

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI



34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELİF DEMİRAL

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU

BOLU, ARALIK - 2023

KABUL VE ONAY SAYFASI

Elif DEMİRAL tarafından hazırlanan “**34,5 kV Zig-Zag Topraklama Transformatörünün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi**” adlı tez çalışması jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans Tezi olarak oy birliğiyle kabul edilmiştir. 29/12/2023

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Üye
Prof. Dr. Erdal IRMAK
Gazi Üniversitesi

.....

Üye
Doç. Dr. Nihat DALDAL
Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. İbrahim KÜRTÜL
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir,

Aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

.....
ELİF DEMİRAL

ÖZET

**34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN
TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELİF DEMİRAL
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

(TEZ DANIŞMANI: PROF.DR. ERDAL BEKİROĞLU)

**BOLU, ARALIK - 2023
XII + 48**

Bu tez çalışmasında, topraklanmamış sistemlerde nötr noktası oluşturmak amaçlı kullanılacak bir 34,5 kV zig-zag topraklama transformatörü modellenmesi açıklanmıştır. Doğrusal olmayan manyetik karakteristikli çekirdeğe sahip zig-zag transformatörün sonlu elemanlar modelleri (SEM), Ansys Maxwell yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Topraklama transformatörü tasarımı için önemli kriterler olan demir kaybı ve kaçak reaktans ele alınmıştır. Ansys programının sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak zig-zag transformatörün 2B ve 3B modellerine ait manyetik akı yoğunluğu ve demir kayıpları incelenip karşılaştırılmıştır. Kaçak reaktans için tek fazlı üç boyutlu ve üç fazlı üç boyutlu olacak şekilde sonlu elemanlar analizine (SEA) dayanan sayısal bir yöntem sunulmuştur. Bu modellerin çözümünde manyetik vektör potansiyel formülasyonu kullanılmıştır. Prototip topraklama transformatörü, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla üretilmiştir. Bu yöntemlerin doğruluğunun deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, zig-zag transformatörün üç faz 3B modelinin tek faz 3B modele göre daha doğru kaçak reaktans değeri elde ettiğini ve 3B modelinin 2B modele göre demir kayıplarda daha iyi doğruluk sağladığını göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Topraklama Transformatörü, Zig-zag Transformatör, Kaçak Reaktans, Sonlu Elemanlar Modeli

ABSTRACT

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF 34,5 KV ZIG-ZAG GROUNDING TRANSFORMER

MSC THESIS

ELİF DEMİRAL

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: PROF. DR. ERDAL BEKİROĞLU)**

BOLU, DECEMBER 2023

XII + 48

In this thesis, modeling of a 34.5 kV zig-zag grounding transformer to be used to create a neutral point in ungrounded systems was explained. Finite element models (FEM) of the zig-zag transformer with a core with nonlinear magnetic characteristics were created using Ansys Maxwell software. Iron loss and leakage reactance, which are important criteria for grounding transformer design, are discussed. Using the finite element method of the Ansys program, the magnetic flux density and iron losses of the 2D and 3D models of the zig-zag transformer were examined and compared. A numerical method based on finite element analysis (FEA) for single-phase three-dimensional and three-phase three-dimensional is presented for leakage reactance. Magnetic vector potential formulation was used to solve these models. The prototype grounding transformer was produced with the help of the finite element method. The accuracy of these methods was compared with experimental results. Experimental results show that the three-phase 3D model of the zig-zag transformer obtains more accurate leakage reactance value than the single-phase 3D model, and the 3D model provides better accuracy in iron losses than the 2D model.

KEYWORDS: Grounding Transformer, Zig-zag Transformer, Leakage Reactance, Finite Element Modeling

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL VE ONAY SAYFASI	iii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ	ix
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	x
TEŞEKKÜR	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜ	6
2.2 Topraklama Transformatörü Faydaları	8
2.3 Topraklama Transformatörü Parametreleri	8
2.4 Topraklama Transformatörü Çeşitleri	9
2.5 Zig-zag Transformatör.....	11
2.5.1 Çalışma Prensibi	13
2.5.2 Eş Değer Devresi	15
2.5.3 Kaçak Reaktans Hesabı	18
3. 34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN	
TASARIMI	24
3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi	24
3.2 Ansys Maxwell Paket Programı	25
3.3 Analiz Edilen 34,5 kV Zig-zag Transformatörün Parametreleri	26
3.4 2B ve 3B Açık Devre Analiz Testi	32
4. 34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN	
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	37
4.1 Test Sonuçları Ve Karşılaştırma	41
4.1.1 Boşta Kayıp Ölçülmesi	42
4.1.2 Sıfır Bileşen Empedansı Ölçülmesi	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
6. KAYNAKLAR.....	46

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Topraklama Transformatörünün Yıldız-Üçgen Bağlantısı.....	10
Şekil 2.2. Topraklama Transformatörünün Zig-zag Bağlantısı	10
Şekil 2.3. Zig-zag Transformatör Yapısı	12
Şekil 2.4. Zig-zag Transformatörün Fazör Diyagramı.....	13
Şekil 2.5. Zig-zag Transformatörün Çalışma Prensibi	14
Şekil 2.6. Zig-zag Transformatör Devre Bağlantısı.....	15
Şekil 2.7. Zig-zag Transformatörün Sistem Konfigürasyonunu.....	16
Şekil 2.8. Sıfır Dizi Eşdeğer Devresi	16
Şekil 2.9. Zig-zag-Yıldız Transformatörün Geometrik Şekli	21
Şekil 3.1. Analiz Akış Diyagramının.....	26
Şekil 3.2. Tek Faz 3B Transformatör Modeli	28
Şekil 3.3. Üç faz 3B Transformatör Modeli	29
Şekil 3.4. M4 Tipi Laminasyon Malzemesinin Mıknatıslanma (B-H) Eğrisi ..	29
Şekil 3.5. M4 Tipi Laminasyon Malzemesinin 50 Hz Frekans Değerindeki Özgül Nüve Kaybı (B-P) Eğrisi	30
Şekil 3.6. Tek Faz Transformatörün Çekirdeğine Ve Sargılarına Uygulanan Mesh İşlemi.....	31
Şekil 3.7. Üç Faz Transformatörün Çekirdeğine Ve Sargılarına Uygulanan Mesh İşlemi.....	31
Şekil 3.8. 2B AG Uygulanan Gerilim.....	33
Şekil 3.9. 3B AG Uygulanan Gerilim.....	33
Şekil 3.10. 2D 3 Fazlı Zig-zag Transformatörün Demir kaybı.....	34
Şekil 3.11. 3D 3 Fazlı Zig-zag Transformatörün Demir Kaybı.....	34
Şekil 3.12. 2B Transformatör Çekirdeğindeki Manyetik Akı Yoğunluğu.....	35
Şekil 3.13. 3B Transformatör Çekirdeğindeki Manyetik Akı Yoğunluğu.....	35
Şekil 4.1. Zig-zag Transformatör Tasarımının Akış Diyagramı.....	37
Şekil 4.2. Nüve Ölçüleri.....	38
Şekil 4.3. Transformatörün Zig-zag Sargıları	39
Şekil 4.4. Zig-zag Sargıları Bağlantı Uçları.....	40
Şekil 4.5. Zig-zag Topraklam Transformatörün Nihai Görünümü	41

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Zig-zag Transformatörün Parametreleri.....	27
Tablo 3.2. Manyetostatik Analiz Sonuçları.....	32
Tablo 3.3. Elektromanyetik Geçici Analiz Sonuçları.....	34
Tablo 4.1. Boşta Kayıp Analiz ve Test Sonuçları	42
Tablo 4.2. Kaçak Reaktans Analiz ve Test Sonuçları	44



KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

P₀	: Boşta Kayıp
μ	: Manyetik Geçirgenlik
μ_0	: Amper-sarım yoğunluğu
2B	: İki Boyut
3B	: Üç Boyut
A	: Manyetik Vektör Potansiyeli
AG	: Alçak Gerilim
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
B_{AG}	: Alçak Gerilim Sargısının Radyal Kalınlığı
B_{YG}	: Yüksek Gerilim Sargısının Radyal Kalınlığı
B_{YG-AG}	: Yüksek-Alçak Gerilim Sargıları Arası Boşluğun Radyal Kalınlığı
D_{AG}	: Alçak Gerilim Sargısının Ortalama Çapı
DE	: Differansiyel Evrim
DER	: Dağıtılmış Enerji Kaynakları
D_{YG}	: Yüksek Gerilim Sargısının Ortalama Çapı
D_{YG-AG}	: Yüksek-Alçak Gerilim Sargıları Arası Boşluğun Ortalama Çapı
ECG	: Gana Elektrik Şirketi
f	: Frekans
GA	: Genetik Algoritma
H	: Manyetik Alan Kuvveti
Heq	: Sargının Eşdeğer Yüksekliği
I	: Sürekli Primer Akımı
I_k	: Kısa Devre Arıza Akımı
I_N	: Nötr Akımı
i_{s0}	: Sıfır Dizili Akım Kaynağı
J	: İletkendeki Akım Yoğunluğu
K_R	: Rogowski Faktörü
kV	: Kilo Volt
kVA	: Kilo Volt Amper Görünür Güç
N	: Sarım Sayısı
NA	: Kuzey Amerika
PV	: Fotovoltaik Sistemler

SEM	: Sonlu Elemanlar Modeli
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
S_n	: Anma Gücü
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
U	: Primer Gerilimi
v	: Manyetik Rezistivite
V_{FF}	: Faz-Faz Gerilimi
V_{FN}	: Faz-Nötr Gerilimi
V_{S0}	: Sıfır Dizi Gerilim Kaynağı
Y	: Yıldız Sargı Bağlantı
Z₀	: Sıfır Bileşen Empedansı
ZSBR	: Sıfır Dizili Bloklama Reaktörü
Z_{SN}	: Şebeke-Zig-zag Transformatör Arasındaki Empedansı
Z_{LN}	: Yük-Zig-zag Transformatör Arasındaki Nötr İletkenin Empedansı
Z_{ZN}	: Zig-zag Transformatör Sıfır Dizi Empedansı

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecim boyunca mesleki bilgi, birikim ve tecrübelerinden faydalandığım, çalışmalarımın her safhasında yardım ve önerilerini benden esirgemeyen değerli danışmanım Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her evresinde beni destekleyen, yoğun çalıştığım zamanlarda sabırla bana yardımcı olan sevgili eşim Muhammed Cemil DEMİRAL'a çok teşekkür ederim.

Ayrıca tez çalışmamda üretim ve deney imkanları sunan ASTOR Enerji'ye ve değerli yorum ve katkılarını esirgemeyen Kamran Dawood'a katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Endüstriyel güç sistemlerinde bir toprak arızası meydana geldiğinde, sistem için son derece tehlikeli olduğu bilinmektedir. Faz toprak kısa devresinde akacak olan arıza akımının şiddeti yıldız noktasının durumuna bağlı olduğu için yıldız noktasının topraklanma yöntemi çok büyük önem taşımaktadır. Topraklamasız sistemlerde ise arızanın bir an önce giderilmesi gerekmektedir fakat arıza akımının akacağı bir nötr noktası yoktur. Nötr bağlantı noktası sağlamak için kullanılan ekipmanlardan topraklama transformatörü en önemlisidir.

Topraklama trafosunun görevi üç fazlı güç sistemlerinin topraklanması ve toprak arıza sırasında toprak akımının geçmesini sağlamaktır. Ayrıca güç sistemindeki toprak arızalarından oluşan geçici gerilim artışlarının sistemdeki cihazlara zarar vermeden fazdan toprağa arızanın izolasyonunu sağlayıp gerekirse arıza tespitinin yapılmasını sağlar. Topraklama transformatörü genellikle sekonder sargılı veya sargısız bir zig-zag transformatördür.

Zig-zag transformatör, elektrik güç sisteminin önemli bir parçasıdır. Zig-zag transformatörün optimum tasarımı, transformatör tasarımcıları için toprak arızaları için gerekli dönüş yolunu sağlamak ve güç sisteminin düzgün çalışmasını sağlamak açısından önemlidir. Zig-zag transformatörlerin en önemli iki parametresi yüksüz kayıplar ve kaçak empedanstır. Her iki faktörün doğru hesaplanması, transformatörün genel maliyetini en aza indirmeye yardımcı olur. Bu nedenle, analitik veya sayısal yöntemler kullanılarak zig-zag transformatördeki kaçak reaktansın tahmini, transformatörün erken tasarım aşamalarının önemli bir parçasıdır.

Literatürde topraklama transformatörü tasarımı, çeşitli yöntemler ile modellenmesi ve analizinin yer aldığı çalışmalar vardır. Bir çalışmada herhangi bir transformatör kapasitesi (100KVA-1000KVA) için 5 bacaklı çekirdek tipine sahip bir zig-zag topraklama transformatörü sonlu elemanlar modeli (SEM), ANSYS yazılımı elektromanyetik paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Zig-zag topraklama transformatörünün bu SEM modeli kullanılarak hesaplama sonuçlarının deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde uyduğu görülmüştür (1). Başka bir çalışmada normal durumda ve sıfır bileşen empedans ölçümü sırasında zig-zag transformatöre etki

eden elektromanyetik kuvvetlerin hesaplanması için iki boyutlu sonlu elemanlar hesaplama tekniği kullanılmıştır. Her iki koşulun sonuçları da analitik yöntemle karşılaştırılmıştır (2). K. Dawood ve ark. sonlu elemanlar hesabı ile topraklama trafosunun kaçak reaktans ve boşa kaybının hesaplanabilirliğini göstermektedir (3). Salkoski ve ark. genetik algoritmanın (GA) geliştirilmiş bir versiyonu olan vektör popülasyonuna dayalı bir stokastik optimizasyon yöntemi olan diferansiyel evrim (DE), enterkonnekte yıldız topraklama transformatörünün üretim ve işletme maliyetlerinin en aza indirilmesine ve oldukça rekabetçi olan sonuçlar sunmaktadırlar (4). Peter ve ark. sargı bağlantıları, sargılardaki gerilim dağılımı, zig-zag bağlantıların uygulanmasını ve zig-zag transformatörlerin testlerini ayrıntılı olarak ele almışlardır (5).

Literatürde çeşitli toprak arıza senaryoları simülasyonlarında çeşitli programlar ile modellenen topraklama transformatörlerinin analizinin yapıldığı çalışmalar çoğunlukla yer almaktadır. Bir çalışmada zig-zag topraklama transformatörü PSCAD/EMTDC simülatöründe modellenmektedir. 27,6 KV topraksız üç fazlı iletim sistemi inşa edildikten sonra topraklama trafosunun bağlanmasıyla farklı senaryolar simüle edilip ve farklı koşullar altında doğrulanmıştır (6). Başka bir çalışmada ise MATLAB simülatöründe zig-zag topraklama transformatörü modellenmiştir. Gerçekleştirilen arıza simülasyon sonuçları ile topraklama transformatörünün teorik temeli sağlayan analizin doğruluğunu ve geçerliliğini kanıtlamaktadır (7). M. Ropp ve ark. dağıtımına bağlı invertör tabanlı dağıtılmış enerji kaynakları (DER) tesislerinde aşırı gerilimi azaltma stratejisi olarak topraklama transformatörlerinin kullanılması hakkında bir çalışma yapmışlardır (8). Corzo ve ark. zig-zag konfigürasyonunda bağlanan üç fazlı bir transformatörün elektrik modeli, dengeli ve dengesiz yük ile çalışma senaryoları simüle edilerek analiz etmişlerdir (9). Jou ve ark. tarafından zig-zag transformatörünün ideal ve ideal olmayan güç koşulları altındaki performansını değerlendirmek için bir analiz gerçekleştirilmiştir ve bilgisayar simülasyonu kullanılmıştır (10). Başka bir çalışmada ideal ve ideal olmayan güç koşulları altında zig-zag transformatörünün ve sıfır dizili bloklama reaktörü (ZSBR)'nin performansını değerlendirmek için analiz yapıldığı görülmektedir. Simülasyon ve laboratuvar test sonuçları, ZSBR ve zig-zag transformatörünün filtre olarak kombinasyonunun, nötr akımı zayıflatmanın daha iyi ve etkili bir yolu olduğunu ve

bunun aynı zamanda güç kalitesini artırmak için yenilikçi bir yol sağladığını göstermektedirler (11). Khera ve ark. tarafından üç fazlı, 208 V/120 V dağıtım sisteminin nötr iletkenlerindeki harmonikleri azaltmak için zig-zag transformatörlerin kullanımı sunulmaktadır. Zig-zag transformatörün kurulumundan önce ve sonra çekilen akım ölçümleri sunulmaktadır (12). Başka bir çalışmada topraklama transformatörlerinin fiziksel özellikleri, koruma prensipleri, simetrik bileşenlerle kısa devre hesaplamaları ile birlikte simetrik ve asimetrik yüklü, tek fazdan toprağa arızalı OG güç şebekelerinde detaylı simülasyon vakaları incelenip sonuçlandırılmıştır (13).

