin aynı yönde hizalanmasının ardından, manyetik akı daha fazla artamaz ve malzeme doyum noktasına ulaşır. Ferromanyetik malzemelerde gözlemlenen bu davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için, Şekil 3.6'daki histerezis eğrisi incelenebilir. Bu egride, y eksenini manyetik akı yoğunluğunu (B), x eksenini ise manyetik alan şiddetini (H) göstermektedir.



Şekil 3.5. B-H histerezis eğrisi

Dış manyetik alan ortadan kaldırıldığında, hizalanmış domainler eski rastgele konumlarına geri dönemezler. Bu dönüşüm için bir enerjiye ihtiyaç duyulsa da yeterli enerji bulunamadığında ferromanyetik malzeme kalıcı bir mıknatıs gibi davranmaya başlar. Eksenlerin her defasında doğru şekilde hizalanması için gerekli olan enerji, elektrik makinelerinde histerezis kaybı olarak adlandırılan enerji kayıplarına yol açar.

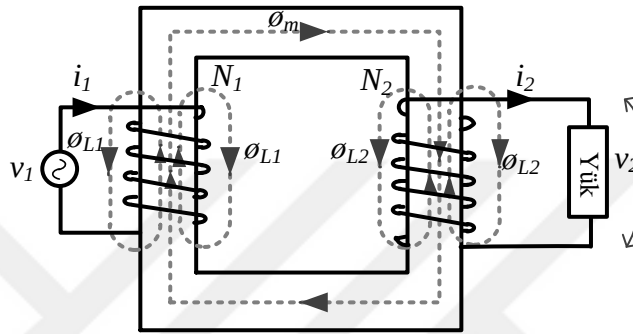
Histerezis kaybı, P_h denklem (3.2) ile ifade edilmektedir,

$$P_h = K_h f B_{\max}^n \quad (3.2)$$

Ferromanyetik malzemenin karakteristik özelliğine bağlı olarak K_h sabit bir değer olarak belirlenir. n değeri ise 1.5 ile 2.5 arasında değişen bir değişkendir. Akımın bir periyot boyunca değişimine bağlı olarak, enerji ya kaynaktan çekilir ya da manyetik alanda depolanan enerji kaynağa geri verilir. Akımın ve dolayısıyla manyetik alan şiddetinin (H) bir periyodu boyunca gerçekleşen bu enerji akışı, histerezis kaybı olarak adlandırılan nüve kaybına yol açar. Histerezis eğrisinin alanı büyüdükçe, malzemenin maruz kaldığı histerezis kaybı da artar.

3.1.5 Transformatörün Eşdeğer Devre Modeli

İdeal bir transformatör, sargılarında ve nüvesinde herhangi bir enerji kaybı olmayan, dolayısıyla verimi %100 olan bir transformatör olarak tanımlanmaktadır. Bu tür transformatörlerde, manyetik akı tamamen primer sargıdan sekonder sargıya aktarılmakta ve sargı direnci, manyetik kaçak ile nüve kayıpları göz ardı edilmektedir. Transformatörün temel yapısı Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Tek faz transformatörün temel yapısı

Burada v_1 ve v_2 , sırasıyla primer ve sekonder sargılardaki gerilimlerdir. N_1 ve N_2 ise primer ve sekonder sargılardaki sarım sayılarını temsil etmektedir. Primer taraftan giren akım i_1 ve sekonder taraftan çıkan akım i_2 olarak tanımlanmaktadır. Transformatörün güç korunumu prensibine göre primer ve sekonder sargılar arasında enerji kaybı olmadığı varsayılır. Bu varsayım, denklem (3.3)’te ifade edilen eşitliği ortaya çıkarmaktadır;

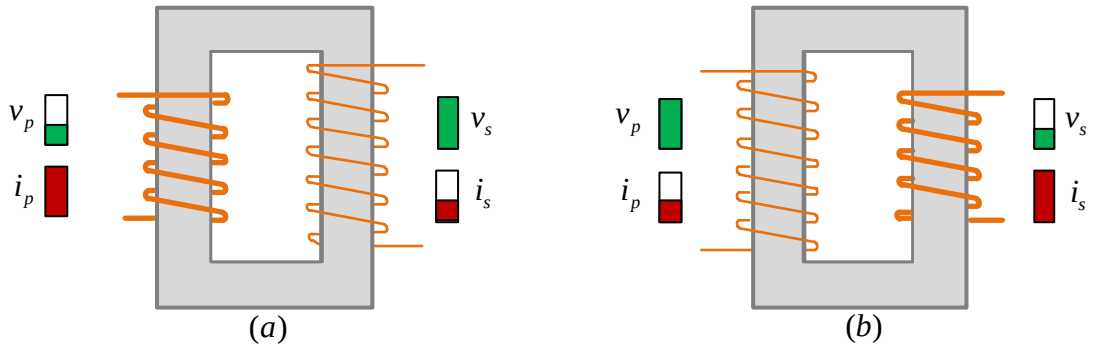
$$P = V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (3.3)$$

Transformatörün düşürücü ya da yükseltici olması, çevirme oranı “ a ” ile verilir.

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_1}{I_2} = a \quad (3.4)$$

Transformatörün dönüştürme oranı, primer ve sekonder sargılarındaki sarım sayılarının oranına bağlı olarak belirlenmektedir. Bu oran, transformatörün gerilimi

artıran (yükseltici) veya azaltan (düşürücü) bir cihaz olarak çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 3.7. a) Yükseltici tip transformatör b) Düşürücü tip transformatör

Transformatörün gerçek elektriksel modeli oluşturulurken, sargılardaki direnç, kaçak reaktans ve nüve kayıpları gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Bu kayıplar, ideal transformatör modelinden sapmalara neden olmaktadır. Transformatörün eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için, açık devre ve kısa devre testleri uygulanır. Açık devre testinde, transformatörün bir sargısı açık devre iken, diğer sargıya uygulanan gerilim nedeniyle tüm giriş akımı transformatörün uyarma devresinden geçmektedir. Seri bağlı empedansın düşük olması, gerilim düşümünü minimuma indirmektedir. Bu nedenle, uygulanan giriş geriliminin büyük bir kısmı uyarma devresine ulaşır. Bu sayede uyarma devresindeki R_c ve X_m değerleri, uyarım kolundaki Y_e admitansına göre hesaplanır. Burada hesaplamaların düşük gerilim tarafına indirgenerek yapıldığı kabul edilmiştir. Denklem (3.5)'te admitans hesabı formülü bulunmaktadır.

$$\mathbf{Y}_e = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_M} \quad (3.5)$$

Açık devre testinde I_{OC} akım ve V_{OC} gerilim değerleri denklem (3.6)'daki gibi ifade edilir.

$$|Y_e| = \frac{|I_{OC}|}{|V_{OC}|} \quad (3.6)$$

Denklemler (3.7) ve (3.8) ile güç faktörü ve faz açısı hesaplanabilir.

$$\cos \theta = \frac{P_{OC}}{|V_{OC}| |I_{OC}|} \quad (3.7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{P_{OC}}{|V_{OC}| |I_{OC}|} \right) \quad (3.8)$$

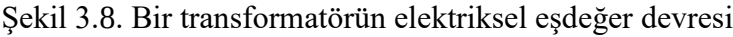
Akım değeri vektörel olarak gerilim değerinden geridedir; bu yüzden empedans açısı pozitif olur. Toplam seri empedans değeri Z_{SEH} , denklem (3.9) ile denklem (3.11) arasındaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$Z_{SEH} = \frac{V_{SC}}{I_{SC}} \angle(\theta) \quad (3.9)$$

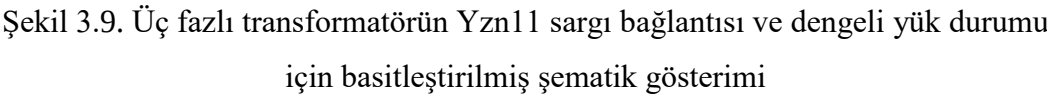
$$Z_{SEH} = R_{ES} + jX_{ES} \quad (3.10)$$

$$Z_{SEH} = (R_H + a^2 R_L) + j(X_H + a^2 X_L) \quad (3.11)$$

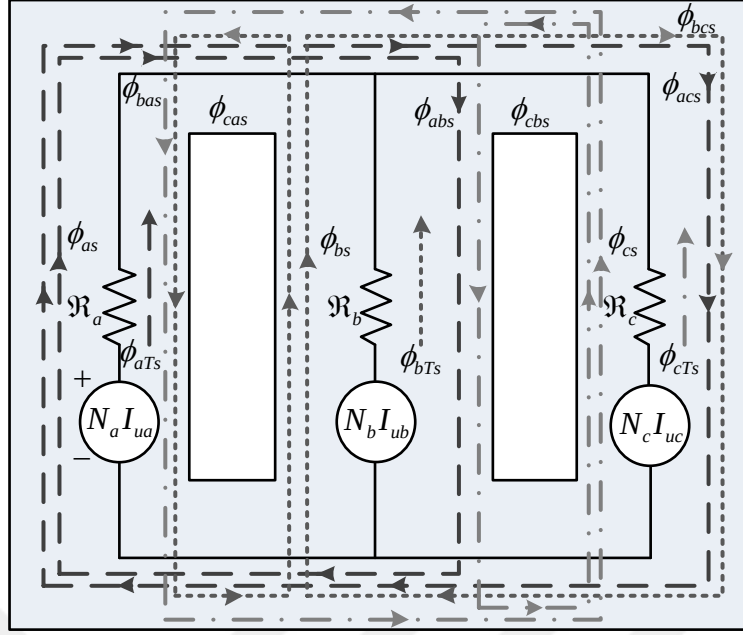
Burada; R_1 ve X_1 sırasıyla yüksek gerilim direnç ve reaktansı, R_2 ve X_2 sırasıyla alçak gerilim direnç ve reaktansı değerleridir. Transformatorün elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3.8'deki gibidir.



Üç fazlı transformatörlerin elektriksel eşdeğer devresi, transformatörün fiziksel özelliklerini matematiksel bir modelle temsil eden önemli bir araçtır ve bu sayede transformatörün davranışını analiz etmek, kayıplarını değerlendirmek ve yük altındaki performansını anlamak için kullanılabilir. Şekil 3.9’da üç fazlı transformatörün basitleştirilmiş şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.9'daki devrede primer sargı tarafı yıldız bağlıdır ve aralarında 120° 'lik elektriksel faz farkı bulunan V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} kaynak gerilimleri tarafından beslenmektedir. Sekonder tarafı ise zigzag bağlantılıdır. Zigzag bağlantıda, her fazın sargıları ikiye bölünmektedir ve bu bölümler farklı faz sargıları ile birleştirilmektedir. Bu yapı, sekonder tarafında dengeleme sağlarken harmonikleri azaltarak sistemde dengeli bir yapı sunmaktadır. Şekil 3.10'da ise transformatörün manyetik eşdeğer devresi bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Üç fazlı transformatörün manyetik eşdeğer devresi [43].

Transformatörün sağlıklı çalışma durumunda, çekirdek akıları, primer sargılardan geçen mıknatıslanma akımları tarafından meydana gelmektedir. Bu akılar, uygulanan kaynak gerilimi ve çekirdek malzemesinin manyetik özelliklerine bağlıdır ve sekonder sargıya bağlı yükten büyük ölçüde bağımsızdır. Transformatörün sağlıklı çalışma durumu için A fazı, B fazı ve C fazı sargılarının manyetomotor kuvvetleri (MMK) tarafından oluşturulan çekirdek akıları, denklem (3.12), (3.13) ve (3.14)'teki gibi ifade edilebilir [43].

$$\phi_{as} = \frac{N_a I_{ua}}{\mathfrak{R}_a + \left(\frac{\mathfrak{R}_b \mathfrak{R}_c}{\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c} \right)} = \frac{N_a I_{ua} (\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c)}{\mathfrak{R}_T} \quad (3.12)$$

$$\phi_{bs} = \frac{N_b I_{ub}}{\mathfrak{R}_b + \left(\frac{\mathfrak{R}_a \mathfrak{R}_c}{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_c} \right)} = \frac{N_b I_{ub} (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_c)}{\mathfrak{R}_T} \quad (3.13)$$

$$\phi_{cs} = \frac{N_c I_{uc}}{\mathfrak{R}_c + \left(\frac{\mathfrak{R}_a \mathfrak{R}_b}{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b} \right)} = \frac{N_c I_{uc} (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b)}{\mathfrak{R}_T} \quad (3.14)$$

Burada ϕ_{as} , ϕ_{bs} ve ϕ_{cs} sağlıklı durum için A, B ve C fazlarının bulunduğu bacakların çekirdek akılarını, N_a , N_b ve N_c faz sargılarının primer sarım sayılarını ($N_a=N_b=N_c=N$), I_{ua} , I_{ub} ve I_{uc} uyarma akımlarını, $\mathfrak{R}_a$, $\mathfrak{R}_b$ ve $\mathfrak{R}_c$ ise sırasıyla transformatör bacaklarının relüktans değerlerini ifade etmektedir. Ayrıca denklemleri sadeleştirmek için $\mathfrak{R}_T$ ($\mathfrak{R}_T = \mathfrak{R}_a \mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_b \mathfrak{R}_c + \mathfrak{R}_c \mathfrak{R}_a$) eşdeğer relüktans ifadesi denklemlerde kullanılmıştır.

Transformatörün sağlıklı çalışma durumu için B ve C kolu MMK'larından kaynaklanan A kolundaki akıların temel fazörleri denklem (3.15) ve (3.16)'daki gibi ifade edilebilir [43].

$$\phi_{bas} = \frac{N_b I_{ub} \mathfrak{R}_c}{\mathfrak{R}_T} \quad (3.15)$$

$$\phi_{cas} = \frac{N_c I_{uc} \mathfrak{R}_b}{\mathfrak{R}_T} \quad (3.16)$$

Burada ϕ_{bas} ve ϕ_{cas} B ve C kolunun A koluna etki ettiği akı değerlerini temsil etmektedir. Dolayısıyla A bacağındaki toplam akı değeri (ϕ_{aTs}) denklem (3.17)'deki elde edilebilir [43].

$$\phi_{aTs} = \phi_{as} - \phi_{bas} - \phi_{cas} = \frac{N}{\mathfrak{R}_T} (I_{ua} (\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c) - I_{ub} \mathfrak{R}_c - I_{uc} \mathfrak{R}_b) \quad (3.17)$$

Benzer şekilde C bacağındaki toplam akı değeri de (ϕ_{cTs}) denklem (3.18)'deki gibi elde edilebilir [43].

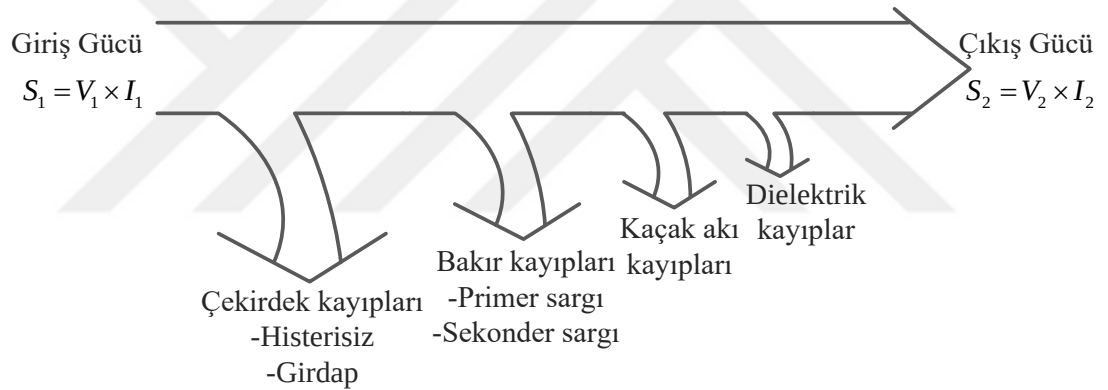
$$\phi_{cTs} = \phi_{cs} - \phi_{acs} - \phi_{bcs} = \frac{N}{\mathfrak{R}_T} (I_{uc} (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b) - I_{ua} \mathfrak{R}_b - I_{ub} \mathfrak{R}_a) \quad (3.18)$$

Manyetik eşdeğer devre analizi ile transformatörlerin manyetik akı dağılımları ve sargılarda meydana gelen enerji kayıpları ayrıntılı bir şekilde incelenebilir. Ayrıca,

transformatörlerde meydana gelen arızaların, manyetik akının yapısında bozulmalara neden olduğu bilinmektedir. Bu durum, arızaların manyetik alan üzerindeki etkilerinin gözlemlenmesine ve değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

3.1.6 Transformatörlerde Kayıplar

Transformatörlerde hareketli parçaların bulunmaması nedeniyle sürtünme ve rüzgâr kaynaklı kayıplar meydana gelmez. Bununla birlikte, sargılar ve nüve nedeniyle oluşan kayıplar mevcuttur. Bu kayıplar arasında bakır kayıpları, demir kayıpları (nüve kaynaklı), histerezis kayıpları, girdap kayıpları ve kaçak kayıplar yer almaktadır. Bu kayıplar, sargılar ve değişken manyetizasyonun bir sonucudur. Şekil 3.11’de transformatörde meydana gelen kayıpların güç akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Transformatördeki güç akış diyagramı

3.1.6.1 Çekirdek Kayıpları

Transformatörlere gerilim uygulandığında, çekirdek içinde değişen manyetik akı nedeniyle enerji kaybı meydana gelir. Transformatörün sekonder tarafı açık devrede çalıştırıldığında ölçülen kayıplar, demir kayıpları olarak adlandırılır. Bu kayıplar, histerezis kaybı ve girdap akımı kaybı olarak ikiye ayrılır ve denklem (3.19) ile ifade edilir.

$$P_0 = P_h + P_e \quad (3.19)$$

Transformatör çekirdekleri yüksek mıknatıslanma özelliğine sahip ferromanyetik malzemelerden oluşur. Alternatif akımın her yön değiştirmesi sırasında çekirdekte artık bir mıknatıslanma akımı kalır. Artık mıknatıs, diğer akımın oluşturduğu manyetik akıma karşı koyar; böylece bir güç kaybı oluşur. Bu kayıp histerezis kaybı olarak adlandırılır ve denklem (3.20)'deki gibi ifade edilir.

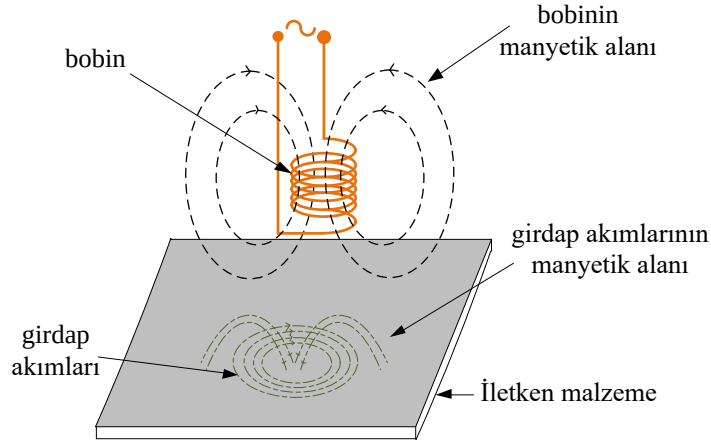
$$P_h = k_h f B^n \quad (3.20)$$

Burada P_h histerezis kayıplarını, k_h malzemeye bağlı katsayıyı, f frekansı ve B^n ise manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu kayıp, manyetik malzemenin özelliğine ve manyetik alanın frekansına bağlıdır.

Girdap (eddy) akımı kaybı, değişken manyetik alanların çekirdek içinde dolaşan girdap akımları oluşturması sonucu meydana gelir. Bu girdap akımları çekirdek içinde ısıya dönüşerek enerji kaybına sebep olur. Girdap akımı kaybı, nüve saclarının kalınlığı ve malzemenin elektriksel iletkenliği ile ilişkilidir. İnce ve yalıtılmış saclar kullanılarak bu kayıp değeri azaltılabilir. Bu akımların neden olduğu güç kaybı denklem (3.21)'deki gibi verilir.

$$P_e = k_e f^2 B^2 \quad (3.21)$$

Burada P_e girdap kayıplarını, k_e malzemeye bağlı katsayıyı, f frekansı ve B ise manyetik akı yoğunluğunu temsil etmektedir. Şekil 3.12'de girdap akımı oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Girdap akımlarının oluşması

3.1.6.2 Bakır Kayıpları

Transformatör primer ve sekonder sargılarından geçen akımların sargı direncinden dolayı oluşturduğu kayıplardır. Denklem (3.22)'de görüldüğü gibi sargı direncine ve sargıdan geçen akımın karesine bağlı olarak değişir. Bu kayıplar kısa devre deneyi ile hesaplanır.

$$P_{iletken} = P_{cu} = I^2 \times R \quad (3.22)$$

Bakır kayıplarını minimize etmek için sargıların kesit alanı artırılır veya daha düşük dirençli iletken malzemeler kullanılır. Ayrıca, transformatör tasarımında soğutma sistemleri ve düşük kayıplı sargı teknikleri kullanılarak ısının etkileri azaltılır. Bakır kayıpları, transformatörün toplam enerji verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür ve özellikle sürekli çalışan büyük güç transformatörlerinde ekonomik kayıplara neden olabileceği için dikkatle yönetilmelidir.

3.1.6.3 Stray Kayıpları

Stray (hesaplanamayan) kayıpları, transformatördeki toplam yük kaybının küçük bir kısmını oluşturmaktadır. Sargılarda, çekirdekte, tankta, sıkıştırma plakalarında ve manyetik yüzeylerde kaçak akım nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Girdap ve dolaşım akımı kaybını ve yüksek akımlardan kaynaklanan kayıpları içermektedirler.

3.1.6.4 Dielektrik Kayıpları

Dielektrik (izolasyon) kayıpları, özellikle transformatör yağında veya izolasyonunda, yağın bozulması, katı izolasyonun zarar görmesi ya da kalitesinin düşmesi sonucu meydana gelmektedir.

Transformatörlerin yapısını ve temel çalışma prensiplerini anlamada eşdeğer devre modelleri önemli bir yere sahiptir. Ancak, transformatörlerin karmaşık çalışma koşullarında karşılaşılabileceği arıza durumlarının daha ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir.

3.2 Transformatörlerde Meydana Gelen Elektriksel Arızalar

Transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızalar, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin güvenliği ve verimliliğini doğrudan etkileyen kritik faktörler arasında yer almaktadır. Bu arızalar, genellikle izolasyon hataları, kısa devreler, aşırı gerilim, dengesiz ve aşırı yüklenme, topraklama sorunları, harmonik bozulmalar ve sargı deformasyonları gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır.

İzolasyon arızaları, malzemenin zamanla yaşlanması ya da yıpranması, aşırı gerilim sonucu yalıtımın delinmesi veya nem, kirlilik ve kimyasal etkiler nedeniyle izolasyon yapısının bozulması şeklinde meydana gelebilmektedir. Kısa devre arızaları ise sargılar veya fazlar arasında kısa devre oluşması, yıldırım ya da aşırı akım gibi dış etkenlerin sargılara zarar vermesi veya transformatör içerisinde bulunan yabancı cisimlerin kısa devreye sebep olması gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. Aşırı gerilim kaynaklı arızalar, yıldırım darbeleri, şebekede meydana gelen dalgalanmalar, kaynak gerilimi dengesizliği veya açma-kapama işlemleri esnasında oluşan darbe gerilimleri nedeniyle oluşabilmektedir. Dengesiz ve aşırı yüklenmeye bağlı arızalar, transformatörün nominal kapasitesinin üzerinde yüklenmesi veya sürekli yüksek akım çekmesi sonucunda sargıların ısınması ve izolasyonun zayıflaması ile kendini göstermektedir. Topraklama problemleri nedeniyle oluşan arızalar, sargılardan toprağa kaçak akım sızması ya da nötr bağlantısındaki hatalar sonucunda meydana gelmektedir. Harmonik bozulmalar ise yüklerden kaynaklanan harmonik akımların

transformatörde aşırı ısınmaya sebep olması ve bu durumun güç kalitesini düşürmesi nedeniyle transformatörün verimliliğini azaltmaktadır. Son olarak, sargı deformasyonları; kısa devre ya da aşırı akım nedeniyle sargılarda mekanik hasar meydana gelmesi, sargıların gevşemesi veya mekanik gerilim altında kalması gibi etkenlerin sonucunda ortaya çıkmaktadır. Şekil 3.13'te, kısa devre nedeniyle transformatör sargılarında ve çekirdeğinde oluşan hasarların görselleri verilmiştir.

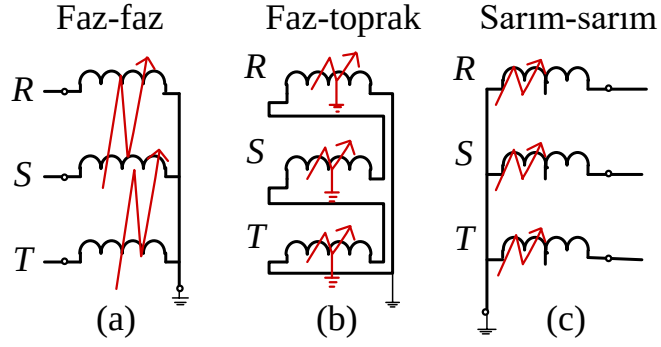


Şekil 3.13. Transformatörde sargı ve çekirdek arızalarının etkilerini gösteren görseller [58]

Elektriksel arızalar, transformatörlerin yapısal bütünlüğünü zayıflatarak işletme ömrünü kısaltmaktadır ve enerji iletim sistemlerinde kesintilere neden olarak şebekede hem güç kayıplarına hem de verimlilik düşüşlerine neden olabilmektedir.

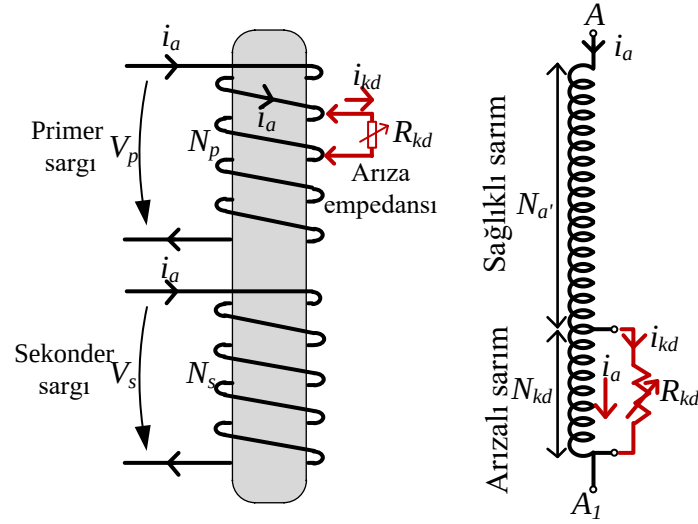
3.2.1 Sargı Kısa Devre Arızaları

Sargı kısa devre arızaları, sargı yalıtımındaki zayıflamalar veya mekanik zorlanmalar sonucunda sargıların birbirleriyle temas etmesi sonucunda oluşmaktadır. Bu arızalar, transformatörde aşırı ısınmaya, sargı deformasyonlarına ve cihazın devre dışı kalmasına yol açabilmektedir. Transformatörlerde sargı kısa devre arızaları, düşük empedanslı bağlantıların oluşmasıyla meydana gelir ve bu tür bağlantılar üç farklı şekilde ortaya çıkabilmektedir: fazlar arasında (faz-faz arası), faz ile toprak arasında (faz-toprak arası) veya aynı sargı üzerindeki sarımlar arasında (sarım-sarım arası). Şekil 3.14'te sargı arıza türlerine ait basit elektriksel devreler gösterilmektedir.



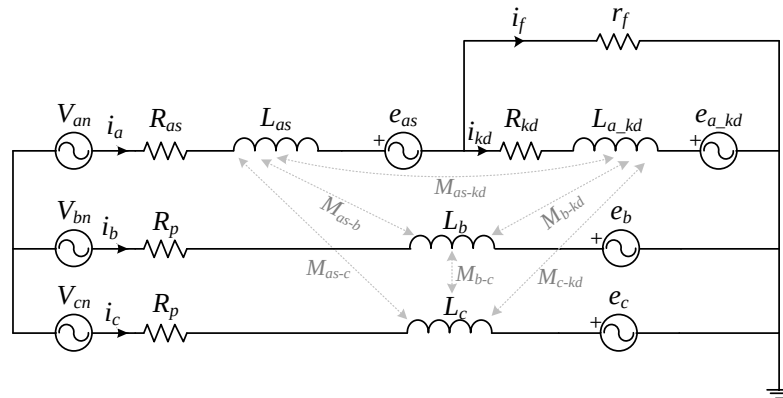
Şekil 3.14. (a) Faz-faz (b) Faz-toprak (c) Sarım-sarım kısa devre arızaları

Faz-faz arası kısa devre arızaları, transformatördeki iki veya daha fazla farklı faz arasında kısa devre oluştuğunda meydana gelmektedir. Bu arızalar, genellikle yalıtım arızaları, aşırı gerilim darbeleri veya mekanik streslerin birikmesi sonucu meydana gelebilmektedir. Faz-toprak arızaları, bir fazın veya birden fazla fazın toprakla kısa devre yapması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu tür arızalar genellikle yanlış işletme prosedürleri, yalıtım hataları veya daha önceden meydana gelen sargılar arası arızaların bir sonucu olarak gelişebilmektedir. Transformatörlerde meydana gelen sargı arızaları arasında tespiti ve korunması en zor olan tür, sarım-sarım arızalarıdır. Başlangıçta yalnızca bir sargı turunu etkileyen bu arızalar, erken tespit edilmediğinde hızla ilerleyerek daha büyük ve kritik arızalara dönüşebilmektedir. Bu arızalar genellikle yalıtımın zayıflamasıyla birlikte iç ark oluşumu ile başlamaktadır ve düşük akım, yüksek empedans özellikleri göstermektedir. Bu durum, hattaki akım seviyesinde belirgin bir artışa neden olmadığından, standart aşırı yük devre kesicileri veya daha hassas dengeli koruma cihazları tarafından tespit edilememektedir. Arızanın ilerleme aşamasında, bu tür arızalar düzensiz bir hızda gelişim göstererek ek sargı turlarını ve katmanlarını etkilemekte ve sonunda yüksek akım, düşük empedanslı bir arızaya dönüşmektedir. Ancak, arıza transformatörün önemli bir bölümünü etkileyene kadar otomatik devre dışı kalma durumu gerçekleşmemektedir. Bu süreç, başlangıçta küçük çaplı bir sargı arızasının zamanla büyüyerek ciddi hasara yol açabileceğini ve transformatörün bir bütün olarak işlevselliğini tehlikeye atabileceğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.15'te sarım-sarım kısa devre arızasının elektriksel şematik gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 3.15. Sarım-sarım kısa devre arızasının şematik gösterimi

Şekil 3.15'te, V_p ve V_s sırasıyla primer ve sekonder gerilimleri, N_p ve N_s ise primer ve sekonder sarım sayılarını ifade etmektedir. $N_{a'}$ ve N_{kd} , sırasıyla sağlıklı durum ve arızalı durumdaki sarım sayılarını temsil etmektedir. i_a ise her iki sargı için A fazı akımını göstermektedir. Sarım-sarım kısa devre arızası meydana geldiğinde i_{kd} akımı bir kısa devre empedansı (R_{kd}) üzerinden yolunu tamamlamaktadır. Bu kısa devre akımı, transformatör tasarımına, kısa devre empedansına ve arızanın şiddetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Kısa devre akımının genliği nominal sargı akımının 5 ila 50 katına kadar ulaşabilmektedir. Şekil 3.16'da, primer sargıda meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızasının elektriksel eşdeğer devre modeli gösterilmektedir.

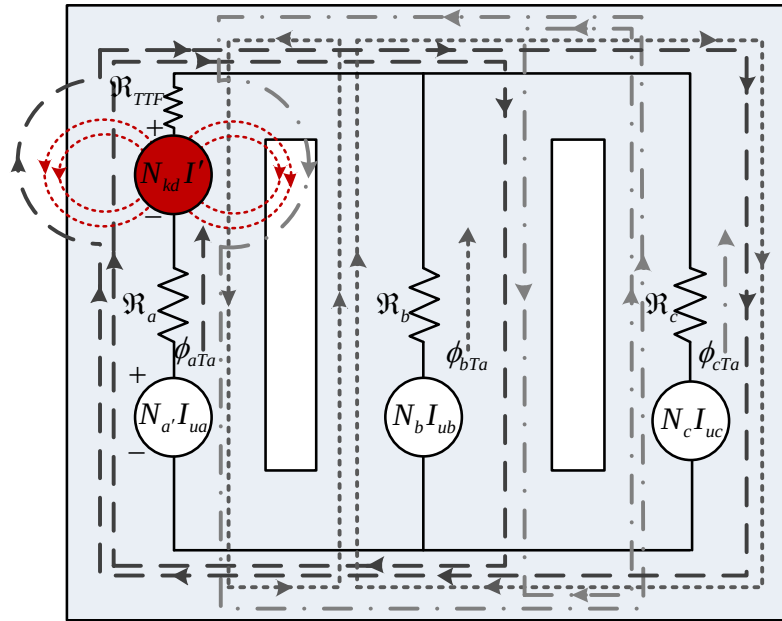


Şekil 3.16. Primer sargıda meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızasının elektriksel eşdeğer devresi [59]

Şekil 3.16'da r_f arıza yolu direncini, i_f ise bu yoldan geçen akımı temsil etmektedir. Ayrıca, i_{kd} kısa devre akımı ya da sirkülasyon akımı olarak adlandırılmaktadır. Faz gerilimi denklemleri, en sade haliyle denklem (3.23)'te sunulmuştur. Bu denklemin farklı gösterimleri de mevcuttur [59-61]. Bu denkleme göre, kısa devreli sargılar; faz A'nın arızalı kısmını ve diğer fazlar olan faz B ve faz C'nin sağlıklı bölümlerini temsil eden fazlar arasında, öz indüktans (L_{a_kd}) ve karşılıklı indüktanslar (M_{as-kd} , M_{b-kd} ve M_{c-kd}) ile ek bir faz gibi davranmaktadır.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_p & 0 & 0 & -R_{kd} \\ 0 & R_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_p & 0 \\ R_{kd} & 0 & 0 & -R_{kd} - r_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_a - i_{kd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as-b} & M_{as-c} & M_{as-kd} \\ M_{as-b} & L_b & M_{b-c} & M_{b-kd} \\ M_{as-c} & M_{b-c} & L_c & M_{c-kd} \\ M_{as-kd} & M_{b-kd} & M_{c-kd} & L_{a_kd} \end{bmatrix} \times \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{kd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_b \\ e_c \\ e_{a_kd} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Şekil 3.17'de sarım-sarım kısa devre arızası için manyetik eşdeğer devresi bulunmaktadır.