Literatürde ayrıca zig-zag transformatör kullanım alanının yüksek harmonik içeren hat akımlarındaki nötr aşırı yüklemeyi ve harmonik akımları azaltmak olduğunu gösteren çalışmalar vardır (14-15-16-17). Kumar ve ark. harmoniklerin ve nötr akımın azaltılması için zig-zag transformatör konfigürasyonunu kullanmışlardır. Önerilen sistem MATLAB/ SIMULINK kullanılarak simüle edilmiştir. Zig-zag transformatörünün performansı, kaynak akımının toplam harmonik distorsiyonu (THD) karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Buna ek olarak dengesiz doğrusal olmayan yük altında zig-zag transformatörün performansını değerlendirmek için laboratuvar testleri yapılmıştır. Simülasyon ve laboratuvar sonuçları, zig-zag transformatörünün nötr ve hattaki harmonikleri azaltabildiğini ve dağıtım sistemindeki nötr akımını zayıflatabildiğini göstermektedir (18).

Kamu kuruluşlarındaki güç sistemlerinde meydana gelen çeşitli problemlere çözüm amaçlı çalışmalar da yapılmıştır. Bir çalışmada Kuzey Amerika (NA) kamu hizmeti kuruluşunun, fotovoltaik sistemler (PV) tesislerinin etkili bir şekilde topraklanmasını talepleri üzerine IEEE 367 ve IEEE 1547.8'in sunduğu prosedürlere göre topraklama transformatörleri ayrıntılı bir 4 telli besleyici modelinden elde edilen simülasyon sonuçlarına göre test edilerek incelenmiştir (19). Detjen ve ark. topraklama transformatörlerinin son teknolojilerini gözden geçirmekte ve daha sonra uygun olmayan şekilde uygulanan topraklama transformatörlerini ve ilgili toprak arızasını gösteren iki kamu sistemi örnek olay incelemesini ve iyileştirici önlemleri tartışmışlardır (20). Eduful ve ark. Gana Elektrik Şirketi (ECG) iki yıllık bir süre içinde belirli bir trafo merkezindeki toplam altı topraklama transformatörünü kaybetmesi üzerine problemin analizini

tartışmışlardır ve topraklama transformatörünün seçimi için karar kriterleri önermişlerdir (21). Dashti ve ark. Türkiye 1.Bölgede orta gerilim kablolarının arızalanması nedeniyle bazı topraklama trafolarının hasar görmesinden dolayı PSCAD yazılımı ile sistem modellemişlerdir. Yıldız-delta transformatörü delta tarafında bir zig-zag transformatörü tarafından topraklanmıştır. Gerçek zamanlı simülasyon aracı olan RTDS'yi RSCAD yazılımı aracılığıyla kullanarak arıza akımlarıyla ilgili olası senaryoların simülasyonu ve analizi yapılarak uygun ve uygulanabilir bir çözüm önerilmiştir (22).

Zig-zag transformatördeki kaçak reaktansının analitik ve sayısal teknikler kullanılarak değerlendirilmesi zamandan tasarruf sağlar, deney ve prototip sayısını azaltır. Bu tezin amacı, zig-zag transformatör tasarımı için önemli kriterler olan nüve kaybı ve kaçak reaktans hesabı için farklı yöntemlerin karşılaştırılması ve bu yöntemlerin doğruluğunun deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasıdır. Bu tez çalışması zig-zag transformatördeki kaçak reaktansın hesaplanması için analitik bir formül ve eksiksiz bir prosedür de sağlamaktadır; bu, araştırmacıların ve transformatör tasarımcısının bu tip transformatörü optimize etmesine yardımcı olacaktır.

Çalışmamın ikinci bölümünde, topraklama transformatörlerinin genel yapılarından yapısal parçalarından çalışma şekillerinden bahsedilmiştir. Ayrıca en yaygın kullanılan topraklama transformatörlerinden biri olan zig-zag transformatörlerin eş değer devresi ve kaçak reaktans hesaplamaları üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde, 34,5 kV sistem için üç bacaklı çekirdek tipinde bir zig-zag transformatörü tasarımı yapılmış ve tasarım aşamaları detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanılarak tasarım aşamalarında nüve kayıplarının tahmini için; iki (2B) boyutlu üç fazlı ile üç boyutlu(3B) üç fazlı sonlu eleman modelleri karşılaştırılmıştır. Kaçak reaktansın hesaplanması ise; üstelik kaçak reaktansın doğru hesaplanması için 3B tek fazlı ile 3B üç fazlı sonlu eleman modelleri karşılaştırılmıştır. Bu modellerin temel amacı, nüve kaybı ve kaçak reaktansın hesaplanmasında farklı modellerin doğruluğunun değerlendirilmesidir. Tasarım ve optimizasyonlar için Ansys Maxwell paket programı kullanılmıştır.

Dördüncü bölümde, Astor Enerji transformatör fabrikasında üretilen prototip nüve kayıpları ve kaçak reaktansın hesaplanmasına yönelik sonlu eleman modellerinin doğruluğunu doğrulamak amacıyla üretilmiş ve test edilmiştir.

Sonuç bölümünde ise bu çalışmada elde edilen analiz sonuçları ile deneysel sonuçların karşılaştırılması üzerinde durulmuştur. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, sonlu eleman hesaplamasının yalnızca doğru kaçak reaktans değerleri (manyetostatik analiz) elde etmekle kalmayıp aynı zamanda yüksüz kayıplarda (geçici analiz) daha iyi doğruluk sağladığını göstermektedir.



2. TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜ

2.1 Genel Bilgi

Topraklanmamış veya izole edilmiş bir güç sisteminde bir toprak arızası meydana geldiğinde bu sistem için son derece tehlikeli olduğu bilinmektedir. Topraklamasız sistemlerde arızanın bir an önce giderilmesi gerekmektedir fakat arıza akımının akacağı bir nötr noktası yoktur. Sistem bu şekilde çalışmaya devam edebilir fakat arızasız fazlarda gerilimi arttırmasından dolayı sistemdeki transformatörün izolasyonunu ve diğer ekipmanlarda bir zorlanmaya sebep olacaktır. Sisteme bağlı ekipmanlar için ek güvenlik sağladığından, birçok uygulamada güç kaynağında uygun topraklama tercih edilir. Sistemin toprak noktası her zaman güç kaynağında olmalıdır.

Üç fazlı sistemlerde nötr elde etmenin en iyi yollarından biri yıldız bağlantıya sahip transformatör kullanmaktır. Nötr nokta yok ise yani üçgen bağlantılı güç sistemlerinin topraklanması gerektiğinde nötr noktası elde etmek için topraklama transformatörü kullanılabilir. Topraklanmamış bir güç sisteminde nötr noktasını bir topraklama transformatörü aracılığıyla elde etmek en iyi yöntemlerden birisidir (6).

Topraklama transformatörleri güç sistemindeki en önemli unsurlardan biridir. Topraklama trafosu topraklanmamış güç sisteminde toprak arıza akımına bir dönüş yolu sağlamada önemli bir rol oynar. Üç fazlı delta bağlı sistem gibi topraklanmamış üç fazlı sistemlerde topraklama amacıyla yapay bir nötr noktası oluşturmak için kullanılan transformatörlerdir. Arıza tespiti ve izolasyona zarar verebilecek aşırı gerilimlerin azaltılması gibi özellikleri sayesinde önem kazanır. Topraklama transformatörleri toprak arızaları veya dengesiz faz-nötr yük koşulları sırasında meydana gelen sıfır bileşen akımı için bir nötr noktası oluştururlar.

Topraklama amacıyla sistem nötrünü elde etmenin en iyi yolu düşük bir sıfır bileşen empedansı sağlamaktır. Transformatörün sıfır bileşen empedansı, güç sistemine göre düşüktür. Böylece yüksek değerdeki toprak arıza akımlarının topraklanmasına düşük empedanslı bir dönüş yolu sağlarlar. Ayrıca topraklama transformatörlerinin normal akımlara karşı empedansı yüksektir. Yani sistemde

toprak arızası veya dengesiz faz-nötr yük olmadığında, transformatör sargılarından yalnızca küçük bir mıknatıslama akımı akar (1-2).

Üç fazlı topraklama transformatörünün güç değeri, normal hattın nötr gerilimine ve transformatörün arıza koşulları altında belirli bir süre boyunca akım taşımak üzere tasarlandığı arıza akımının ürünüdür. Çoğu topraklama transformatörü, toprak akımını yalnızca 10 saniyeden 1 dakikaya kadar sınırlı bir süre boyunca taşıyacak şekilde tasarlanmıştır (23).

Topraklama transformatörleri, güç ve dağıtım transformatörleri gibi düşünülmemelidir. Aralarındaki farklar şu şekilde ifade edilebilir;

Topraklama transformatörü güç ve dağıtım transformatörlerinin aksine kısa sürelidir, çünkü bir topraklama transformatörü yalnızca devre kesiciler arızayı temizleyene ve arızalı devrenin enerjisini kesene kadar kısa devre toprak arıza akımını taşır (24). Topraklama transformatörünün gücü, güç ve dağıtım transformatörlerinkinden tamamen farklıdır. Güç ve dağıtım transformatörleri toplam yükü sürekli olarak taşıyacak şekilde tasarlanmıştır; topraklama transformatörleri ise yük taşımaz ve yalnızca kısa devre arıza durumunda akım sağlarlar. Neredeyse yüksüz çalıştıkları için demir kayıpları düşüktür. Topraklama transformatörlerinde güç akış yönü tek yönlüdür, güç ve dağıtım transformatörü için ise güç her iki yönde de akar. Topraklama transformatörü gücü kısa süreli aşırı yük için tasarlanmıştır, ancak güç ve dağıtım transformatörü güç değerleri sürekli çalışma için tasarlanmıştır. Topraklama transformatörleri, topraklanmamış üç fazlı sistemlerde nötr noktası elde etmek için kullanılırken, güç ve dağıtım transformatörleri, gücü bir devreden diğerine aktarmak ve voltaj seviyelerini değiştirmek için kullanılır. Topraklama trafosunun arıza akımı sisteme bağlıdır, bazen birkaç bin ampere kadar çıkabilir ancak dağıtım transformatörlerinde arıza akımı normal anma akımının 25 katına kadar çıkabilir. Topraklama transformatörlerinde kaçak reaktansları dağıtım transformatörlerine göre nispeten daha azdır. Harmonik artık bileşenler dağıtım transformatöründe bulunur ancak topraklama transformatörlerinde görülmez. Topraklama transformatörlerinde verim daha fazla, maliyeti ise güç transformatörlerine göre daha azdır, bu nedenle çok çeşitli işlemlerde kullanımı çok ekonomiktir.

2.2 Topraklama Transformatörü Faydaları

Topraklama transformatörlerinin genel amacı ve faydaları aşağıda sunulmuştur;

- Faz-toprak arızalarında arıza akımı için kaynak oluşturmak
- Üç fazlı güç sistemlerinin birisinde faz-toprak arızası meydana geldiğinde otomatik kapanmayı önleyerek gücün sürekliliğini korumak
- Toprak ark arızası oluştuğunda oluşan geçici aşırı gerilimlerin büyüklüğünü sınırlandırmak
- Nötr dengeyi sağlamak
- Faz-nötr bağlantılı yüklerin bağlantısına olanak sağlamak
- Sistemdeki arıza tespiti için gerekli hata akımlarını ölçmek için ölçüm noktası oluşturmak
- Toprak arıza akımını direnç ile sınırlandırarak, akımın üzerinden aktığı ekipmanlarda oluşacak hasarı azaltmak

2.3 Topraklama Transformatörü Parametreleri

Topraklama transformatörü tasarımı yapılırken en önemli elektriksel parametreler şunlardır;

- Primer Gerilim (U): Topraklama transformatörünün bağlandığı güç sisteminin fazlar arası gerilim değeridir.
- Kısa Devre Gücü ve Anma Gücü (S_n): Topraklama transformatörleri sadece arıza durumunda kullanılan trafolar olduğu için kısa devre arıza akım değerinde göre gücüne kısa devre gücü, varsa sargılardan akacak sürekli faz akımı değerine göre gücüne anma gücü hesaplanır.
- Sürekli Primer Akımı (I): Bu akım değeri sistemden akacak sürekli mıknatıslanma akımının değeridir ve topraklama transformatörünün termal kapasitesini hesaplamak için kullanılır.
- Arıza Akımı ve Süresi $I_k(s)$: Arıza akımı güç sistemindeki ekipmanların parametreleri baz alınarak ve analiz edilerek belirlenir.

Topraklama transformatörleri arıza akımlarını sistemin izin verdiği sürede taşıyabilecek şekilde tasarlanmalıdırlar. Bu değerler transformatör sargılarındaki sıcaklık artışını hesaplamak ve transformatörü buna göre boyutlandırmak için kullanılmaktadırlar.

Ancak bir arıza akımının doğru tahmin edilmemesi veya dağıtımdan kaynaklanan arızanın izolasyonunun doğru ve kısa sürede yapılabilmesi durumunda topraklama transformatörünün sargılarının zarar görmesi mümkündür.

- Sıfır Bileşen Empedansı (Z_0): Topraklama transformatörleri için sistemdeki arıza akımı üzerinden sıfır bileşen empedansı hesaplanır ve gerekirse sistem şartlarına uygun özel sargılar üretilir. Sıfır bileşen empedansı gerilim ve akım bilinerek belirlenebilir. Gerekli empedansı elde etmek için, sargı boyutları ve sargıların kalınlıkları transformatörün sıfır bileşen empedans değerine göre ayarlanmalıdır.