Şekil 3.17. Üç fazlı transformatörün sarım-sarım kısa devre arızası için manyetik eşdeğer devresi [43]

Şekil 3.17’de gösterildiği üzere, primer sargıda meydana gelen sarım-sarım kısa devre arızası, sekonder sargısı kısa devre durumunda olan bir oto transformatöre benzer şekilde davranmaktadır. Bu durum, primer sargıda yer alan uyarma akımlarının, kısa devre olmuş sarım veya sarımların ürettiği MMK’ya karşı koyacak şekilde değişmesine neden olmaktadır. Sarım-sarım kısa devre arızası esnasında, kısa devrede bulunan sarım veya sarımlar boyunca gerilim, nominal voltaj/sarım değerinin altına düşmektedir. Bunun temel sebebi, arızalı sarımlardaki akımın, terminal akımlarına kıyasla oldukça artmasıdır. Bu denli yüksek bir akım, sağlıklı sargılar tarafından üretilen ana manyetomotor kuvvete karşı bir MMK oluşturmaktadır. Teorik olarak, kısa devreli sarımlar boyunca indüklenen elektromotor kuvvetin (EMK) sıfır olması, bu sarımlardan geçen manyetik akının da sıfır olmasını gerektirmektedir. Bu durum, kısa devrede oluşan EMK’nın, uyarma akısı tarafından sıfırlanmasından kaynaklanmaktadır. Kısa devre olan sarımlar, manyetomotor kuvvet oluşturarak uyarma manyetomotor kuvvetine karşı koymakta ve bu durum, Şekil 3.17’de gösterildiği gibi, kısa devreli sarımlar boyunca yüksek radyal kaçak akımın meydana gelmesine yol açmaktadır [43, 62, 63]. Radyal kaçak akı, kısa devreli sarımların yakınında artış gösterse de çekirdek akısının otomatik düzenlenmesi sayesinde akı bağlantısı (linkage flux) sabit kalmaktadır [64]. Kısa devreli sarımlar, uyarma akısının karşılaştığı relüktansı artırarak transformatörün uyarma akımları ve manyetik akı değerleri üzerinde etkili olmaktadır. Bu etki, kısa devreli sarımların sayısına, yerleşim konumuna ve çekirdeğe olan mesafesine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [35, 36, 43, 62-64].

Sarım-sarım kısa devre arızası durumunda, primer A faz sargısının MMK tarafından üretilen çekirdek akısı (ϕ_{af}), Denklem (3.24)’te belirtilen şekilde matematiksel olarak ifade edilebilir [43],

$$\phi_{af} = \frac{N_a I_{ua} - N_{kd} I_{kd}}{(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_{TTF}) + \left(\frac{\mathfrak{R}_b \mathfrak{R}_c}{\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c} \right)} = \frac{N_a I_{ua} - N_{kd} I_{kd} (\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c)}{\mathfrak{R}_{TTF} (\mathfrak{R}_b + \mathfrak{R}_c) + \mathfrak{R}_T} \quad (3.24)$$

Burada $\Re_{TTF}$ sarım-sarım kısa devresinden kaynaklanan çekirdek akısındaki relüktans değişimini temsil etmektedir. Arıza durumunda, B ve C fazlarına ait MMK tarafından A fazında indüklenen akıların temel fazör bileşenleri, sırasıyla Denklem (3.25) ve Denklem (3.26)'da belirtilen şekilde matematiksel olarak ifade edilebilir [43],

$$\phi_{baf} = N_b I_{ub} \left(\frac{\Re_c}{\Re_{TTF} (\Re_b + \Re_c) + \Re_T} \right) \quad (3.25)$$

$$\phi_{caf} = N_c I_{uc} \left(\frac{\Re_b}{\Re_{TTF} (\Re_b + \Re_c) + \Re_T} \right) \quad (3.26)$$

Burada ϕ_{baf} ve ϕ_{caf} B ve C fazlarının A fazında indüklediği akı değerlerini temsil etmektedir. Dolayısıyla A bacağındaki toplam akı değeri (ϕ_{aTa}) denklem (3.27)'deki gibi elde edilebilir,

$$\begin{aligned} \phi_{aTa} &= \phi_{af} - \phi_{baf} - \phi_{caf} \\ &= \frac{N \left(\Re_b (I_{ua} - I_{uc}) + \Re_c (I_{ua} - I_{ub}) - \frac{N_{kd}}{N} I_{kd} (\Re_b + \Re_c) \right)}{\Re_{TTF} (\Re_b + \Re_c) + \Re_T} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Benzer şekilde, C fazındaki toplam akı değeri de (ϕ_{cTa}), Denklem (3.28)'deki gibi hesaplanabilir [43],

$$\begin{aligned} \phi_{cTa} &= \phi_{cf} - \phi_{acf} - \phi_{bcf} \\ &= \frac{N \left(\Re_a (I_{uc} - I_{ub}) + \Re_b (I_{uc} - I_{ua}) + \Re_{TTF} (I_{uc} - I_{ub}) - \frac{N_{kd}}{N} I_{kd} \Re_b \right)}{\Re_{TTF} (\Re_b + \Re_c) + \Re_T} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Sağlıklı durum ve arızalı durumdaki toplam akı bileşenlerinin bağlı olduğu büyüklükler karşılaştırıldığında arıza durumunun etkisi hakkında yorum yapılabilir. Burada arızanın sarım sayıları, uyarma akımları ve çekirdek relüktans değerlerine

bağlı olduğu görülmektedir. Arıza sonucunda denklem (3.27) ve (3.28)'de sağlıklı duruma kıyasla (bkz. denklem (3.17) ve (3.18)) değişikliğin meydana geldiği gözlemlenebilir. Bu değişim, arızanın meydana geldiği A fazında arıza etkisiyle eklenen çekirdek relüktansı ($\mathfrak{R}_{TF}$) ve manyetomotor kuvveti ($N_{kd}I_{kd}$) nedeniyle oluşmaktadır. A ve C fazlarının bulunduğu kollardaki akı değerlerindeki bu değişim, sarım-sarım kısa devre arızasının tespit edilmesinde kullanılabilir. Böylece akı değerlerindeki anormal değişiklikler, arızanın varlığını belirlemede önemli bir gösterge olarak ifade edilebilir. Bu yöntemle transformatörün sağlıklı çalışma durumundaki akı profili ile karşılaştırma yaparak, arızanın tespit edilmesi sağlanabilmektedir.

3.2.2 Kaynak Gerilimi Dengesizliği

Elektrik şebekesindeki gerilim dengesizlikleri, fazlar arasındaki gerilim seviyelerinin farklı olması nedeniyle transformatörlerin performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Özellikle bir fazdaki gerilim düşmesi veya yükselmesi, sargılarda dengesiz akımlar oluşturarak iletkenlerde ekstra güç kayıplarına yol açmakta ve verimliliği düşürmektedir. Bu durum sargı yalıtımının zayıflamasına ve arızalara neden olabilir. Ayrıca, transformatör çekirdeğinin doygunluk sınırına yaklaşması kayıpları artırır ve gürültü seviyesini yükseltir. Sonuç olarak, gerilim dengesizlikleri transformatörlerin elektriksel ve termal dayanıklılığını zayıflatmakta, kullanım ömrünü kısaltmakta ve bakım maliyetlerini artırmaktadır. Elektrik şebekelerinde gerilim dengesizliklerini önlemek, transformatörlerin güvenli ve verimli çalışmasını sağlamada kritik öneme sahiptir.

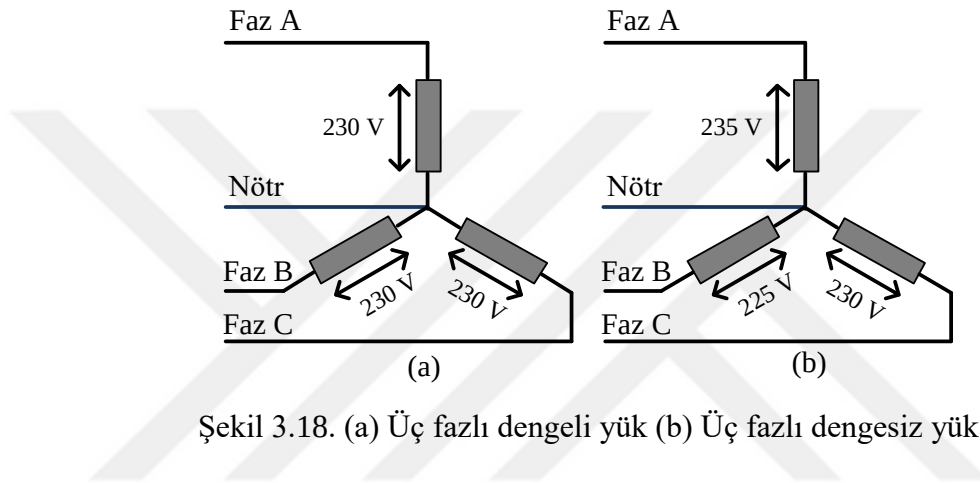
Güç sistemlerinde, tek fazlı ve üç fazlı yüklerin varlığı nedeniyle dengesiz akım ve gerilim sürekli karşılaşılan bir durumdur. Bu yüzden, güç sistemlerinde özellikle transformatörlerde dengesiz koşulların etkileri incelenmeli ve bu durumun azaltılması için önlemler alınmalıdır. İletim hatları, transformatör sargıları ve dengesiz dağıtılmış tek fazlı yüklerin ortak bağlantıları, sistemdeki dengesizliklerin temel nedenleri arasında yer almaktadır. Gerilim dengesizliği %2'nin altında olduğunda transformatör performansı genellikle etkilenmemektedir; ancak dengesizlik daha yüksek seviyelere ulaştığında transformatörün kapasitesini azaltmak

gerekebilmektedir. Transformatörlerde bu işleme deratasyon adı verilmektedir ve bu işlem, transformatörün nominal kapasitesinin belirli çevresel etkilerine, sıcaklık veya yük koşullarına göre düşürülmesini ifade etmektedir. Deratasyon, transformatörün güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak amacıyla yapılmakta ve özellikle ortam sıcaklığının yükselmesi, soğutma koşullarının yetersizliği, yük eğrisinin sürekli yüksek olması veya yük dağılımındaki dengesizlikler gibi durumlarda uygulanmaktadır. Transformatörün tasarım değerleri belirli sıcaklık ve yük limitlerine göre optimize edildiğinden, çevresel koşullar nominal değerlerin dışına çıktığında iç kayıplar artar ve transformatörün ömrü kısalabilir. Örneğin, ortam sıcaklığının artması durumunda transformatörün yağ veya sargı sıcaklıkları yükselir; bu da izolasyon malzemesinin yaşlanma sürecini hızlandırır. Bu gibi durumlarda, yük kapasitesini düşürerek transformatörün güvenli bir şekilde çalışması sağlanır. Ayrıca, yüksek rakımlı bölgelerde hava yoğunluğunun azalması nedeniyle doğal soğutma kapasitesinin düşmesi de deratasyonun uygulanmasını gerektirebilir. Deratasyon oranları, uluslararası standartlara (IEC, IEEE) ve üretici teknik verilerine göre hesaplanmaktadır. Bu işlem, transformatörün ömrünü uzatırken arızaların ve enerji kayıplarının önlenmesine yardımcı olmaktadır.

Üç fazlı güç sistemlerinde, üretilen gerilim sinüzoidal olup, her faz arasında 120° faz farkı vardır ve gerilimlerin genlikleri eşittir. Ancak, gerçek hayattaki elektrik sistemlerindeki gerilim ve akım bileşenleri tam bir simetrik yapı göstermemektedir. İletim ve dağıtım merkezlerinde çeşitli sebeplerden dolayı gerilim dengesizlikleri ortaya çıkabilmektedir. Dengesiz gerilimler, güç sistemlerinde gerilim ve akımda negatif ve sıfır bileşenlerinin oluşmasına yol açmaktadır. Akımın negatif bileşeni, enerji dağıtım sırasında kayıpların artmasına neden olurken, gerilimin negatif bileşeni transformatör nüvesi ve sargılarında sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Gerilim dengesizliğini tamamen ortadan kaldırmak pratikte mümkün olmasa da, üretici ve tüketici düzeyinde alınacak bazı önlemlerle kontrol edilebilir. Üç fazlı sistemlerde gerilim dengesizliği, üç temel durumda meydana gelmektedir. Bunlar; faz veya hat gerilimlerinin büyüklüklerinin farklı olması, faz açıları arasındaki farkın 120° 'den sapması ya da her iki durumun aynı anda ortaya çıkması şeklinde sıralanabilir. Bu tür durumlarda, dengesiz gerilim faktörünün hesaplanmasına yönelik çeşitli tanımlar bulunmakta olup bu tanımlar, üç fazlı transformatörlerin

dengeless gerilim koşullarındaki performans değerlendirmesinde 6nemli bir rol oynamaktadır.

Dengesiz gerilimlerden kaynaklanan negatif bileşenler, transformat6r6n aşırı ısınmasına yol açarak arızalanmasına ve beklenen 6mr6nden daha kısa s6rede devre dışı kalmasına neden olmaktadır. şekil 3.18’de g6sterildiği gibi, dengesiz dağıtılan tek fazlı y6kler, otomatik g6 fakt6r6 d6zeltme ekipmanlarının arızalanmasına ve dağıtım hatlarındaki gerilim reg6lat6rlerinde dengesiz gerilimlere neden olmaktadır.



şekil 3.18. (a) Üç fazlı dengeli y6k (b) Üç fazlı dengesiz y6k

Gerilim dengesizliğinin nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

- *şebeke Arızaları:* Elektrik şebekesinde meydana gelen faz kopmaları, kısa devreler ve arıza durumları gerilim dengesizliğine yol açabilir.
- *Dengesiz Y6k Dağılımı:* Transformat6re bağlı y6klerin fazlar arasında dengesiz dağıtılması gerilim dengesizliği yaratır.
- *Hat Empedansı Farkları:* Elektrik iletim hatlarının farklı empedanslara sahip olması fazlar arasında gerilim farklılıklarına neden olabilir.
- *Hatalı Bağlantılar:* Trafo bağlantılarındaki hatalar (6rneğin, yanlış faz bağlantıları) gerilim dengesizliğine yol açabilir.
- *Topraklama Problemleri:* Yetersiz veya hatalı topraklama, fazlar arasında potansiyel farkları oluşturabilir.
- *Arıza Durumları:* Transformat6rdeki izolasyon hataları, dahili kısa devreler veya sargı arızaları gerilim dengesizliği oluşturabilir.

- *Harmonik Bozulmalar:* Yüklerden kaynaklanan harmonik bozulmalar gerilim dengesizliğini artırabilir.
- *Gevşek Klemensler ve Bağlantılar:* Elektrik bağlantılarındaki gevşeklikler ve oksitlenmeler gerilim düşümüne ve dengesizliğine neden olabilir.
- *Üretim ve Dağıtım Problemleri:* Elektrik retim tesislerindeki dengesiz üretim veya dağıtım ağındaki düzensizlikler gerilim farklılıklarına yol açabilir.
- *Doğal Etkenler:* Fırtına, yıldırım ve aşırı sıcaklık gibi doğal faktörler elektrik hatlarında arızalar ve gerilim dengesizlikleri oluşturabilir.

Transformatörlerde gerilim dengesizliği oluştuğuunda, fazlar arasındaki gerilim değerleri eşit olmaktan çıkar ve enerji sisteminde birçok olumsuz etki meydana gelir. Gerilim dengesizliği genellikle %1 ile %3 arasında tolere edilebilir bir aralıktadır. Bu sınır, uluslararası standartlara ve uygulama gereksinimlerine göre değişebilir. Gerilim dengesizliği bu sınırı aştığuında, transformatör sargılarında aşırı ısınma, kayıplarda artış, verim düşüşü ve izolasyon bozulmaları ortaya çıkar. Ayrıca, dengesiz besleme elektrik makinelerine zarar vererek titreşim, gürültü ve mekanik yıpranmaya yol açabilir. Koruma sistemleri yanlış çalışabilir veya aşırı yüklenmeden dolayı devre dışı kalabilir. Sonuç olarak, enerji sisteminin kararlılığı bozulur, bakım ve onarım maliyetleri artar ve ciddi arızalar meydana gelebilir. Bu nedenle, enerji kalitesini korumak için gerilim dengesizliğinin sürekli izlenmesi ve sınırların aşılmasını önleyici tedbirlerin alınması hayati önem taşımaktadır.

Elektrik güç sistemlerinde gerilim dengesizliği, önemli bir kalite göstergesi olarak kabul edilir. Transformatörlerde bu dengesizlik, fazlar arasındaki gerilim farklılıklarını ifade eder ve uluslararası standartlara uygun şekilde ölçülüp değerlendirilir. Gerilim dengesizliği standartları aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

IEC 61000-3-13: Elektrik güç kalitesi ve gerilim dengesizliği için uluslararası standarttır.

IEEE 1159: Elektrik enerjisi kalitesi standartlarını belirler.

EN 50160: Avrupa’da elektrik enerjisi karakteristiklerini tanımlar.

Bu standartlara göre, fazlar arasındaki gerilim dengesizliğinin %2 ile %3 arasında olması genellikle kabul edilebilir. Önemli sanayi tesislerinde ise tolerans %1'in altına indirilebilir. Gerilim dengesizliği, genellikle faz-faz gerilimlerinin ölçülmesiyle hesaplanmaktadır. Denklem (3.29) yaygın olarak kullanılmaktadır [57].

$$\%VUF = \frac{(V_{\phi,max} - V_{\phi,avg})}{V_{\phi,avg}} \times 100 \quad (3.29)$$

Gerilim dengesizliği, multimetreler, enerji analizörleri ve SCADA sistemleri ile ölçülebilmektedir. Dengesizliğin önlenmesi için; yüklerin fazlara eşit dağıtılması, hat empedanslarının dengelenmesi, düzenli bakım, bağlantı kontrolü ve harmonik filtrelerin kullanılması gerekmektedir.

3.2.3 Laminasyon Arızaları

Transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızalardan bir diğeri de laminasyon arızalarıdır. Bu tür arızaların, transformatörlerde kayıp artışına yol açtığı ve manyetik devrelerde daha yüksek girdap akımı kayıplarına neden olduğu bilinmektedir. Büyük boyutlardaki transformatör nüvelerinde, laminasyonlar arası meydana gelen kısa devre akımı, nüveye zarar verebilecek seviyelere ulaşabilmektedir.

Güç transformatörlerinin nüveleri genellikle ince laminer elektriksel çelikten imal edilmekte ve bu yapı, girdap akımı kayıplarını azaltarak yüksek verimlilik sağlamaktadır. Her iki tarafa 1 ile 3 µm kalınlığında inorganik bir kaplama (vernük gibi) uygulanarak laminasyonların doğrudan elektriksel temasının önüne geçilmektedir. Bununla birlikte, elektriksel çeliğin kesilmesi ve şekillendirilmesi sırasında oluşan mekanik gerilmeler, laminasyonlarda deformasyona ve manyetik özelliklerde bozulmaya neden olmaktadır. Transformatör nüvesi, montaj ve sargıların sarım işlemleri sırasında mekanik hasarlara maruz kalabilir. Ayrıca üretim sürecinde transformatör gövdesine yabancı maddeler girebilir. Bu durum, titreşim, ısı, ark ve yalıtımın bozulması gibi etkiler meydana getirerek laminasyonlara zarar verebilmektedir. Kesim işlemi sırasında mekanik kayma deformasyonu nedeniyle kesim kenarlarında çapak oluşabilmektedir. Bu çapaklar, yalıtımı aşındırarak

laminasyonlar arasında elektriksel kısa devrelere neden olmaktadır. Çok sayıda laminasyonun kısa devre olması, yüksek girdap akımları oluşturarak güç kayıplarını önemli ölçüde artırır ve çekirdeğin yerel olarak aşırı ısınmasına yol açabilir. Bu durum, sacların yanması veya erimesi sonucunda transformatörün tamamen arızalanmasıyla sonuçlanabilmektedir. Şekil 3.19, elektrik sacı laminasyonlarının yapısını, kenar çapaklarını ve laminasyonlar arasındaki temasın nasıl gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 3.19. Sac yığını üzerindeki kenar çapaklarından kaynaklanan laminasyon kısa devre arızaları

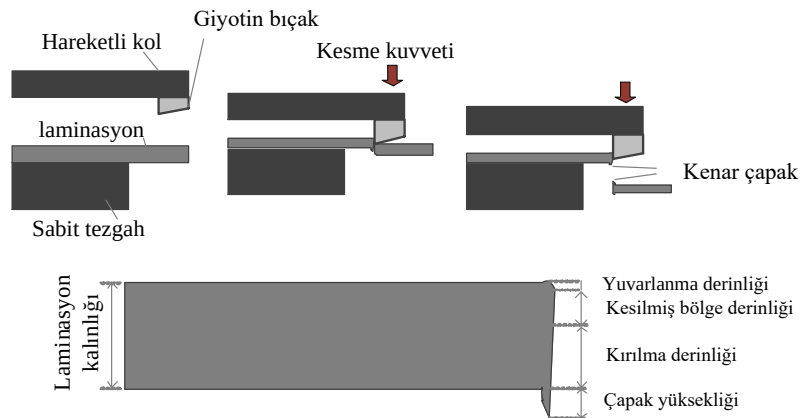
Belirli durumlarda, yalıtımın kademeli olarak bozulması, aşağıda açıklanan dış faktörlere bağlı olarak kısa devre arızalarına yol açabilir [62]. Bu süreç, genellikle yalıtım malzemesinin uzun süreli mekanik, termal veya elektriksel strese maruz kalması sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu faktörler, yalıtım tabakasının incelmeye veya bütünlüğünü kaybetmesine neden olarak laminasyonlar arasında elektriksel temasın oluşmasını kolaylaştırmaktadır. Bu temas, kısa devrelere neden olarak transformatörün performansını olumsuz etkileyebilir ve aşırı ısınma gibi ciddi sonuçlara yol açabilir.

3.2.3.1 Kenar Çapak Arızası (Edge Burr Fault)

Kenar çapak arızası, elektriksel çeliğin kesilmesi ve delinmesi sırasında ortaya çıkabilen ve genellikle laminasyon üretim hatası olarak adlandırılan bir sorundur. Montaj sırasında kırık laminasyonlar, somunlar veya cıvatalar gibi istenmeyen bileşenler laminasyon katmanlarının içine karışabilir. Sabitlenmemiş laminasyonlar veya sargılardan kaynaklanan titreşimler de ciddi yapısal sorunlar meydana

getirebilir. Transformatör çekirdek istifinde uygun olmayan şekilde yerleştirilen kenar çapakları, laminasyonlar arasında kısa devre meydana getirerek girdap akımlarının oluşmasına ve dolayısıyla çekirdek kayıplarının artmasına neden olmaktadır [63]. Bu durum, istifin karşılıklı yüzeylerinde bulunan çapakların kapalı devreler oluşturmasıyla meydana gelmekte ve bu devreler, girdap akımlarının dolaşabileceği yollar ortaya çıkarmaktadır. Çapakların boyutu çekirdeğe doğrudan zarar verecek kadar büyük olmasa da, özellikle yüksek manyetik akı yoğunluklarında transformatörün verimliliğini önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Laminasyon sacları kesilirken, iki bıçaklı giyotin kullanıldığında makaslama etkisi nedeniyle kesim kenarlarında çapaklar oluşmaktadır. Bıçak metale temas ettiğinde, metali kesmeye başlar ve bıçağın metal üzerinde uyguladığı yük artarak makaslama ve kırılma gerilmeleri meydana gelir. Bu gerilme, metalde sünek bir kırılmaya yol açarak ani çatlamalar ve çapak oluşumuna neden olmaktadır. Kesim işlemi sırasında, bıçak metali keserken kesme etkisi değişir ve sacın kesim kenarında görülebilir. Bıçakla temas eden ilk metal kısmı plastik deformasyona uğrar ve kenar yuvarlanır. Kesme derinleştikçe, sac boyunca dikey olarak parlak bir kesim alanı oluşur. Son aşamada ise açılı kırılmalar meydana gelir ve kesim kenarında küçük çapaklar oluşur. Bu çapakların boyutu, kesme aralığı ve bıçağın keskinliği gibi faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Kesim işleminin aşamaları Şekil 3.20’de gösterilmektedir.



Şekil 3.20. Laminasyon saclarının kesilme işlemi ve çapak oluşumu [63]

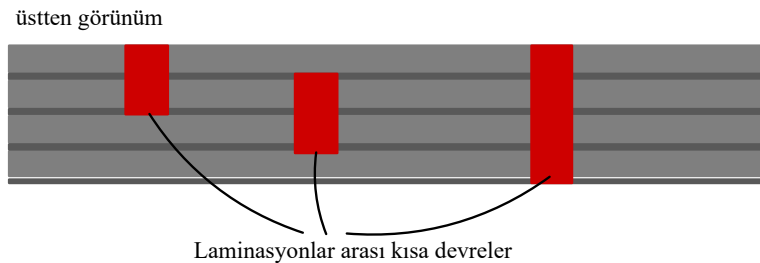
Şekil 3.20’deki kesme işlemi sırasında sac üzerinde oluşan farklı bölgeler ve deformasyonlar detaylı bir şekilde aşağıda açıklanmıştır:

- *Yuvarlanma derinliği*: İlk temas noktasında metalin plastik deformasyona uğrayarak kenar boyunca yuvarlanma yaptığı alan.
- *Kesilmiş Bölge derinliği*: Kesme işleminin düzgün bir şekilde gerçekleştirildiği, parlak ve net bir kesim alanı.
- *Kırılma derinliği*: Kesim derinleştikçe sünek kırılmanın meydana geldiği ve çatlakların oluştuğu alan.
- *Çapak Yüksekliği*: Kesim sonucu kenarda kalan çapakların yüksekliği.
- *Kırılma Açısı*: Çapak oluşumuna katkı sağlayan kırılmanın açısı.

Bu durum, transformatörün enerji kayıplarını artırarak operasyonel maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır.

3.2.3.2 Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızası

Transformatörlerde laminasyonlar arası kısa devre arızası, saclar arasındaki yalıtım tabakasının bozulması sonucu ortaya çıkan önemli bir elektriksel arızadır. Bu arıza, genellikle yalıtım malzemesinin zamanla yıpranması, nemin etkisiyle korozyon oluşması, yüksek sıcaklıklar nedeniyle yalıtımın erimesi veya montaj hatalarından kaynaklanmaktadır. Yalıtımın deforme olarak özelliğini kaybetmesi, saclar arasında kısa devreye yol açarak transformatörün manyetik devresinde enerji kayıplarını artırır ve çekirdekte aşırı ısınmaya neden olmaktadır. Bu arıza sonucunda, transformatörün nüvesinde sıcaklık artışı, daha yüksek gürültü seviyesi, enerji kayıplarında artış ve genel verim düşüşü gibi olumsuz etkiler ortaya çıkabilmektedir. Laminasyonlar arası kısa devre arızası Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Laminasyonlar arası kısa devre arızası gösterimi

4. TRANSFORMATÖRÜN VE ELEKTRİKSEL ARIZA SENARYOLARININ MODELLENMESİ

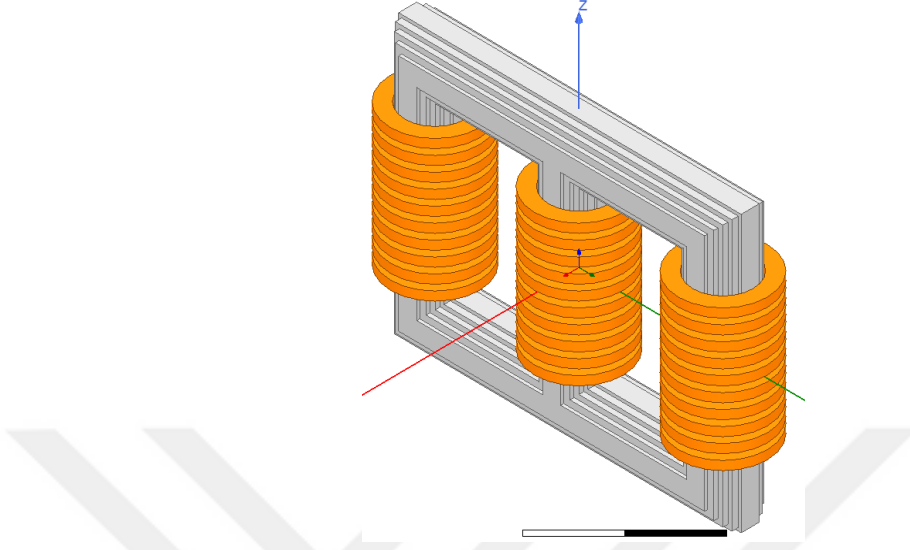
Transformatörde sarım-sarım kısa devre, kaynak gerilimi dengesizliği ve laminasyon arızalarını analiz etmek için Sonlu Elemanlar Yöntemi tabanlı ANSYS® Maxwell-3D simülasyon programı kullanılmıştır. Bu analiz yardımıyla arızaların oluşturduğu karakteristik parametreler incelenmiştir. Bu amaçla tasarım ve elektriksel parametreleri bilinen bir dağıtım transformatörü program vasıtasıyla modellenmiş ve transformatörün farklı türdeki arıza sonuçları sağlıklı durum ile karşılaştırılmıştır.

Transformatörün sağlıklı ve arızalı modelleri tam yük koşullarında çalıştırılarak, kaçak akı ve faz akımları gibi değişkenlere ait veriler elde edilmiştir. Bu veriler, MATLAB programı kullanılarak FFT ile analiz edilmiş ve frekans spektrumunda karakteristik arıza sinyalleri tespit edilmiştir.

4.1 ANSYS® Maxwell Programına Genel Bakış

ANSYS® Maxwell, elektrik ve manyetik alan problemlerini Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz eden yüksek performanslı bir simülasyon programıdır. Bu yazılım; transformatörler, elektrik motorları ve jeneratörlerin yanı sıra elektriksel veya mekanik sensörler ile çeşitli elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarımında ve matematiksel analizinde kullanılmaktadır. Donanımsal prototipler oluşturulmadan önce gelişmiş elektromanyetik alan analizleri yaparak sistem performansının değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. ANSYS® Maxwell’de, çeşitli tasarım türleri ve çözücüler kullanılarak uygun denklem setleri ile analizler yapılmaktadır. ANSYS® Maxwell’de kullanım alanlarına bağlı olarak elektriksel ve manyetiksel, magnetostatik, elektrostatik, DA iletim, elektrik makineleri ve transformatörler için tasarım arayüzleri ve devre ve sistem simülasyonları gibi farklı çözücü sistemleri bulunmaktadır. ANSYS® Maxwell yazılımında RMXprt (Rotation Machinery Expert), Maxwell 2D ve Maxwell 3D olmak üzere üç tasarım seçeneği bulunmaktadır. RMXprt, elektrik motorları, sensörler, dönüştürücüler ve çeşitli elektromanyetik ve elektromekanik cihazların tasarım ve analizine yönelik olarak tercih edilir. Maxwell 2D, çözümleri XY veya RZ düzlemlerinde gerçekleştirirken;

Maxwell 3D, üç boyutlu olarak problemleri sonlu elemanlar yöntemiyle çözmektedir. Şekil 4.1’de ANSYS® Maxwell ile tasarlanan modellere örnek çizimler verilmiştir.



Şekil 4.1. ANSYS® Maxwell ile tasarlanmış örnek bir modelin gösterimi

Sonlu Elemanlar Yöntemi, elektromanyetik alan problemlerini uzayın sonlu bir bölgesinde belirlenen uygun sınır koşulları ve başlangıç koşullarıyla Maxwell denklemlerini çözerek tekil olmayan bir çözüm elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu denklemler, zamana bağlı olarak denklem (4.1) ile denklem (4.4) arasında verildiği gibidir.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \times D = \rho \quad (4.4)$$

Burada H manyetik alan şiddetini (A/m), J akım yoğunluğunu (A/m²), D elektriksel akı yoğunluğunu (C/m²), ρ yük yoğunluğunu, B manyetik akı yoğunluğunu (T) ve E ise elektrik alanını (V/m) ifade etmektedir.

Manyetik akı yoğunluğu ve elektrik alanı şiddeti arasındaki ilişki ise denklem (4.5)'te verilmiştir.

$$\begin{aligned} B &= \mu \times H \\ H &= \nu \times B \end{aligned} \tag{4.5}$$

Elektromanyetik alan problemlerinde, doğrudan alanın kendisi yerine alan potansiyellerinin kullanılması, daha basit ve hızlı bir çözüm elde edilmesini sağlar. Kartezyen koordinatlarda ise alan potansiyelleri denklem (4.6), denklem (4.7) ve denklem (4.8)'deki gibi yazılabilir.

$$B_x = \frac{\partial A_x}{\partial y} + \frac{\partial A_y}{\partial z} \tag{4.6}$$

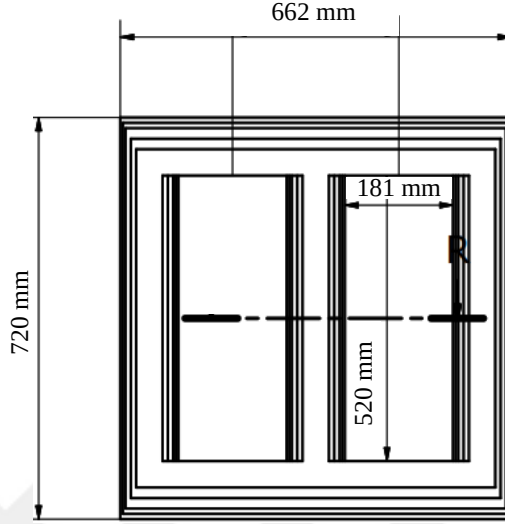
$$B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} + \frac{\partial A_z}{\partial x} \tag{4.7}$$

$$B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} + \frac{\partial A_x}{\partial y} \tag{4.8}$$

4.2 Transformatörün Modellenmesi

Transformatörün modeli, temel tasarım parametreleri dikkate alınarak ANSYS® Maxwell yazılımında oluşturulmuştur. ANSYS® Maxwell yazılımında, çeşitli elektrik makinelerinin çekirdek ve sargı yapıları doğrudan oluşturulabilir ya da SolidWorks gibi CAD (Computer Aided Design) yazılımlarıyla çizilen geometriler Maxwell arayüzüne kolayca entegre edilebilmektedir. Ayrıca, farklı türdeki elektrik makinelerini simüle etmek amacıyla programda RMXprt Modülü bulunmaktadır. Ancak, bu modül içerisindeki bazı parametrelerin değiştirilememesi, özel tasarım özelliklerine sahip makinelerin modellenmesini sınırlamaktadır. Bu çalışmada transformatör 3 boyutlu (3D) olarak doğrudan Maxwell üzerinde modellenmiştir.

Tezde kullanılan transformatör, 3 faz, 50 kVA gücünde olup 33/0.4 kV dönüştürme oranına ve Yzn11 sargı bağlantı grubuna sahiptir. Transformatörün teknik özellikleri Şekil 4.2 ve Çizelge 4.1’deki gibidir.

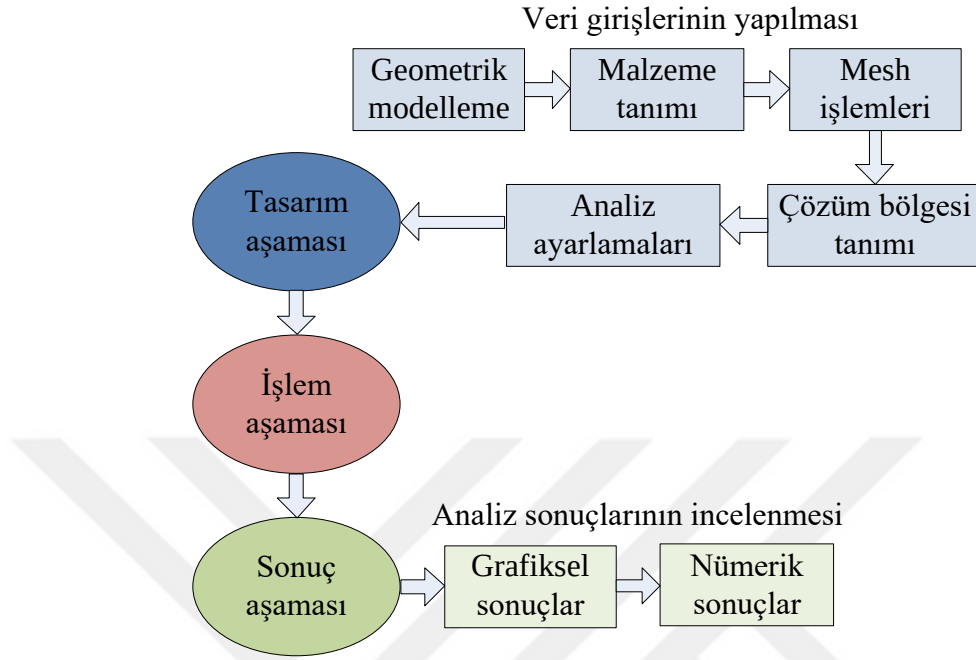


Şekil 4.2. Transformatörün geometrik büyüklükleri

Çizelge 4.1 Transformatörün teknik özellikleri

Teknik Parametreler	Değer
Anma gücü (kVA)	50
Frekans (Hz)	50
Soğutma sistemi	ONAN
Gerilim oranı (kV)	33/0.4
Bağlantı grubu	Yzn11
Ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)	40
Yüksek gerilim (YG) sarım sayısı	7716
Alçak gerilim (AG) sarım sayısı	108
Pencere genişliği (mm)	181
Pencere yüksekliği (mm)	520
Transformatör genişliği (mm)	662
Transformatör yüksekliği (mm)	720
Paket boyu (mm)	110
Gerilim regülasyonu (%)	4.13

Transformatörün modeli oluşturulurken sırasıyla tasarım, işlem aşaması ve sonuç aşamaları izlenmektedir. Bu sıralama Şekil 4.3'teki gibi verilmiştir.



Şekil 4.3. Transformatör modelleme aşamaları

Tasarım aşamasında gerçekleştirilenler sırasıyla aşağıdaki gibi detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

i. Çözüm tipinin belirlenmesi

ANSYS® Maxwell, farklı türdeki analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla farklı çözüm türleri sunmaktadır. Bunlar sırasıyla Manyetostatik, Eddy akımı, Geçici durum analizi, Elektrostatik, DA iletimi ve Geçici durum elektrik çözüm türleridir. Çalışmada akım, gerilim, manyetik alan ve akıların zamanla değişimini incelemek amacıyla geçici durum analizi seçilmiştir.

ii. Model geometrisinin tanımlanması

Transformatörün geometrik modelini oluşturmak için doğrudan Maxwell üzerinde çizimler oluşturulabilir veya bir CAD programındaki geometrik çizimler de Maxwell içerisine eklenebilir. Çalışmada çekirdek ve sargıların geometrisi doğrudan program içerisindeki tanımlamalar ile oluşturulmuştur.

iii. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi

Transformatörün nüvelerinde elektriksel çelik malzeme kullanılmaktadır ve bu çelik sacların kalınlığı 0.23-0.5 mm aralığında değişmektedir. Çalışmada nüve malzemesi olarak yazılım arayüzünde tanımlı olan elektriksel saclardan biri olan M27-26G seçilmiştir.

iv. Mesh yapısının oluşturulması

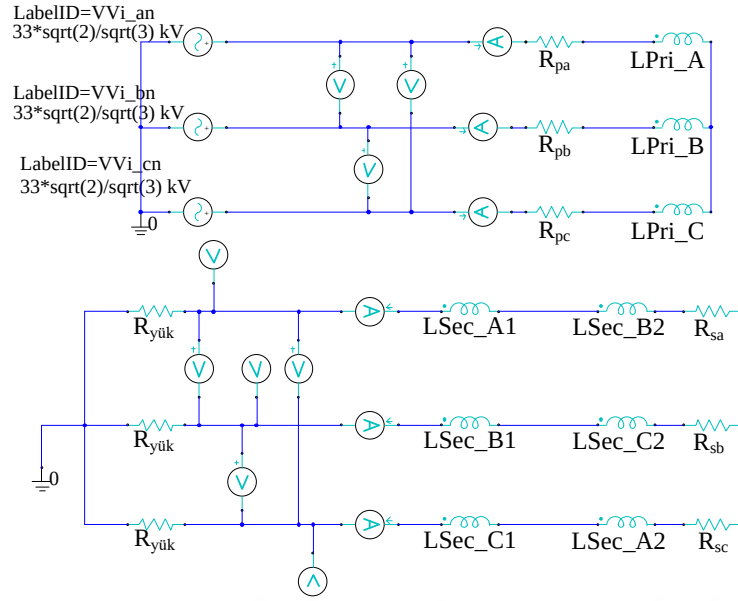
Sonlu elemanlar yönteminin çalışma prensibi, analizleri gerçekleştirmek için “mesh” adı verilen sonlu sayıda küçük alanlar oluşturmaya dayanır. Geometrik modele uygun bir ağ yapısının oluşturulması işlemi “mesh oluşturma” olarak adlandırılmaktadır. Mesh sayısının artması, daha hassas çözümler elde edilmesini sağlarken, aynı zamanda simülasyon süresinin uzamasına neden olmaktadır. ANSYS® Maxwell yazılımında, geometrinin istenilen bölgeleri için manuel olarak mesh oluşturulabileceği gibi, otomatik mesh oluşturma seçeneği de bulunmaktadır.

v. Simülasyon çözüm alanı tanımlaması

ANSYS® Maxwell’de tasarlanan modellerin analizini gerçekleştirmek için bir simülasyon bölgesi tanımlanması gerekmektedir. Bu simülasyon bölgesi, 2D veya 3D model fark etmeksizin “boşluk (vacuum)” olarak seçilmektedir. Simülasyon bölgesinin boyutları, analiz edilecek modelle uyumlu olmalıdır ki doğru ve hassas bir mesh işlemi gerçekleştirilebilsin.

vi. Uyarım devre modelinin oluşturulması

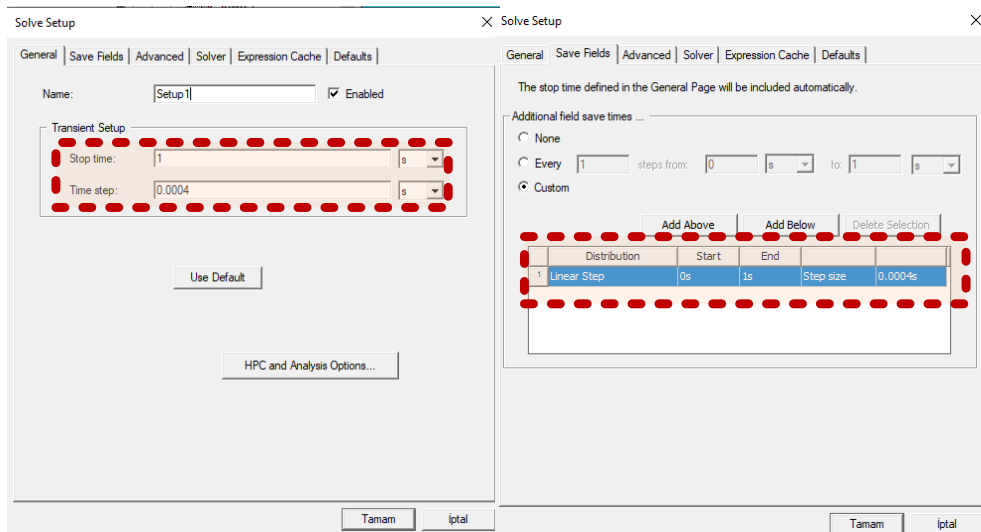
Modellenen transformatörün beslenmesi iki farklı yöntemle gerçekleştirilebilir. Birinci yöntemde, sargılara önceden belirlenmiş bir akım uygulanır; bu yaklaşım genellikle statik veya harmonik analizlerde tercih edilmektedir. İkinci yöntemde ise sargılardan geçen akım bir bilinmeyen olarak ele alınır ve sargılar Şekil 4.4’teki gibi harici bir elektrik devresi (External Circuit Editor) aracılığıyla beslenir. Bu yöntem, sarım-sarım kısa devre arızası ve kaynak gerilim dengesizliği gibi durumların incelenmesi amacıyla tercih edilmiştir.



Şekil 4.4. ANSYS® Maxwell ile uyarım devresi oluşturma

vii. Analiz ayarlarının yapılması

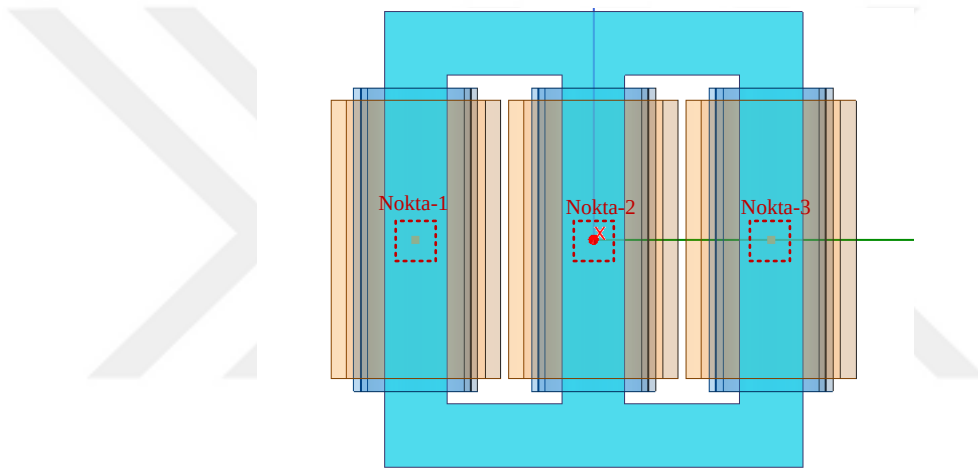
Geçici durum analizi için çözüm süresinin ve örnekleme zamanının doğru bir şekilde belirlenmesi gereklidir. Örnekleme zamanının düşük tutulması, analiz sonuçlarının daha hassas olmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, transformatörün manyetik alan hesaplamalarını göz önünde bulundurmak için, “alan kaydet” seçeneğinin aktif hale getirilmesi önem taşımaktadır. Şekil 4.5’te çözüm ayarlarının belirlendiği arayüz gösterilmiştir.



Şekil 4.5. ANSYS® Maxwell’de analiz ayarlarının yapıldığı arayüz

viii. Kaçak akı sonuçlarının elde edilmesi,

Model oluşturulduktan sonra, transformatör üzerinde ve çevresinde oluşan kaçak akı değişimlerini izlemek amacıyla, bir sensör gibi işlev görecek kaçak akı gözlem noktalarının modellenmesi gerekmektedir. Bu noktaların konumlarının doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşır. Gerçek hayatta olduğu gibi, bu noktalardan elde edilen kaçak akı bilgileri, sensörlerden alınan verilerle benzerdir. Şekil 4.6'da kaçak akı gözlem noktalarının konumları gösterilmektedir. Bu noktalardan geçen akı miktarlarının hesaplanması için belirli matematiksel işlemler uygulanmalıdır. Ayrıca, bu noktalardan geçen manyetik alan yoğunluğu x , y ve z koordinat düzlemlerinde B_x , B_y , B_z olarak elde edilebilir.



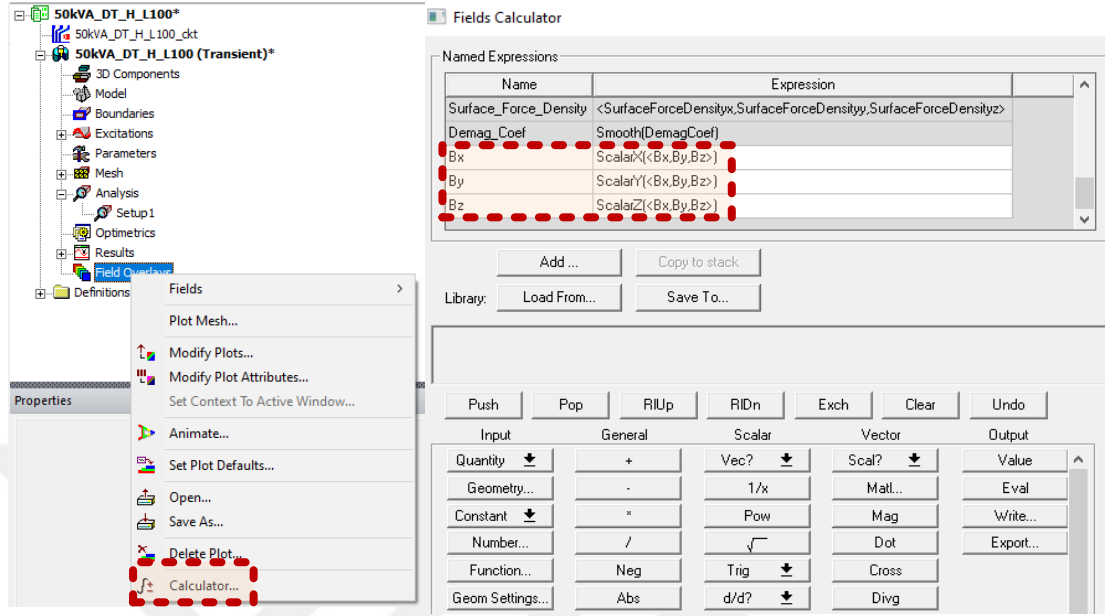
Şekil 4.6. Kaçak akıları tespit etmek için kullanılan sensörlerin konumları

Koordinat düzlemine göre bakılan B_x , B_y ve B_z ANSYS® Maxwell'de Şekil 4.7'de gösterilen *calculator* kısmında hesaplanarak işleme dahil edilir.

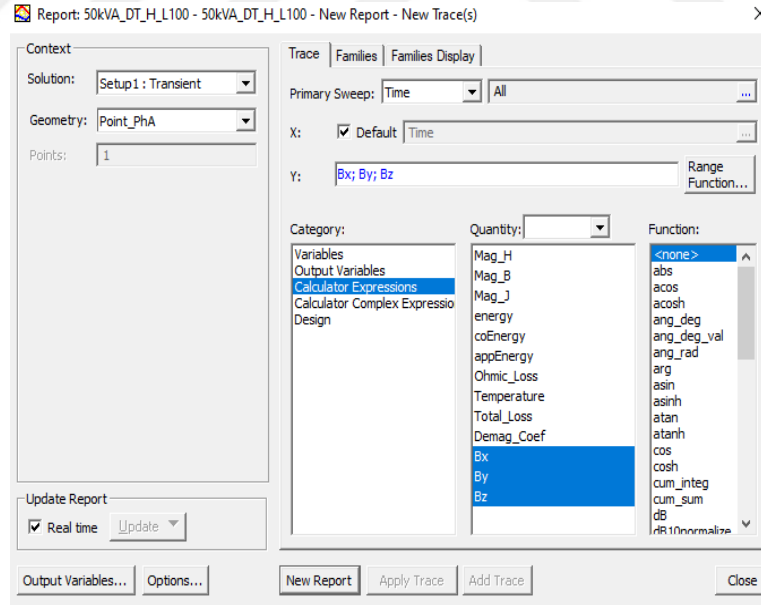
$$\begin{aligned} B_x &= \text{ScalarX}(< B_x, B_y, B_z >) \\ B_y &= \text{ScalarY}(< B_x, B_y, B_z >) \\ B_z &= \text{ScalarZ}(< B_x, B_y, B_z >) \end{aligned} \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) ile noktalar üzerindeki kaçak akı sonuçlarının incelenmesi gerçekleştirilebilir. Denklemlerin hesabından sonra kaçak akı grafiklerini elde etmek

için Şekil 4.8’de alan sonuçları raporunu oluşturma (create fields report) kısmındaki kaçak akıya ait olan B_x , B_y ve B_z değerlerinin grafikleri eklenir.

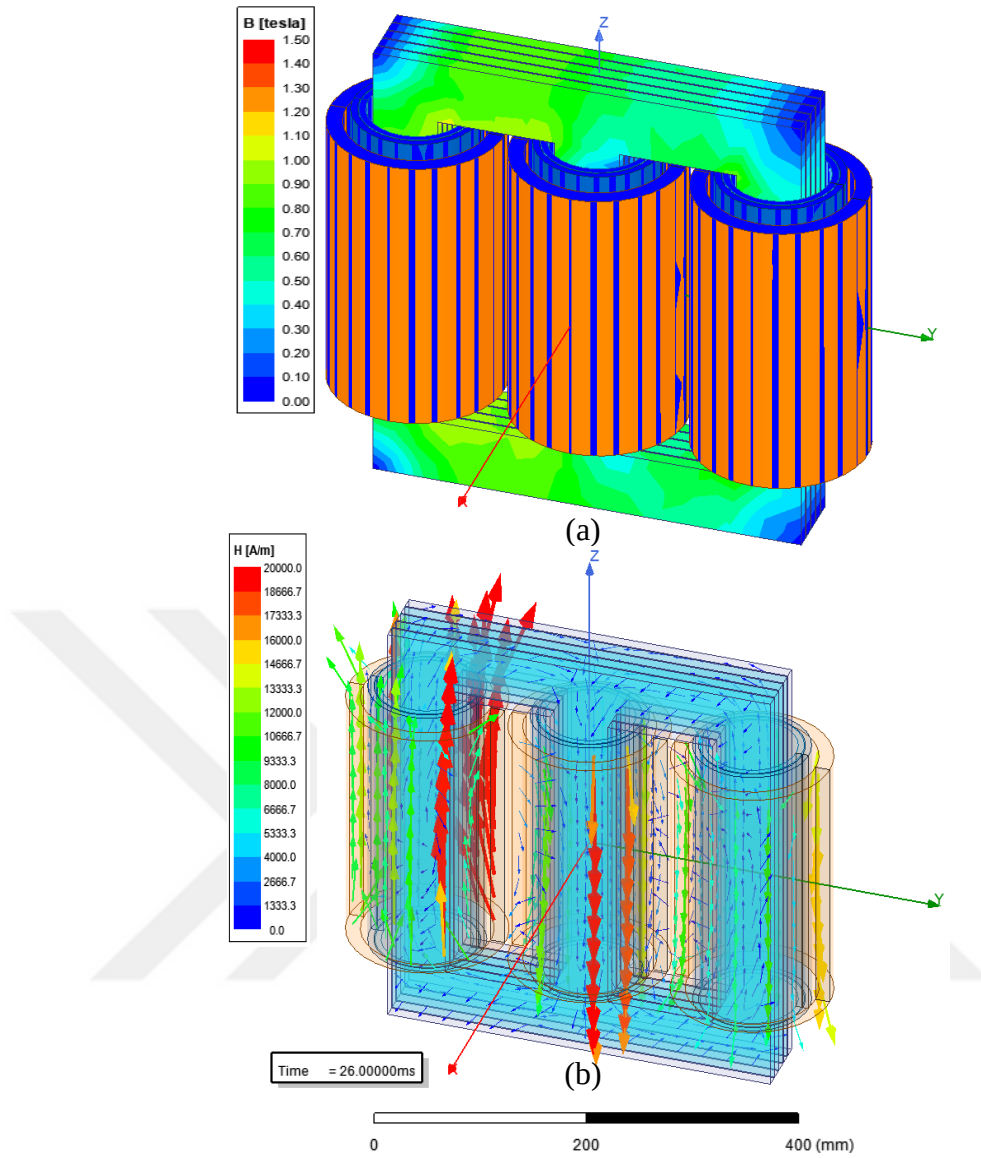


Şekil 4.7. B_x , B_y ve B_z denklemlerinin oluşturulması



Şekil 4.8. B_x , B_y ve B_z grafiklerinin oluşturulması

Tasarımı gerçekleştirilen transformatörün sağlıklı şartlar altındaki manyetik alan ve manyetik akı vektörü dağılımı Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

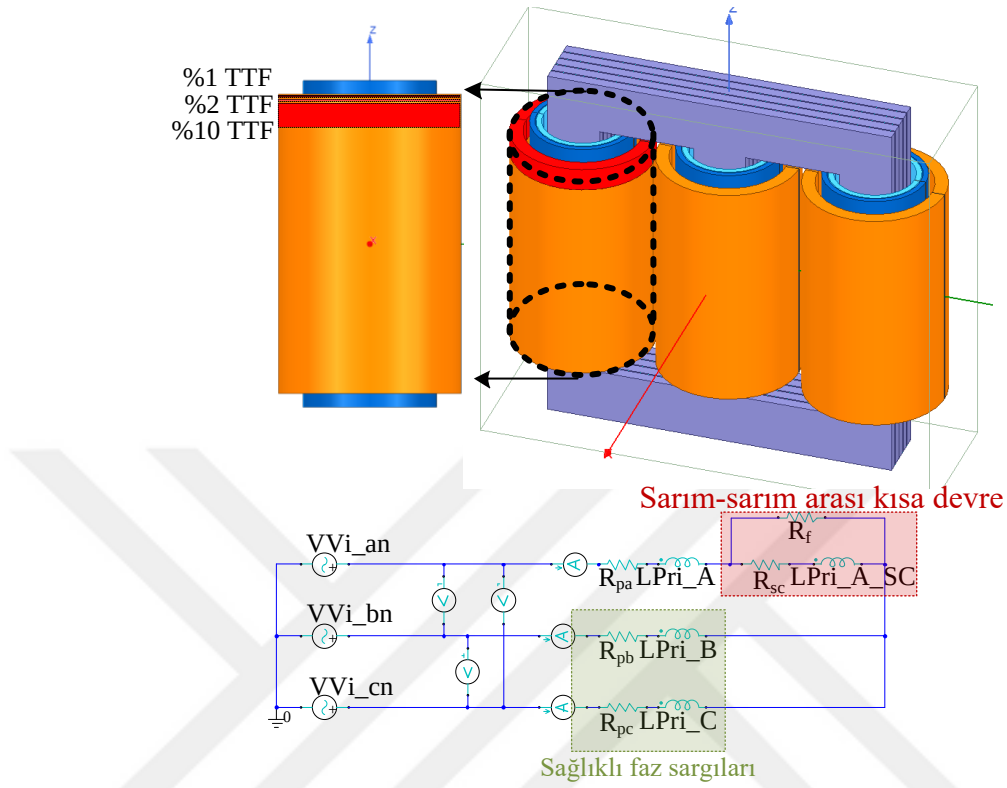


Şekil 4.9. ANSYS® Maxwell -3D programında tasarlanan transformatörün sağlıklı durumu için a) Manyetik alan dağılımı b) Manyetik akı vektörü dağılımı

4.3 Sarım-Sarım Kısa Devre Arızasının Oluşturulması

Sarım-sarım kısa devre arızası, yüksek gerilim sargısının A fazında %1, %2 ve %10 oranlarına karşılık gelen sarım sayılarının kısa devre edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kısa devre sarım sayısını belirlemek için toplam sarım sayısının arıza oranlarına göre değişimi ele alınmıştır. Kısa devre arızaları model üzerinde doğrudan uygulanmış ve harici devre editörü kullanılarak simüle edilmiştir. Bu yaklaşım ile farklı oranlardaki sarım arızalarının transformatör üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde

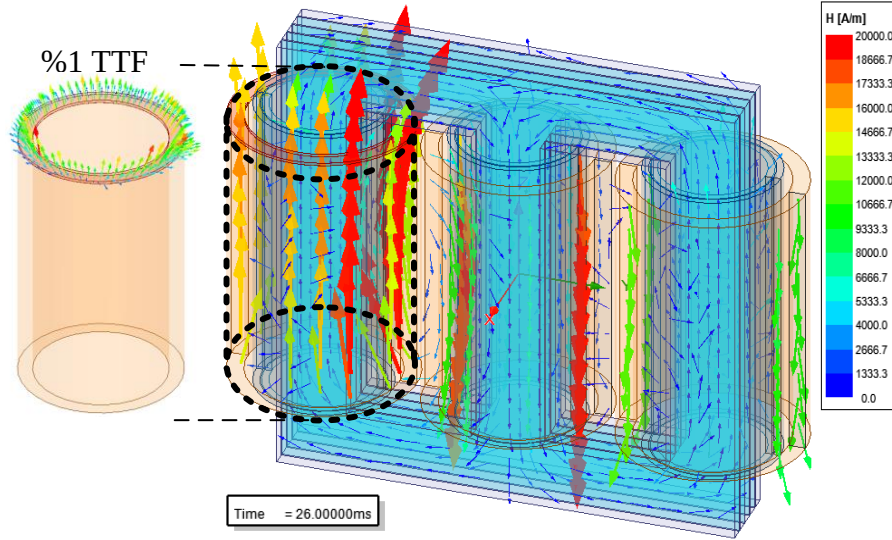
incelenmiştir. Şekil 4.10’da transformatörün sarım-sarım kısa devre arızası modeli ve harici eşdeğer devre modeli bulunmaktadır.



Şekil 4.10. Sarım-sarım kısa devre arızasının modeli ve harici eşdeğer devre modeli

Harici eşdeğer devrede bulunan V_{i_an} , V_{i_bn} ve V_{i_cn} transformatörün faz sargılarına uygulanan besleme gerilimlerini; R_{pa} , R_{pb} ve R_{pc} ise primer sargı dirençlerini temsil etmektedir. R_f direnci, kısa devre akımını sınırlamak için gerekli olan direnci; R_{SC} kısa devre sargı direncini; L_{Pri_A} , L_{Pri_B} , L_{Pri_C} ise sırasıyla faz sargı indüktanslarını ve kısa devre sargı indüktansını ifade etmektedir. Bu şekilde üç farklı sarım-sarım kısa devre arıza senaryosu (%1, %2 ve %10 kısa devre arızası) gerçekleştirilmiştir.

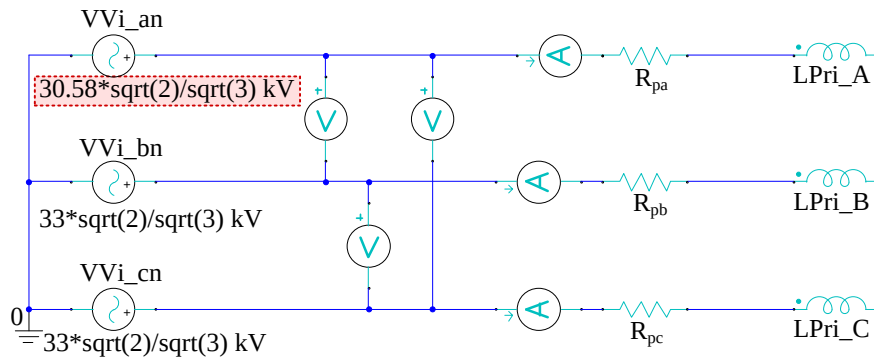
Şekil 4.11’de, transformatörün %1 sarım-sarım kısa devre arızası altındaki manyetik akı vektör dağılımı gösterilmektedir. Arıza bölgesinde artan akım yoğunluğu, manyetik alan vektörlerinin (H) daha yüksek değerlere ulaşmasına ve akı çizgilerinin düzensiz bir şekilde yoğunlaşmasına yol açmaktadır.



Şekil 4.11. ANSYS® Maxwell-3D programında tasarlanan transformatörün %1 sarım-sarım kısa devre arızası durumu için manyetik akı vektör dağılımı

4.4 Kaynak Gerilimi Dengesizliğinin Oluşturulması

Gerilim dengesizliklerinin transformatörler veya herhangi bir elektrik makinesindeki etkisi oldukça önemlidir. Bu durum, sistemde bulunan ekipmanlarda dengesiz akımların meydana gelmesine ve kayıplarla beraber makine ömrünün azalmasına neden olabilmektedir. Kaynak gerilim dengesizliği modellenirken, harici eşdeğer devrede bulunan faz sargılarının besleme gerilimleri dengesiz hale getirilmiştir ve dengesiz hale getirilen besleme gerilimlerinin sonuçları analiz edilmiştir. Şekil 4.12’de, A fazının besleme geriliminin azaltılması sonucunda %5 oranında gerilim dengesizliği meydana getirilmiştir.