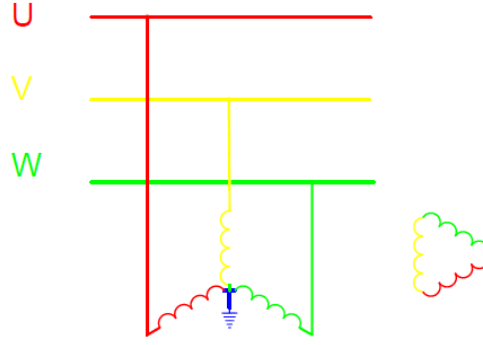
2.4 Topraklama Transformatörü Çeşitleri

Topraklama transformatörleri güç sistemine çeşitli bağlantılarla bağlanabilir. Topraklama transformatörünün birkaç tasarımı vardır, fakat iki tip topraklama transformatörü yaygın olarak kullanılır:

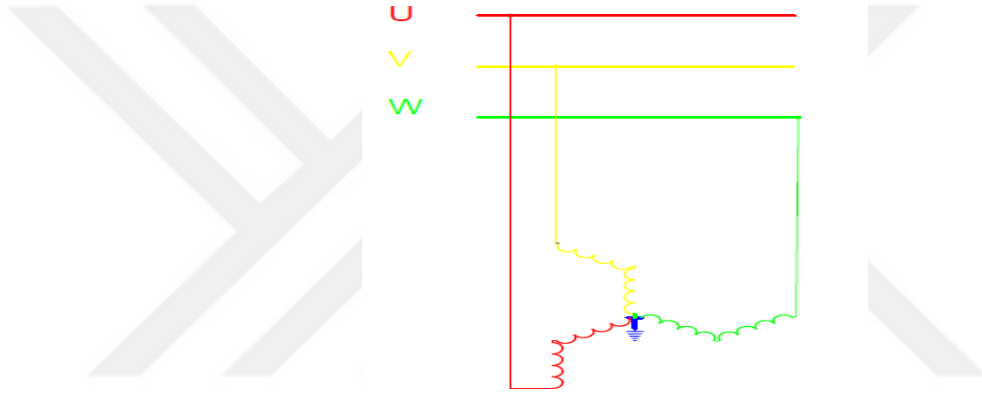
a) Yıldız-üçgen topraklama transformatörü

b) Zig-zag topraklama transformatörü

En genel tasarım, birincil tarafında nötr nokta sağlayan Şekil 2.1'de gösterildiği gibi Y- Δ bağlantısıdır ancak en yaygın kullanılanı Şekil 2.2'de gösterildiği gibi ZN formudur.



Şekil 2.1. Topraklama Transformatörünün Yıldız-Üçgen Bağlantısı



Şekil 2.2. Topraklama Transformatörünün Zig-zag Bağlantısı

Topraklamasız sistemde yapay bir nötr noktasının sağlanması amacıyla uygulanırlar. Topraklama transformatörlerinde yardımcı güç sağlamak için bir yardımcı sargı da kullanılabilir.

Zig-zag bağlantı geometrisinden dolayı üçüncü harmoniklerin salınımını sağlanmak için kullanışlı olduğu bilinmektedir. Zig-zag transformatörler daha ucuz ve boyutlarının daha küçük olması nedeniyle de yıldız-üçgen bağlantıya göre daha yaygındır (1-7). Aynı sıfır dizi empedansında, Zig-zag transformatörler yıldız üçgen transformatörlerden daha küçük bir zemin boyutu sağlar (20).

Topraklamasız güç sistemlerinde yüksek empedanslı bir topraklama sistemi sağlamak için Zig-zag transformatörleri kullanılır. Zig-zag transformatörler ucuz oldukları için genellikle yüksek empedanslı topraklama sistemler olarak kullanılırlar (5). Zig-zag transformatörü, sekonder sargılı veya sekonder sargısız yapılmış üç fazlı bir transformatördür. Bu transformatörler özel uygulamalara uygun özel sargılara sahiptir. Uygulamaları, topraklanmamış 3 fazlı bir sistemden nötr bağlantının türetilmesi içindir.

İkincil sargısı üçgen bağlı üç fazlı güç sisteminde veya topraklamasız bir güç sisteminde kısa devre arıza akımlarına kaynak oluşturacak bir nötr noktası oluşturabilmek için sisteme zig-zag transformatör monte edilir.

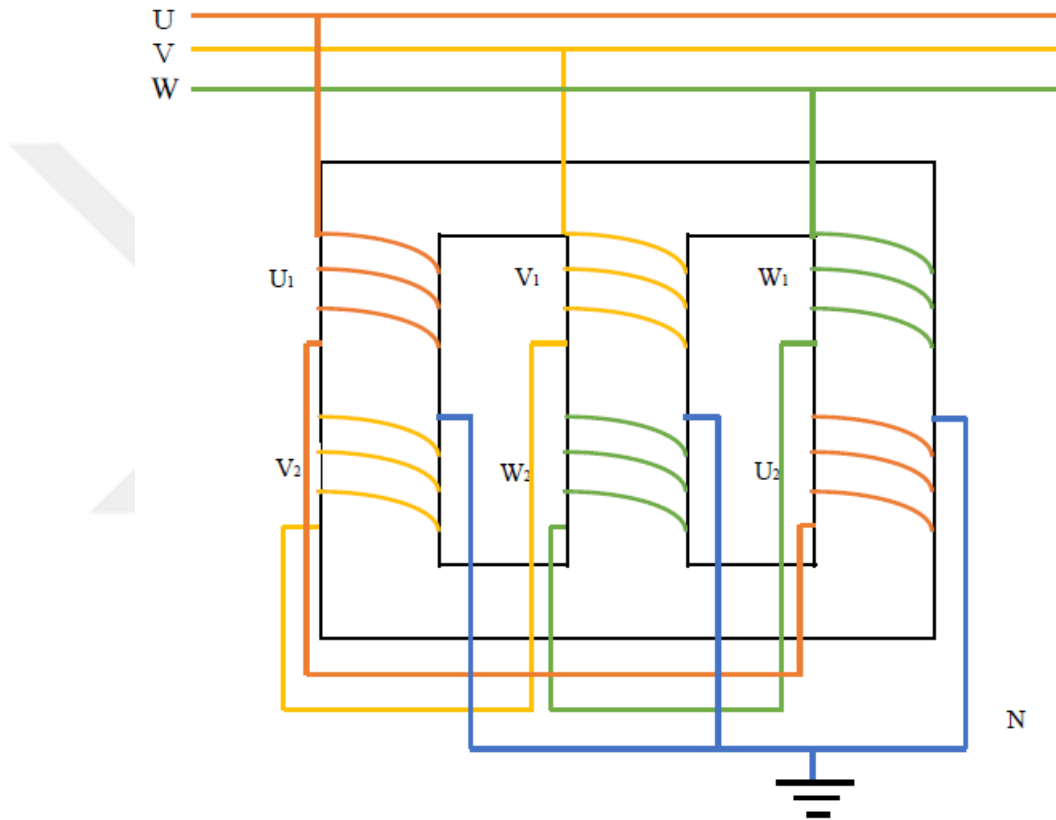
Zig-zag bağlantı aslında birbirine bağlı bir yıldız bağlantısıdır. Topraklama transformatörlerinde üç çift eş merkezli bobin zig-zag düzeninde düzenlenmiştir. Bu tür bir düzenleme kullanılır çünkü bu bağlantının bazı kendine has özellikleri vardır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir;

- Bu düzenleme için nötr kayma ihmal edilebilir düzeydedir, yani sabit nötr nokta bu bağlantı tarafından oluşturulur.
- Bu tür bağlantı sıfır dizi akımları için çok küçük empedans sağlar, dolayısıyla toprak arızası anında bu sargı düşük akım verir.
- Arıza akımını topraklamak için direnç yolu oluşturur.
- Sargı izolasyonları ihmal edilebilir düzeyde elektrik gerilimine maruz kalır.
- Bu tür bir bağlantıda her türlü harmonik kalıntı bulunmaz.
- Topraklama nedeniyle arıza akımı sekonder tarafı etkilemez.

2.5 Zig-zag Transformatör

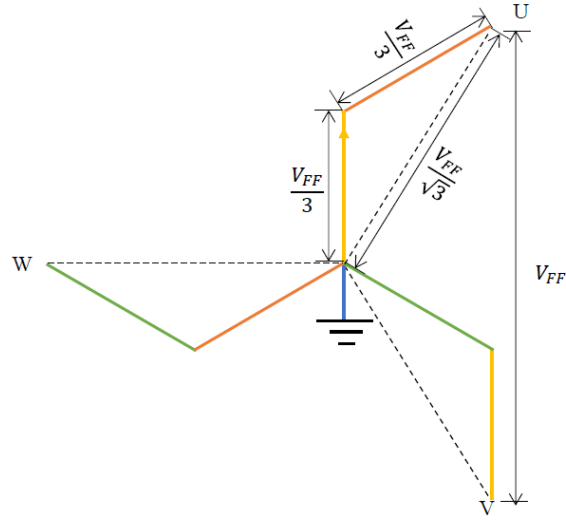
Zig-zag transformatörünün, üçü dış bobin ve üçü iç bobin olan altı bobini vardır. İç bobin sarımlarına zig sarımı dış bobin sarımlarına ise zag sarımı adı verilir. Zig-zag transformatör, üç çekirdek üzerinde altı bobin içerir. Bir fazın zig sargısı, başka bir fazın zag sargısına seri olarak bağlanır, bu nedenle buna birbirine bağlı yıldız sargısı da denilmektedir. Zig-zag transformatörün her fazı iki özdeş sargıya sahiptir ve aynı sayıda sargı dönüşüne sahiptir ancak normal faz akımlarına

yüksek empedans kazandırmak için ya zıt yönlerde sarılırlar ya da ters bağlanarak bunu sağlarlar. Bobinler Şekil 2.3'te gösterildiği gibi U fazının dış bobini V fazının iç bobinine bağlanır. V fazının dış bobini W fazının iç bobinine bağlanır. W fazı U fazının iç bobinine bağlanır. Dış bobinler ise mevcut delta sisteminin U, V, W fazlarına bağlanır. İç bobinler nötr oluşturacak şekilde birbirine bağlanır. Bu nedenle her faz, diğer faz ile birleşir ve gerilimler sıfırlanır. Nötr nokta daha sonra doğrudan veya Nötr Topraklama Direnci (NGR) aracılığıyla toprağa bağlanır.



Şekil 2.3. Zig-zag Transformatör Yapısı

Farklı fazların sargılarının birbirine bağlanması, zig (veya zag) sargı arasında 30° (veya 150°) faz kaymasına neden olur. Şekil 2.4'te zig-zag bağlantının vektör diyagramında gerilim dağılımı göstermektedir.



Şekil 2.4. Zig-zag Transformatörün Fazör Diyagramı

Fazör diyagramda görüleceği üzere sistemin faz-faz gerilimi (V_{FF}) ve faz-nötr gerilimi (V_{FN}) dir.

$$V_{FN} = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \quad (2.1)$$

$$V_{zig} = \frac{V_{FF}}{3} \quad (2.2)$$

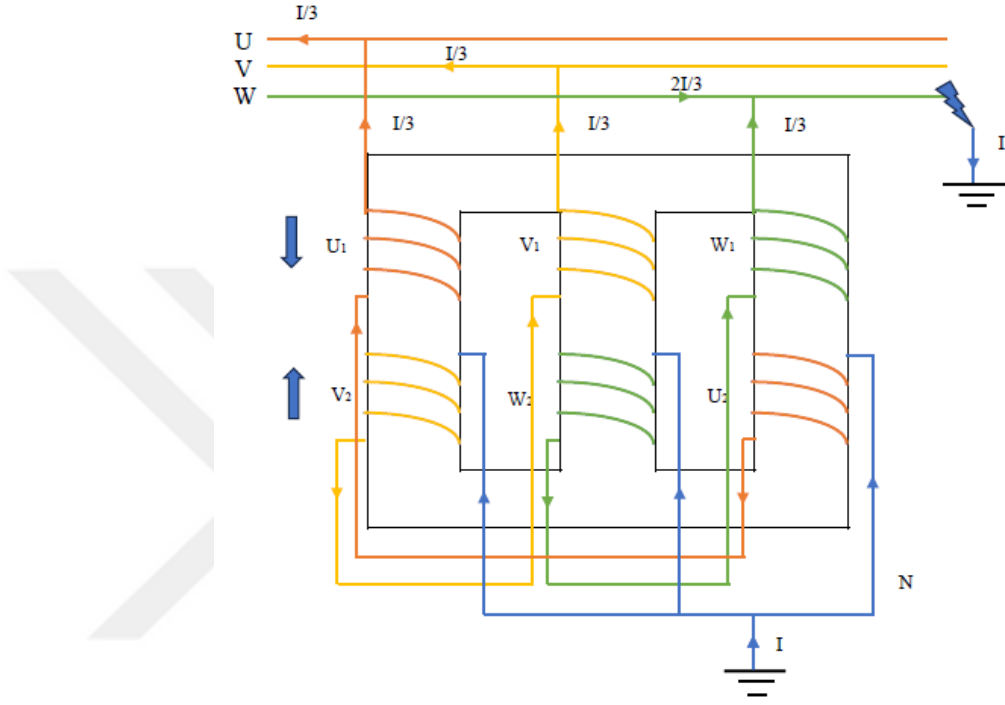
$$V_{zag} = \frac{V_{FF}}{3} \quad (2.3)$$

Denklem (2.2) ve (2.3)'ten anlaşılacağı üzere zig-zag transformatörün sargıları üzerindeki gerilim sistemin faz-faz geriliminin üçte biridir (25).

2.5.1 Çalışma Prensibi

Zig-zag transformatör bağlantısı üç adet tek fazlı transformatör sargıları ile veya üç fazlı bir transformatör sargılarının özel bir şekilde bağlanmasıyla elde edilir (26). Herhangi bir tek fazdaki toprak arıza akımının sıfır dizi bileşeni topraklama terminali üzerinden kaynağa gider. Topraklama transformatörünün toprak yıldız noktası yoluyla elektrik güç sistemine geri döner. Toprak arıza akımını üç eşit bileşene ayırarak topraklama transformatörün üç sargısından eşit akım akar. Bu, toprak arıza akımının üç hatta eşit dağılıma sahip olması toprak akımlarının düşük empedansı ile sonuçlanır. Her bacağın sarımının bir bölümündeki akım, Şekil 2.5'te

gösterildiği gibi o bacağın sarımının diğer bölümündeki ile ters yöndedir. Her sargıda eşit fakat zıt akım akar. Bu akımların oluşturduğu manyetik akılar da birbirine zıt yönde olduğu için nötralize olacaktır. Yani net akı artmaz. Sargı boyunca ekstra bir gerilim indüklenmediği ve arıza akımının akışını engelleyecek bir boğucu etkinin meydana gelmediği anlamına gelir.



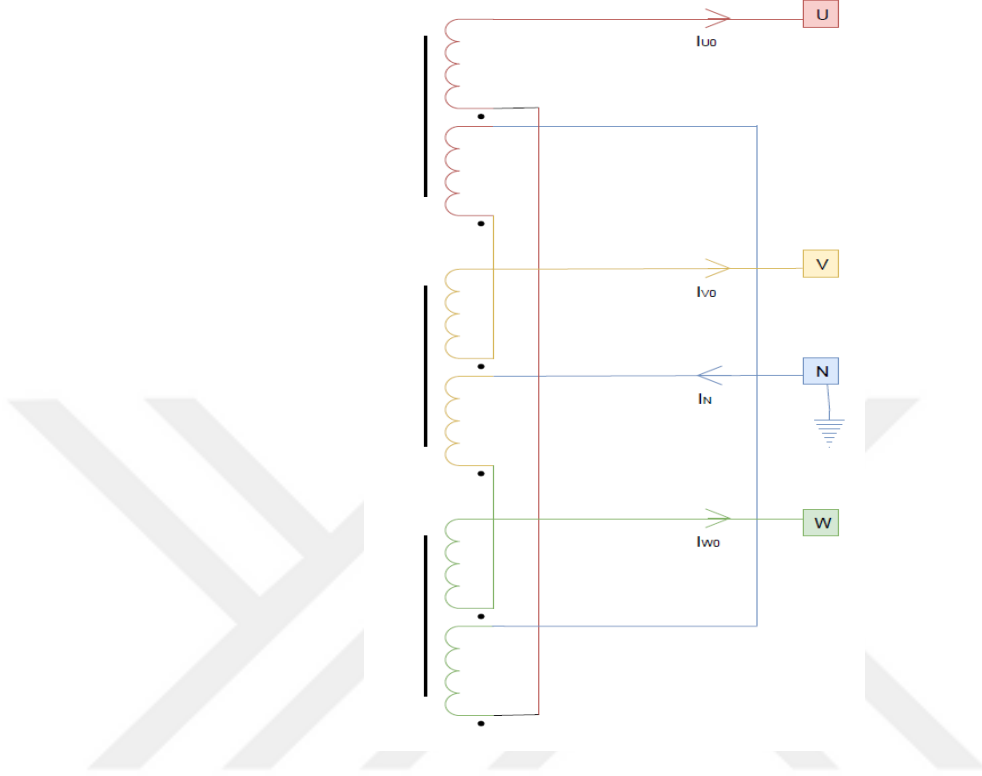
Şekil 2.5. Zig-zag Transformatörün Çalışma Prensibi

Diğer iki fazdaki gerilimler faz-nötr gerilim seviyesinde tutulur. Topraklanmış nötr olmasaydı sistemdeki diğer fazların gerilim seviyeleri faz-faz gerilim seviyelerine yükselecek ve sistemdeki ekipmanların izolasyonu zorlayacaktır. Böylece zig-zag topraklama transformatörü sadece arıza akımından korumakla kalmaz, geçici aşırı gerilimlerin artmasını da azaltır (27).