Şekil 4.12. Kaynak gerilimi dengesizliği için harici eşdeğer devre modeli

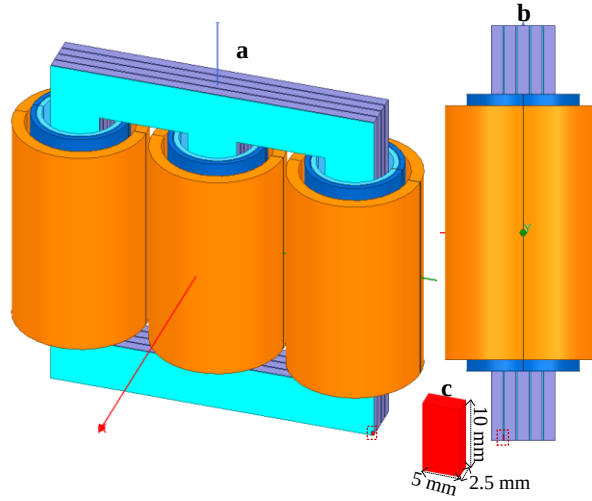
4.5 Laminasyon Arızasının Oluşturulması

Laminasyon arızasının etkilerini incelemek için kenar çapak arızası (edge burr) ve laminasyonlar arası kısa devre arızası (inter-laminar) senaryoları modellenmiştir. Bilindiği üzere, kenar çapak arızası laminasyonların üretim aşamasında kesme ve delme işlemleri sonucunda oluşan ve laminasyonun kenarlarında üretim hatası olarak ortaya çıkan bir arıza durumudur. Laminasyonlar arası kısa devre arızası ise iki sacın birbirine teması sonucunda ortaya çıkan arıza durumudur. Bu arızaları modellemek için transformatörün çekirdeği beş eşit parçalı lamineli bir yapıda olacak şekilde modellenmiştir. Laminasyon sayısının artması, transformatör çekirdeğindeki mesh sayısını önemli ölçüde artırarak analiz sürecinin gerçekleşmesini imkânsız hale getirebileceğinden, bu değer dikkatle seçilmiştir. Burada amaç arızanın etkilerini incelemek olduğundan, analizin optimum koşullar altında gerçekleşmesi hedeflenmiştir. Transformatörün çekirdek modelinin üstten görünümü Şekil 4.13'teki gibidir.



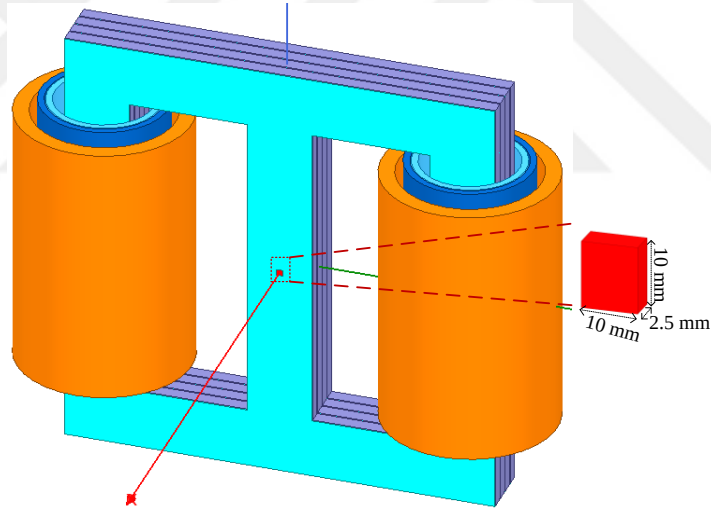
Şekil 4.13. Transformatör çekirdeği modelinin sağlıklı durumu için üstten görünümü ve laminasyon içerisinde akacak olan olası girdap akımı yolu

Kenar çapak arızasını simüle etmek amacıyla laminasyonlar arasında bir kısa devre oluşturulmuştur. Kenar çapak arızası modelinin detaylı görünümü ise Şekil 4.14'teki gibidir. Transformatör çekirdeğinin sağ kenarında bulunan ilk izolasyon bölgesinin alt köşesi, 5 mm uzunluk, 10 mm yükseklik ve 2,5 mm derinlik ölçülerine sahip olacak şekilde laminasyon malzemesi olarak tanımlanmıştır. Bu düzenleme ile söz konusu alt köşe kısmındaki bitişik iki laminasyonun temas ederek kısa devre oluşturduğu bir senaryo simüle edilmiştir.



Şekil 4.14. Kenar çapak arızası modeli: a) Karşı perspektif görünüm b) Sağ yandan görünüm c) Arızalı kısmın geometrisi

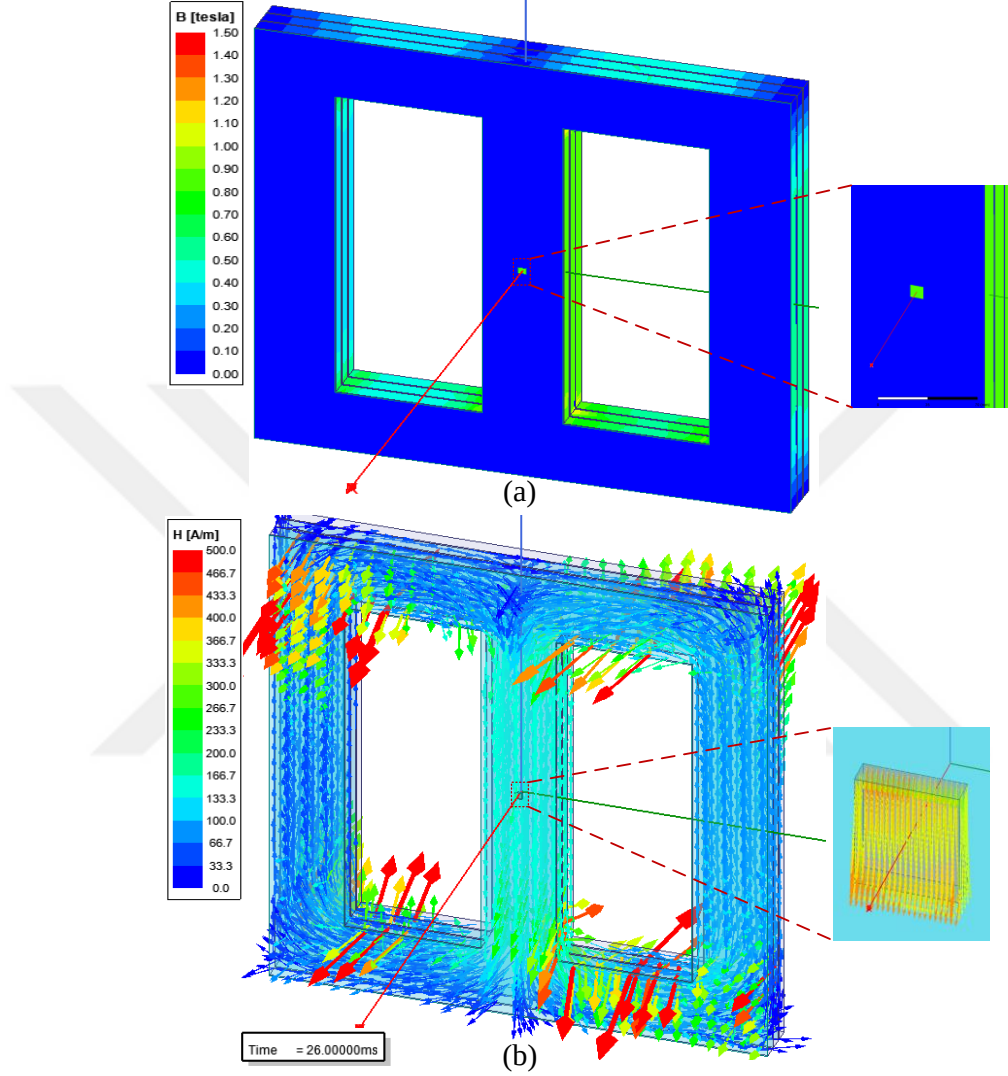
Laminasyonlar arası kısa devre arızası, Şekil 4.15'teki gibi modellenmiştir.



Şekil 4.15. Laminasyonlar arası kısa devre arızası modeli ve arızalı kısmın geometrisi

Şekil 4.15'te gösterildiği üzere, kenar çapak arızasına benzer şekilde, transformatör çekirdeğinin tam orta kısmında bir bölge 10 mm uzunluk, 10 mm yükseklik ve 2,5 mm derinlik ölçülerine sahip olacak şekilde laminasyon malzemesi olarak tanımlanmıştır. Bu düzenleme ile izolasyon malzemesinin yerini alan bu alan, laminasyonların birbirine temas ettiği bir kısa devre arıza senaryosu oluşturmak amacıyla modellenmiştir. Bu simülasyon sayesinde, transformatör çekirdeğinin

merkezinde oluşabilecek olası kısa devre arızalarının etkilerini incelemek amaçlanmıştır. Şekil 4.16’da ise, transformatörün laminasyonlar arası kısa devre arızası durumundaki manyetik alan ve manyetik akı vektör dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.16. ANSYS® Maxwell-3D programında tasarlanan transformatörün laminasyonlar arası kısa devre arıza durumu için a) Manyetik alan dağılımı b) Manyetik akı vektörü dağılımı

Şekil 4.16’da, transformatörün laminasyonlar arası kısa devre arızası durumundaki manyetik alan ve manyetik akı vektör dağılımı gösterilmektedir. İzolasyonun bozulmasıyla arıza bölgesinde manyetik akı yoğunluğunun artışı ve manyetik akı çizgilerinin belirginleşmesi, laminasyonlar arası kısa devrenin oluştuğunu göstermektedir.

5. KAÇAK AKI TABANLI SİMETRİK BİLEŞENLER METODU VE AÇI SPEKTRUMLARI

Transformatörlerde elektriksel bir arıza meydana geldiğinde manyetik alanın simetrisi bozulmakta ve bu durum faz akımı, gerilim ve akı gibi bileşenlerde belirgin değişikliklere yol açmaktadır. Bu etkiler, arızanın türüne ve şiddetine bağlı olarak akım ve kaçak akı gibi dalga formlarında simetrisinin bozulması, genlik artışı ve faz kayması olarak kendini gösterebilmektedir. Arızanın meydana getirdiği etkiler akım veya kaçak akının hem zaman ekseninde hem de frekans spektrumunda gözlemlenebilir. Arızanın erken aşamada ve şiddetinin düşük olduğu durumlarda, zaman ekseninde arıza tespitiyle ilgili doğru bir değerlendirme yapmak bazen zor olabilmektedir. Bu durumda, frekans spektrumunun incelenmesi, arızanın tespiti açısından daha güvenilir sonuçlar sunabilmektedir. Tek bir faz akımının incelenmesi veya tek bir noktadan ölçüm yapan sensörler, konumlarına bağlı olarak farklı duyarlılıklara sahip olup yalnızca bir faz bilgisi sunduklarından hata tespitinde yetersiz kalabilmektedir. Simetrik bileşenler yöntemi, üç fazlı sistem arızalarının değerlendirilmesinde tek fazlı bilgilere kıyasla daha hassas ve etkili bir çözüm sunabilmektedir.

5.1. Kaçak Akı Analizi ile Simetrik Bileşenler Metodu

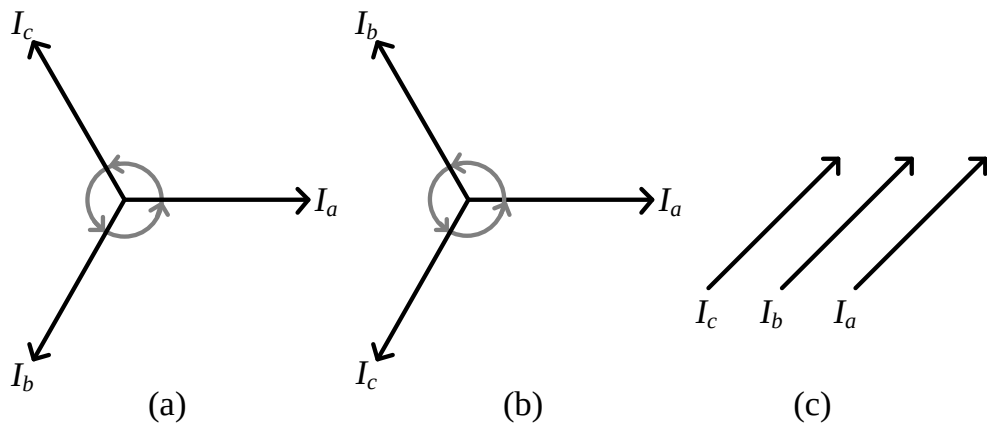
Transformatörler, güç sistemlerinde kritik bir rol oynamakta olup, kısa devre arızaları, dengesiz besleme veya yük koşulları gibi durumlarda dengesiz akımlara maruz kalabilmektedir. Üç fazlı güç sistemlerinde meydana gelen bu dengesiz akımlar, gerilimler veya manyetik akılar, simetrik bileşenler yaklaşımı ile analiz edilerek daha anlaşılır hale getirilebilir. Bu yöntemde, dengesiz faz büyüklükleri üç temel bileşene ayrılır; bunlar:

1. *Pozitif bileşen:* Normal çalışma koşullarında sistemde mevcut olan, fazlar arasında 120 derece farkla ilerleyen dengeli bileşenlerdir.
2. *Negatif bileşen:* Arıza veya dengesiz yük koşullarında ortaya çıkan ve fazların ters yönde ilerlediği bileşenlerdir.

3. *Sıfır bileşen*: Toprak kaçakları veya fazlar arası dengesizliklerde gözlemlenen, aynı fazda ve aynı büyüklükte olan bileşenlerdir.

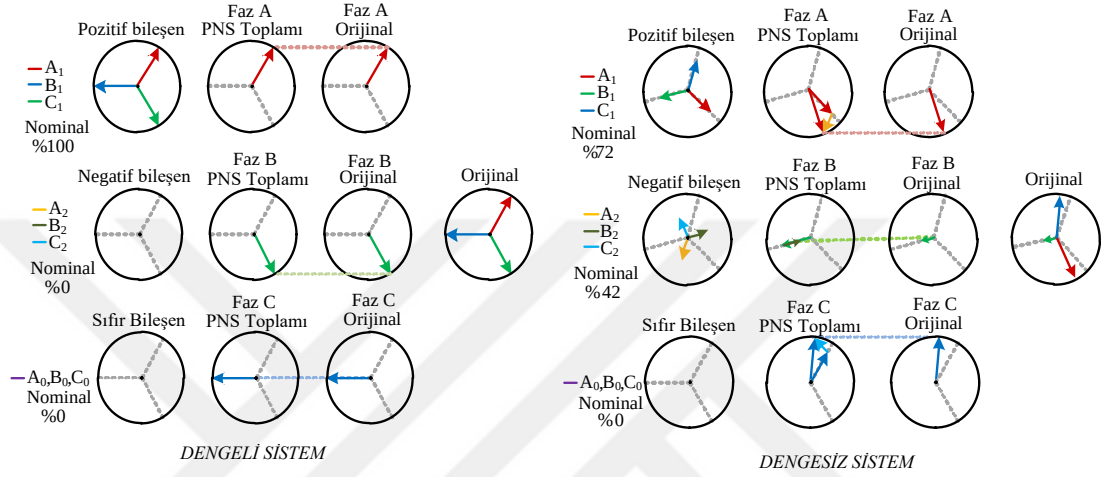
Bu bileşenlerin analizi, arıza tespiti ve sistem performansının değerlendirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. Simetrik bileşenler yaklaşımı, dengesiz üç fazlı bir sistemin üç ayrı tek fazlı devre olarak ele alınmasına olanak tanımaktadır. Bu yöntem, her bir fazın bağımsız olarak incelenmesini sağlayarak, doğrudan üç fazlı bir devrenin analizine kıyasla daha pratik ve sade bir çözüm sunmaktadır. Böylece, hesaplamalar daha kolay yapılabilmekte ve hata payı önemli ölçüde azalmaktadır. Ayrıca, bu yaklaşım devre teorisi ile birleştirildiğinde arıza tespiti daha etkin bir şekilde gerçekleştirilebilir. Simetrik bileşenlerin uzay vektör spektrumu, üç fazlı sistemin tüm bilgilerini içerdiğinden arızaların etkileri kapsamlı bir şekilde incelenebilir. Bu sayede, sistemde meydana gelen dengesizlikler daha sistematik bir şekilde analiz edilerek arızaların kaynağı tespit edilebilir.

Simetrik bileşenler teorisi ilk kez Charles Legeyt Fortescue tarafından tanımlanmış ve akım veya gerilimlerin pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenlere ayrıştırılabileceği gösterilmiştir [64]. Bu yöntem, günümüzde güç sistemleri analizinde yaygın olarak kullanılmakta olup, özellikle arıza koşullarında sistemin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamaktadır. Şekil 5.1’de, akım büyüklüğünün simetrik bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Simetrik bileşenlerin gösterimi a)Pozitif b) Negatif c) Sıfır

Dengesiz bir sistemde bu üç bileşen birleşerek toplam akımı veya akıyı oluşturmaktadır. Şekil 5.2’de ise, transformatör faz sargıları üzerindeki kaçak akının (veya akımın) pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerinin vektörel birleşimi ile birbirlerine dönüşümleri detaylı şekilde incelenmektedir. Bu görseller, kaçak akı vektörlerinin zaman ve faz uzayındaki konumlarını gösterirken, dengesiz çalışma koşullarında ve arıza durumlarında bileşenlerin birbirleriyle etkileşimini vurgulamaktadır.



Şekil 5.2. Dengeli ve dengesiz sistemlerde simetrik bileşenlerin vektörel gösterimleri

Şekil 5.2’de gösterildiği üzere, transformatör fazları arasında herhangi bir dengesizlik veya kısa devre arızası meydana geldiğinde, negatif ve/veya sıfır bileşenlerinin genliklerinde belirgin değişimler gözlemlenmekte; hatta arıza şiddetinin artması hâlinde bu bileşenlerin genlikleri pozitif bileşenine yakın seviyelere ulaşabilmektedir.

Fortescue dönüşümünün temel mantığı, üç fazlı bir sistemde faz büyüklüklerini simetrik bileşenlere dönüştürmektir. Bu tezde faz büyüklüğü olarak akım ve kaçak akı incelendiğinden, denklem (5.1)’deki matris her iki büyüklük için de ayrı ayrı ifade edilebilir. Burada faz akımları arasında 120° ’lik bir faz farkı olduğu gibi, faz sargıları üzerinde bulunan kaçak akı ölçüm noktaları arasında da 120° ’lik elektriksel faz farkı bulunmaktadır.

Kaçak akı için dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_p \\ \phi_n \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Burada $a=1^{\angle 120^\circ}$ dir ve ϕ_a , ϕ_b ve ϕ_c sırasıyla faz sargıları üzerinden elde edilen kaçak akıları, ϕ_0 , ϕ_p ve ϕ_n ise akının sıfır, pozitif ve negatif bileşenlerini ifade etmektedir. Dönüşümün tersine çevrilmesiyle üç fazlı kaçak akılar veya akımlar tekrar elde edilebilir,

$$\begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_p \\ \phi_n \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{3} \right) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Denklem (5.1) ve (5.2)'de verilen matrisler düzenlenecek olursa, kaçak akının pozitif, negatif ve sıfır bileşenleri denklem (5.3)'teki gibi elde edilmektedir,

$$\begin{aligned} \phi_p &= \frac{1}{3} (\phi_a + a\phi_b + a^2\phi_c) \\ \phi_n &= \frac{1}{3} (\phi_a + a^2\phi_b + a\phi_c) \\ \phi_0 &= \frac{1}{3} (\phi_a + \phi_b + \phi_c) \end{aligned} \quad (5.3)$$

Uzay vektörü düzlemindeki manyetik akılar, denklem (5.4) ve denklem (5.5) kullanılarak elde edilebilir,

$$\begin{aligned} \phi_d &= \frac{2}{3} \left(\phi_a - \frac{1}{2} (\phi_b + \phi_c) \right) \\ \phi_q &= \frac{\sqrt{3}}{3} (\phi_b - \phi_c) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\phi_{SV} = \phi_d + j\phi_q \quad (5.5)$$

Negatif ve pozitif spektrumlar gibi simetrik bileşenler ile üç fazlı tüm kaçak akı verileri kullanılarak uzay vektörü (ϕ_{SV}) bileşeni elde edilir. Kaçak akıda gözlemlenen sinyaller; arıza, dengesiz akım veya transformatör sisteminin dinamik davranışına bağlı olarak pozitif, negatif veya sıfır bileşenlerinden oluşabilir.

Güç sisteminde herhangi bir arıza bulunmadığında ve üç fazlı akımlar, yüke 120° elektriksel faz farkı ile dengeli olarak aktığında, yalnızca pozitif sıra bileşenleri oluşmaktadır. Bu koşulda sistem dengeli çalışır ve negatif veya sıfır bileşenleri gözlemlenmez. Kısa devre arızaları, dengesiz akım veya gerilimler, arızanın türüne ve şiddetine bağlı olarak simetrik olmayan negatif ve sıfır bileşenlerinin oluşmasına neden olabilir. Yani negatif bileşenlerin varlığı, sistemdeki dengesizliğin bir göstergesidir. Negatif bileşen akımlarının etkisiyle meydana gelen yüksek girdap akımları transformatör nüvesinde aşırı ısınmaya yol açabilir ve bu durum transformatörün hasar görmesine neden olabilir. Ayrıca, negatif bileşen akımı, çekirdek akısına zıt yönde hareket eden bir manyetik alan oluşturur. Bu durum, transformatörün verimini düşürür ve negatif bileşenlerin genliğine bağlı olarak transformatörün performansını olumsuz etkiler.

5.2. Açı Spektrumları Analizi

Akım İmza Analizi (CSA), elektrik makinelerindeki arızaların tespitinde temel bir yöntem olarak kullanılmakta olup, mekanik, manyetik ve elektriksel sorunların tespitinde etkili bir araçtır. Transformatörlerdeki elektriksel arızaların tespitinde, CSA tabanlı yaklaşımlar gelişmiş sinyal işleme teknikleriyle desteklenerek ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, motorlar ve transformatörlerde meydana gelebilecek arızaların tespiti sürecinde çevrimiçi stator veya faz akım izleme sistemleri yaygın bir şekilde tercih edilmektedir.

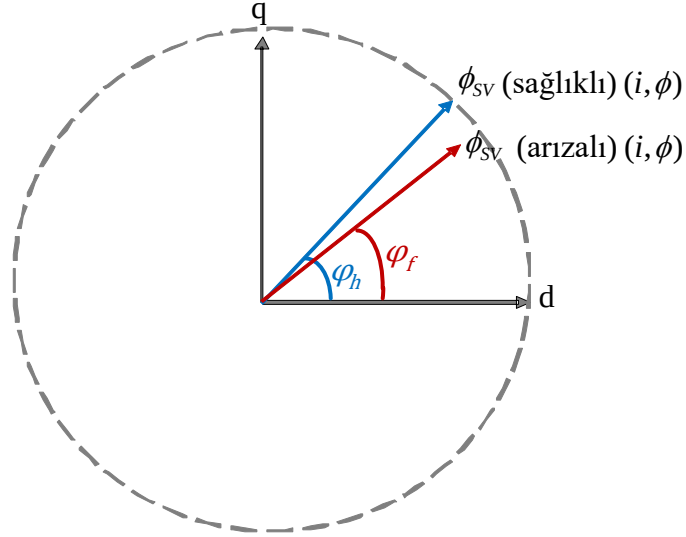
Arıza tespitinde kullanılan analiz yöntemlerinin önemli bir bölümü, FFT tabanlı tekniklere dayalı akım, titreşim veya kaçak akı imza analizlerini kapsamaktadır. FFT, bir sinyalin farklı frekans bileşenlerini çözümleyerek enerji dağılımını belirleme

imkânı sunmaktadır. Elektrik makinelerinde, özellikle akım ve gerilim harmoniklerinin incelenmesi, arızaların tespiti için kritik bir bilgi kaynağıdır. Zaman-frekans düzleminde gerçekleştirilen spektrum analizlerinde, FFT yöntemi en temel ve etkili araçlardan biri olarak öne çıkmaktadır.

Bu bağlamda, transformatörlerdeki elektriksel arızaların tespitinde akım imza sinyalleri ve FFT yöntemi önemli bir role sahiptir. Özellikle sarım-sarım veya sarımlar arası kısa devre arızalarının belirlenmesinde, transformatör terminallerinden ölçülen akım, gerilim veya kaçak akı sinyallerinin frekans spektrumlarının analizi yapılmaktadır. FFT'nin sunduğu ayrıntılı spektral analiz, farklı frekanslardaki enerji dağılımını görselleştirerek arızaların doğru ve güvenilir bir şekilde teşhis edilmesine olanak tanımaktadır.

Transformatör akım ve gerilim sinyalleri, manyetik doyuma, yük dalgalanmalarına, gerilim dengesizliklerine veya arıza durumlarına bağlı olarak çeşitli derecelerde harmonikler barındırdığından, ideal bir sinüs formunda değildir. Bu nedenle, transformatör akım ve gerilim sinyallerinin içeriğinde yer alan harmonik bileşenlerin frekans düzleminde detaylı bir şekilde incelenmesi ve arıza durumunda bu harmoniklerin gösterdiği değişim miktarlarının analiz edilerek transformatörün arıza şiddetinin belirlenmesi gerekmektedir. Tezin bu bölümünde, bir transformatörün hem sağlıklı durumunda hem de farklı elektriksel arıza koşullarında, akım ve kaçak akı harmonik genlikleri ile faz açılarındaki değişimlerin incelenmesinin arıza tespiti ve arızaların ayırt edilmesi açısından taşıdığı önem ele alınmıştır. Bu kapsamda, genlik spektrumuyla birlikte açı spektrumunun analiz edilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Açı spektrumu, sinyaldeki her bir frekans bileşeninin faz konumunu ifade ettiği için arızaların ve harmonik kaynaklı sapmaların incelenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Örneğin, transformatör akımında veya kaçak akısında gözlemlenen bir harmonik bileşen, arıza kaynaklı bir açı kayması (φ_f) ile sağlıklı durumdan (φ_h) ayrılabilir. Bu açı farkları, özellikle arıza ve dengesiz durumlar için önemli ipuçları sağlayabilir. Bu durum, Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Açı spektrumu bileşenlerinin vektörel gösterimi

Şekil 5.3'e göre sistemde bir arıza veya dengesiz durum oluştuğunda genlik değerinde her zaman belirgin bir değişim gözlenmeyebilmektedir. Ancak açı farklarında belirgin kaymalar varsa arıza tespiti açısından daha güvenilir ve net çıkarımlar sağlandığı yorumu yapılabilir. Bu durum, özellikle genlik değişiminin sınırlı kaldığı veya göz ardı edilebilecek düzeyde seyrettiği senaryolarda faz açısı spektrumunun önemini ortaya çıkarmaktadır.

FFT, Ayırık Fourier Dönüşümü'nü (DFT) ve tersini verimli bir şekilde hesaplayan bir algoritmadır. Bu dönüşüm, ayırık zaman ekseninde tanımlı bir sinyali frekans eksenindeki temsiline dönüştürür. FFT'nin çıktısı, sinyalin içindeki sinüzoidal bileşenlerin genliklerini ve fazlarını temsil eden karmaşık sayılardan oluşmaktadır.

$x(n)$ zaman eksenindeki N örnekten oluşan DFT'nin matematiksel ifadesi denklem (5.6)'daki gibi tanımlanır;

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (5.6)$$

Burada $x(n)$ analog zaman eksenini sinyali $X(t)$ 'den örneklenen ayrık sinyali, k ($k = 0, 1, \dots, N-1$) frekans eksenindeki DFT çıkış indisini, n ($n = 0, 1, \dots, N-1$) zaman eksenini ve N toplam örnek sayısını ifade etmektedir [61].

DFT sonucunda elde edilen farklı sinüslerin frekansları, sinyalin örnekleme frekansı (f_s) ve örnekleme sayısı (N) ile ilişkilidir. Bu durumda, frekans ekseninde her bir noktanın frekansı şu şekilde hesaplanır:

$$f_k = \frac{kf_s}{N} \quad (5.7)$$

Bu ilişki, DFT'nin frekans çözünürlüğünü belirler ve her bir noktanın hangi frekansa karşılık geldiğini tanımlar. Denklem (5.6)'dan görüldüğü üzere, örnekleme sayısı (N) arttıkça DFT hesaplamalarının verimliliği azalmaktadır. Bunun nedeni, DFT'nin karmaşıklığının doğrudan N^2 ile orantılı olmasıdır. Uygulamada, bu sorunun çözümü için örnekleme sayısının 2'nin bir kuvveti olduğu durumlarda daha verimli bir yöntem olarak FFT algoritması kullanılmaktadır. FFT, işlem karmaşıklığını azaltarak, özellikle büyük boyutlu veri setlerinde hızlı ve etkin bir spektral analiz imkânı sunmaktadır. Bu nedenle, frekans analizi gerektiren uygulamalarda FFT yaygın olarak kullanılmaktadır.

FFT'nin çıktısı, sinyalin frekans bileşenlerini temsil eden karmaşık sayılar dizisidir. Bu karmaşık sayılar, genlik spektrumu ve faz açısı spektrumlarının hesaplanmasına olanak tanımaktadır.

FFT'nin genlik spektrumu eldesinde her bir $X(k)$ karmaşık çıktısının genliği, büyüklüğünün hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Genlik, denklem (5.8)'deki gibi ifade edilir;

$$A(k) = |X(k)| = \sqrt{\Re(x(k))^2 + \Im(x(k))^2} \quad (5.8)$$

Burada $\Re(X(k))$ ve $\Im(X(k))$, $X(k)$ 'nin sırasıyla reel ve imajiner bileşenleridir. Genlik spektrumu, sinyaldeki her bir frekans bileşeninin kuvvetini veya enerji yoğunluğunu temsil etmektedir.

FFT'nin faz açısı spektrumu eldesinde ise, $X(k)$ karmaşık sayılarının açılarından hesaplanmaktadır. Her bir frekans bileşeninin faz açısı denklem (5.9)'daki gibi bulunur;

$$\varphi(k) = \arctan\left(\frac{\Im(X(k))}{\Re(X(k))}\right) \quad (5.9)$$

Bu açı, $X(k)$ karmaşık sayısının pozitif reel eksene göre yönünü ifade etmektedir ve sinyaldeki frekans bileşenlerinin faz bilgilerini ortaya çıkarmaktadır.

FFT'den elde edilen genlik ve faz değerleri, sinyalin uzunluğuna (N) ve gerçek/sanal sinyal durumuna bağlı olarak ölçeklenmektedir. Gerçek sinyallerde genellikle yalnızca pozitif frekanslar analiz edilmektedir ve genlikler $2/N$ gibi bir faktörle normalize edilmektedir. DA ve Nyquist frekansları genelde ikiye katlanmaz [65]. Genlik spektrumu, genellikle logaritmik (dB) veya lineer bir ölçek kullanılarak grafiksel olarak ifade edilmektedir. Buna karşılık, faz spektrumu, sinyaldeki frekans bileşenlerinin açısal kaymalarını analiz etmek amacıyla değerlendirilmektedir.

Özellikle transformatör gibi elektrik makinelerinde, bu faz bilgileri arıza teşhisi açısından kritik önemdedir. Zira sarım arızaları, kısa devre ya da dengesiz yük koşulları altında bazı harmoniklerin faz açıları belirgin şekilde değişebilmektedir. Dolayısıyla, Şekil 5.3'te gösterilen vektörel faz farklılıklarının pratikteki karşılığı, FFT faz spektrumlarında gözlemlenen açısal kaymalardır. Bu kaymaların tespiti ve analizi, arıza türü ve şiddeti hakkında önemli ipuçları sunabilmektedir.

6. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, Bölüm 4'te ele alınan farklı elektriksel arıza senaryolarına ait akım ve kaçak akı sonuçları detaylı şekilde analiz edilmiştir. Zaman ekseninde elde edilen simülasyon verileri, MATLAB ortamında FFT yöntemiyle frekans ekseninde incelenmiştir. Kısa devre arızası, %1, %2 ve %10 şiddet seviyeleri ile tam yük koşulu altında hem zaman hem de frekans ekseninde değerlendirilmiştir. Sonuçların güvenilirliğini daha doğru değerlendirebilmek amacıyla, akım ve kaçak akı verilerinin simetrik bileşenleri analiz edilmiş ve bu incelemeler hem zaman hem de frekans ekseninde kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Frekans spektrumlarındaki gözlemlenen genlikler, akım, kaçak akı ve uzay vektör bileşenlerinin temel harmoniğinin maksimum değerleri esas alınarak normalize edilmiştir. Bu nedenle, spektrumdan elde edilen tüm sonuçlar per-unit (pu) biriminde ifade edilmiştir. Bu yaklaşım, arıza etkilerinin daha detaylı ve hassas değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Benzer şekilde, transformatöre uygulanan kaynak gerilimi dengesizliği durumu da akım, kaçak akı ve uzay vektör bileşenleri üzerindeki etkileri açısından incelenmiştir. Bu analizler sonucunda, transformatörde meydana gelen kısa devre arızası ve kaynak gerilimi dengesizliği durumunun ayrıştırılmasına yönelik önemli bulgular elde edilmiştir. Laminasyon arızaları ise, kenar çapak ve laminasyonlar arası kısa devre arıza durumları için zaman ve frekans ekseninde incelenmiştir. Benzer şekilde akım, kaçak akı ve uzay vektör bileşenleri açısından da detaylı analizler gerçekleştirilmiştir. Örnekleme zamanının düşük olması daha hassas sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamakta ve analizin daha doğru olmasına imkân tanımaktadır. Bu nedenle, örnekleme zamanı periyoda bağlı olarak 0.4 ms aralıklı olarak seçilmiştir. Böylece bir periyot için 50 adet örnekleme alınmıştır. Geçici durum analizinde ilk dört veya beş periyot sonunda sistem kararlı hale gelmektedir. Bu nedenle transformatör sonuçlarının doğru ve hassas incelenmesi amacıyla simülasyon süresi 1 sn olarak seçilmiştir. Sağlıklı ve arızalı durumlara ait elde edilen sonuçlar, grafiksel görseller ve çizelgeler halinde sunularak karşılaştırmalı bir inceleme imkânı sağlanmıştır. Böylece, elektriksel arıza sinyalleri geniş bir çalışma aralığında ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

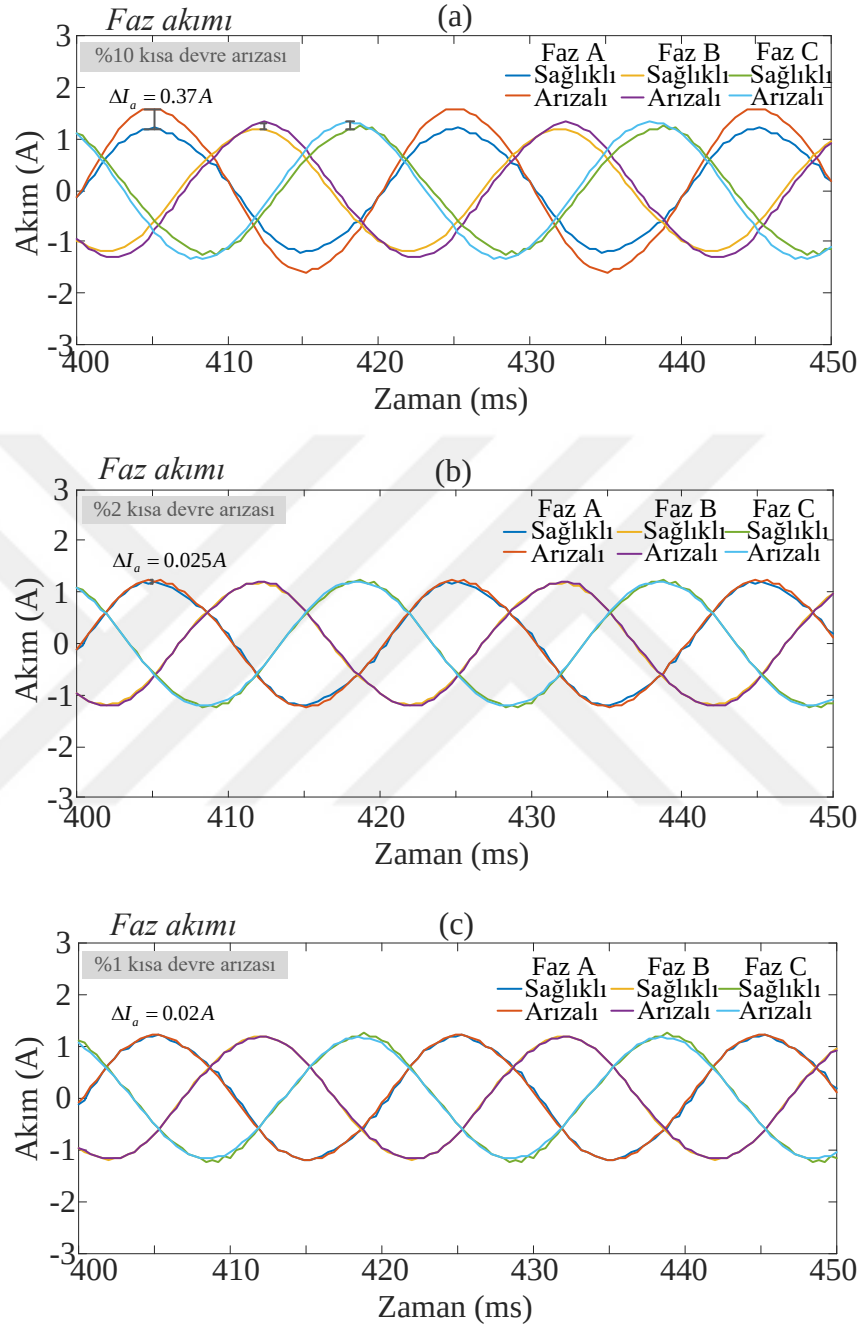
6.1 Sarım-Sarım Kısa Devre Arızası Sonuçlarının Analizi

Bu bölümde sarım-sarım kısa devre arızasının meydana getirdiği etkileri incelemek amacıyla faz akımları, kaçak akılar ve bu iki büyüklüğün uzay vektör bileşenleri incelenmiştir. Elde edilen veriler zaman eksenini, frekans spektrumu ve uzay vektör bileşen spektrumları olarak detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Ayrıca, daha yüksek hassasiyetle arıza tespiti sağlamak amacıyla, kaçak akının simetrik bileşenler metodu kullanılarak genlik analizi gerçekleştirilmiş ve açı spektrumu sonuçları ile beraber ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı analiz, hem genlik hem de faz açısı bilgilerinin bir arada kullanılmasının arıza tespitinin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırdığını göstermektedir.

6.1.1 Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi- Kısa Devre Arızası

Öncelikle, tam yük koşullarında çalışan bir transformatörde meydana gelebilecek farklı şiddetlerdeki sarım-sarım kısa devre arızalarının faz akımları üzerindeki etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 6.1’de, %10, %2 ve %1 oranlarındaki farklı arıza şiddetleri için faz akımlarının zaman eksenindeki değişimlerine ait grafikler bulunmaktadır. Şekil 6.1 incelendiğinde, sağlıklı durum için faz akımlarının düzgün ve dengeli bir yapıda olduğu görülmektedir. Faz A, Faz B ve Faz C için akımlar, zamana bağlı olarak periyodik bir şekilde değişmekte ve dalga formları arasında uyum bulunmaktadır. Bu durum, sistemin sağlıklı ve dengeli bir çalışma sergilediğini göstermektedir. Kısa devre arızası meydana geldiğinde ise faz akımlarında düzensizlik ve genlik dalgalanmalarının meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu durum %10 kısa devre arızası için net bir şekilde görülmektedir. Arızanın olduğu Faz A’da genlik artışı ve dalga formunda bozulma tespit edilirken, diğer fazlar ise dolaylı olarak etkilenmiştir. Faz akımları arasındaki uyum kaybolmuş ve sistemde asimetrik bir dağılım meydana gelmiştir. Bu durum, kısa devre arızasının fazlar arasındaki dengeyi bozduğunu da göstermektedir. %2 ve %1 kısa devre arıza durumları için ise arızanın zaman eksenindeki etkisi tam olarak belirgin değildir. %10, %2 ve %1 arıza durumları için kısa devrenin etkisiyle sağlıklı durum genliği ve arızalı durum genliği arasındaki mutlak farklar sırasıyla 0.37 A,

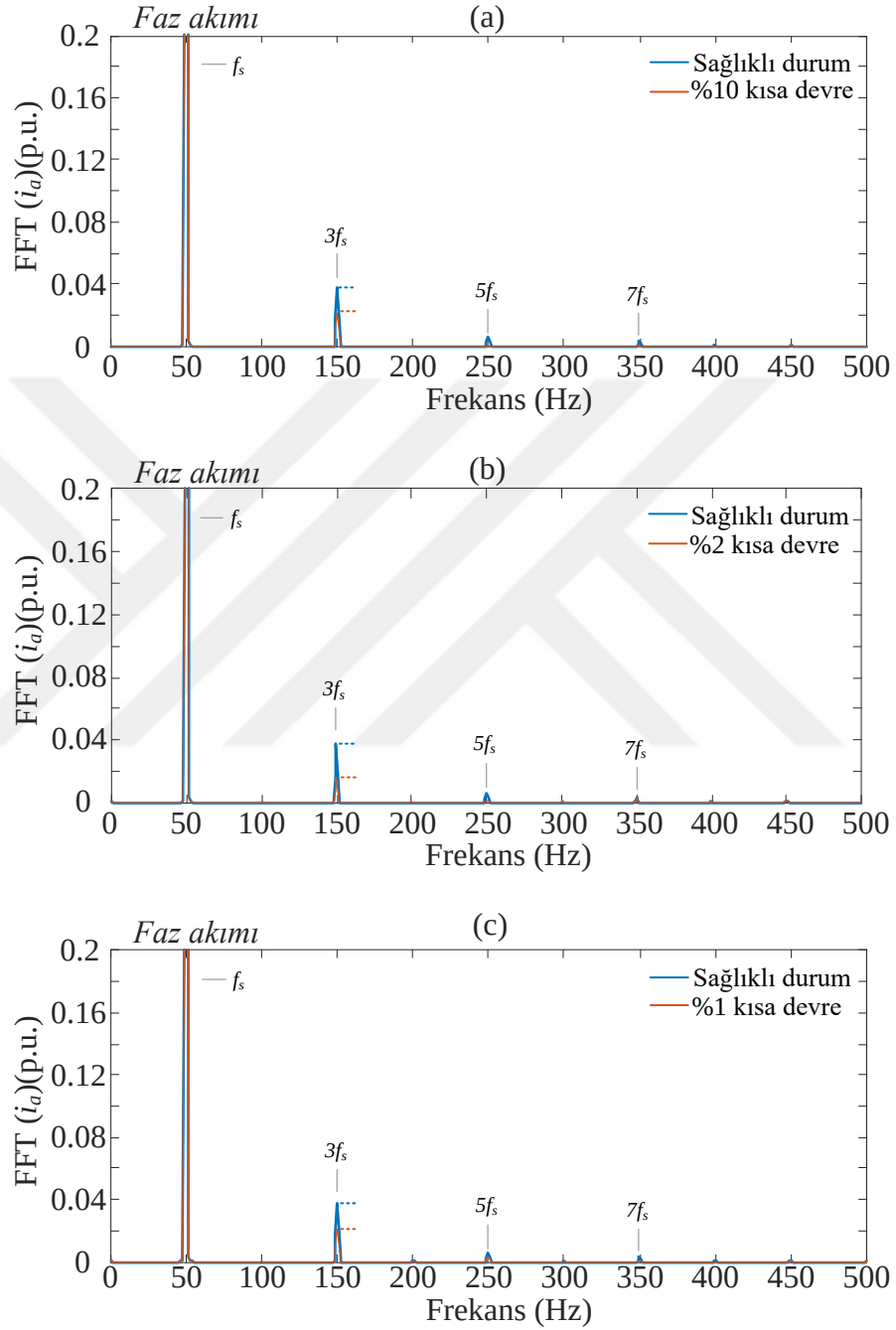
0.025 A ve 0.002 A olarak gözlemlenmektedir. Buna göre, kısa devre oranı düştükçe arıza tespitinin zorlaştığı görülmektedir.



Şekil 6.1. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için faz akımları-zaman grafikleri a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

%1 gibi düşük şiddetli kısa devre arızalarının erken tespiti için yüksek çözünürlüklü ve hassas yöntemler gerekmektedir. Arızanın etkilerini daha ayrıntılı analiz

edebilmek için akım verileri FFT yöntemiyle frekans spektrumuna dönüştürülmüştür. Şekil 6.2’de transformatörün tam yükte ve farklı arıza koşullarındaki faz akımları frekans spektrumları bulunmaktadır.

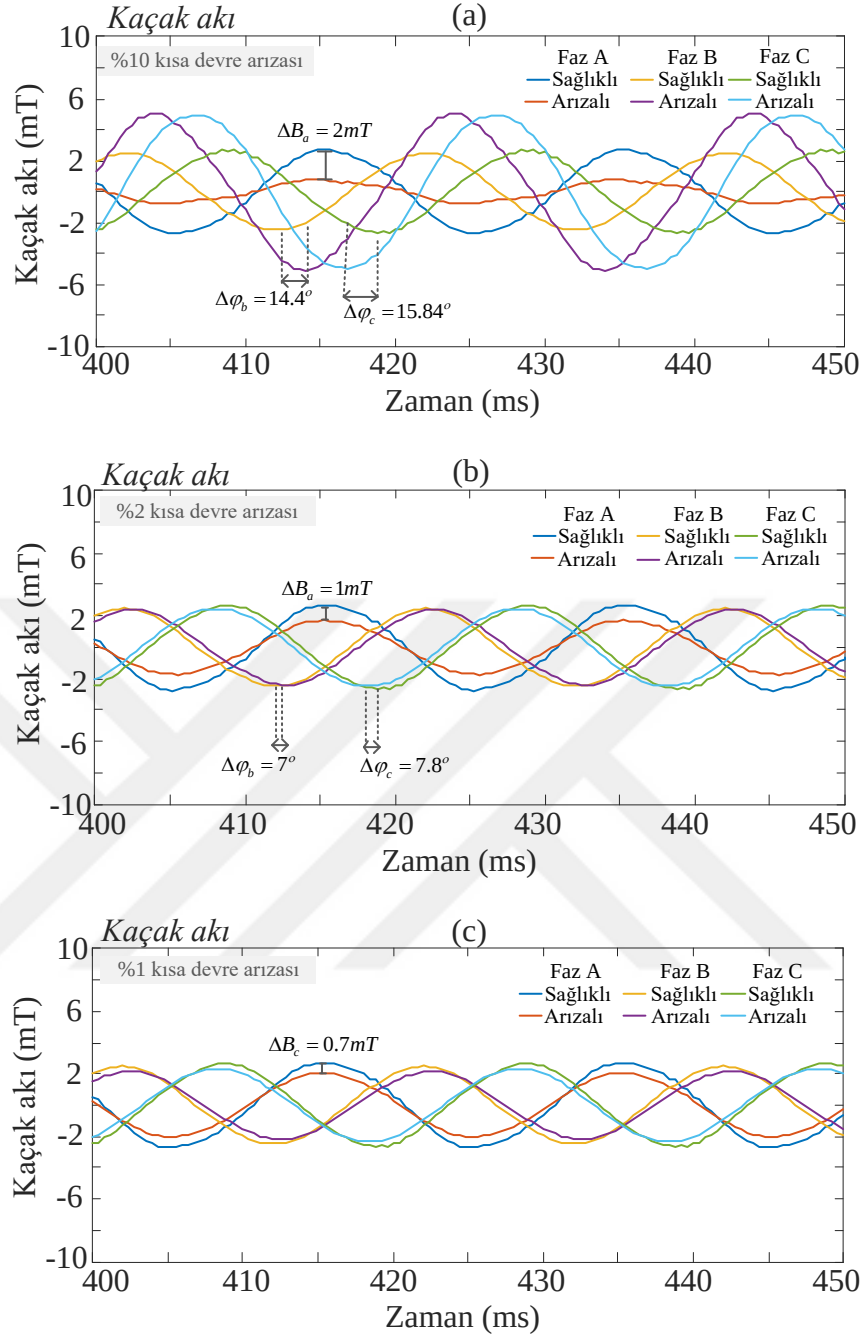


Şekil 6.2. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için i_a faz akımları-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

Şekil 6.2’de arıza şiddetlerine bağlı olarak çeşitli arıza harmoniklerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Arıza durumunda üçüncü harmonik bileşenin ortaya çıktığı bilinmektedir. Ancak burada sağlıklı durum harmoniğinin arızalı durum harmoniklerinden daha yüksek değerde olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ortaya çıkma nedeni, sistemin simetrisinin bozulması sonucunda arıza harmonik bileşenlerinin bastırılması veya azalması olarak yorumlanabilir. Bu durumda arıza tespitinin gerçekleştirilmesi hususunda net bir yorum yapılamamaktadır.

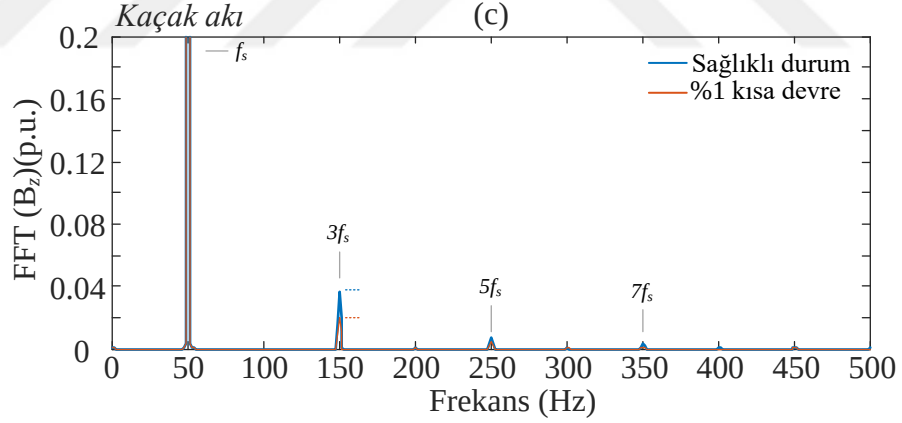
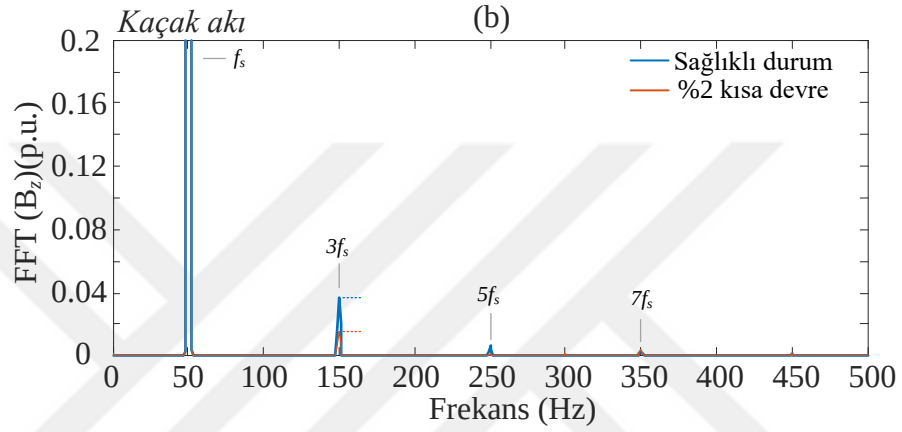
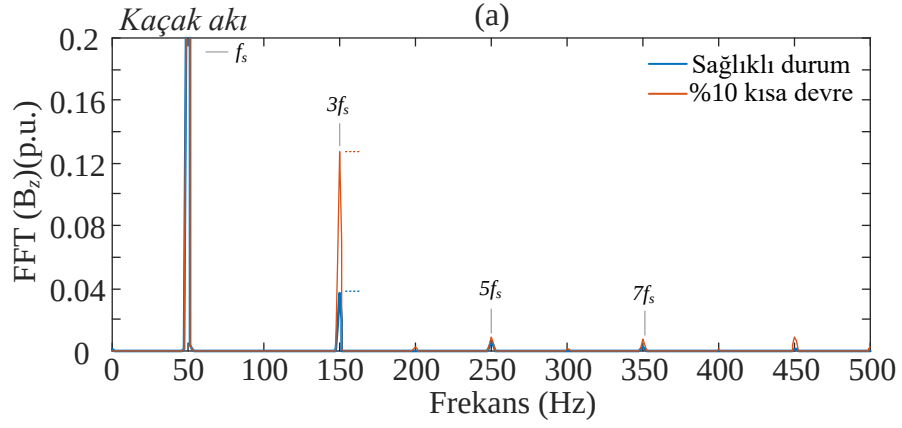
Manyetik alan dağılımı transformatörün performansında önemli bir rol oynamaktadır. Çekirdeğin içerisinde dolaşan manyetik akı yolu bir arıza meydana geldiği zaman bozulmaktadır ve arızanın meydana geldiği noktada kaçak akı dağılımında da bozulmalar meydana gelmektedir. Şekil 6.3’te, farklı arıza şiddetlerine göre kaçak akı dağılımının grafiği verilmiştir.

Şekil 6.3a’da %10 arıza şiddeti için kaçak akı dağılımının ciddi bir şekilde bozulduğu gözlemlenmektedir. Bu durum akı bileşeninin hem genlik hem faz açısı bazında ciddi etkilendiğini göstermektedir. Arızanın meydana geldiği A fazı için sağlıklı durum ve arızalı durumun genlikleri arasında meydana gelen akı farkı 2 mT olarak elde edilmiştir. Arızanın meydana getirdiği dolaylı etki sonucunda ise B ve C fazlarının ise faz açılarının önemli oranda kaydığı gözlemlenmiştir. Bu durum B fazı için 14.4° ve C fazı için 15.84° olarak tespit edilmiştir. %2 arıza şiddeti için kaçak akı dağılımının %10 arıza şiddetine göre biraz daha simetrik hale geldiği gözlemlenmiştir. Ancak arızalı faz olan A fazı için sağlıklı ve arızalı durum genlik farkının 1 mT değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Benzer şekilde B ve C faz açılarının ise sırasıyla 7° ve 7.8° kaydığı gözlemlenmiştir. Son olarak, %1 arıza şiddeti durumu incelenecek olursa, kaçak akı dağılımının daha düzgün bir formda ve sağlıklı duruma benzer bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Bu kısımda arızalı faz ve sağlıklı durum genlikleri arasındaki farkın 0.7 mT değerine düştüğü ve sağlıklı durum ile arızalı durum arasındaki açı kaymalarının kaybolduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.3. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için kaçak akı-zaman grafikleri a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

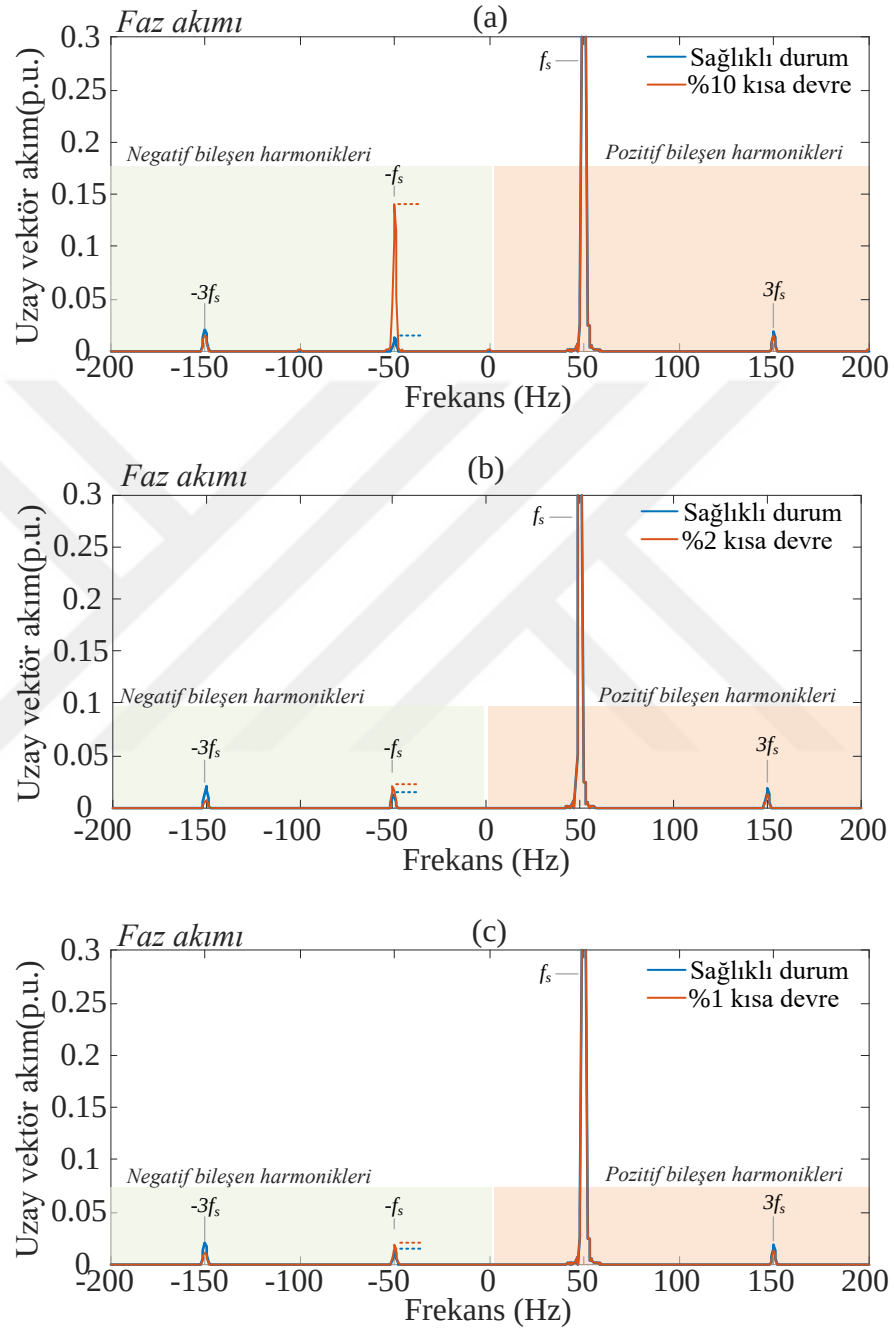
Şekil 6.3 incelendiğinde, zaman ekseninde arızanın etkisi faz akımına (bkz. Şekil 6.1.a) kıyasla kaçak akıda net olarak görülse de, bu arızaların tespitinin özellikle düşük seviyelerde oldukça güç olduğu kanaatine varılmıştır. Arıza tespitini daha kapsamlı incelemek amacıyla, kaçak akı verilerinin frekans spektrumuna dönüştürülmüş hali Şekil 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için B_z kaçak akı-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

Şekil 6.4a incelenecek olursa %10 arıza durumu için üçüncü harmonik bileşenin net bir şekilde ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Ancak Şekil 6.4b ve Şekil 6.4c'deki %2 ve %1 gibi düşük şiddetli arızalar için aynı harmonik bileşen incelendiğinde arıza tespiti hakkında net bir yorum yapılamamaktadır. Düşük şiddetli sarım-sarım kısa

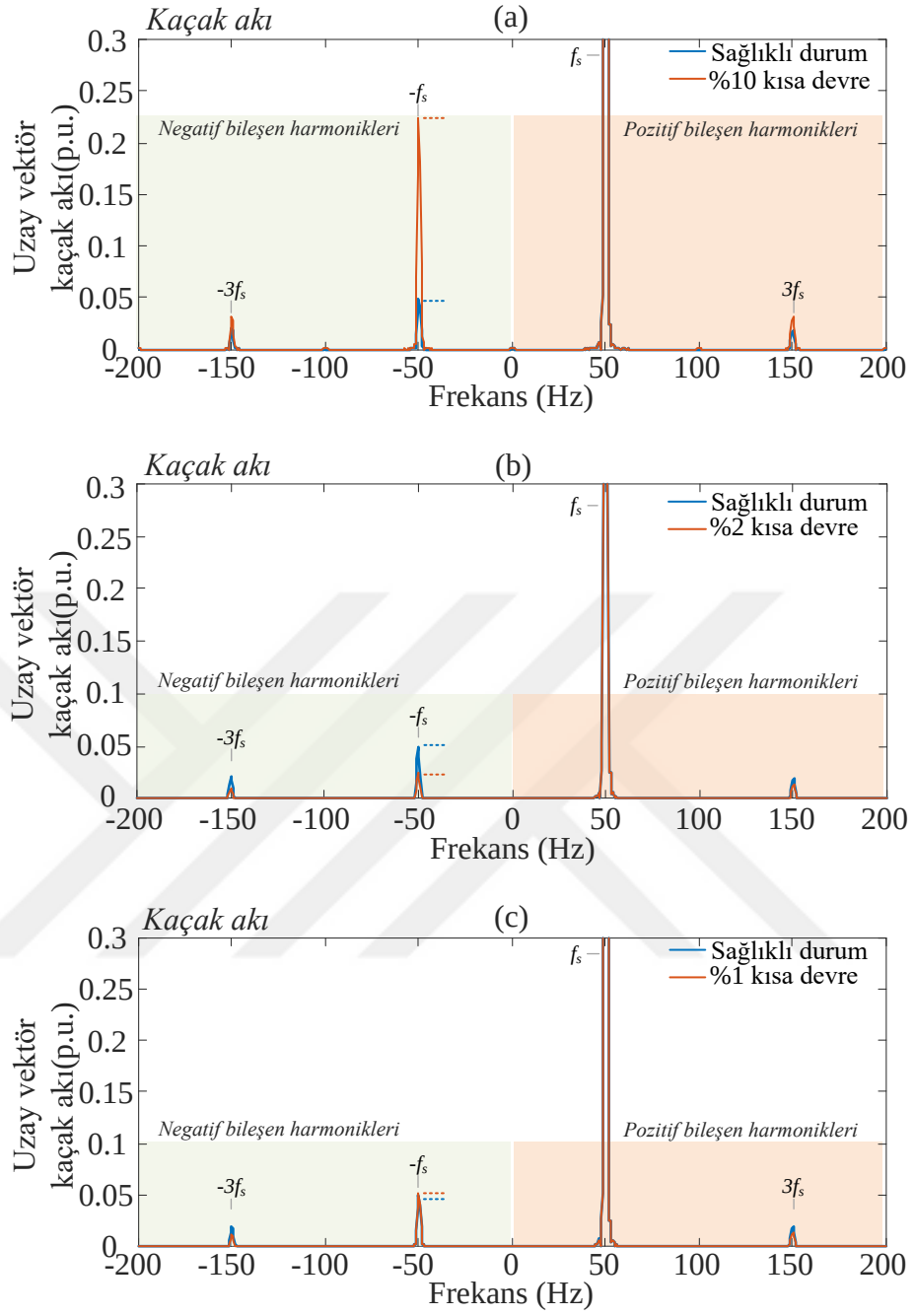
devre arıza tespiti için akım ve kaçak akı bileşenlerinin zaman eksenini ve tek noktadaki frekans spektrumu sonuçları incelendiğinde hassas bir arıza tespitinin gerçekleştirilemediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, elektrik enerjisi sistemlerinin arıza tespitinde kritik öneme sahip uzay vektör bileşenleri yöntemi incelenmiştir.



Şekil 6.5. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör akım-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

Şekil 6.5'te uzay vektör akım bileşenlerinin farklı arıza şiddetleri için grafikleri bulunmaktadır. Şekil 6.5 $-f_s$ sinyali incelendiğinde arıza sinyalinin varlığı net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu harmonik için %10 arıza şiddetinin genliği 0.1406 iken %2 ve %1 arıza şiddetleri için bu değerler sırasıyla 0.02011 ve 0.01928'dir. Burada arıza tespitinin, %2 ve %1 şiddet seviyelerinde gerçekleştirilebilir olsa da arızaların genlik seviyeleri incelendiğinde çok düşük şiddetli arızaların tespit edilmesinin hâlâ zor olduğu görülmektedir.

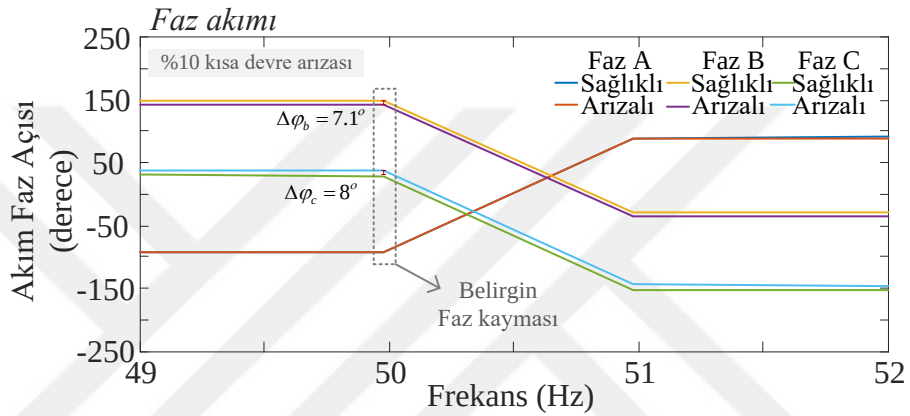
Sarım-sarım kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı grafikleri Şekil 6.6'da verilmiştir. Şekil 6.6'da $-f_s$ harmoniği genliğinin uzay vektör akım spektrumuna göre daha fazla artış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, uzay vektör kaçak akı bileşeninin uzay vektör akım bileşenine göre daha hassas bir sonuç sağladığını ispat etmektedir. Sırasıyla %10, %2 ve %1 arıza şiddetleri için $-f_s$ harmoniği genlik değerleri 0.2235, 0.024 ve 0.05129'dur. Bu sonuçlar incelendiğinde, özellikle %1 arıza şiddeti durumu için $-f_s$ harmonik genliğinin uzay vektör akım spektrumuna göre daha belirgin bir artışa sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.6. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumları a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

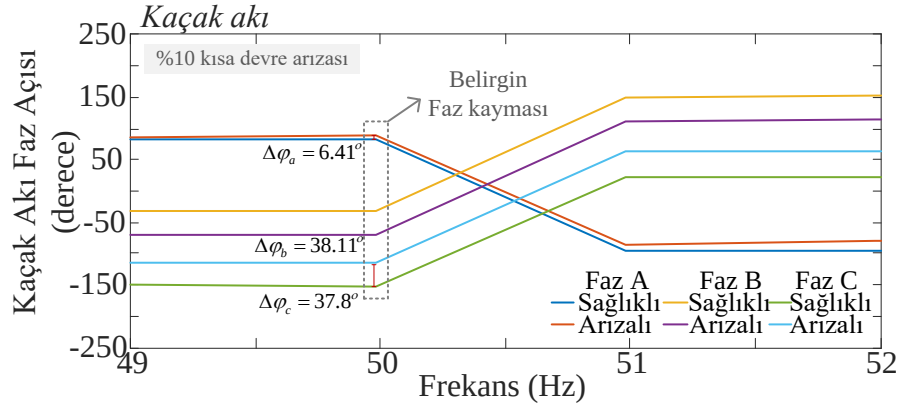
6.1.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Kısa Devre Arızası

Sarım-sarım kısa devre arızasını genlik frekans spektrumunun yanı sıra faz açısı-frekans spektrumu üzerinde de gözlemlemek arıza tespiti açısından ayırt edici bir etkiye sahip olabilir. Bu kısımda %10, %2 ve %1 kısa devre oranına sahip üç farklı arıza şiddeti için faz akımı ve kaçak akı faz açıları frekans spektrumu sonuçları incelenmiştir. İlk olarak %10 sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti için faz akımları açı değerlerinin frekans spektrumu Şekil 6.7’de verilmiştir.