Dengeli durumda üç fazdaki akımların büyüklükleri birbirine eşittir. Üç fazlı güç sistemlerinde arıza veya dengesiz bir akım olmadığı müddetçe üç faz akımına karşı yüksek empedans gösterdiği için yalnızca küçük bir mıknatıslanma akımı akıtır (28). Aksi durumda sistemde meydana gelen toprak arıza akımlarına karşı düşük empedans göstererek toprak akımının akmasına izin verir.

Şekil 2.5'deki transformatörün zig zag sargılarının sarım sayısı birbirine eşit olduğundan birincil sargının nokta noktasına akan giriş akımı ile ikincil sargının

nokta noktasından dışarı akan çıkış akımı birbirine eşittir. Bu, zig-zag transformatörünün sıfır dizi akımı için akış yolu sağlayabileceği anlamına gelir. Zig-zag transformatörün devre bağlantısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Zig-zag Transformatör Devre Bağlantısı

Zig-zag transformatöründen akan akım yalnızca sıfır dizi bileşenidir. Üç fazlı güç sisteminde sıfır dizi akımları $I_{u0}(t)$, $I_{v0}(t)$ ve $I_{w0}(t)$ aynı genliğe ve aynı faza sahiptirler ve aşağıdaki şekilde temsil edilirler.

$$I_{u0}(t) = I_{v0}(t) = I_{w0}(t) \quad (2.4)$$

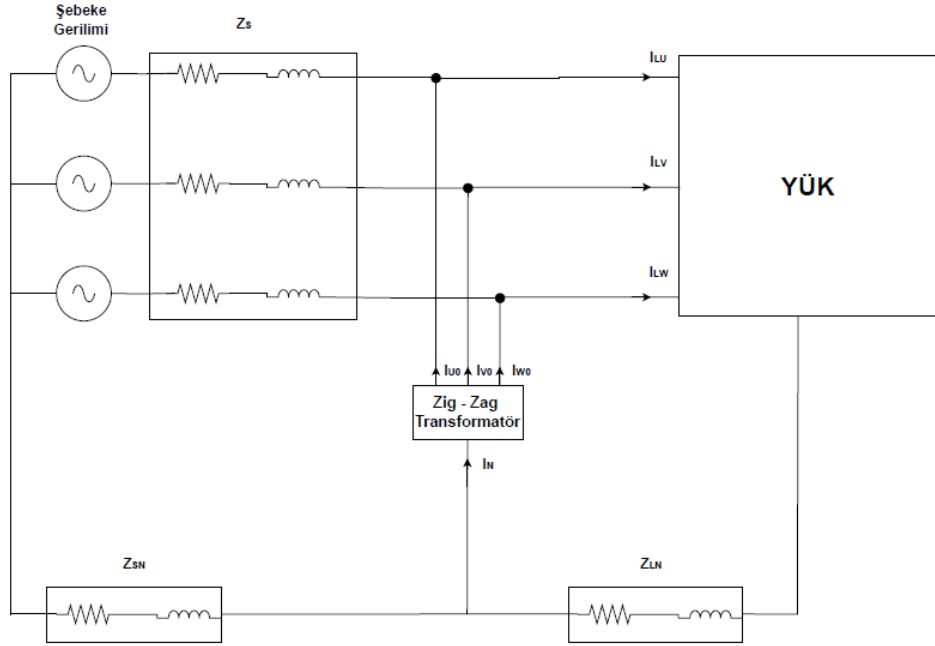
Nötr akımını üç fazlı sıfır dizi akımların toplamıdır ve şu şekilde temsil edilir:

$$I_N(t) = 3I_{u0}(t) \quad (2.5)$$

2.5.2 Eş Değer Devresi

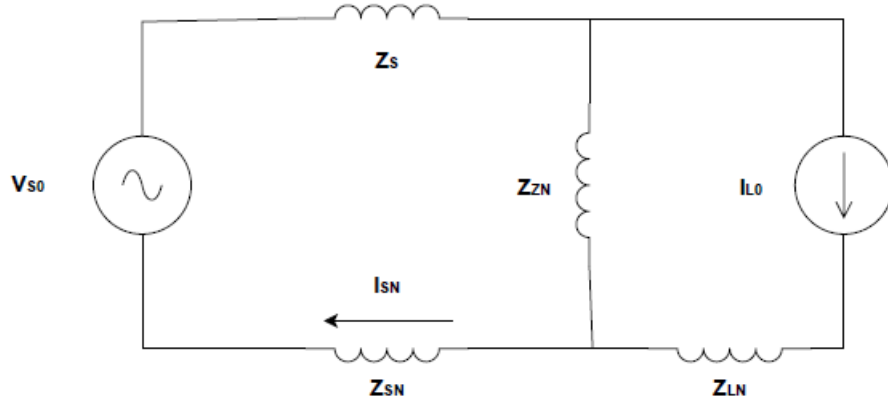
Bir transformatörün kaçak empedansı, genel tasarımı üzerinde önemli etkisi olan en önemli özelliklerden biridir (29). Transformatör, sargıların düzenine ve göreceli fiziksel konumuna bağlı olarak belirli benzersiz devre özellikleri sergiler.

Üç fazlı bir sistem lineer olmayan yüke bağlanır ve topraklama transformatörü şekilde 2.7’de gösterildiği gibi yüke yakın ve paralel bağlanır.



Şekil 2.7. Zig-zag Transformatörün Sistem Konfigürasyonunu

Şekil deki genel sistemin sıfır dizi eşdeğer devresi Şekil 2.8’de gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Sıfır Dizi Eşdeğer Devresi

Z_{YN} yük ile Zig-zag transformatörü arasındaki nötr iletkenin empedansıdır, Z_{SN} şebeke ile Zig-zag transformatörü arasındaki empedanstır. $V_{S0}(t)$ ve $I_{L0}(t)$ bu iki sıfır dizi kaynağından oluşur.

Endüstri dağıtım güç sisteminde, her fazdaki yukarı akışın eşit olmayan yük dağılımı veya yükler dengeli olsa bile anormal faz değişimi nedeniyle dengesiz şebeke gerilimleri sıklıkla meydana gelebilir.

$V_{s0}(t)$ dengesiz şebeke gerilimlerinin neden olduğu sıfır dizi gerilim kaynağıdır. Şu şekilde ifade edilebilir (18).

$$V_{s0}(t) = \frac{1}{3}(V_{UN}(t) + V_{VN}(t) + V_{WN}(t)) \quad (2.6)$$

$i_{L0}(t)$ sıfır dizili akım kaynağıdır ve dengesiz temel yük akımlarını ve sıfır dizili harmonik yük akımlarını içerir ve şu şekilde türetilebilir:

$$i_{L0}(t) = \frac{1}{3}(i_{Lu}(t) + i_{Lv}(t) + i_{Lw}(t)) \quad (2.7)$$

Z_{zn} , zig-zag transformatörünün sıfır dizi empedansıdır. Bir sarım için temel olarak iki tip sıfır dizi reaktansı vardır;

Biri açık devre (mıknatıslanma) reaktansıdır ve diğer tüm sargıların terminalleri açık devre tutulur. Diğeri Kısa (kaçak) reaktanstır ve yalnızca diğer bir sargının terminalleri kısa devre yapılır.

Zig-zag transformatörü kullanıldıktan sonra $V_{s0}(t)$ ve $i_{L0}(t)$ nin şebeke tarafındaki nötr akımına etkisi süperpozisyon teorisi kullanılarak analiz edilebilir. $i_{L0}(t)$ etkisini dikkate almak için $V_{s0}(t)$ kısa devre olduğu varsayılmalıdır. $i_{L0}(t)$ in neden olduğu şebeke tarafındaki nötr akım $i'_{sn}(t)$ şu şekilde ifade edilebilir

$$i'_{sn}(t) = \frac{Z_{zn}}{Z_{s0} + Z_{sn} + Z_{zn}} i_{L0}(t) \quad (2.8)$$

Bu denklem $i_{L0}(t)$ in neden olduğu şebeke tarafı nötr akımının büyüklüğünün azalacağını göstermektedir. Z_{zn} azaltılırsa veya Z_{sn} arttırılırsa fayda tarafındaki $i_{L0}(t)$ zayıflatılabilir.

$V_{s0}(t)$ etkisini dikkate almak için, $i_{L0}(t)$ açık devre olduğu varsayılmalıdır. Zig-zag transformatörünün sıfır bileşen gerilimi $V_{s0}(t)$ için düşük empedanslı bir yol sağladığı bulunabilir. Bu, zig-zag transformatörü uygulandıktan sonra dengesiz şebeke voltajı altında şebeke nötr akımının daha büyük hale geldiği anlamına gelir.

$V_{s0}(t)$ 'nin neden olduğu fayda tarafının nötr akımı $i''_{sn}(t)$ şu şekilde ifade edilebilir. $V_{s0}(t)$ 'nin neden olduğu $i''_{sn}(t)$ tarafının şebeke tarafındaki nötr akımı, üç fazlı dört telli aktif güç filtresinin yüksek maliyeti nedeniyle sınırlı olduğu şeklinde ifade edilebilir. Zig-zag transformatörü, düşük maliyeti, kolay kurulumu ve ücretsiz bakımı nedeniyle bu sorun için hala popüler bir çözümdür.

$$i''_{sn}(t) = \frac{1}{Z_{s0} + Z_{sn} + Z_{zn}} v_{s0}(t) \quad (2.9)$$

Zig-zag transformatörün şebeke ile zig-zag transformatörü arasında akan sıfır dizi akımı için bir yol sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte şebeke sisteminin zig-zag transformatörünün ve nötr iletkenin empedansı üç fazlı güç sistemlerinin çoğunda çok küçüktür. Genel nötr akımı $i_{sn}(t)$ her iki sıfır dizi kaynağı olan $V_{s0}(t)$ ve $i_{L0}(t)$ 'nin neden olduğu nötr akımlarının $i'_{sn}(t)$ ve $i''_{sn}(t)$ toplamıdır.

$$i_{sn}(t) = \frac{Z_{zn}}{Z_{s0} + Z_{sn} + Z_{zn}} i_{L0}(t) + \frac{1}{Z_{s0} + Z_{sn} + Z_{zn}} v_{s0}(t) \quad (2.10)$$

Zig-zag transformatörü yüke yakın monte edilirse Zig-zag'ın performansı daha iyi olacaktır (10-18).

2.5.3 Kaçak Reaktans Hesabı

Transformatörler için pozitif dizi ve negatif dizi empedansları (reaktanslar) eşittir. Simetrik yükleme koşullarında yalnızca pozitif dizi reaktansının dikkate alınması gerekir. Pozitif bileşen reaktansını anlamak ve hesaplamak kolaydır ancak bir transformatörün sıfır bileşen reaktansı farklı olabilir. Sıfır dizili bir akım dizisi tarafından üretilen manyetik alan, negatif veya pozitif dizili akımların ürettiği manyetik alandan kökten farklıdır. Asimetrik yükleme veya tek fazlı arıza durumunda, sistem tepkisine büyük ölçüde ağır sıfır bileşen reaktansı tarafından karar verilir.

Transformatör sargısının boyutundaki değişiklik, kaçak reaktansını önemli ölçüde etkileyebilir, bu da kısa devre akımında ve transformatörün kısa devre empedansında değişikliğe neden olur (30). İç sargının boyutu aynı zamanda kaçak reaktansı ile de belirlenebilir (31). Sıfır dizi empedansının kaba tahminleri, transformatörün pozitif dizisine ve çekirdek biçimine göre belirlenebilir. Sıfır dizi

empedansı kısa devre hesaplamalarında kullanılır. Sıfır dizi empedansı genellikle pozitif ve negatif empedanslardan çok farklıdır ve çekirdek yapısının şekline ve sargıların düzenine bağlıdır.

Pozitif ve negatif dizi akımlarının akışı için zig-zag bağlantılar yüksek bir mıknatıslanma empedansı oluşturur. Bununla birlikte, üçlü harmoniklerin ve sıfır dizili akımların akışını iyileştirmek için zig-zag transformatörler, toprak arızalarından gelen sıfır dizili akımlar için bir yol sağladıklarından daha düşük bir sızıntı reaktansına sahiptir.

Güç sistemindeki sıfır dizi akımları çoğunlukla dengesiz yüklerden ve topraklamayla ilgili arızalardan kaynaklanır. Bu nedenle, kaçak reaktansın doğru değerini vermek ve uluslararası standartlar aralığında kaçak endüktans seviyelerini garanti etmek zikzak transformatör tasarımında önemlidir. IEC 60076–1 standardı, zig-zag transformatörler için $\pm\%10$ toleransı zorunlu kılar.

Transformatördeki kaçak reaktansı hesaplamanın analitik teknikler, sayısal yöntemler ve deneysel testler gibi yöntemleri vardır. Transformatörün kaçak reaktansı, relüktans ağ modellemesi kullanılarak da hesaplanabilir (32).

Sayısal teknikler doğrudur ancak eşdeğer manyetik devreler kavramı kullanılarak hesaplanabilir ve bu yöntem zaman harcamaktadır. Sıfır dizi empedansının klasik yöntemlerle hesaplanması çok daha zordur.

Relüktans ağ modellemesi, sayısal yöntemlere göre daha hızlıdır ama daha az doğrudur. Rogowski yönteminin doğruluğunun diğer analitik yöntemlere göre daha yüksek olması nedeniyle, kaçak reaktansının değerlendirilmesinde etkili bir şekilde kullanılabilecek analitik tekniklerden biridir (33). Denklem (2.11), kaçak reaktansının değerlendirilmesi için Rogowski yöntemini göstermektedir (24);

$$X = 2\pi f \frac{\mu_0 \cdot \pi N^2}{H_{eq}} x \frac{1}{3} (B_{YG} x D_{YG}) + (B_{YG-AG} x D_{YG-AG}) + \frac{1}{3} (B_{AG} x D_{AG}) \quad (2.11)$$

f: Frekans

μ_0 : Amper-sarım yoğunluğu

N: Yüksek gerilim sargısının sarım sayısı

H_{eq} : Sargının eşdeğer yüksekliği

B_{YG} : Yüksek gerilim sargısının radyal kalınlığı

D_{YG} : Yüksek gerilim sargısının ortalama çapı

B_{YG-AG} : Yüksek ve alçak gerilim sargıları arası boşluğun radyal kalınlığı

D_{YG-AG} : Yüksek ve alçak gerilim sargıları arası boşluğun ortalama çapı

B_{AG} : Alçak gerilim sargısının radyal kalınlığı

D_{AG} : Alçak gerilim sargısının ortalama çapı

Sargının eşdeğer yüksekliği H_{eq} aşağıdaki denklem (2.12) ile elde edilebilir.