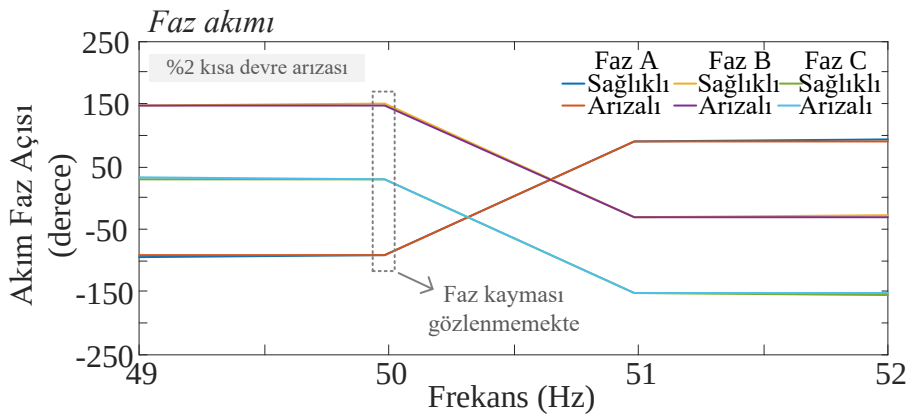
Şekil 6.7. Sağlıklı durum ve %10 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.7 incelendiğinde, %10 kısa devre arızası durumunda faz akımlarının açı-frekans spektrumunda sağlıklı durum ile arızalı durum arasında belirgin faz kaymalarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Arızalı durumda, B fazında 7.1°, C fazında ise 8°'lik faz kaymaları gözlemlenmiştir. Belirtilen arıza şiddetini tespit etmek için sağlanan bilgi yeterli olabilir. Ancak, arızanın etkilerinin daha detaylı bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla, kaçak akı faz açısının frekans spektrumu üzerindeki etkisini incelemek üzere Şekil 6.8 sunulmuştur.



Şekil 6.8. Sağlıklı durum ve %10 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

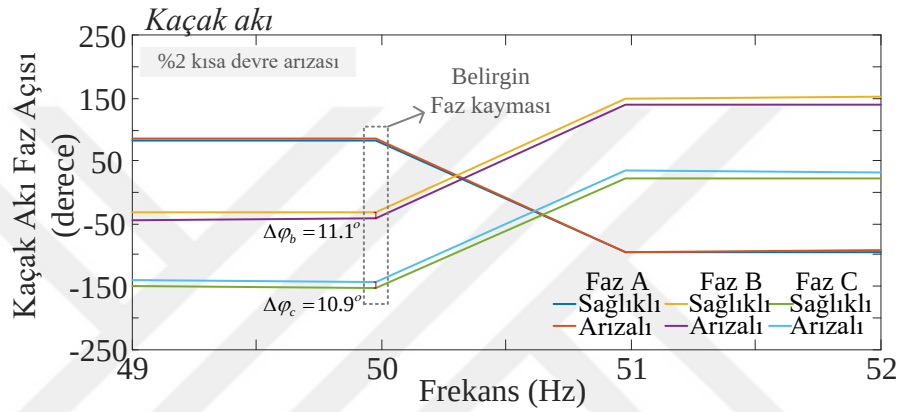
Şekil 6.8'e göre, %10 kısa devre arızası durumunda kaçak akı açısı-frekans spektrumunda, sağlıklı ve arızalı durumlar arasında çok belirgin faz kaymaları meydana gelmektedir. Arızalı durumda, A fazında 6.41° , B fazında 38.11° , C fazında ise 37.8° 'lik faz kaymaları gözlemlenmiştir. Bu sonuç, %10 kısa devre arıza şiddetinin tespiti için kaçak akı faz açısı-frekans spektrumunun incelenmesinin, arıza tespitinde faz akımlarına göre daha hassas bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır. Arıza şiddetinin daha düşük ve erken aşamalarda tespit edilebilmesi için %2 ve %1 oranlarında kısa devre arıza şiddetlerine ait sonuçlar incelenmiştir. Şekil 6.9'da %2 sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti için faz akımları açısı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.9. Sağlıklı durum ve %2 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.9 incelendiğinde, %2 oranındaki kısa devre arızası durumunda faz akımlarının açılı-frekans spektrumunda sağlıklı durum ile arızalı durum arasında belirgin bir faz kayması olmadığı gözlemlenmektedir. Bu durum, %2 oranındaki kısa devre arızasında faz akımlarının açılı-frekans spektrumunun incelenmesinin arıza tespiti için yeterli olmayacağını ortaya koymaktadır.

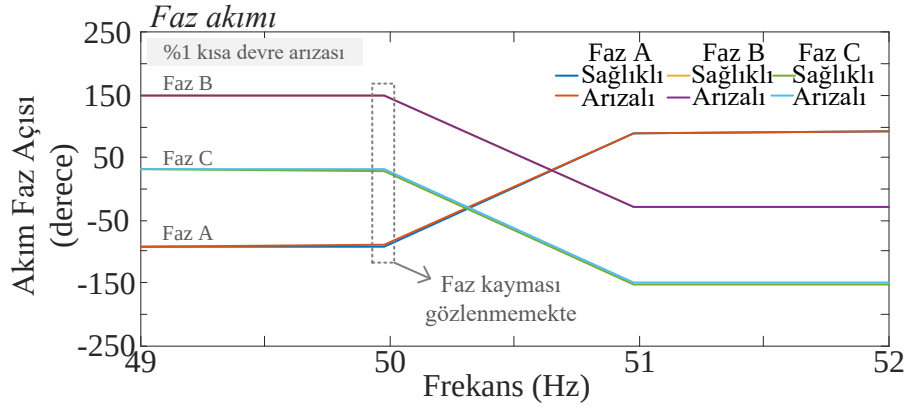
Şekil 6.10'da %2 sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı açılı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.10. Sağlıklı durum ve %2 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açılı-frekans spektrumu

Şekil 6.10'a göre, %2 oranındaki kısa devre arızası durumunda kaçak akının açılı-frekans spektrumunda, sağlıklı ve arızalı durumlar arasında belirgin faz kaymaları olduğu görülmektedir. Arızalı durumda, B fazında 11.1° ve C fazında 10.9°'lik faz kaymaları tespit edilmiştir.

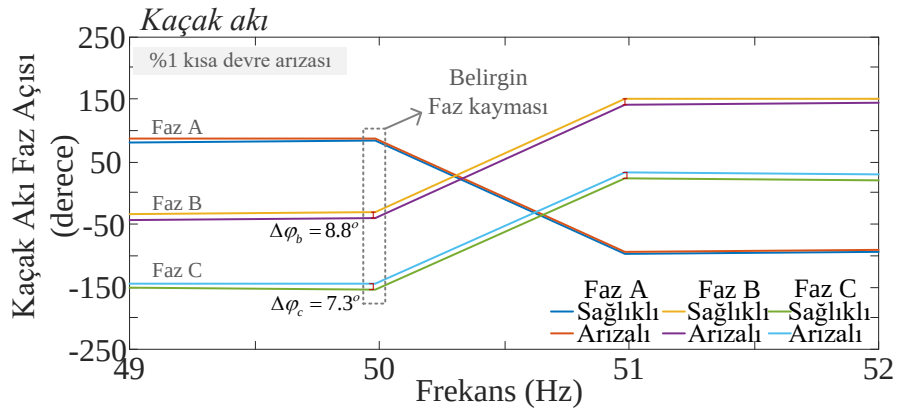
Son olarak, arızanın erken aşamada ve düşük şiddette tespitinin incelenmesi amacıyla %1'lik kısa devre oranı incelenmiştir. Şekil 6.11'de %1 sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti için faz akımları açılı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.11. Sağlıklı durum ve %1 kısa devre arıza şiddeti için akım faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.11 incelendiğinde, %1 kısa devre arızası durumunda faz akımlarının açı-frekans spektrumunda sağlıklı durum ile arızalı durum arasında belirgin bir faz kayması olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum, %1 kısa devre arızasında faz akımlarının açı-frekans spektrumunun incelenmesinin arıza tespiti için yeterli olmayacağını göstermektedir.

Şekil 6.12’de %1 sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı açı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.12. Sağlıklı durum ve %1 kısa devre arıza şiddeti için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.12’ye göre, %1 kısa devre arızası durumunda kaçak akı açı-frekans spektrumunda, sağlıklı ve arızalı durumlar arasında belirgin faz kaymaları meydana

gelmektedir. Arızalı durumda, B fazında 8.8°, C fazında ise 7.3°'lik faz kaymaları gözlemlenmiştir. Bu sonuç, düşük şiddetli arızaların erken tespiti için kaçak akı faz açısı-frekans spektrumunun incelenmesinin, arıza tespitinde önemli bir gösterge olabileceğini ortaya koymaktadır. Elde edilen faz akımları ve kaçak akı faz açısı-frekans spektrumları, detaylı bir şekilde incelenmek üzere Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için faz akımları açısı değişimleri

	%10 TTF $\Delta\phi_I(^{\circ})$	%2 TTF $\Delta\phi_I(^{\circ})$	%1 TTF $\Delta\phi_I(^{\circ})$
Faz A	-	-	-
Faz B	7.1	-	-
Faz C	8	-	-

Çizelge 6.1 incelendiğinde, %10 sarım-sarım kısa devre arıza şiddetinde, sadece Faz B ve Faz C'de açı değişimi gözlemlenmiştir. Faz B'de 7.1°, Faz C'de ise 8°'lik açı değişimi olmuştur. Daha düşük şiddetli arızalar (%2 TTF ve %1 TTF) için Faz A, B ve C'de açı değişimi tespit edilmemiştir.

Çizelge 6.2 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için kaçak akı açısı değişimleri

	%10 TTF $\Delta\phi_{\phi}(^{\circ})$	%2 TTF $\Delta\phi_{\phi}(^{\circ})$	%1 TTF $\Delta\phi_{\phi}(^{\circ})$
Faz A	6.41	-	-
Faz B	38.11	11.1	8.8
Faz C	37.8	10.9	7.3

Çizelge 6.2 incelendiğinde, %10 arıza seviyesinde Faz A'da 6.41°, Faz B'de 38.11° ve Faz C'de 37.8° gibi belirgin açı değişimleri gözlemlenmiştir. Bu, Faz B ve Faz C'nin arızaya karşı daha duyarlı olduğunu göstermektedir. %2 arıza seviyesinde Faz B'de 11.1°, Faz C'de ise 10.9° açı değişimi tespit edilmiştir. Faz A için açı değişimi

gözlemlenmemiştir. Son olarak %1 arıza seviyesinde ise Faz B’de 8.8° ve Faz C’de 7.3° açı değişimi görülmüş, ancak Faz A yine etkilenmemiştir.

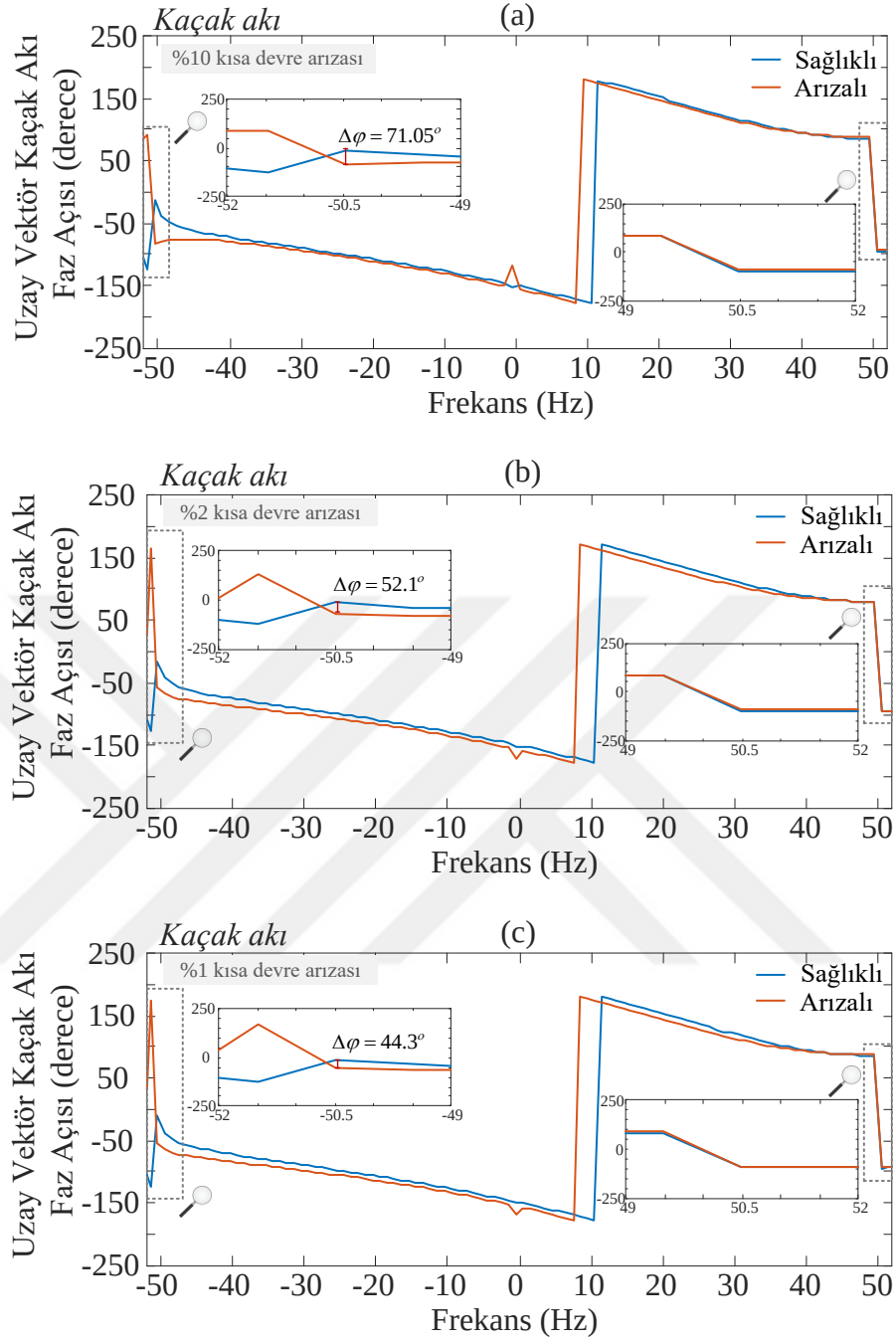
Sarım-sarım kısa devre arıza şiddeti arttıkça (TTF yüzdesi büyüdükçe), özellikle Faz B ve Faz C üzerindeki açı değişimlerinin belirgin hale geldiği görülmektedir. Faz A, düşük seviyeli arızalardan etkilenmezken, Faz B ve Faz C daha hassas tepki vermektedir. Bu durum, kaçak akı ve faz akımlarındaki açı değişimlerinin, özellikle Faz B ve Faz C’ye odaklanılarak arıza tespiti açısından daha etkin bir şekilde değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır. Analiz sonuçları, kaçak akıdaki değişimlerin daha belirgin bir şekilde gözlemlendiğini de göstermektedir.

Arızanın daha detaylı ve hassas bir şekilde incelenbilmesi amacıyla uzay vektör bileşenlerinin faz açısı spektrumları da incelenmiştir. Bu yaklaşım, farklı kısa devre arıza şiddetlerinin fazlar üzerindeki etkilerini daha kapsamlı bir şekilde analiz ederek, arıza tespiti ve değerlendirme süreçlerine derinlik kazandırabilmektedir. Şekil 6.13’te farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı bileşenlerinin faz açısı spektrumları verilmiştir.

Şekil 6.13’teki uzay vektör kaçak akı faz açıları analiz edildiğinde, ana harmoniğin pozitif bileşeninin f_s faz açısında bir değişim gözlenmediği, ancak negatif bileşeninde belirgin faz açısı değişikliklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. %10, %2 ve %1 kısa devre arıza şiddetlerinde sırasıyla 71.05°, 44.3° ve 52.1°’lik açı kaymaları gözlemlenmiştir. Kaçak akı tabanlı simetrik bileşenler yönteminin faz açısı spektrumlarından elde edilen $-f_s$ sinyaline ait açı değişimleri, detaylı bir inceleme amacıyla Çizelge 6.3’te verilmiştir.

Çizelge 6.3 Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı açı değişimleri

	%10 TTF $\Delta\varphi_\phi(^{\circ})$	%2 TTF $\Delta\varphi_\phi(^{\circ})$	%1 TTF $\Delta\varphi_\phi(^{\circ})$
$-f_s$	71.05	52.1	44.3



Şekil 6.13. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu a) %10 kısa devre arıza şiddeti b) %2 kısa devre arıza şiddeti c) %1 kısa devre arıza şiddeti

Bu bulgular, sarım-sarım kısa devre arızalarının tespiti amacıyla uzay vektör kaçak akı faz açısı-frekans spektrumunun analiz edilmesinin arıza tespiti için etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir. Arıza şiddeti %1 gibi düşük seviyelerde olsa

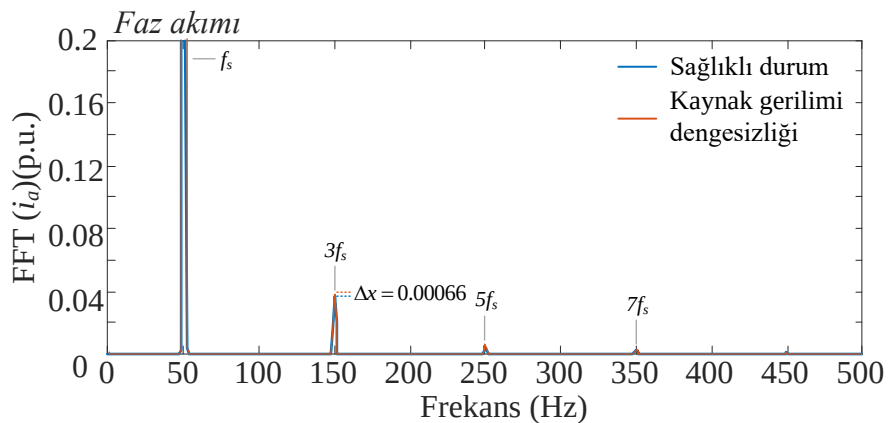
bile, bu yöntemle arızanın analizleri gerçekleştirilen diğer yöntemlere kıyasla daha hassas bir şekilde tespit edilebildiği belirlenmiştir.

6.2 Faz Gerilimi Dengesizliği Altında Kısa Devre Arızalarının Analizi ve Ayrıştırılması

Transformatörlerin primer sargılarında oluşan kaynak gerilimi dengesizliği, negatif bileşen harmoniklerini artırarak transformatörü olumsuz etkiler ve verim kayıplarına neden olabilir. Kaynak gerilimi dengesizliği durumunu modellemek için primer sargısı A fazının besleme geriliminde %5'lik bir gerilim dengesizliği meydana getirilmiştir. Sarım-sarım kısa devre arızası durumuna benzer şekilde gerilim dengesizliğinin etkilerini incelemek amacıyla faz akımı, kaçak akı ve bu iki büyüklüğün uzay vektör bileşenleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, genlik ve faz açısı-frekans spektrumu ile uzay vektör bileşen spektrumları üzerinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu analiz, sarım-sarım kısa devre arızası sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu sayede hem sistemdeki gerilim dengesizliğinin varlığı hem de iki durumun ayırt edilebilirliği ortaya konulmuştur.

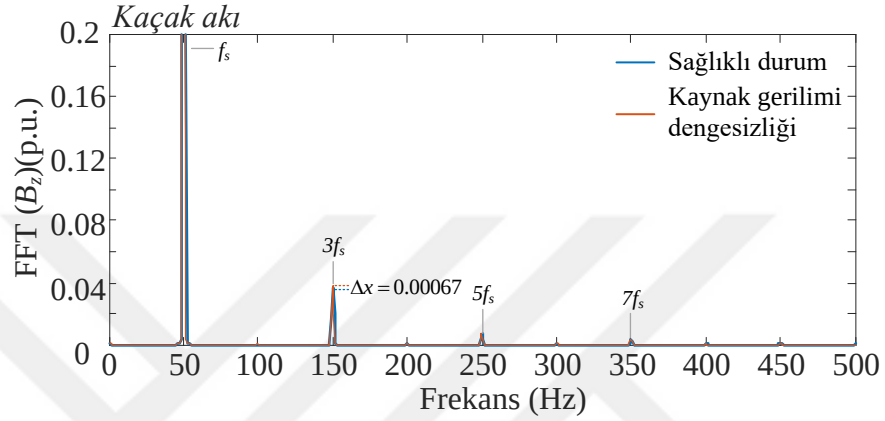
6.2.1 Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi-Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği etkisinin akım frekans spektrumu sonuçları 6.14'teki gibidir.



Şekil 6.14. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği durumu için i_a faz akımı-frekans spektrumu

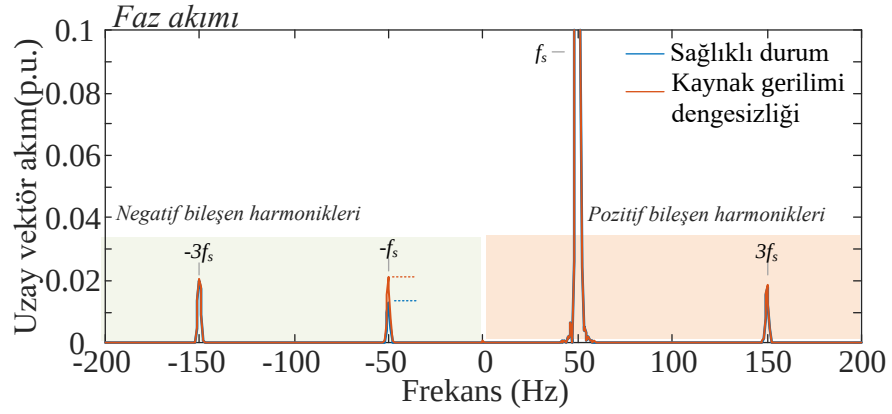
Şekil 6.14 incelendiğinde, gerilim dengesizliği etkisiyle $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ 'te arıza harmonikleri ortaya çıkmıştır. Ancak bu sinyallerin genlikleri oldukça düşük seviyededir. Bu harmonik bileşenler, sarım-sarım kısa devre arızası durumunda da meydana gelmektedir. Bu nedenle, kaynak gerilimi dengesizliğinin tespiti ve sarım-sarım kısa devre arızalarından ayrıştırılması konusunda kesin bir değerlendirme yapılamamaktadır. Kaçak akı frekans spektrumu ise Şekil 6.15'te verilmiştir.



Şekil 6.15. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği durumu için kaçak akı-frekans spektrumu

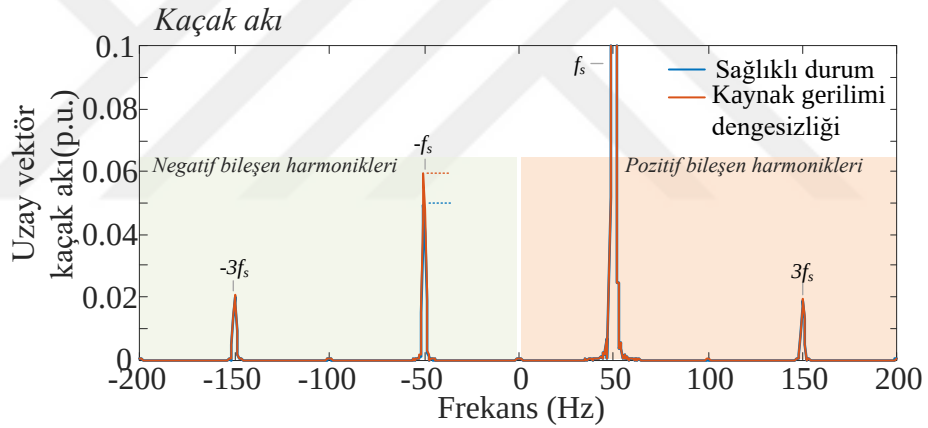
Şekil 6.15'te gösterildiği gibi, gerilim dengesizliği sonucunda kaçak akı frekans spektrumunda, akım frekans spektrumuna benzer arıza harmoniklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Ancak elde edilen sonuçlar, kaynak gerilim dengesizliğinin hassas bir şekilde tespit edilmesi ve sarım-sarım kısa devre arızası ile kaynak gerilim dengesizliği durumunun ayrıştırılmasına yönelik net bir değerlendirme yapılmasını mümkün kılmamaktadır.

Şekil 6.16'da kaynak gerilimi dengesizliği durumu için uzay vektör akım bileşeninin frekans spektrumu bulunmaktadır. Şekil 6.16'da meydana gelen gerilim dengesizliğinin $-f_s$ harmoniğindeki etkisi net bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu durumda, akım ve kaçak akının frekans spektrumundaki sonuçlarında tespit edilemeyen arıza harmoniklerinin, arıza sinyalinin $-f_s$ harmoniğinde mümkün olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.16. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için uzay vektör akım-frekans spektrumu

Şekil 6.17’de, transformatörün gerilim dengesizliği durumunda uzay vektör kaçak akı bileşenlerinin frekans spektrumuna ilişkin analiz sonuçları gösterilmektedir.

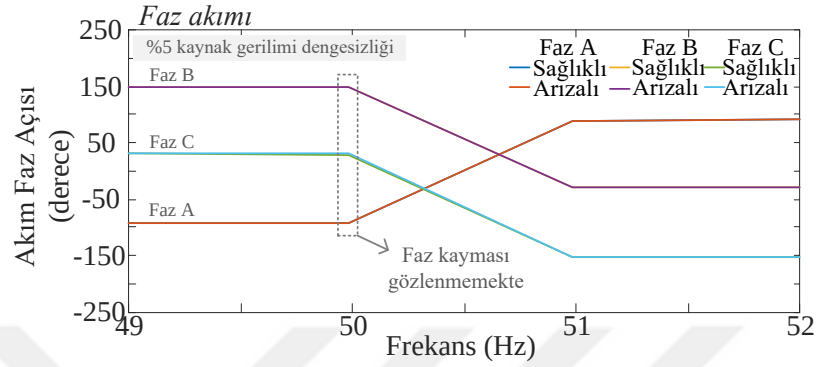


Şekil 6.17. Sağlıklı durum ve kaynak gerilimi dengesizliği için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu

Şekil 6.17’de $-f_s$ harmoniğindeki arıza genliğinin uzay vektör akım sonucuna göre önemli oranda arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum uzay vektör kaçak akı spektrumu incelemesinin uzay vektör akım spektrumu incelenmesine göre daha etkin bir arıza tespiti sağladığını ortaya çıkarmaktadır. $-f_s$ arıza harmoniği için akım ve kaçak akı genlik değerleri sırasıyla 0.021 ve 0.06 değerindedir. Ancak, yalnızca $-f_s$ harmonik bileşeni incelenerek, kaynak gerilimi dengesizliği ile sarım-sarım kısa devre arızalarının ayırtılmasına ilişkin net bir değerlendirme yapılamamaktadır.

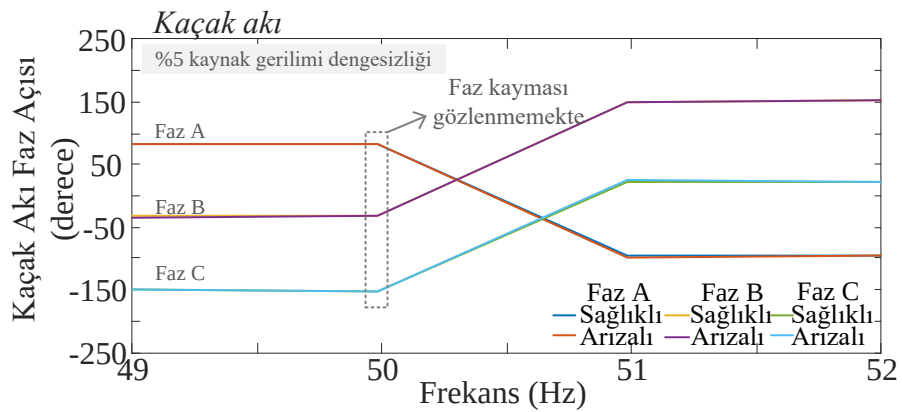
6.2.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Gerilim Dengesizliği

Şekil 6.18’de kaynak gerilim dengesizliği durumu için faz akımları açısı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.18. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için akım faz açıları-frekans spektrumu

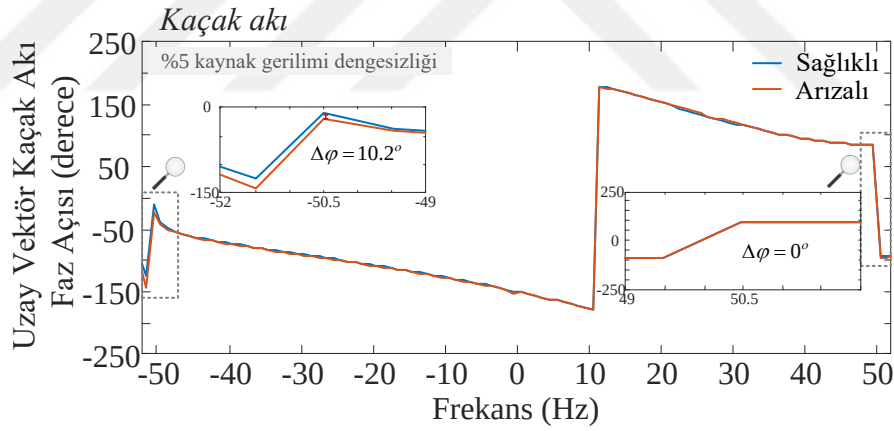
Şekil 6.18 incelendiğinde, kaynak gerilimi dengesizliği durumunda faz akımlarının açı-frekans spektrumunda sağlıklı durum ile arızalı durum arasında bir faz kaymasının oluşmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.19’da ise kaynak gerilim dengesizliği durumu için kaçak akı açısı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.19. Sağlıklı durum ve kaynak gerilim dengesizliği için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.19'a göre, kaynak gerilimi dengesizliği durumunda kaçak akı açısı-frekans spektrumunda sağlıklı ve arızalı durumlar arasında herhangi bir faz kayması gözlemlenmemiştir. Bu sonuç, faz akımları ve kaçak akıların açısı-frekans spektrumunun incelenmesinin, kaynak gerilimi dengesizliğini tespit etmek için tek başına yeterli bir yöntem olmadığını göstermektedir. Ancak, bu yöntem sarım-sarım kısa devre arızasının ayırt edilmesinde önemli bir araç sunmaktadır. Çünkü, sarım-sarım kısa devre arızasına ilişkin kaçak akı açısı-frekans spektrumu incelendiğinde (Bkz. Şekil 6.12 ve Şekil 6.13), faz açısında kayma meydana geldiği gözlemlenmektedir. Bu durumda, sistemde hem kaynak gerilimi dengesizliği hem de sarım-sarım kısa devre arızası mevcutsa, kaçak akı açısı-frekans spektrumu sonuçları analiz edilerek iki arıza durumunun ayrıştırılması konusunda net bir değerlendirme yapılabilmektedir.

Şekil 6.20'de kaynak gerilimi dengesizliği için uzay vektör kaçak akı bileşeninin faz açısı spektrumu verilmiştir.



Şekil 6.20. Farklı kısa devre arıza şiddetleri için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

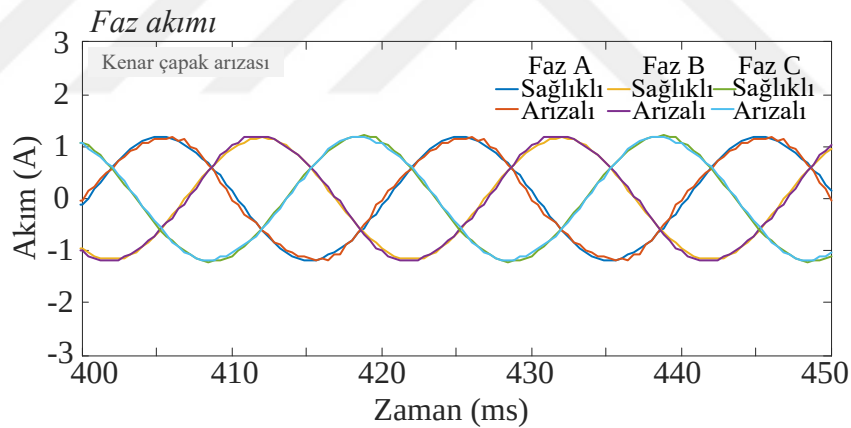
Şekil 6.20'ye bakıldığında, kaynak gerilim dengesizliği durumunda $-f_s$ sinyalinin faz açısındaki değişimin izlenmesiyle bu durumun tespit edilebildiği görülmüştür.

6.3 Laminasyon Arıza Sonuçlarının Analizi

Bu bölümde, transformatör çekirdeğinde meydana gelen laminasyon arızalarından kenar çapak arızası ile laminasyonlar arasındaki kısa devre arızasının transformatör üzerindeki olumsuz etkileri incelenmiştir. Arıza tespiti amacıyla akım ve kaçak akı bileşenleri analiz edilerek elde edilen sonuçlar, zaman eksenini, genlik ve faz açısı-frekans spektrumu ile uzay vektör bileşen spektrumları üzerinde ayrıntılı bir şekilde değerlendirilmiştir. Bu analizlerde her parametre ayrı ayrı değerlendirilmiş ve transformatörün çalışma koşullarında meydana gelen harmoniklerin arıza türüne bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği detaylı bir biçimde ortaya konmuştur.

6.3.1 Kenar Çapak Arızasının Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzay Vektör Analizi

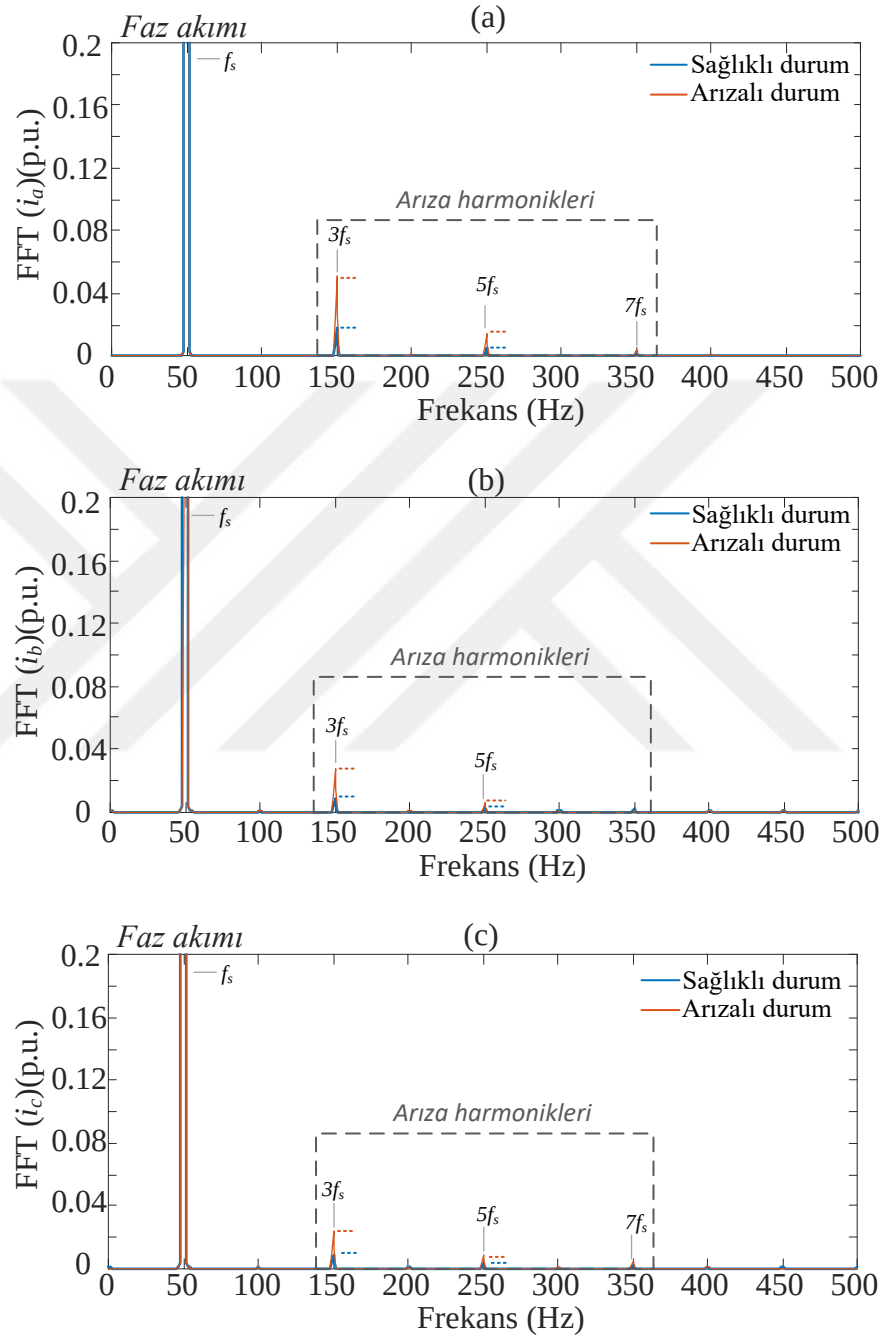
Kenar çapak arızası için primer faz akımının zaman eksenindeki grafiği Şekil 6.21’de verilmiştir.



Şekil 6.21. Kenar çapak arızası için faz akımları-zaman grafiği

Şekil 6.21’de faz akımlarında kenar çapak arızasının etkileri incelendiğinde, faz akımları arasında düşük bir seviyede asimetri olduğu gözlemlenmektedir. Ancak bu asimetrik durumun, arızanın doğası gereği oldukça sınırlı olması ve yalnızca küçük genlik farkları şeklinde kendini göstermesi nedeniyle, bu tür bir bozulmanın doğrudan ve kesin bir şekilde tespit edilmesi her zaman mümkün olmayabilmektedir. Bu durum, özellikle transformatörün çalışma koşullarının normal sınırlar içinde bulunduğu durumlarda arıza belirtilerinin fark edilmesini zorlaştırmaktadır.

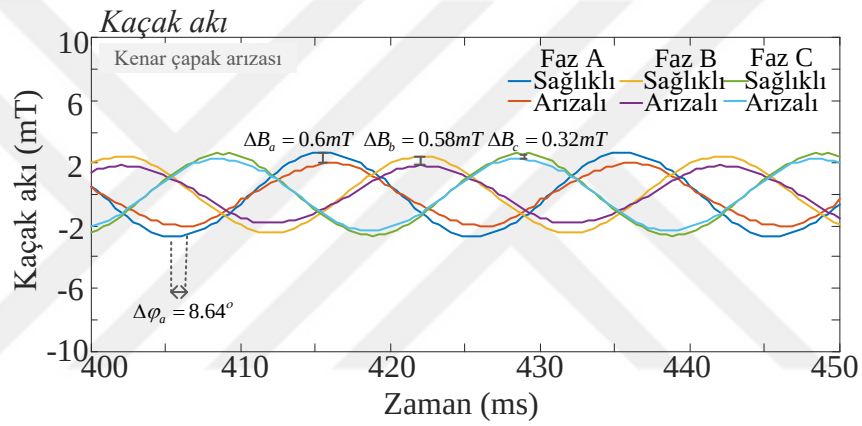
Dolayısıyla, kenar çapak arızasının varlığını daha hassas ve güvenilir bir şekilde gözlemleyebilmek amacıyla, faz akımlarına ilişkin zaman eksenindeki verilerin frekans spektrumuna dönüştürülerek analiz edilmesi gerekmektedir.



Şekil 6.22. Sağlıklı durum ve arızalı durum için faz akımları-frekans spektrumları a) i_a -frekans spektrumu b) i_b -frekans spektrumu c) i_c -frekans spektrumu

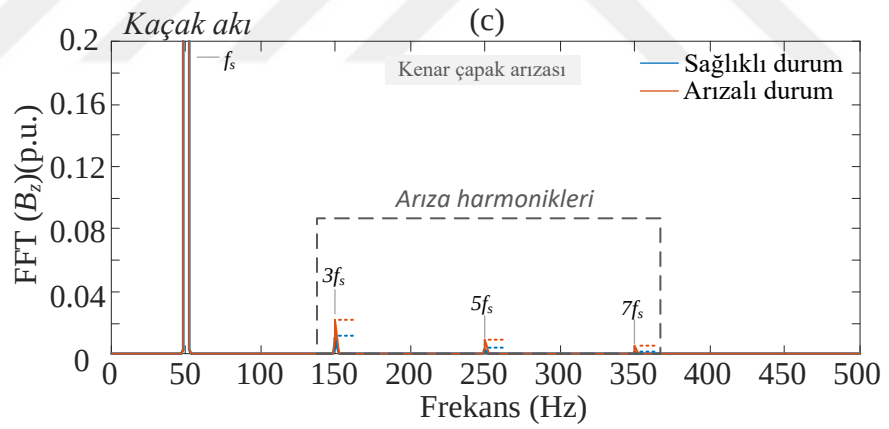
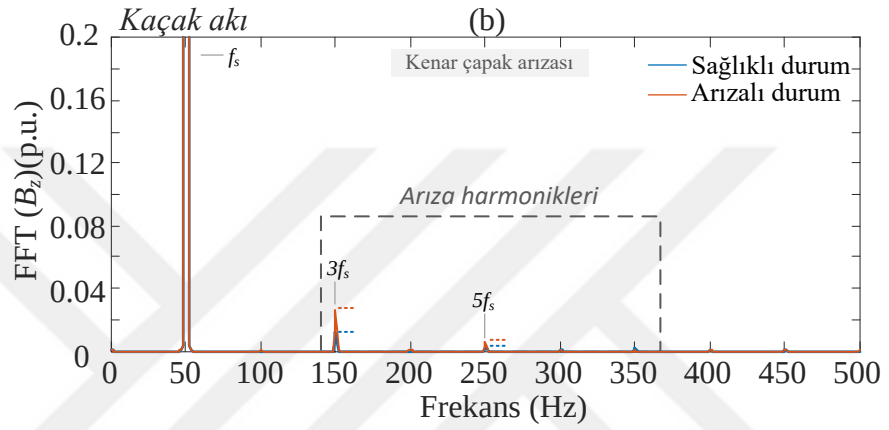
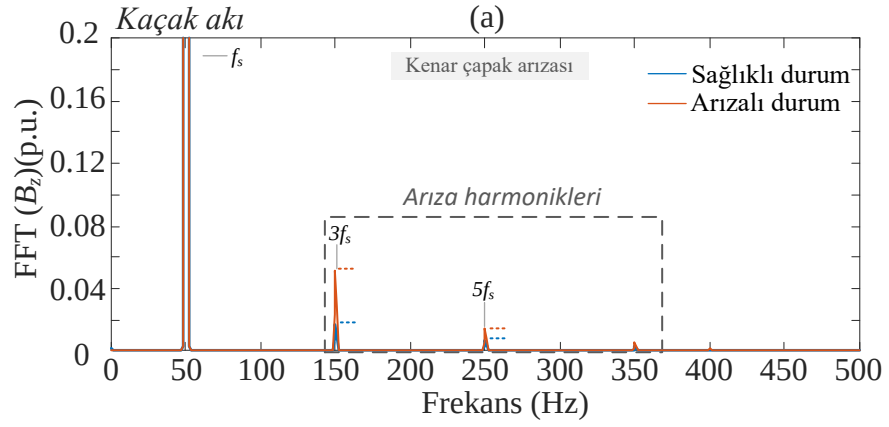
Şekil 6.22'deki frekans spektrumu, akım verilerinde gözlemlenen düşük seviyeli sapmaların daha belirgin hale getirilmesini sağlamakta ve arızaya işaret eden harmonik bileşenlerin ayırt edilebilir şekilde ortaya konmasına imkân tanımaktadır. Şekil 6.22'de arızanın etkisiyle $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ 'te her üç faz akımı için de arıza harmoniklerinin ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Elde edilen sonuçlar, arızanın etkisinin en belirgin şekilde A fazının akım frekans spektrumunda gözlemlendiği şeklinde yorumlanabilir.

Kenar çapak arızası için kaçak akının zaman eksenindeki grafiği Şekil 6.23'te verilmiştir.



Şekil 6.23. Kenar çapak arızası için kaçak akı-zaman grafiği

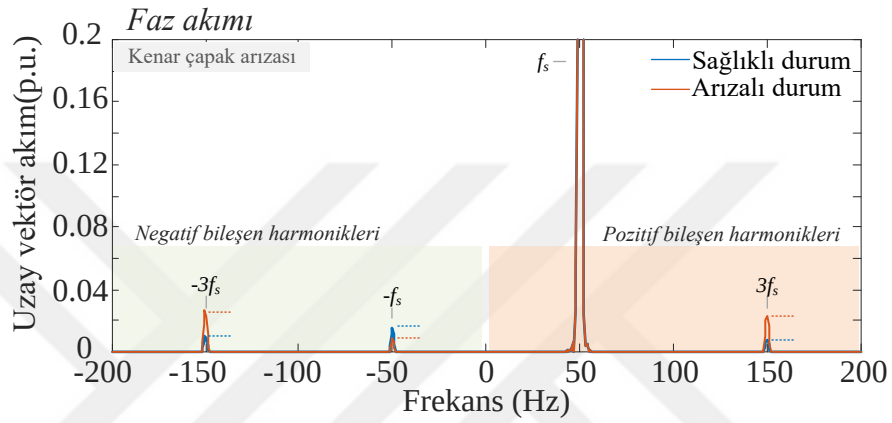
Şekil 6.23'te kenar çapak arızasının kaçak akı dalga formlarında belirgin bir asimetri meydana getirdiği gözlemlenmektedir. Faz sargılarındaki kaçak akı sensörlerinden elde edilen verilere göre, arıza durumunda A, B ve C faz sensörlerinin ölçtüğü kaçak akı genliklerinde sırasıyla 0,6 mT, 0,58 mT ve 0,32 mT'lik bir azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrıca A fazı üzerinde bulunan kaçak akı noktası için sağlıklı ve arızalı durum arasında 8.64° 'lik bir faz kaymasının da meydana geldiği görülmektedir. Bu sonuçlar transformatörde kenar çapak arızasının etkisini göstermektedir. Arıza etkisini daha ayrıntılı incelemek amacıyla kaçak akı verilerinin frekans spektrumu sonuçları Şekil 6.24'teki gibi verilmiştir.



Şekil 6.24. Sağlıklı durum ve arızalı durum için kaçak akı-frekans spektrumları a) B_{za} -frekans spektrumu b) B_{zb} -frekans spektrumu c) B_{zc} -frekans spektrumu

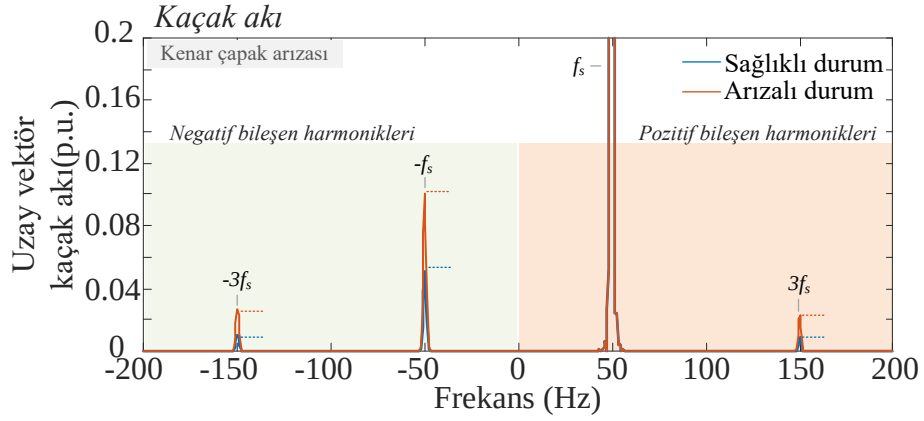
Şekil 6.24'te arızanın etkisiyle her üç kaçak akı noktası için $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ 'te arıza harmoniklerinin ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Arızanın etkisinin en belirgin olarak A fazı üzerinde bulunan kaçak akı yoğunluğu frekans spektrumunda gözlemlendiği yorumu yapılabilir.

Kenar çapak arızası, manyetik çekirdek yapısında yerel bozulmalara yol açarak manyetik akının simetrik yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu arıza, sistemin manyetik devresindeki kaçak akının bozulmasına neden olmakta; bu da pozitif ve negatif harmonik bileşenlerde belirgin sapmalar meydana getirebilmektedir. Şekil 6.25'te uzay vektör akım bileşenlerinin frekans spektrumu analizi bulunmaktadır. Bu grafik, kenar çapak arızasının faz akımları üzerindeki etkilerini ve farklı harmonik bileşenlerde meydana gelen değişimleri ortaya koymaktadır.



Şekil 6.25. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için uzay vektör akım-frekans spektrumu

Şekil 6.25, transformatörde meydana gelen kenar çapak arızasının özellikle üçüncü harmonik bileşenlerde arıza sinyallerini açık ve net bir biçimde ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu durum, kenar çapak arızasının manyetik akı yolunda asimetri ve bozulmalara yol açarak, belirli harmonik frekanslarda dikkat çekici büyüklükte değişimlere sebep olduğunu kanıtlamaktadır. Ancak, temel frekansın negatif bileşeni $-f_s$ incelendiğinde, belirgin bir arıza sinyalinin gözlemlenemediği dikkat çekmektedir. Bu durum, arızanın bazı harmonik frekanslarda daha belirgin şekilde kendini gösterdiğini, ancak belirli bileşenler üzerinde ihmal edilebilir düzeyde etkiler yarattığını ortaya koymaktadır. Şekil 6.26'da ise uzay vektör kaçak akı bileşenlerinin frekans spektrumu verilmiştir.

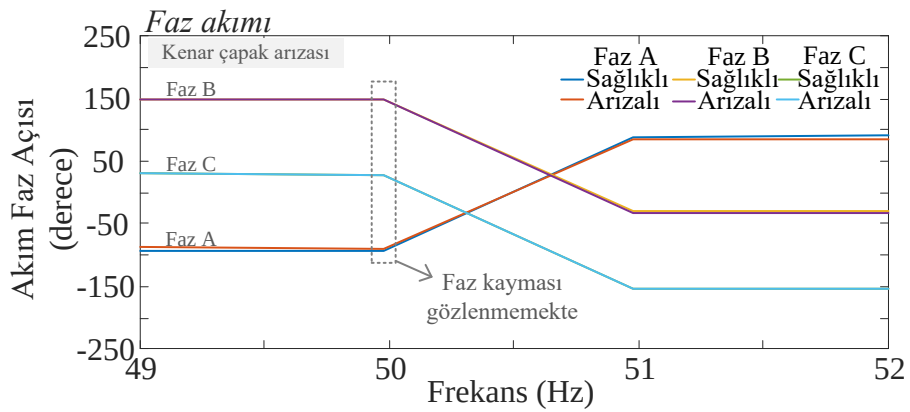


Şekil 6.26. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu

Şekil 6.26 incelendiğinde, kenar çapak arızasının etkisiyle oluşan arıza harmoniklerinin, kaçak akının hem negatif hem de pozitif bileşenlerinin üçüncü harmoniklerinde ($\pm 3f_s$) ortaya çıktığı ve temel frekansın negatif bileşeni $-f_s$ 'de belirgin bir şekilde tespit edildiği görülmektedir.

6.3.2 Faz Açısı Spektrumu Analizi-Kenar Çapak Arızası

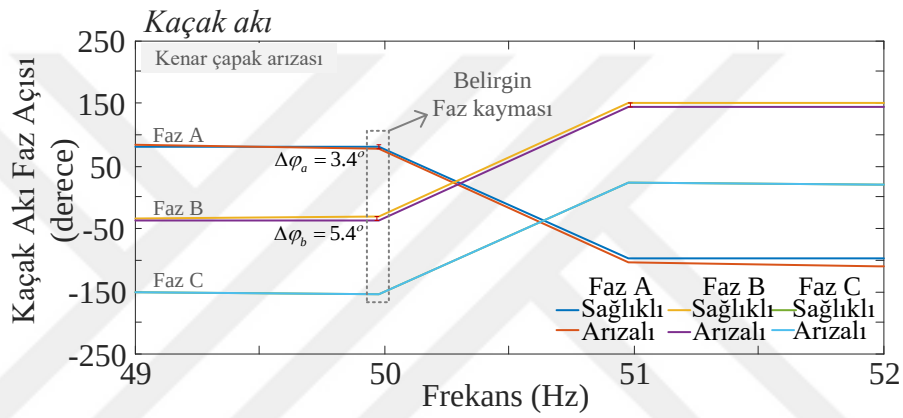
Şekil 6.27'de kenar çapak arızası için faz akımları açı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.27. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için akım faz açıları-frekans spektrumu

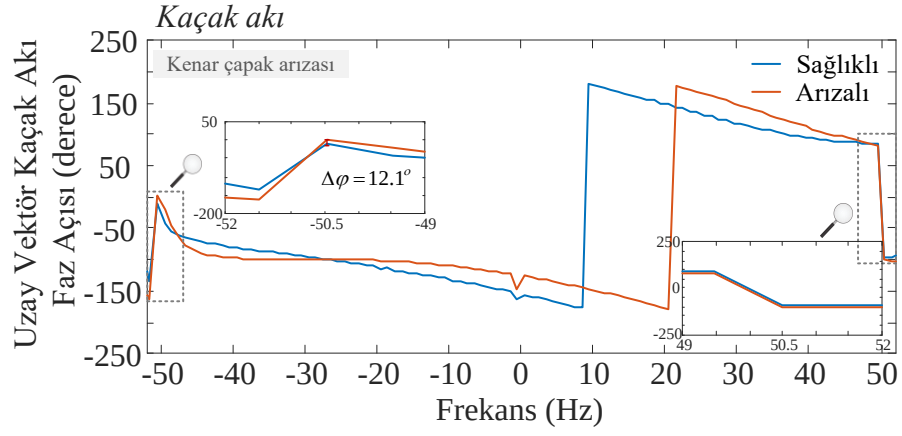
Şekil 6.27 incelendiğinde, kenar çapak arızasının varlığına rağmen, faz akımlarının açı-frekans spektrumunda sağlıklı ve arızalı durumlar arasında herhangi bir belirgin faz kaymasının meydana gelmediği tespit edilmiştir. Bu durum, kenar çapak arızasının transformatörün faz akımları üzerindeki etkisinin, açı-frekans spektrumu temelinde yapılan analizlerde sınırlı kalabileceğini ve arızanın bu yöntemle kesin bir şekilde tespit edilmesinin her zaman mümkün olmayabileceğini ortaya koymaktadır.

Şekil 6.28’de ise kenar çapak arızası için kaçak akı açı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.28. Sağlıklı durum ve kenar çapak arızası için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.28'deki kaçak akı açı-frekans spektrumunda, sağlıklı ve arızalı durumlar arasında belirgin faz kaymaları gözlemlenmiştir. Arızalı durum için, A fazında 3.4° ve B fazında 5.4° 'lik faz kaymaları tespit edilmiştir. Bu sonuç, kenar çapak arızalarının tespiti için kaçak akı faz açısı-frekans spektrumunun incelenmesinin etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir. Son olarak, Şekil 6.29'da kenar çapak arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları frekans spektrumu verilmiştir.

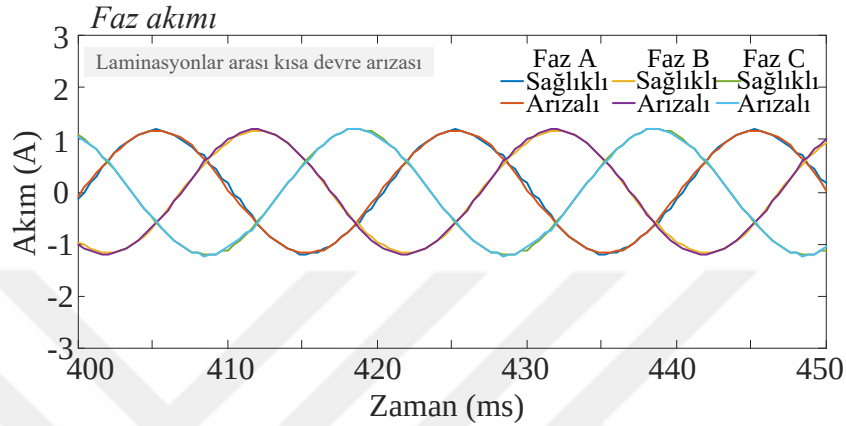


Şekil 6.29 Kenar çapak arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.29'daki uzay vektör kaçak akı faz açıları incelendiğinde, ana harmoniğin pozitif bileşeni f_s faz açısında belirgin bir değişim gözlenmezken, negatif bileşeninde ($-f_s$) 12.1° 'lik bir faz açısı değişikliği tespit edilmiştir. Bu sonuç, kenar çapak arızalarının tespiti için uzay vektör kaçak akı faz açısı-frekans spektrumunun analizinin etkili bir yöntem olabileceğini göstermektedir.

6.3.3 Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızasının Simetrik Bileşenler Metodu ile Uzak Vektör Analizi

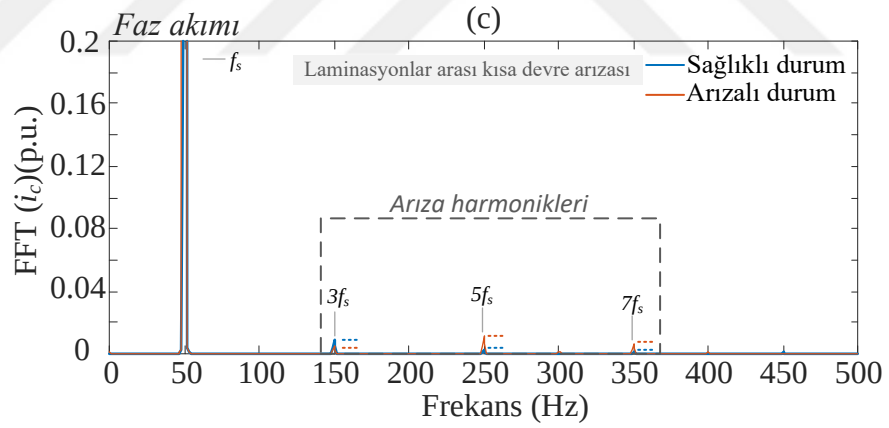
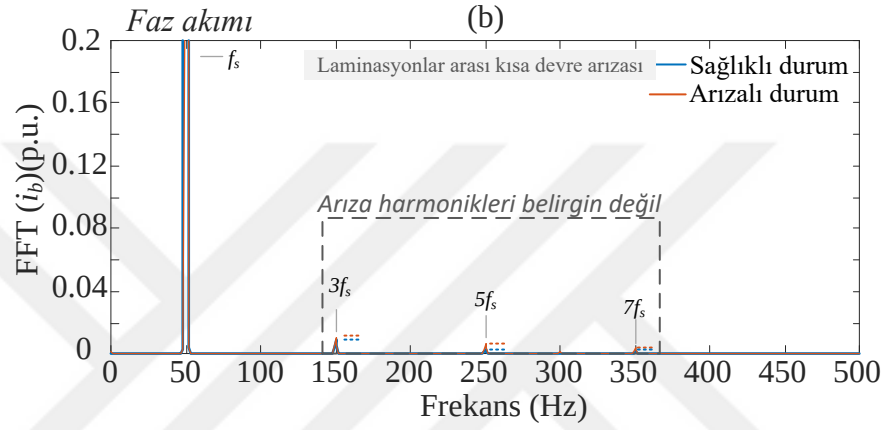
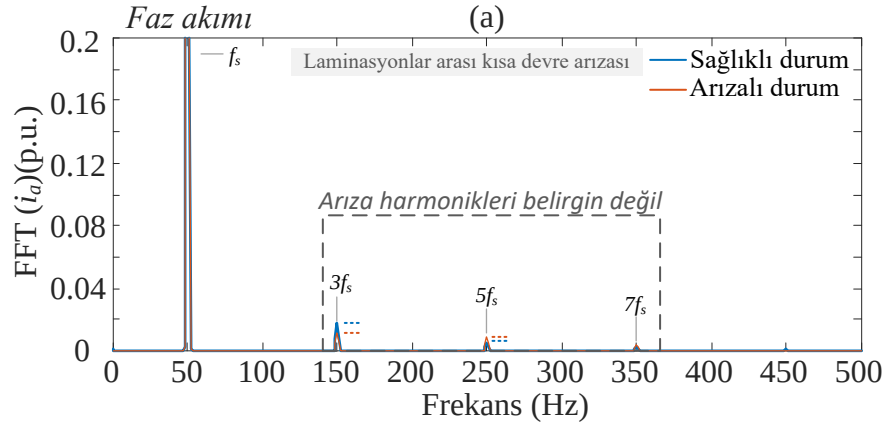
Laminasyonlar arası kısa devre arızası faz akımının zaman eksenini grafiği Şekil 6.30'daki gibidir.



Şekil 6.30. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için faz akımları-zaman grafiği

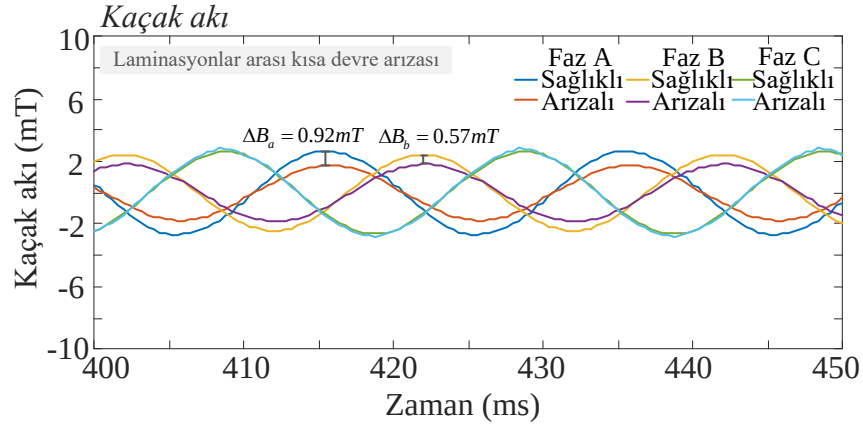
Şekil 6.30 incelendiğinde, transformatörde meydana gelen laminasyonlar arası kısa devre arızasının faz akımları üzerinde belirli bir düzeyde asimetri meydana getirdiği gözlenmektedir. Ancak, bu asimetri nispeten düşük seviyede olduğundan, yalnızca faz akımlarının zaman eksenini üzerinden arıza tespitinin gerçekleştirilmesi, kesin ve güvenilir bir sonuç elde etmeyi zorlaştırmaktadır.

Laminasyonlar arası kısa devre arızasının etkilerini daha hassas ve ayrıntılı bir şekilde değerlendirebilmek amacıyla, faz akımlarına ilişkin zaman eksenindeki veriler Şekil 6.31'deki gibi frekans eksenine dönüştürülmüştür. Şekil 6.31'de, arızanın etkisiyle $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ frekanslarında düşük genlikli arıza harmoniklerinin ortaya çıktığı gözlemlenmektedir. Ancak, bu harmoniklerin düşük genlikli olması, sinyalin sistemdeki gürültüden mi yoksa gerçek bir arızadan mı kaynaklandığı konusunda kesin bir değerlendirme yapılmasını zorlaştırmaktadır.



Şekil 6.31. Sağlıklı durum ve arızalı durum için faz akımları-frekans spektrumları a) i_a -frekans spektrumu b) i_b -frekans spektrumu c) i_c -frekans spektrumu

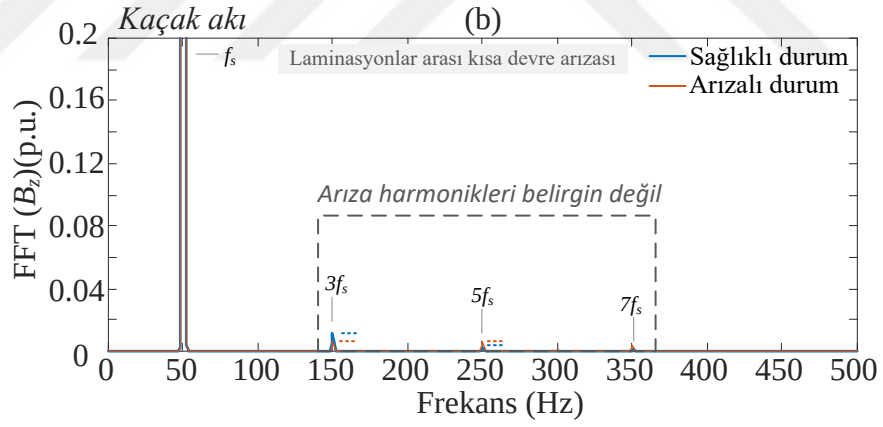
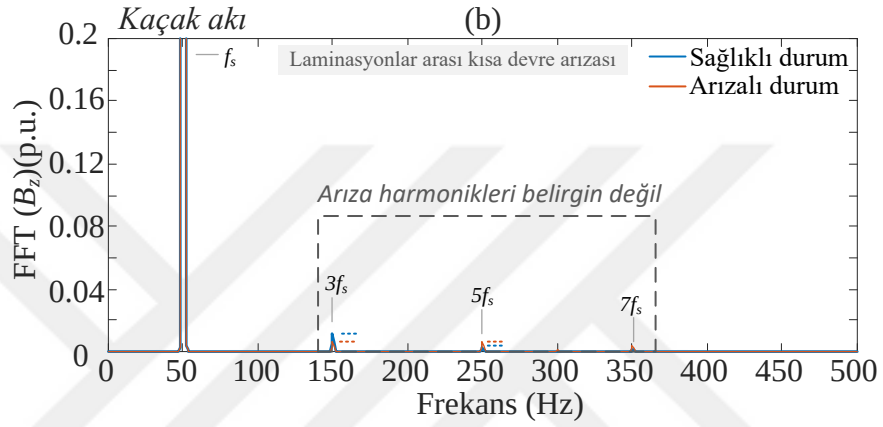
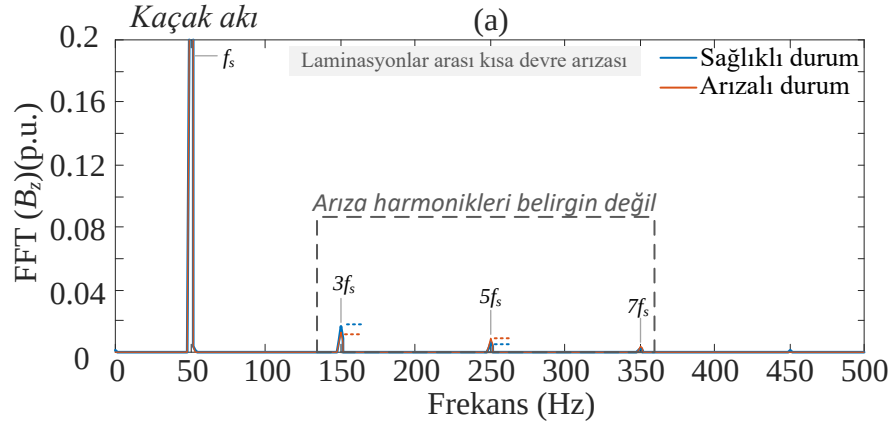
Laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akının zaman eksenindeki grafiği ise Şekil 6.32’de verilmiştir.