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} \quad (2.12)$$

K_R Rogowski faktörüdür ve denklem (2.13) ile gösterilmiştir.

$$K_R = \frac{1 - e\left(\frac{-\pi x H_w}{B_{YG} + B_{YG-AG} + B_{AG}}\right)}{\frac{\pi x H_w}{B_{YG} + B_{YG-AG} + B_{AG}}} \quad (2.13)$$

Zig-zag ve yıldız transformatörlerdeki kaçak reaktansı denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$X_{Y-zigzag} = \frac{1}{2} [X_{YG-zig} + X_{YG-zag}] + \frac{1}{6} [X_{zig-zag}] \quad (2.14)$$

Zig-zag-yıldız bir transformatörün geometrik ölçü birimlerinin gösterimi Şekil 2.9'da sunulmuştur. Alçak gerilim ile zig sargısı, yüksek gerilim ile zag sargısı ve zig ile zag sargısı arasında kaçak reaktanslar hesaplanarak zikzak transformatördeki kaçak reaktans üç adımda hesaplanabilir.

$$H_{AG-zag} = \frac{H_{W2}}{K_{R2}} \quad (2.19)$$

H_{AG-zag} alçak gerilim ile zag sargının ortalama yüksekliğidir. Denklem (2.19) hesaplamak için kullanılabilir. B_{zag} , D_{zag} ve B_3 , D_3 , sırasıyla zag sargının radyal kalınlığı ve ortalama çapıdır ve AG ile zag sargının arasındaki boşluğun radyal kalınlığı ve ortalama çapıdır.

AG ile zag sargının Rogowski faktörü K_{R2} denklem (2.20) kullanılarak hesaplanabilir.

$$K_{R2} = \frac{1 - e\left(\frac{-\pi x H_W}{B_{AG} + B_3 + B_{zag}}\right)}{\frac{\pi x H_W}{B_{AG} + B_3 + B_{zag}}} \quad (2.20)$$

Zig ve zag sargı çifti arasındaki kaçak reaktansı denklem (2.21) kullanılarak hesaplanabilir.

$$X_{zig-zag} = 2\pi f \frac{\mu_0 \cdot \pi N^2}{H_{zig-zag}} x \frac{1}{3} (B_{zig} x D_{zig}) + (B_2 x D_2) + \frac{1}{3} (B_{zag} x D_{zag}) \quad (2.21)$$

$$H_{zig-zag} = \frac{H_{W3}}{K_{R3}} \quad (2.22)$$

$H_{zig-zag}$ zig ile zag sargının ortalama yüksekliğidir. Denklem hesaplamak için kullanılabilir. B_2 , D_2 , sırasıyla zig ile zag sargının arasındaki boşluğun radyal kalınlığı ve ortalama çapıdır. Zig ile zag sargının Rogowski faktörü K_{R2} denklem (2.23) kullanılarak hesaplanabilir.

$$K_{R3} = \frac{1 - e\left(\frac{-\pi x H_W}{B_{zig} + B_2 + B_{zag}}\right)}{\frac{\pi x H_W}{B_{zig} + B_2 + B_{zag}}} \quad (2.23)$$

Zig-zag yüksek gerilim tarafında olduğundan, denklem (2.24) şekilde hesaplanabilir:

$$X_{zigzag-AG} = \frac{1}{2} [X_{AG-zig} + X_{AG-zag}] + \frac{1}{6} [X_{zig-zag}] \quad (2.24)$$

Topraklama transformatörünün sıfır bileşen empedansı aşağıdaki denklem (2.25)'te sunulan formülden hesaplanabilir;

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3}V_{FF}}{I_N} \quad (2.25)$$

Z_0 : Sıfır bileşen empedansı

V_{FF} : Faz-faz gerilimi KV

I_N : Nötr akımı Amper

Kaçak reaktans hesaplamasının alternatif bir yöntemi enerji tekniklerine dayanmaktadır. Aşağıdaki formüller ile hesaplanabilir;

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 \quad (2.26)$$

$$L = \frac{2W_m}{I^2} \quad (2.27)$$

$$X_0 = \omega L = \frac{4\pi f W_m}{I^2} \quad (2.28)$$

$$X \% = \frac{X_0}{Z_b} = \frac{4\pi f W_m}{Z_b I^2} \quad (2.29)$$

Burada W_m , kapalı bir yolda akan I akımının ürettiği manyetik alandaki elektromanyetik enerjidir. Sarımlardaki elektromanyetik enerjiyi hesaplamak, ardından elektromanyetik enerjiyi üçe bölmek ve faz başına reaktansı hesaplamak için faz akımını kullanmak anlamına gelir.

Sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal yöntemler kullanıldığında, alanın çözümü genellikle manyetik vektör potansiyeli (A) cinsinden elde edilir, çünkü depolanan elektromanyetik enerji, akım yoğunluğu (J) ile manyetik vektör potansiyelinin (A) çarpımından hesaplanabilir. İki boyutlu manyetik alanda pencere uzayında yırtılan manyetik enerji aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilir.

$$W_m = \frac{1}{2} \iint J \cdot A \cdot d_s \quad (2.30)$$

$$L = \frac{1}{I^2} \iint J \cdot A \cdot d_s \quad (2.31)$$

A : Manyetik vektör potansiyeli

J : Akım yoğunluğu vektörü

3. 34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN TASARIMI

3.1 Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (SEY), elektrik veya manyetik problemleri çözmek için kullanan bilgisayar destekli bir mühendislik programıdır ve sayısal yöntemler içerisinde yaygın kullanılır. SEY'deki temel fikir karmaşık bir problemi basitleştirerek çözmektir. Herhangi bir sayısal yöntemin ilk adımı ağ veya mesh yapma denilebilir. Analiz edilecek olan ortam bu işlem ile belirli bir sayıdaki küçük alt bölgelere ve düğüm noktalarına bölünmektedir (34). Bu yöntemde sistem davranışı daha önce belirlenmiş çok sayıda basit, küçük, birbirine bağlı alt bölgelere bölünür. Başka bir deyişle, çok sayıda düğümle birbirine bağlanan parçalara bölünen problem kolaylıkla çözülebilir. Bir sistem içerisindeki herhangi bir noktanın gerçek davranışını temsil eden analitik çözümlere karşılık, sayısal çözümler sadece düğüm noktaları adı verilen belirli noktalarda tam çözümleri yaklaşık olarak temsil etmektedir (35). Yaygın olarak kullanılan sayısal yöntem sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yönteminin bütün uygulamalarında büyük bir alanın hesaplanması istenir.

Klasik yöntemle kolayca ve doğru bir şekilde ele alınamaya, standart dışı sargı konfigürasyonlarının asimetrik amper-sarım dağılımlarının reaktansının hesaplanmasında en yaygın kullanılan sayısal yöntemdir (36).

Maxwell denklemleri transformatör içindeki elektromanyetik alan problemlerinde kullanılırlar. Sıfır dizi reaktans hesaplanmasını sağlayan temel denklemler aşağıda sunulmuştur.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (3.1)$$

B: Manyetik akı yoğunluğu ve H: Manyetik alan kuvveti (At/m)'dir
Denklem (3.1) Amper kanunundan türetilmiştir.

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (3.2)$$

$$v = \frac{1}{\mu} \quad (3.3)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.4)$$

μ : Manyetik permabilite, v : Manyetik rezistivite ve A : Manyetik vektör potansiyeli (wb/m)'dir.

Denklem (3.1)'de H yerine denklem (3.2) eşitliği konulduğunda denklem (3.5) elde edilir.

$$\nabla \times \vec{B}v = \vec{j} \quad (3.5)$$

Denklem (3.5)'te B yerine denklem (3.4) konulduğunda denklem (3.6) elde edilir.

$$\nabla \times (v \nabla \times \vec{A}) = \vec{j} \quad (3.6)$$

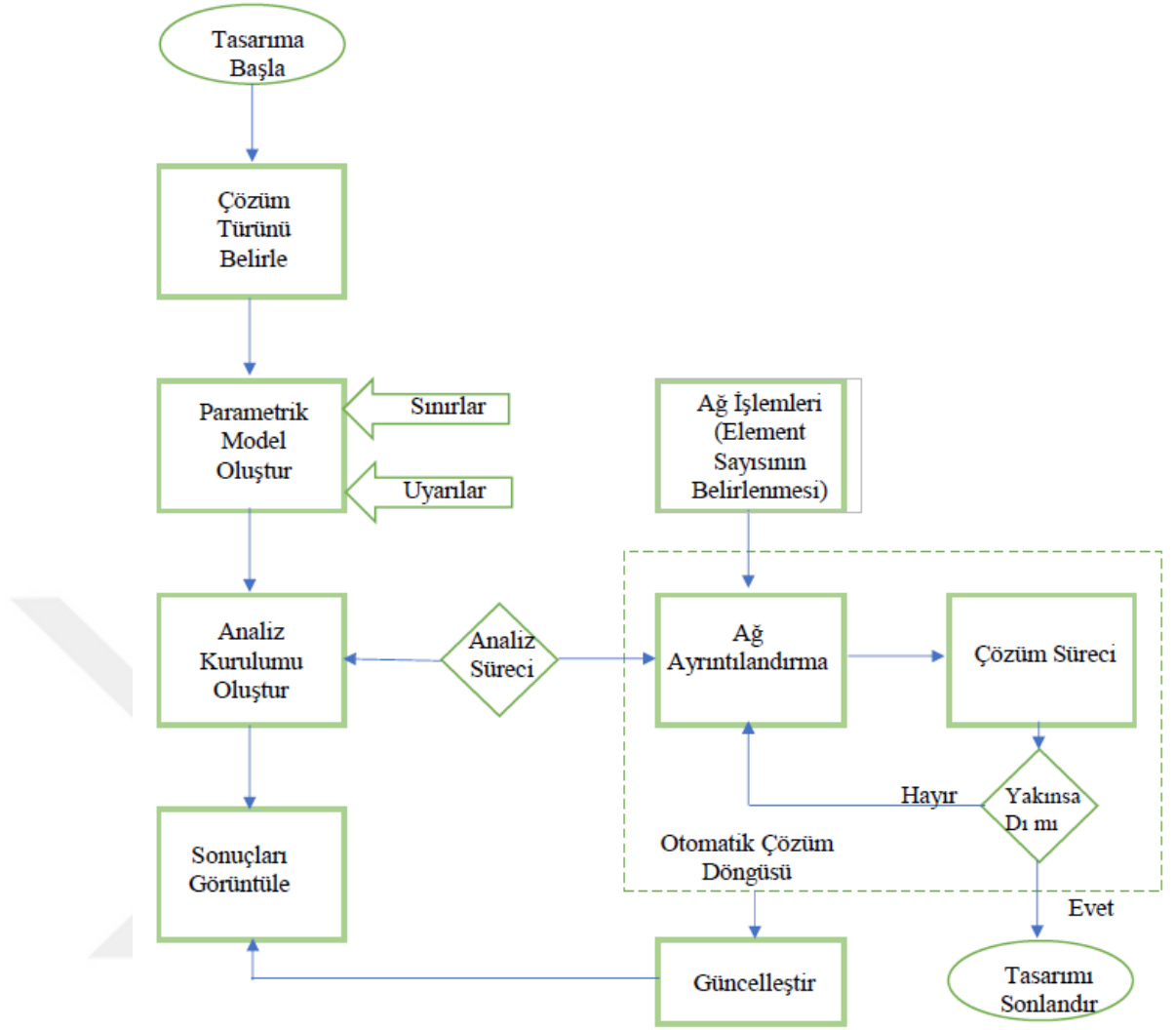
Denklem (3.6) çözülerek manyetik vektör potansiyeli (A) hesaplanabilir. Denklem (3.4) ile de manyetik akı yoğunluğu (B) hesaplanabilir.

3.2 Ansys Maxwell Paket Programı

ANSYS Maxwell yaygın olarak kullanılan ve problemlerin sayısal analizini sağlayan sonlu elemanlar paket programıdır. Problemlerin çözümünde sonlu elemanlar metoduyla işlem yapar. Tasarım tiplerinden Maxwell 2D ve Maxwell 3D'de tasarlanan sistemlerde kolayca değişiklikler yapılarak sistemin davranışları izlenebilir. Maxwell 2D, XY veya RZ düzlemlerini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi analizi gerçekleştirirken, Maxwell 3D, üç boyutlu elektromanyetik alan çözümlerini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi analizini gerçekleştirir. Ürünlerin prototipleri üretilmeden önce bilgisayar ortamında test edilmelerine olanak sağlar. Üretimden sonra çıkabilecek sorunların önceden tespit edilip önlem alınmasına olanak sağlar.

Bu tezde tasarlanan trafo modelinin elektromanyetik olarak analizi için Maxwell 3D kullanılmıştır. Maxwell 3D'de sonlu elemanın temel birimi tetrahedrondur. Modeldeki tetrahedral yapıların tümüne basitçe ağ veya tüm modelin sonlu elemanlar ağı adı verilir (37). Tüm tetrahedral yapıların birleşimine modelin sonlu elemanlar ağı veya basitçe ağ adı verilir.

Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılacak analizin akış diyagramının Maxwell 3D kullanılarak gerçekleştirilmesi Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Analiz Akış Diyagramının

ANSYS/Maxwell'de mesh işlemi çok önemlidir çünkü hesaplanan sonuçların doğruluğu mesh işleminden doğrudan etkilenir. Maxwell, analiz süreci başlamadan önce tüm nesneleri otomatik olarak işler. Kullanıcılar mesh işleminin nasıl yapılacağı konusunda programda değişiklik yapabilirler.

3.3 Analiz Edilen 34,5 kV Zig-zag Transformatörün Parametreleri

Transformatör modeli Ansys Maxwell yazılım programında oluşturulmuştur. Nüveden sonra alçak gerilim sargısı (AG) üstüne zig sargılar ve zag sargılar da üstte olacak şekilde programda nüve ve sargıların ölçüleri girilerek model oluşturulmuştur. Bu transformatörün Maxwell program analizi yoluyla

kaçak empedans, demir kaybı hesaplanmıştır. Prototipin deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.

Normal çalışma koşulları altında, sargılardan akan akımlar yalnızca topraklama transformatörünün mıknatıslanma akımlarıdır, ancak sargılar 10 saniyelik bir süre boyunca maruz kalabilecekleri mümkün olan maksimum 333,33A arıza akımını taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Üç fazlı çekirdek tipi transformatör olarak yapılmıştır ve yağa batırılmıştır.