Şekil 6.32. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akı-zaman grafiği

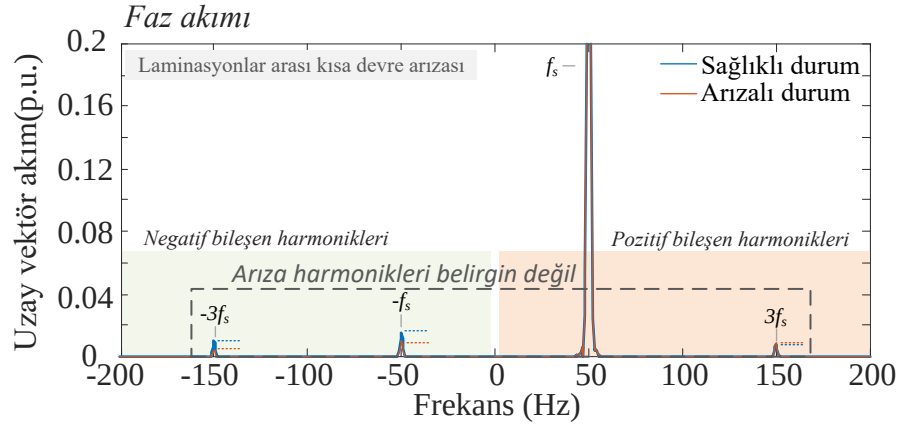
Şekil 6.32, laminasyonlar arası kısa devrenin kaçak akı dalgalarında asimetriye neden olduğunu göstermektedir. Kaçak akı sensörleri verileri incelendiğinde, arıza anında A ve B sensörlerinde sırasıyla 0,92 mT ve 0,57 mT’lik manyetik akı kaybı tespit edilmiştir. C fazı için ise çok düşük miktarda bir genlik azalması mevcuttur. Manyetik akıdaki bu değişimler, arızanın etkisiyle ortaya çıkmaktadır.

Arızanın etkisini daha detaylı bir şekilde incelemek için, kaçak akı verilerinin frekans spektrumu sonuçları Şekil 6.33’te sunulmuştur. Şekil 6.33’te arızanın etkisiyle her üç kaçak akı noktası için $5f_s$ ve $7f_s$ ’te düşük genliklerde arıza harmoniklerinin bulunduğu gösterilmektedir. Ancak arıza sinyallerinin belirgin olmamasından dolayı hassas bir arıza tespitinin mümkün olmadığı yorumu yapılabilir.



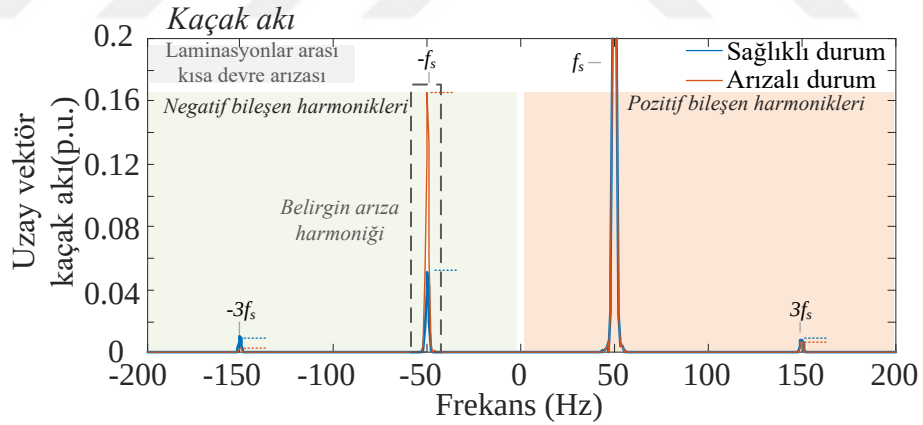
Şekil 6.33. Sağlıklı durum ve arızalı durum için kaçak akı-frekans spektrumları a) A fazı kaçak akı-frekans spektrumu b) B fazı kaçak akı-frekans spektrumu c) C fazı kaçak akı-frekans spektrumu

Daha hassas ve etkin bir arıza tespiti gerçekleştirebilmek için, kenar çapak arıza tespitine benzer şekilde akım ve kaçak akı verilerinin simetrik bileşenleri analiz edilmiştir. Şekil 6.34'te uzay vektör akım bileşenlerinin frekans spektrumu gösterilmektedir.



Şekil 6.34. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör akım-frekans spektrumu

Şekil 6.34'te laminasyonlar arası kısa devre arızasının uzay vektör akım spektrumunda herhangi bir arıza harmoniği meydana getirmediği görülmektedir. Bu nedenle akımın simetrik bileşenlerini inceleyerek arıza tespiti hakkında bir yorum yapmak mümkün değildir. Şekil 6.35'te ise uzay vektör kaçak akı bileşenlerinin frekans spektrumu verilmiştir.

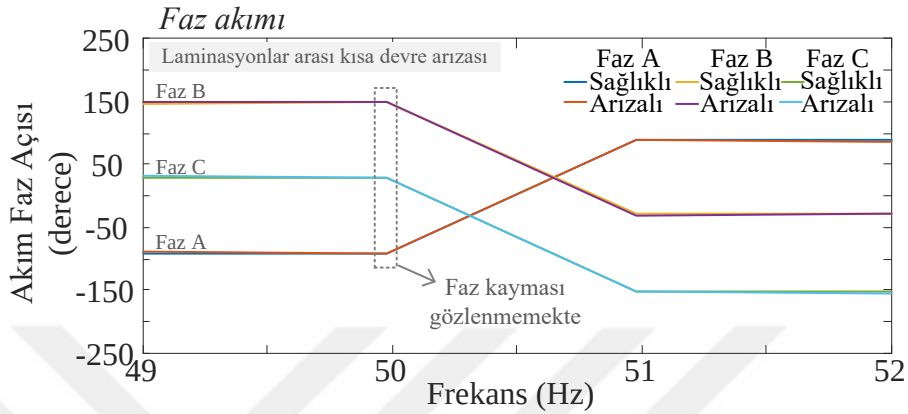


Şekil 6.35. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumu

Şekil 6.35 incelendiğinde, kaçak akının negatif bileşeninde yer alan temel harmoniğin ($-f_s$) arıza tespiti açısından oldukça önemli bir sinyal olduğu görülmektedir. Bu harmonik bileşen için, arıza durumunda sinyalin 0.165 seviyesine yükseldiği gözlemlenmiştir.

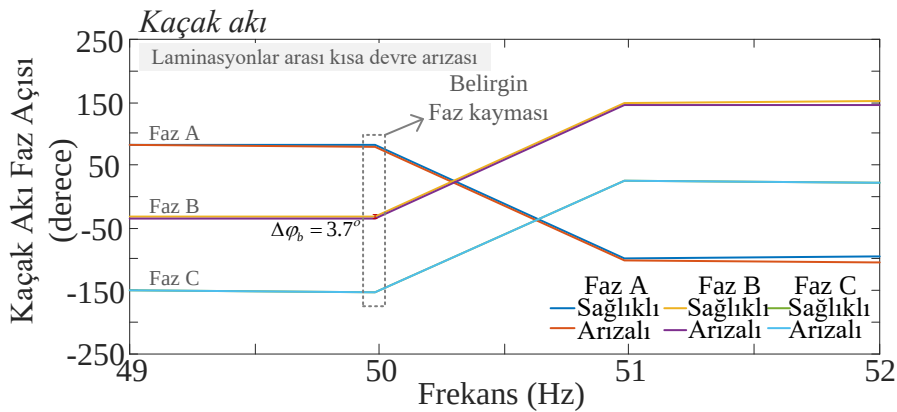
6.3.4 Faz Açısı Spektrumu Analizi- Laminasyonlar Arası Kısa Devre Arızası

Şekil 6.36'da laminasyonlar arası kısa devre arızasının faz akımları açısı-frekans spektrumu bulunmaktadır.



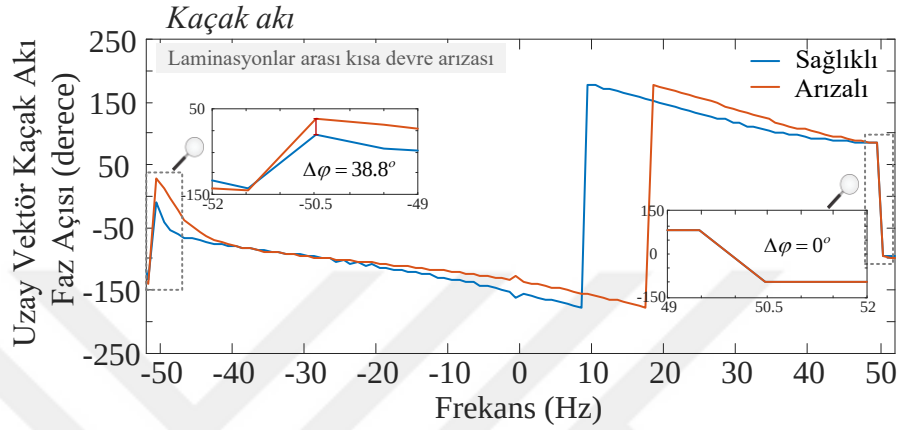
Şekil 6.36. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için akım faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.36'da, laminasyonlar arası kısa devre arızasının açısı-frekans spektrumunda sağlıklı ve arızalı durumlar arasında faz kayması oluşmadığı görülmüştür. Bu durum, laminasyonlar arası kısa devre arızalarının tespiti için faz akımı açısı-frekans spektrumunun yetersiz olduğunu göstermektedir. Şekil 6.37'de ise laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akı açısı değerlerinin frekans spektrumu bulunmaktadır.



Şekil 6.37. Sağlıklı durum ve laminasyonlar arası kısa devre arızası için kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.37'ye göre, laminasyonlar arası kısa devre arızası durumunda kaçak akı açısı-frekans spektrumunda, sağlıklı ve arızalı durumlar arasında belirgin faz kaymaları meydana gelmektedir. Arızalı durumda, B fazında 3.7° faz kayması gözlemlenmiştir. Son olarak, Şekil 6.38'de laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları frekans spektrumu verilmiştir.



Şekil 6.38. Laminasyonlar arası kısa devre arızası için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumu

Şekil 6.38'deki uzay vektör kaçak akı faz açıları incelendiğinde, ana harmoniğin pozitif bileşeni (f_s) faz açısında belirgin bir değişim gözlenmezken, negatif bileşeninde ($-f_s$) 38.8° 'lik bir faz açısı değişikliği tespit edilmiştir. Bu sonuç, laminasyonlar arası kısa devre arızasının tespiti için uzay vektör kaçak akı faz açıları-frekans spektrumunun önemli bir göstere olabileceğini göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların erken tespiti, elektrik şebekesinin güvenilirliği ve iletim-dağıtım sistemlerinin kararlı çalışması açısından büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, bu arızaların aynı frekanslarda harmoniklere sahip olabileceği göz önünde bulundurulduğundan, bu arızaların birbirinden ayrıştırılması sistem güvenilirliğine ve performansına olumlu katkılar sağlayabilmektedir.

Bu tez çalışması, transformatörlerde meydana gelen elektriksel arızaların tespitine yönelik yeni yöntemler geliştirmek ve bu arızaların etkilerini ayrıntılı şekilde analiz etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, sarım-sarım kısa devre arızası, kaynak gerilimi dengesizliği ve laminasyon arızaları gibi çeşitli elektriksel arıza senaryoları ele alınmış ve bu arızaların transformatörün çalışma performansı üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Tez çalışmasında ilk olarak gerçek bir transformatörün elektriksel ve geometrik büyüklükleri dikkate alınarak ANSYS® Maxwell programında modellenmiştir ve bu model üzerinden belirtilen farklı arıza senaryoları simüle edilmiştir. Analizler sonucunda, özellikle akım ve kaçak akı gibi elektriksel parametreler zaman ve frekans eksenlerinde detaylı olarak incelenmiştir. Daha hassas arıza tespiti sağlamak amacıyla, simetrik bileşenler yöntemi tabanlı uzay vektör analizi ve faz açısı spektrumları analizi yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Sarım-sarım kısa devre arızası için %1, %2 ve %10 kısa devre oranına sahip arıza şiddetlerinde analizler gerçekleştirilmiştir ve bu arıza şiddetlerinin etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir. %10 kısa devre arıza şiddetinde akım ve kaçak akı zaman ekseninde belirgin değişimler gözlenirken, %1 kısa devre arıza şiddetinde bu değişimlerin tespitinin oldukça zor olduğu gözlemlenmiştir. FFT işlemi sonucunda elde edilen frekans ekseninde analizlerinde, kaçak akının akım verilerine kıyasla daha iyi sonuçlar sunduğu tespit edilmiştir. Ancak, kaçak akı verilerinin net ve hassas bir arıza tespiti için yetersiz olduğu belirlenmiştir. Bu aşamada, uzay vektör bileşenleri ve faz açısı spektrumlarının analizleriyle %1 gibi düşük şiddete sahip bir kısa devre arızası tespitinin erken aşamada gerçekleştirilebildiği sonucuna varılmıştır. Kaçak akı

uzay vektör bileşeni faz açısı spektrumu incelenmesi sonucunda $-f_s$ sinyalinde sağlıklı ve arızalı durum arasında 44.3° 'lik belirgin bir açı kayması saptanmıştır. Bu sonuç, düşük şiddetli kısa devre arıza tespitinin hassas bir şekilde belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Kaynak gerilimi dengesizliği durumunda ise %5 dengesizlik oranı için yapılan analizlerde, frekans spektrumunda 3. harmonik bileşende $3f_s$ ve uzay vektör bileşenlerinin $-f_s$ sinyalinde gerilim dengesizliğinin etkileri gözlenmiştir. Ancak faz açısı spektrumu analizlerinde ne akım ne de kaçak akı faz açılarında herhangi bir sapma tespit edilmemiştir. Bu bulgu, kaynak gerilimi dengesizliği ile sarım-sarım kısa devre arızasının ayırt edilmesinde faz açısı spektrumlarının incelenmesinin önemini vurgulamaktadır.

Laminasyon arızalarında ise hem kenar çapak hem de laminasyonlar arası kısa devre arızasında kaçak akı frekans spektrumlarında belirgin arıza harmonikleri gözlemlenmiştir. Kenar çapak arızasında, kaçak akı-frekans spektrumunda $3f_s$, $5f_s$ ve $7f_s$ arıza harmonikleri gözlemlenmiştir. Laminasyonlar arası kısa devre arızasında ise akım ve kaçak akı-frekans spektrumlarında belirgin bir arıza sinyali gözlenmezken, uzay vektör kaçak akı-frekans spektrumunda $-f_s$ harmoniğinde arızanın etkisi net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Ayrıca uzay vektör kaçak akı-faz açısı spektrumu analizi sonucunda kenar çapak ve laminasyonlar arası kısa devre arızası durumları için sırasıyla 12.1° ve 38.8° faz açılarında kayma gözlemlenmiştir. Bu bulgular, laminasyon arızalarının kaçak akı uzay vektör bileşenlerinin genlik ve faz açısı üzerindeki etkilerinin hassas bir tespit için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Elde edilen tüm sonuçlar, kaçak akı tabanlı simetrik bileşenler metodunun ve faz açısı spektrumlarının transformatörün elektriksel arızalarının tespitinde yüksek bir hassasiyete sahip olduğunu göstermektedir. Özellikle düşük şiddetli arızaların erken aşamada tespitinde uzay vektör faz açısı spektrumunun $-f_s$ harmoniği üzerindeki değişikliklerin analiz edilmesi önemli bir gösterge olarak ortaya çıkmaktadır.

Gelecek alışmalar kapsamında, kaçak akı tabanlı analizlerin farklı transformatör türleri ve kapasite seviyelerinde uygulanabilirliği değerlendirilebilir. Özellikle şebeke koşullarındaki gerilim dalgalanmaları ve yük dengesizliklerinin kaçak akı üzerindeki etkilerinin modellenmesi, endüstriyel uygulamalar için önemli bilgiler sağlayabilir. Ayrıca, yapay zeka ve makine öğrenimi tabanlı algoritmaların bu analizlere entegre edilmesiyle arıza tespitinde otomasyonun artırılması, tespit hassasiyetini daha da geliştirebilir. Bunların yanı sıra faz açısı ve uzay vektör analizlerinin şebeke genelinde uygulanabilirliğinin incelenmesi ve bu yöntemlerin standartlaştırılmasına yönelik araştırmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Abbasi, A. R., Fault detection and diagnosis in power transformers: A comprehensive review and classification of publications and methods, *Electric Power Systems Research*, 209, 107990, 2022.
- [2] Bhide, R. S., Srinivas, M. S. S., Banerjee, A., Somakumar, R., Analysis of winding inter-turn fault in transformer: A review and transformer models, *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, 1-7, Kandy, Sri Lanka, 6-9 December 2010.
- [3] González, G. D., Fernández, J. G. A., Arboleya, P. A., Diagnosis of a turn-to-turn short circuit in power transformers by means of zero sequence current analysis, *Electric Power Systems Research*, 69(2–3), 321-329, 2004.
- [4] Sokolov, V. V., Failure statistics, Transformer and bushing design review, Typical failure modes and failure causes, What can be learned from post mortem inspection, *Fifth AVO New Zealand International Technical Conference*, Methven, New Zealand, 2006.
- [5] IEEE, Std C37.91- Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers, vol. 2000, 2000.
- [6] CIGRE, *An International Survey of Failures in Large Power Transformers in Service*, 1983.
- [7] Wang, H., Butler, K. L., Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16(3), 422-428, 2001.
- [8] Goktas, T., Yük salınımı durumunda asenkron motorda rotor çubuk arızasının gerçek zamanlı tespiti, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Malatya, 120, 2015.
- [9] Mirzaei, H., Akbari, A., Gockenbach, E., Miralikhani, K., Advancing new techniques for UHF PD detection and localization in the power transformers in the factory tests, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 448-455, 2015.
- [10] Odongo, G., Musabe, R., Hanyurwimfura, D., A multinomial dga classifier for incipient fault detection in oil-impregnated power transformers, *Algorithms*, 14(4), 128, 2021.

- [11] Wani, S. A., Rana, A. S., Sohail, S., Rahman, O., Parveen, S., Khan, S. A., Advances in DGA based condition monitoring of transformers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111347, 2021.
- [12] Zhou, L., Jiang, J., Zhou, X., Wu, Z., Lin, T., Wang, D., Detection of transformer winding faults using FRA and image features, *IET Electric Power Applications*, 14(6), 972-980, 2020.
- [13] Hashemnia, N., Abu-Siada, A., Islam, S., Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnostics-part 1: Axial displacement simulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 22(1), 556-563, 2015.
- [14] Eissa, M. M., A novel digital directional transformer protection technique based on wavelet packet, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3), 1830-1836, 2005.
- [15] Kasztenny, B., Kezunovic, M., Digital relays improve protection of large transformers, *IEEE Computer Applications in Power*, 11(4), 39-45, 1998.
- [16] Tripathy, M., Maheshwari, R. P., Verma, H. K., Neuro-fuzzy technique for power transformer protection, *Electric Power Components and Systems*, 36(3), 299-316. 2008.
- [17] Balaga, H., Gupta, N., Vishwakarma, D. N., GA trained parallel hidden layered ANN based differential protection of three phase power transformer, *IET Electric Power Applications*, 6(5), 268-276, 2012.
- [18] Bigdeli, M., Vakilian, M., Rahimpour, E., Transformer winding faults classification based on transfer function analysis by support vector machine, *IET Electric Power Application*, 6(5), 268-276, 2012.
- [19] Raichura, M., Chothani, N., Patel, D., Review of methodologies used for detection of magnetising inrush and fault conditions in power transformer, *IET Energy Systems Integration*, 3(2), 109-129, 2021.
- [20] Shin, M. C., Park, C. W., Kim, J. H., Fuzzy logic-based relaying for large power transformer protection, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(3), 718-724, 2003.
- [21] Segatto, Ê. C., Coury, D. V., A differential relay for power transformers using intelligent tools, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(3), 1154-1162, 2006.

- [22] Shah, A. M., Bhalja, B. R., Discrimination between internal faults and other disturbances in transformer using the support vector machine-based protection scheme, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(3), 1508-1515, 2013.
- [23] Shah, A. M., Bhalja, B. R., Fault discrimination scheme for power transformer using random forest technique, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(6), 1431-1439, 2016.
- [24] Ngaopitakkul, A., Kunakorn, A., Internal fault classification in transformer windings using combination of discrete wavelet transforms and back-propagation neural networks, *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 4(3), 365-371, 2006.
- [25] Bhasker, S. K., Bera, P. K., Kumar, V., Tripathy, M., Differential protection of indirect symmetrical phase shift transformer and internal faults classification using wavelet and ANN, *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 1-6, New Delhi, India, 2015.
- [26] Bhasker, S. K., Bera, P. K., Kumar, V., Tripathy, M., Differential protection of indirect symmetrical phase shift transformer using wavelet transform, *Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 6-11, New Delhi, India, 2015.
- [27] Bera, P. K., Kumar, R., Isik, C., Identification of internal faults in indirect symmetrical phase shift transformers using ensemble learning, *IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT)*, 1-6, Louisville, KY, USA, 2018.
- [28] Bera, P. K., Isik, C., Kumar, V., Discrimination of Internal Faults and Other Transients in an Interconnected System With Power Transformers and Phase Angle Regulators, *IEEE Systems Journal*, 15(3), 3450-3461, 2021.
- [29] Bera, P. K., Isik, C., A Data Mining Based Protection and Classification of Transients for Two-Core Symmetric Phase Angle Regulators, *IEEE Access*, 9, 72937-72948, 2021.
- [30] Altayef, E., Anayi, F., Packianather, M., Benmahamed, Y., Kherif, O., Detection and Classification of Lamination Faults in a 15 kVA Three-Phase Transformer Core Using SVM, KNN and DT Algorithms, *IEEE Access*, 10, 50925-50932, 2022.

- [31] Leal H., G. G., Meira, M., Bossio, G. R., Ruschetti, C. R., Verucchi, C. J., Inter-Turn Short-Circuit Detection Through Differential Admittance Monitoring in Transformers, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73, 1-8, 2024.
- [32] Solak, K., Mieske, F., Schneider, S., Negative-sequence current integral method for detection of turn-to-turn faults between two parallel conductors in power transformers, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 141, 108-124, 2022.
- [33] Cabanas, M. F., et al., A New Online Method Based on Leakage Flux Analysis for the Early Detection and Location of Insulating Failures in Power Transformers: Application to Remote Condition Monitoring, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1591-1602, 2007.
- [34] Haghjoo, F., Mostafaei, M., Flux-based method to diagnose and identify the location of turn-to-turn faults in transformers, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(4), 1083-1091, 2016.
- [35] Haghjoo, F., Mostafaei, M., Mohammadi, H., A New Leakage Flux-Based Technique for Turn-to-Turn Fault Protection and Faulty Region Identification in Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(2), 671-679, 2018.
- [36] Venikar, P. A., Ballal, M. S., Umre, B. S., Suryawanshi, H. M., Search Coil Based Online Diagnostics of Transformer Internal Faults, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(6), 2520-2529, 2017.
- [37] Venikar, P. A., Ballal, M. S., Umre, B. S., Suryawanshi, H. M., Sensitive incipient inter-turn fault detection algorithm for power transformers, *IET Electric Power Application*, 10(9), 858-868, 2016.
- [38] Xian, R., Wang, L., Zhang, B., Li, J., Identification Method of Interturn Short Circuit Fault for Distribution Transformer Based on Power Loss Variation, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 20(2), 2444-2454, 2024.
- [39] Hajiaghahi, S., Hosseini Ahmadi, M. M., Goleij, P., Salemnia, A., Transformer inter-turn failure detection based on leakage flux and vibration analysis, *IET Electric Power Applications*, 15(8), 998-1012, 2021.

- [40] Asadi, N., Kelk, H. M., Modeling, Analysis, and Detection of Internal Winding Faults in Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(6), 2419-2426, 2015.
- [41] Oliveira, L. M. R., Cardoso, A. J. M., Comparing Power Transformer Turn-to-Turn Faults Protection Methods: Negative Sequence Component Versus Space-Vector Algorithms, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2817-2825, 2016.
- [42] Arehpanahi, M., Orouji, A., Meshgin Kelk, H., An improved online minor turn-turn winding fault diagnosis in a single-phase transformer based on instantaneous induced voltages and primary current locus, *Measurement*, 226, 114153, 2024.
- [43] Athikessavan, S. C., Jeyasankar, E., Manohar, S. S., Panda, S. K., Inter-Turn Fault Detection of Dry-Type Transformers Using Core-Leakage Fluxes, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(4), 1230-1241, 2019.
- [44] Kakolaki, S. E. H., Hakimian, V., Sadeh, J., Rakhshani, E., Comprehensive Study on Transformer Fault Detection via Frequency Response Analysis, *IEEE Access*, 11, 81852-81881, 2023.
- [45] Ehsanifar, A., Allahbakhshi, M., Tajdinian, M., Dehghani, M., Montazeri, Z., Malik, O. P., Guerrero, J. M., Transformer inter-turn winding fault detection based on no-load active power loss and reactive power, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 130, 107034, 2021.
- [46] Haghjoo, F., Mohammadi, H., Planar Sensors for Online Detection and Region Identification of Turn-to-Turn Faults in Transformers, *IEEE Sensors Journal*, 17(17), 5450-5459, 2017.
- [47] Cabanas, M. F., González, F. P., Melero, M. G., García, C. H. R., Orcajo, G. A., Rodríguez, J. M. C., Norniella, J. G., Insulation fault diagnosis in high voltage power transformers by means of leakage flux analysis, *Progress in Electromagnetics Research*, 114, 211-234, 2011.
- [48] Battulga, B., Shaikh, M. F., Osama, M., Lee, S. B., Converter Embedded Testing of Inter-laminar Core Insulation of Step-up Transformers for Wind Energy Applications, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1-9, 2024.
- [49] Moses, A. J., Aimoniotis, M., Effects of artificial edge burrs on the properties of a model transformer core, *Physica Scripta*, 39(3), 391, 1989.

- [50] Schulz, C. A., Roger, D., Duchesne, S., Vincent, J. N., Experimental characterization of interlamination shorts in transformer cores, *IEEE Transactions on Magnetics*, 46(2), 614-617, 2010.
- [51] Mazurek, R., Marketos, P., Moses, A., Vincent, J. N., Effect of artificial burrs on the total power loss of a three-phase transformer core, *IEEE Transaction Magnetics*, 46(2), 638-641, 2010.
- [52] Hamzehbahmani, H., Moses, A. J., Anayi, F. J., Opportunities and precautions in measurement of power loss in electrical steel laminations using the initial rate of rise of temperature method, *IEEE Transaction Magnetics*, 49(3), 1264-1273, 2013.
- [53] Hamzehbahmani, H., Anderson, P., Hall, J., Fox, D., Eddy current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network - Part I: Fundamental concepts and FEM modeling, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 642-650, 2014.
- [54] Hamzehbahmani, H., Anderson, P., Hall, J., Fox, D., Eddy current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network - Part II: Analytical modeling and experimental results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 29(2), 651-659, 2014.
- [55] Eldieb, A., Anayi, F., Fahmy, A., Investigation of short-circuit fault effects on non-oriented steel at different range of magnetisations, 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 1-6, Stoke on Trent, UK, 1-4 September 2015.
- [56] Hamzehbahmani, H., Inter-laminar fault analysis of magnetic cores with grain-oriented electrical steels under harmonic distortion magnetisations, *IET Science, Measurement and Technology*, 14(1), 26-31, 2020.
- [57] Altayef, E., Anayi, F., Packianather, M. S., Kherif, O., On the Effects of Lamination Artificial Faults in a 15 kVA Three-Phase Transformer Core, *IEEE Access*, 10, 19348-19355, 2022.
- [58] Erişim adresi: <https://electrical-engineering-portal.com/5-transformer-fault-conditions> Erişim tarihi: 03.01.2025.
- [59] Zafarani, M., Bostanci, E., Qi, Y., Goktas, T., and Akin, B., Interturn short-circuit faults in permanent magnet synchronous machines: An extended

- review and comprehensive analysis, *IEEE Journal of Emerging Selected Topics in Power Electronics*, 6(4), 2173–2191, 2018.
- [60] Cintron-Rivera, J. G., Foste, S. N., and Strangas, E. G., Mitigation of turn-to-turn faults in fault-tolerant permanent magnet synchronous motors, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 465–475, 2015.
- [61] Kim, K.-H., Choi, D.-U., Gu, B.-G., and Jung, I.-S., Fault model and performance evaluation of an inverter-fed permanent magnet synchronous motor under winding shorted turn and inverter switch open, *IET Electric Power Applications*, 4(4), 214–225, 2010.
- [62] Chandar, S. A., Panda, S. K., Detection and isolation of interturn faults in inductors of LCL filter for marine electric propulsion system, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 232–248, 2018.
- [63] Behjat, V., Vahedi, A., Numerical modelling of transformers interturn faults and characterising the faulty transformer behaviour under various faults and operating conditions, *IET Electric Power Applications*, 5(5), 415–431, 2011.
- [64] Oliveira, L. M. R., Cardoso, A. J. M., Leakage inductances calculation for power transformers interturn fault studies, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3), 1213–1220, 2015.
- [65] Pillay, P., Manyage, M., Definitions of voltage unbalance, *IEEE Power Engineering Review*, 21(5), 50-51, 2001.
- [66] Eldieb, A., Anayi, F., Evaluation of Loss Generated by Edge Burrs in Electrical Steels, *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(5), 1-4, 2016.
- [67] Fortescue, C. L., Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 37(2), 1027-1140, 1918.
- [68] Richard G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*. United States: Pearson Education Inc., 2004.

ÖZGEÇMİŞ

1. Adı Soyadı : Canan ALADAĞ
2. Doğum Tarihi :
3. Ünvanı : Araştırma Görevlisi
4. Öğrenim Durumu : Yüksek Lisans

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Bitirme Yılı
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Fırat Üniversitesi	2012
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Fırat Üniversitesi	2017

5. Akademik Ünvanlar:

Görevi	Bölümü	Kurumu	Yıl
Araştırma Görevlisi	Enerji Sistemleri Mühendisliği	Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2014-devam

6. İş Tecrübesi:

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Araştırma Görevlisi	Enerji Sistemleri Mühendisliği Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi	2014-devam



T.C.
OSMANİYE KORKUT ATA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI BENZERLİK RAPORU FORMU
(SAVUNMA SONRASI)

FORM DR-34

ÖĞRENCİ BİLGİLERİ	
Adı ve Soyadı	Canan ALADAĞ
Öğrenci Numarası	2011701102
Ana Bilim/ Ana Sanat Dalı	Enerji Sistemleri Mühendisliği
Danışman Unvanı, Adı-Soyadı	Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
Tez Başlığı (Türkçe)	Transformatörlerde Durum İzleme ve Arızaların Erken Tespiti

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Özet ve Abstract c) Giriş, d) Ana bölümler, e) Sonuç ve f) Kaynakça kısımlarından oluşan toplam ...126... sayfalık kısmına ilişkin, 12.03.2025 tarihinde Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %3...'tür.

Filtreleme Tip 1 (maksimum %30) ☐

1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,

2- Kaynakça hariç,

3- Alıntılar dâhil.

Filtreleme Tip 2 (maksimum %10) ☒

1- Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç,

2- Kaynakça hariç,

3- Alıntılar hariç,

4- 5 Kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç.

Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Çalışması Benzerlik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Danışman Onayı
UYGUNDUR

Prof. Dr. Mehmet Salih MAMİŞ
(İmzası)

Enstitü Onayı
UYGUNDUR

12.03.2025

AÇIKLAMALAR

1. Lisansüstü tezler, savunma öncesinde benzerlik raporu ile birlikte Enstitüye teslim edilir.

2. Benzerlik raporu ile ilgili olarak etik kurallar dâhilindeki benzerlik oranları ilgili Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenir. (Enstitü Yönetim Kurulu tarafından tezin, intihal kapsamı dışında değerlendirilmesi için TURNITIN'den alınan raporda "benzerlik oranı"nın, "alıntılar hariç" en fazla %10, "alıntılar dahil" % 30'u geçmemesi şeklinde kabul edilmiştir).