Analiz edilen transformatörün tasarım parametrelerine ait detaylı bilgiler tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Zig-zag Transformatörün Parametreleri

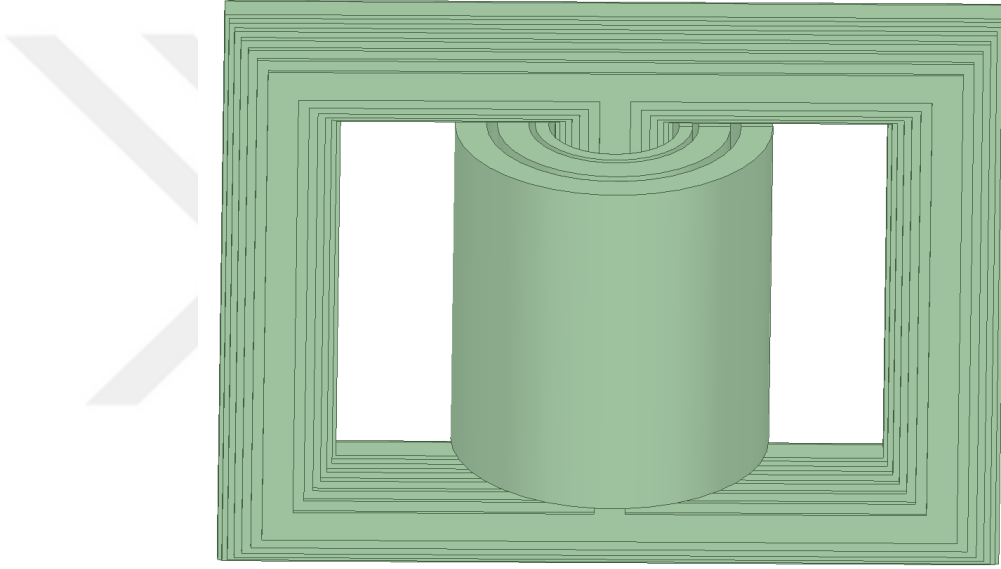
Parametre	Birim	Değer
Frekans	Hz	50
Görünür Gücü	KVA	250
Kısa Devre Gücü	KVA	19919
Primer Nominal Gerilimi	kV	34,5
Sekonder Nominal Gerilimi	kV	0,38
Bağlantı Grubu		ZNyn11
Demir Kaybı	W	1000
Sıfır Bileşen Empedansı	Ohm/faz	59,75
Kısa Devre Empedansı	%	4 (± 10 tol.)

Transformatörün modellenmesi için Ansys Maxwell paket programında tasarım adımları aşağıdaki gibidir:

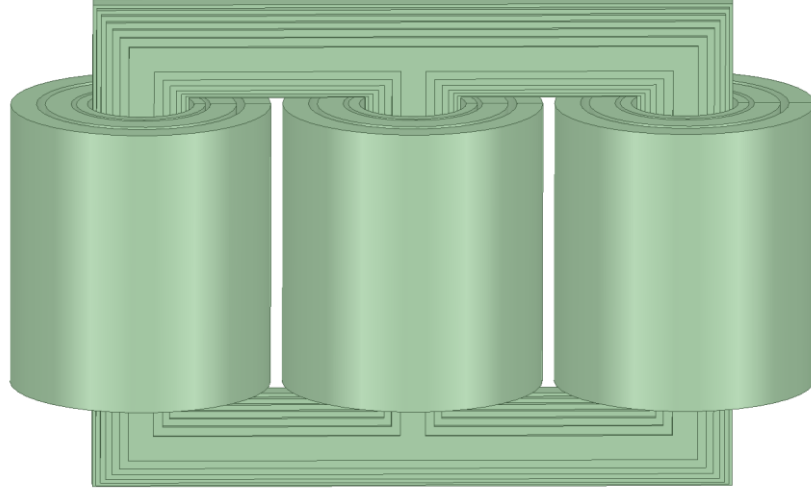
- Transformatörün üç boyutlu modelini oluşturmak için üç boyutlu ekran menüsü açılır.
- Çözücü tipi menüsünden manyetik ve elektrostatik çözümlerden oluşan optimum çözüm tipi model tanımlanır.
- Transformatör üç boyutlu nesneler kullanılarak boyutlarına göre modellenmiştir.
- Malzeme tipi menüsünden çekirdeğin ve sargıların malzeme tipi atanır.
- Transformatör çekirdeği ve bobin terminallerinin sınır ve uyarı verileri detaylı olarak oluşturulur.

- Model kısımlarını bölüntülemek için transformatörün tüm malzemeleri üzerinde mesh(ağ) işlemi oluşturulur.
- Analiz bölgesi menüsünden analizin yapılacağı sınırlar belirlenir
- Analiz zaman ayarı menüsünden analiz süresi belirlenir.
- Analiz başlatılır ve analiz sonuçları menüsünden analiz sonuçları rapor verileri ve diyagramlar alınır.

Maxwell yazılımında 250 kVA 34,5 kV zig-zag transformatörün kaçak reaktans hesabı için tek faz 3B modeli Şekil 3.2’de tasarlanmıştır ve faz başına zig-zag ve alçak gerilim sargıları üst üste yerleştirilmiştir. Üç faz 3B modeli de Şekil 3.3’te gösterildiği gibi tasarlanmıştır.



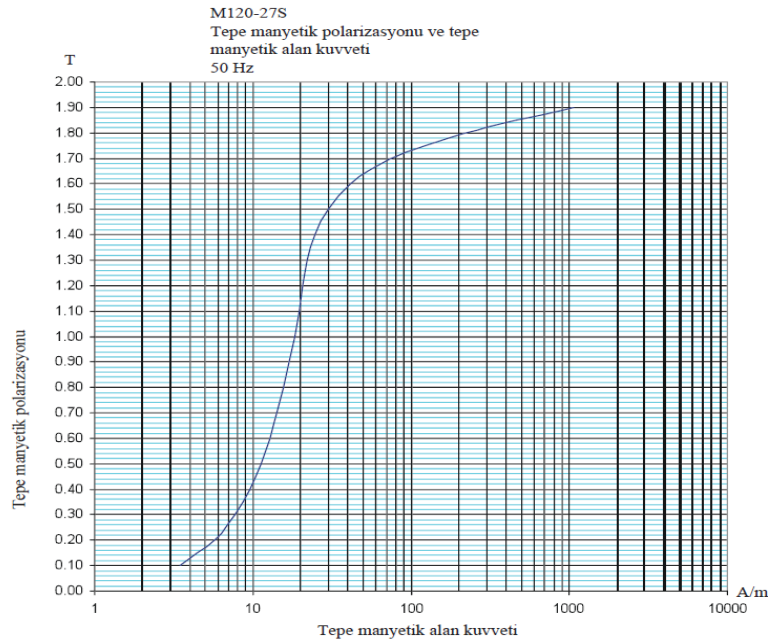
Şekil 3.2. Tek Faz 3B Transformatör Modeli



Şekil 3.3. Üç faz 3B Transformatör Modeli

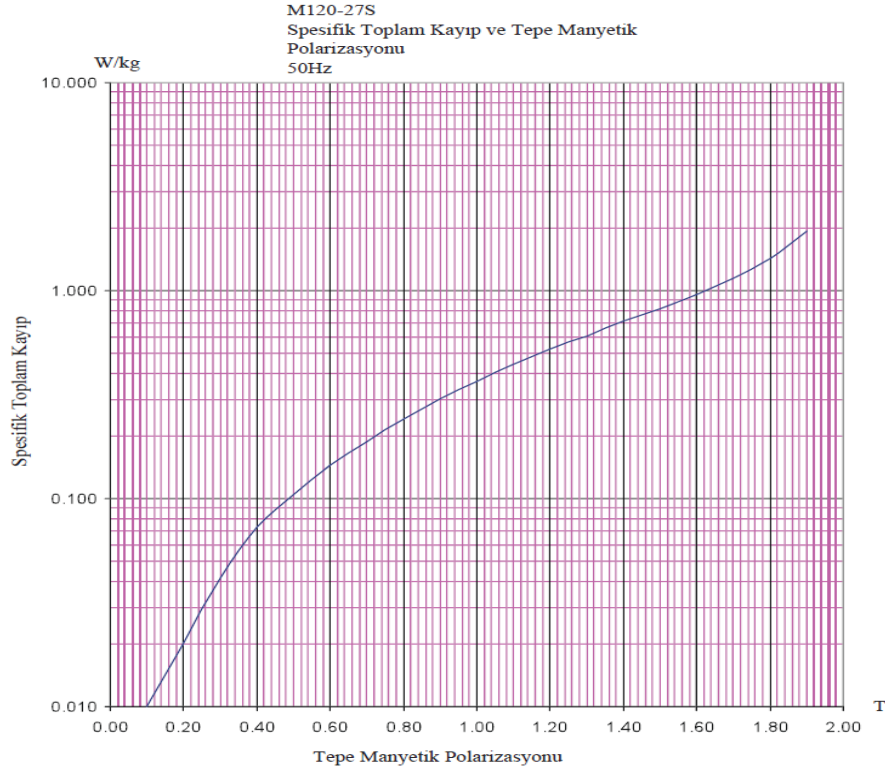
Transformatör çekirdeği ve zig-zag sargıları 3 boyutlu katı nesneler kullanılarak modellenir. Transformatör çekirdeğinin ve sargılarının modellenmesinin ardından, bu ekipmanların malzeme tipleri malzeme özellik paneli kullanılarak seçilir.

Analiz edilen zig-zag transformatörün çekirdek manyetik malzemesi olarak 0,27 mm kalınlığındaki M4 tipi kullanılmıştır. Nüvenin karakteristik özellikleri detaylı olarak belirlenir. Şekil 3.4'te gösterilen transformatör çekirdeğinin manyetik alan- manyetik alan vektörü (B-H)mıknatıslanma eğrisidir.



Şekil 3.4. M4 Tipi Laminasyon Malzemesinin Mıknatıslanma (B-H) Eğrisi

Ansyz Maxwell transformatörde oluşan nŭve kayıplarını hesaplayabilmekte ve grafik olarak çizebilmektedir (38). Ancak bunun için, yazılımın kŭtŭphanesine kullanılan manyetik malzemenin zgŭl nŭve kayıplarını çalışma frekansına göre veri olarak girilmesi gerekmektedir (39). 0,27 mm kalınlığındaki M4 laminasyon malzemesinin 50 Hz frekanstaki zgŭl nŭve kayıpları (B-P) eğrisi şekil 3.5'te grafiksel ve değer olarak verilmiştir.



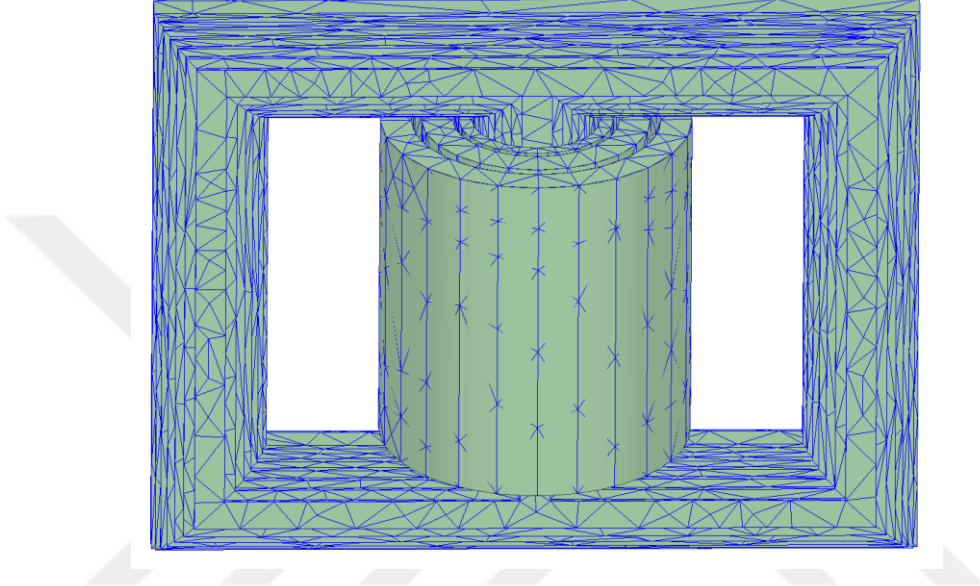
şekil 3.5. M4 Tipi Laminasyon Malzemesinin 50 Hz Frekans Değerindeki zgŭl Nŭve Kaybı (B-P) Eğrisi

Program kŭtŭphanesinde bulunan malzemeler içerisinden transformatrŭn zig-zag ve alçak gerilim sargılarının hepsi bakır olarak belirlenmiştir. Son olarak transformatrŭn analiz edilebileceği alanın boyutları oluşturulmuştur ve bu alan vakum olarak seçilmiştir.

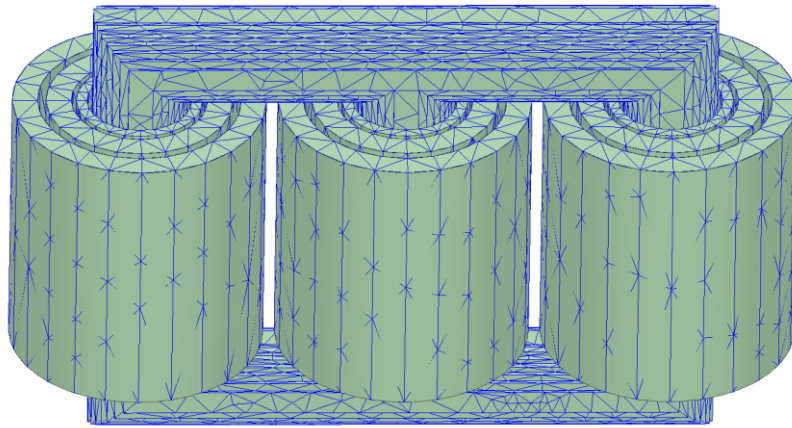
Transformatrŭn malzeme özellikleri seçildikten sonra transformatör çekirdeğine ve bobinlerine mesh işlemi uygulanır. Bu işlem analiz sŭrecinin en önemli kısmıdır ŭnkŭ fiziksel bir tanım aralığının daha kŭŭk tanım aralığlarına blŭnmesine olanak tanır. Tasarlanan transformatör mesh operasyonu sayesinde

tüm parçacıkların elektromanyetik analizi yapılmıştır. Tasarlanan model mesh işlemi sayesinde daha doğru analiz edilmektedir.

SEM ile kaçak reaktansını değerlendirmek için tek fazlı üç boyutlu ve üç fazlı üç boyutlu olmak üzere iki farklı model kullanılmıştır. Kaçak empedansını bulmak için zig-zag transformatör tek faza dönüştürüldü. Şekil 3.6’da tek fazlı üç boyutlu modellerin mesh işlemi, Şekil 3.7’de üç fazlı üç boyutlu modellerin mesh işlemi göstermektedir.



Şekil 3.6. Tek Faz Transformatörün Çekirdeğine Ve Sargılarına Uygulanan Mesh İşlemi



Şekil 3.7. Üç Faz Transformatörün Çekirdeğine Ve Sargılarına Uygulanan Mesh İşlemi

Tüm bu işlemlerin sonunda transformatör analize hazır hale gelir. Analiz süresi kurulum paneli kullanılarak belirlenmelidir. Analiz çözüm adımı, türü, başlama ve durma zamanı parametreleri doğru bir şekilde tanımlanır (40). Bu parametreler transformatörün elektromanyetik geçici analizini çözmek için anahtar parametrelerdir çünkü transformatör üzerindeki akımların, gerilimlerin ve kayıp sinyallerinin doğruluğunu doğrudan etkilerler. Bu çalışma için analiz adım büyüklüğü, saf sinyaller elde etmek amacıyla küçük aralıklar olarak seçilmiştir. Son olarak analiz zamanına bağlı olarak analiz sonuçları elde edilir. Kaçak reaktans hesaplamasının bir yöntemi olan enerji tekniklerine dayanan formüller 2.28 ve 2.29 da gösterilmiştir.

FEM tek fazlı üç boyutlu ve üç fazlı üç boyutlu manyetostatik analiz sonuçları Tablo 3.2’de sunulmaktadır.

Tablo 3.2. Manyetostatik Analiz Sonuçları

	1-Faz	3-Faz
Toplam Enerji	5.616 J	5.5066 J
Kaçak Reaktans (X %)	4.23%	4.15%

Sonlu elemanlar yazılımından transformatörün farklı kısımlarındaki enerjilerin toplamı elde edilmiştir ve 3 faz 3B ve 1 faz 3B için analiz sonuçları Tablo 3.2’de toplam enerji olarak sunulmuştur. Toplam enerji tek faz 3B modelinde, üç faz 3B modeline göre fazla çıktığı görülmüştür.

Kaçak reaktansı denklem 2.29 kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçlarındaki kaçak reaktans değerleri, tek faz 3B modelin üç faz 3B modeline göre fazla olduğu görülmüştür.

3.4 2B ve 3B Açık Devre Analiz Testi

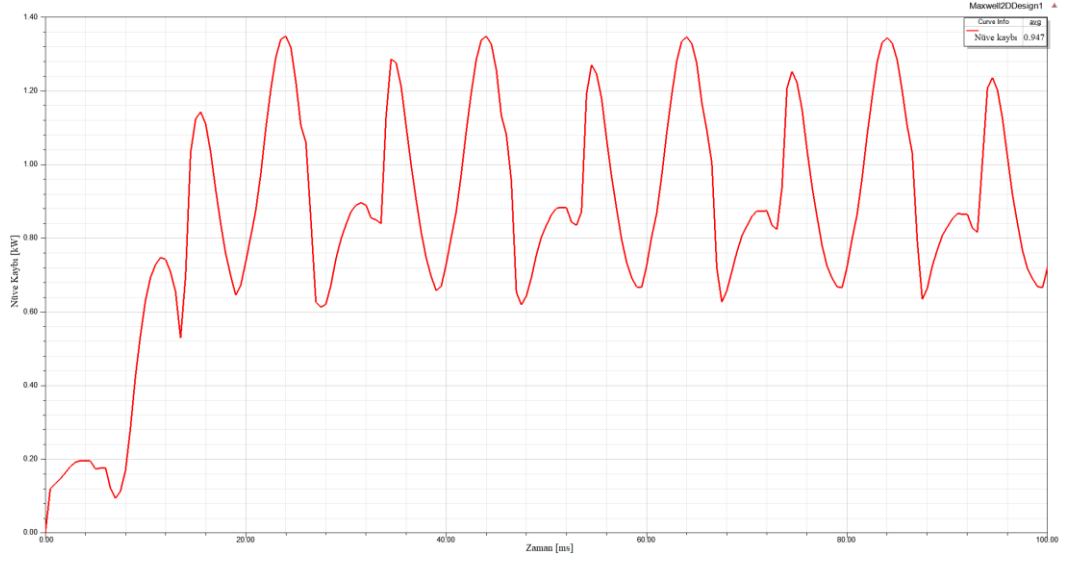
Bu testin amacı ANSYS Maxwell programı vasıtası ile 50 Hz frekansta 2B ve 3B düzlemlerinde nüve kaybı değerlerini hesaplamak ve çıkan sonuçları laboratuvar ortamında ölçülen nüve kaybı değeri ile karşılaştırmaktır.



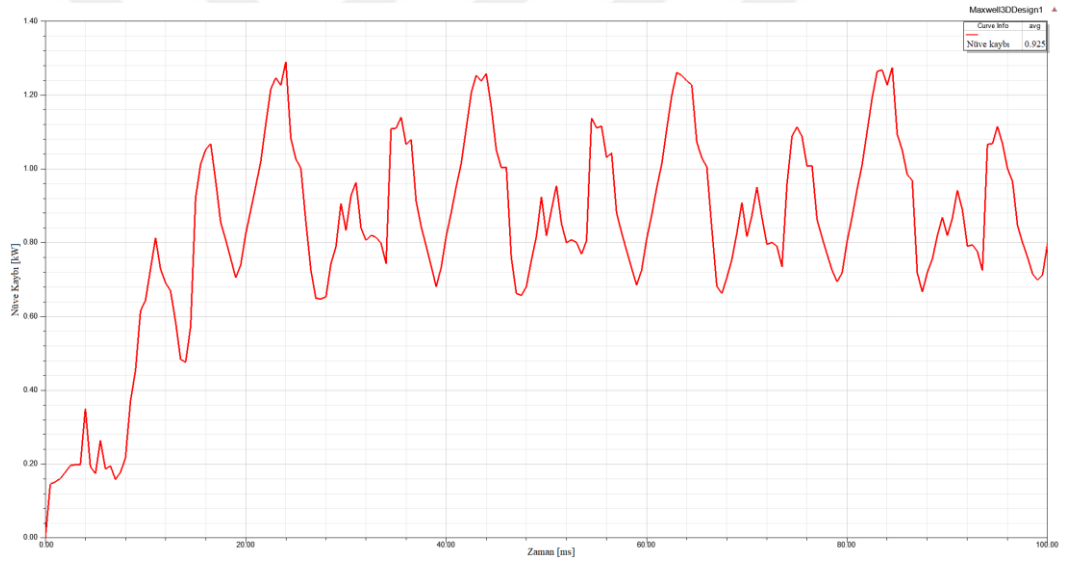
Şekil 3.8. 2B AG Uygulanan Gerilim



Şekil 3.9. 3B AG Uygulanan Gerilim



Şekil 3.10. 2D 3 Fazlı Zig-zag Transformatörün Demir kaybı



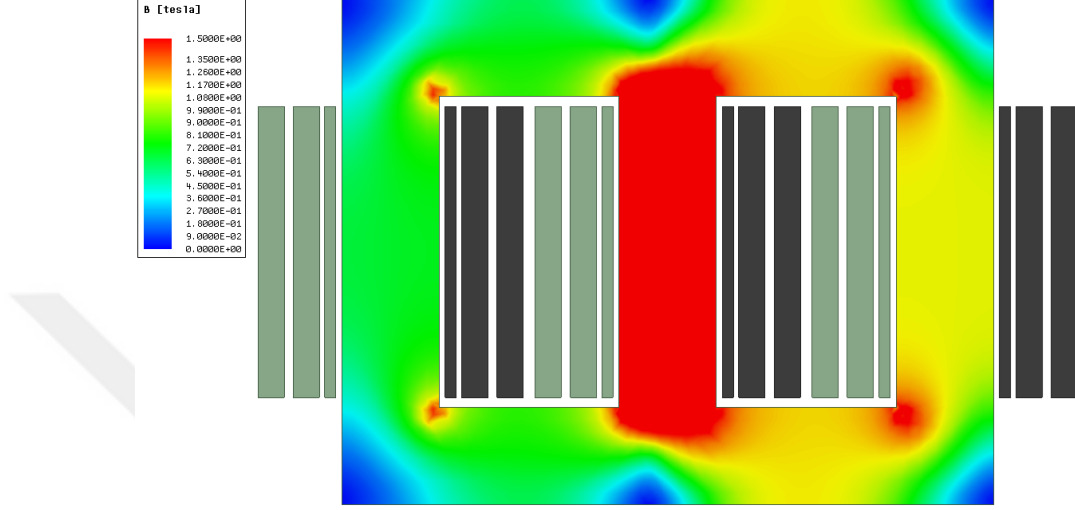
Şekil 3.11. 3D 3 Fazlı Zig-zag Transformatörün Demir Kaybı

Üç fazlı iki boyutlu ve üç fazlı üç boyutlu modeller kullanılarak elektromanyetik geçici analiz sonuçları Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

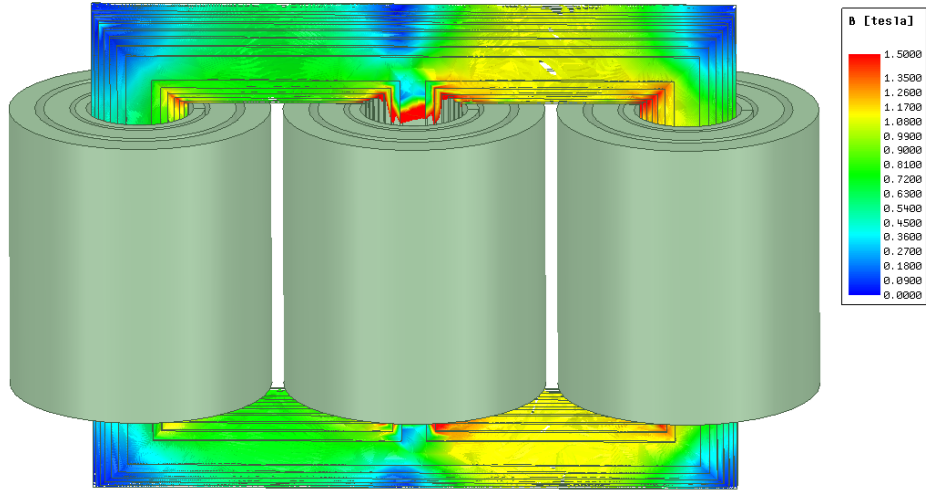
Tablo 3.3. Elektromanyetik Geçici Analiz Sonuçları

	3-B	2-B
Boşta Kayıp	925 W	947 W

Bu test yapılırken laboratuvar testlerinde ölçülemeyen nüvede meydana gelen; manyetik alan yoğunluğu grafikler halinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar manyetik akı yoğunluğu Şekil 3.12’de gösterilen iki boyutlu üç fazlı ve Şekil 3.13’te gösterilen üç fazlı üç boyutlu modeller ile incelenmiştir. Her iki model de manyetik akı yoğunluğu yaklaşık olarak aynı bulunmuştur.



Şekil 3.12. 2B Transformatör Çekirdeğindeki Manyetik Akı Yoğunluğu



Şekil 3.13. 3B Transformatör Çekirdeğindeki Manyetik Akı Yoğunluğu

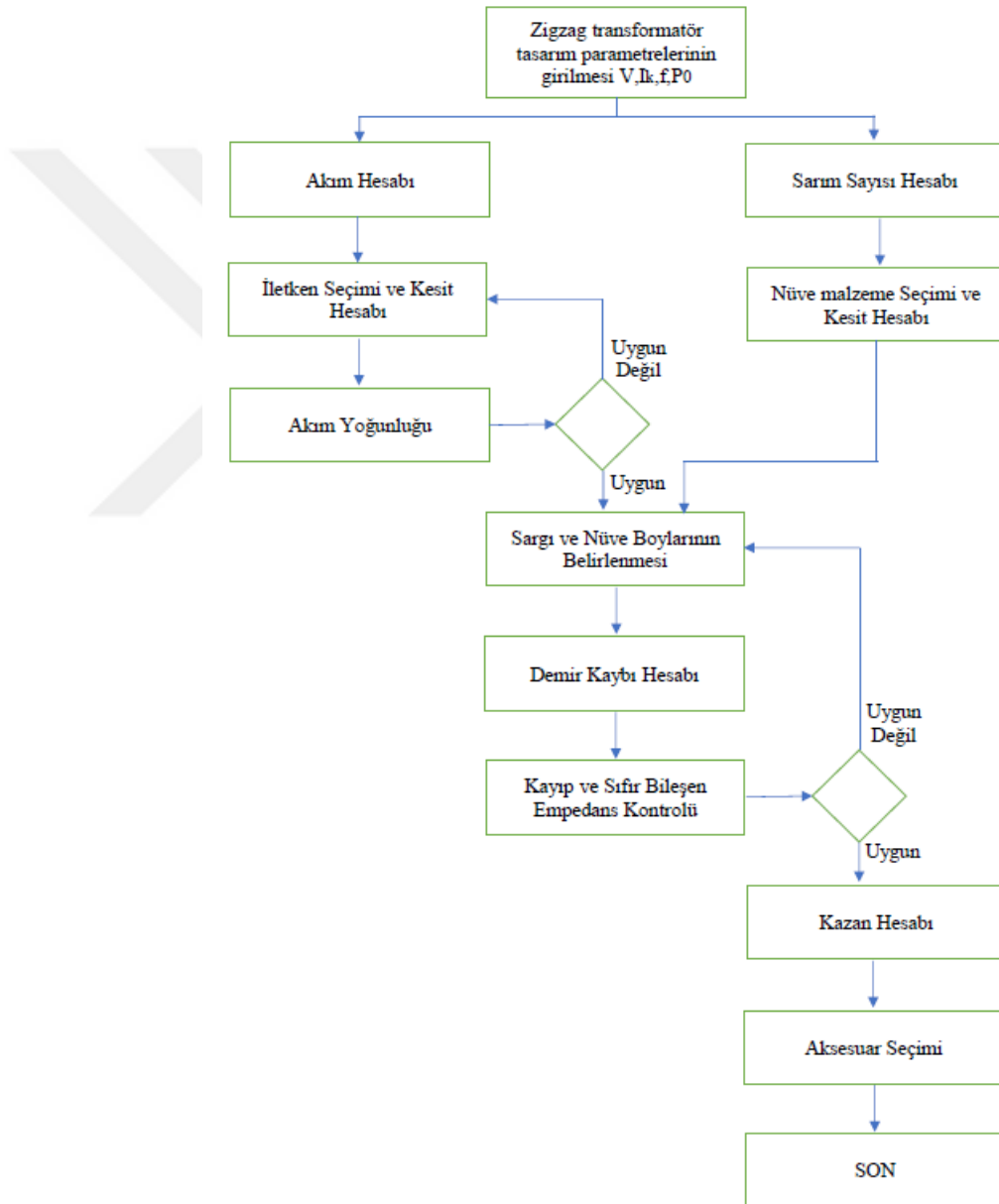
Çekirdeğin orta bacağı ile boyunduruk ve bacakların birleşme yerlerindeki akı yoğunluğunun daha yüksek olduğu, çekirdeğin köşe bölgelerinde akı yoğunluğunun daha az olduğu belirlenmiştir.

Transformatör ANSYS/Maxwell programı ile tasarlanıp analiz edilmiştir. Ayrıca yağlı tip transformatörün matematiksel model parametreleri kullanılarak optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçlarını doğrulamak amacıyla analiz edilen transformatörün test edilmesi gerekli bir işlemdir. Bu nedenle tasarlanan transformatör laboratuvar ortamında koşullarında test edilebilecek şekilde üretilmiştir.



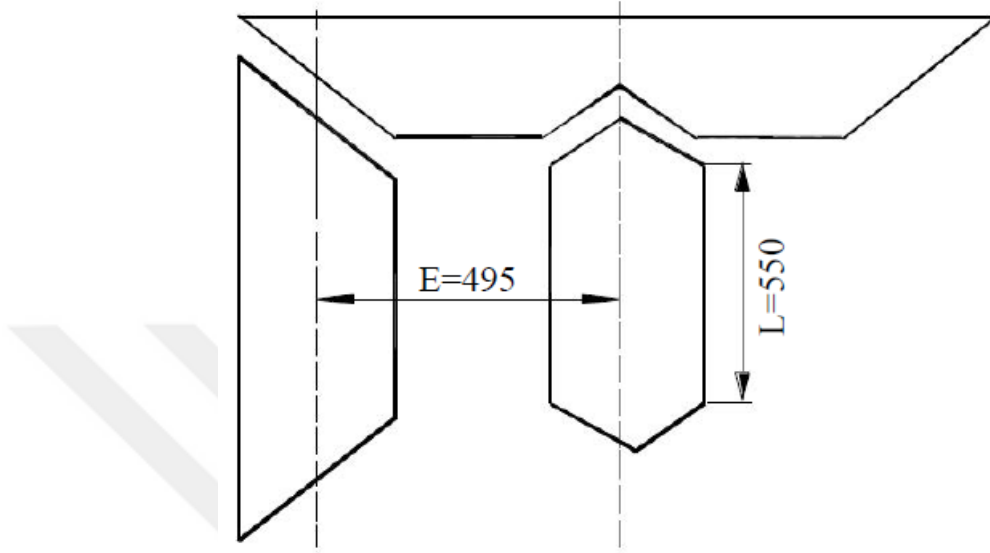
4. 34,5 KV ZİG-ZAG TOPRAKLAMA TRANSFORMATÖRÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Zig-zag transformatör 3 fazlı, 50 Hz frekans, 34,5/0,38 kV primer ve sekonder gerilimde, 1000 A kısa devre arıza akımı, 10 sn kısa devre dayanım süresinde, yağlı harici tip ve ONAN olacak şekilde tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.1’de tasarımın akış diyagramı görülmektedir.



Şekil 4.1. Zig-zag Transformatör Tasarımının Akış Diyagramı

Prototip transformatörün temel boyutları; 34,5 kV gerilim seviyesinde 1000 A kısa devre arıza akımına 10 saniye dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Transformatörün zig-zag sargılarının sarım sayısı 2500'dür. Nüvenin toplam ağırlığı 780 kg, sac kalınlığı 0,27 mm'dir. Nüve ölçüleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Nüve Ölçüleri

Zig-zag transformatör tasarımı yapılırken öncelikle gerilim, kısa devre arıza akımı ve süresi önemli parametrelerdir. Arıza akımını belirtilen sürede taşıyacak iletken kesiti iletken malzemenin cinsine göre akım yoğunluğuna dikkat edilerek seçilir. İletkenin akım yoğunluğunun düşük seçilmesi kullanılacak iletkenin ağırlığını arttıracak ve bobin boyutlarını büyütecektir. Bu durumda optimizasyonu sağlamak önemlidir. Transformatör sargıları yalıtılmış elektrolitik bakır iletkenlerden imal edilmiştir.

Tasarımdaki bir diğer aşama çekirdek kısmıdır. Nüve kesitinin doğru tespiti demir kaybı açısından önemlidir. İndüksiyon değeri sacın doyum bölgesinde olmamasına özen gösterilerek tasarım yapılmaktadır. Çekirdek kesitinin büyük seçilmesi indüksiyon değerini ve demir kaybı düşürecek fakat boyutsal olarak artışa sebep olacaktır. Dolayısıyla iletkendeki gibi çekirdek kesitinde de optimizasyonu sağlamak önemlidir. Kullanılacak malzemenin, yüksek kaliteli, soğuk haddelenmiş, kristalleri yönlendirilmiş, kaliteli silikon saclardan imal edilmesi önemlidir. Çünkü malzemenin özellikleri kesiti ve kayıpları

etkilemektedir (41). Çekirdek konstrüksiyonu fabrika üretimi saçtan yapılmış boyunduruk sıkıştırma yapıları vasıtasıyla birbirine kuvvetli şekilde sıkıştırılmıştır. Doğru seçilen nüve kesiti ile transformatörün çalışma alanına göre indüksiyon belirlendikten sonra volt/sipir oranı hesaplanmıştır.

Topraklama transformatörleri için sistemdeki arıza akımı üzerinden sıfır bileşen empedansı hesaplanır ve gerekirse sistem şartlarına uygun özel sargılar üretilir. Sıfır bileşen empedansı gerilim ve akım bilinerek belirlenebilir. Gerekli empedansı elde etmek için, sargı boyutları ve sargıların kalınlıkları transformatörün sıfır bileşen empedans değerine göre ayarlanmalıdır. İletkeni ve nüvesi belirlenmiş bir zig-zag transformatörün bir sonraki aşamada kat sargı tipi ile sargı boyutları sıfır bileşen empedansı gözetilerek hesaplanmıştır. Zig-zag sargıları Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Transformatörün Zig-zag Sargıları

Yağlı tip transformatör olduğu için atlama mesafeleri kullanılarak kazan boyutlandırması yapılmıştır. Kazan ve kapak yüksek kaliteli çelik levhalardan dayanıklı bir yapıda ve kaliteli bir işçilikle imal edilmiştir. Zig-zag sargı uçları bağlantısı Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Zig-zag Sargıları Bağlantı Uçları

Aksesuar seçimi ve korozyon önlemleri son uygulanacak işlemlerdir. Buşingler kahverengi düz porselen tipte seçilmiştir. Yağ genleşme kabı yağ doldurma kapağı, yağ boşaltma vanası, hava kurutucusu ve yağ seviye göstergesi ile donatılmıştır. Ayrıca buchholz rölesi ve termometre de bulunmaktadır. Transformatörün metal bölümleri korozyona dayanıklı malzemeden yapılmıştır. Paslanabilecek bütün parçalar boyanmıştır. Tasarım bu şekilde sonlandırılmıştır ve Şekil 4.5’te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Zig-zag Topraklam Transformatörün Nihai Görünümü

Prototip bir topraklama transformatörünün üretimi zaman almakta ve maliyet oluşturmaktadır. Bu çalışmada üretilmeden önce sayısal yöntemlerle analizi yapılarak oluşabilecek problemleri önceden görülüp zaman ve maliyet kayıplarının oluşmaması amaçlanmıştır. Bu amaçla üretilen zig-zag transformatör 34,5 kV gerilim seviyesinde 1000 A kısa devre arıza akımına 10 sn olup sıfır bileşen empedansı 57,15 ohm/faz olacak şekilde tasarlanmıştır.

4.1 Test Sonuçları Ve Karşılaştırma

Prototip transformatör analiz sonuçlarının uygunluğu doğrulanması amacı ile Astor Enerji transformatör fabrikasında test edilmiştir. Laboratuvar 2013 yılında ISO/IEC 17025 standardına göre akredite edilmiş ve ISO/IEC 17025 kalite yönetim sisteminin gerekliliklerini yerine getirerek yönetilmektedir.

Analiz edilen ve prototipi tasarlanan transformatör laboratuvarında deney ünitesi kurularak test edilir.

4.1.1 Boşta Kayıp Ölçülmesi

Alternatif akımdan dolayı iletken malzeme üzerinde manyetiksel ve elektriksel etkiler meydana gelir. Manyetik etki histerezis kaybıdır ve akımın ani değerinin değişmesine bağlı olarak amper-sarım ani değerinin dolayısıyla manyetik alan yoğunluğunun değişmesi ile oluşur. Elektrik etki ise fuko-girdap akımlarıdır yani değişken manyetik alan ile demirde indüklenen gerilimin malzemenin içerisinde akan akımlardır (42). Boştaki kayıplar sadece demir kayıplarından ileri geldiği kabul edilir.

Boştaki kayıpların ölçülmesi IEC 60076-1 standartında belirtilen usule uygun olarak yapılır. Boşta kayıplar zig-zag transformatörün performansı ile ilgili olup transformatör işletmede kaldığı sürece bu kayıplar oluşur. Bu nedenle boşta çalışma kayıpları ekonomik yönden önem arz eder.

Primer sargı şebekeye bağlı olup sekonder sargının uçlarının açık olması durumuna transformatörün boşta çalışması denir. Yani sekonder herhangi bir yüke bağlı değildir ve bu durumda sekonder devreden bir akım akmayacaktır. Sadece zig-zag topraklama transformatörlerinde sekonder sargı olmadığı ve şebekeye bağlı oldukları için kısa devre arıza akımı meydana gelinceye kadar boşta çalışırlar.

Transformatörün yüksek gerilim sargı uçları açık devre edilir. Alçak gerilim sargı uçlarına nominal gerilim 380 V uygulanır. Amper metre devreye seri bağlanır ve değer ölçülür. Deney sonucu Maxwell üç fazlı 2B ve üç fazlı 3B analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılır. Sonlu elemanlar yönteminden 2 boyutlu ile 3 boyutlu yöntemlerden elde edilen sonuçlar ve deneysel sonuç tablo 4.1’de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Boşta Kayıp Analiz ve Test Sonuçları

	Analiz Değerleri		Deneysel Sonuçları
	3-B	2-B	
Boşta Kayıp (P_0)	925 W	947 W	867 W

3B boşta analiz sonucunda elde edilen boşta kayıpların, 2B boşta analizde elde edilen kayıplara göre düşük olduğu belirlenmiştir. Analiz sonucunda elde edilen demir kaybının, prototip transformatörün deney sonucuna yakın olduğu

tespit edilmiştir. Demir kaybı açısından hata oranı 3B %6,68 iken 2B %9,22 olduğu hesaplanmıştır. 3 boyutlu üç fazlı yöntemin daha doğru sonuç verdiği görülmüştür.

4.1.2 Sıfır Bileşen Empedansı Ölçülmesi

Zig-zag transformatörün simetrik olmayan yük ve arıza durumlarında gerekli hesaplamaların yapılabilmesi için sıfır empedansının ölçülmesine ihtiyaç vardır. Simetrik olmayan üç fazlı yük vektörü, pozitif (doğru), negatif (ters) ve sıfır bileşen olarak üç bileşene sahiptir. Her üç fazda aynı yöndeki akım ve gerilimin oluşturduğu empedansa sıfır empedans denir. Transformatörlerde pozitif ve negatif empedans birbirine eşittir. Aynı zamanda yaklaşık kısa-devre empedansına da eşittir.

Sıfır bileşen empedansının ölçülmesi IEC 60076-6 standartının ilgili maddesi dikkate alınarak IEC60076-1 standardında belirtilen usule uygun olarak yapılır.

Yıldız bağlı sargılardan biri ölçülür iken diğeri kısa devre yapılır. Burada sıfır empedansı iki sargı arasındaki kaçak reaktansa (kısa devre empedansına) eşit olur. Sıfır dizi empedansını ölçmek için, zig-zag bağlı bir sargının kısa devre terminalleri ile nötr arasına bir gerilim uygulanır. Topraklanmış nötr ile zig-zag bağlantılı bir sargının sıfır dizi empedansı üç fazlı transformatörler olarak hesaplanır.

Sıfır bileşen empedansı aşağıdaki bağlantıya göre hesaplanır;

$$Z_0 = 3 \frac{U_0}{I_T} \Omega / \text{faz} \quad (4.1)$$

U_0 : Uygulanan test gerilimi

I_T : Uygulanan test akımı

Sıfır bileşen empedansı yüzde olarak da ifade edilebilir. Denklem ile hesaplanır;

$$\% z_0 = Z_0 \times \frac{I_N}{U_N} \times 100 \quad (4.2)$$

z_0 : yüzde sıfır bileşen empedansı (%)

I_N : Faz anma akımı (A)

U_N : Faz-nötr anma gerilimi (V)

Sıfır bileşen empedansı 68,81 ohm/faz olarak ölçülmüştür. Sonlu elemanlar tek fazlı 3B ve üç fazlı 3B analiz modellerinden elde edilen sonuçlar ve deneysel sonuç tablo 4.2’de sunulmuştur.

Tablo 4.2. Kaçak Reaktans Analiz ve Test Sonuçları

	Analiz Değerleri		Deneysel Sonuçları
	1 faz 3-B	3 faz 3-B	
Kaçak Reaktans%	4,15	4,23	4,21

Kaçak reaktans açısından hata oranı üç faz 3B %0,47 iken tek faz 3B %1,44 olduğu hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yöntemlerinden üç faz 3B analiz sonucunda elde edilen kaçak reaktans hesabı, tek faz 3B analiz sonucunda elde edilen kaçak reaktans hesaba göre yüksek olduğu belirlenmiştir. Üç faz 3B analiz sonucunda elde edilen kaçak reaktansın, prototip transformatörün deney sonucuna yakın olduğu tespit edilmiştir.

Üç faz 3B kaçak reaktans değerleri ile gerçek transformatörün etiket bilgileri karşılaştırıldığında, analiz sonucunda elde edilen kaçak reaktans değerinin transformatörün deney sonucuna yakın olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 250 kVA 34,5/0,38 kV 1000 A 10 sn ZNyn11 bağlantı grubuna sahip topraklama transformatörünün analizi gerçekleştirilmiştir.

Zig-zag transformatörler için önemli bir parametre olan demir kayıpları ve kaçak reaktans parametreleri sonlu elemanlar yöntemine dayalı analiz edilmiştir. Ansys Maxwell paket programında benzetim modeli tasarlanmıştır. SEY çalışmalarından elde edilen sonuçlar ile prototip transformatörün deneysel sonuçlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Transformatörün nüvesinde oluşan manyetik akı dağılımı ve boşta kayıpları 2 boyutlu üç fazlı ve 3 boyutlu üç fazlı modeller ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre 3 boyutlu üç fazlı boşta kayıp 2 boyutlu üç fazlı boşta kayıp analize göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Kaçak reaktans için sonlu elemanlar yöntemi 3 boyutlu tek faz ile 3 boyutlu üç fazlı modeller arasında kıyaslama yapılmıştır. Deneysel sonuçlara göre üç boyutlu üç fazlı modelin doğruluğunun üç boyutlu tek fazlı modele göre daha fazla olduğu görülmüştür.

Sonuçlar, zig-zag transformatörlerin simülasyon ve analize dayanan kayıp ve kaçak reaktans hesaplarının yapılması üretiminden önce oluşabilecek problemlerin önceden görülüp zaman ve maliyet kayıplarının önüne geçilebildiğini ortaya koymuştur.

6. KAYNAKLAR

(Bu tez çalışmasında Vancouver atıf sistemi kullanılmıştır.)

1. Hameed, Kassim R. Zig-Zag Grounding Transformer Modeling For Zero-Sequence Impedance Calculation Using Finite Element Method. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 2015, 63-87.
2. Schlesinger, R., & Biela, J. Comparison of analytical models of transformer leakage inductance: Accuracy versus computational effort. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 36.1: 146-156.
3. Dawood, K., Isik, F., & Komurgoz, G. Comparison of analytical method and different finite element models for the calculation of leakage inductance in zig-zag transformers. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 2022, 28.1: 16-22.
4. Salkoski, R., & Chorbev, I. Design optimization of Earthing Transformers based on Differential Evolution Algorithms. 2020.
5. Peter, G., Stonier, A. A., Sherine, A., & Iderus, S. A review about Zig Zag and Double Zig Zag connections in Transformer. In: 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). IEEE, 2022. p. 1701-1704. "Uzaktan Eğitim" Bakan Selçuk'un Verdiği Dersle Başladı. [Internet]. [cited 2020 Oct 27]. Available from: <https://www.meb.gov.tr/uzaktan-egitim-bakan-selcukun-verdigi-dersle-basladi/haber/20578/tr>
6. Shen, M., Ingratta, L., & Roberts, G. Grounding transformer application, modeling, and simulation. In: 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008. p. 1-8.
7. Hu, C., Zeng, X., Tao, J., & Wang, Y. Fault analysis of a grounding transformer. In: Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control. IEEE, 2010. p. 579-584.
8. Ropp, M., Cui, Y., Kahrobaee, M., Schutz, D., & Mouw, C. On the Sizing and Benefits of Grounding Transformers with Distribution-Connected Inverters. In: 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). IEEE, 2018. p. 1-5.
9. Corzo, S. M., Lara, N. R., & Gómez, S. B. B. Grounded Wye-Grounded Zig-zag Transformer Connection Modelling in Phase Coordinates for Steady-State Studies. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2015, 143-152.
10. Jou, H. L., Wu, J. C., Wu, K. D., Chiang, W. J., & Chen, Y. H. Analysis of zig-zag transformer applying in the three-phase four-wire distribution power system. *IEEE transactions on power delivery*, 2005, 20.2: 1168-1173.
11. Song, Q., Yin, Z., Xue, J., & Zhou, L. Zero-sequence harmonics current minimization using zero-blocking reactor and Zig-Zag transformer. In: 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. IEEE, 2008. p. 1758-1764.
12. Khera, P. P Application of zig-zag transformers for reducing harmonics in the neutral conductor of low voltage distribution system. In: Conference record of the 1990 IEEE industry applications society annual meeting. IEEE, 1990. p. 1092 vol. 2.
13. Dawood, K., Alboyaci, B., Cinar, M. A., & Sonmez, O. A new method for the calculation of leakage reactance in power transformers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2017, 12.5: 1883-1890.

14. Shaikh, S. K., Mulla, A. M., Bagwan, S. U., & Makandar, Y. A. Analysis and application of zig-zag transformer in distribution system for mitigation of triplen harmonics. In: 2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). IEEE, 2020. p. 94-98.
15. Ahmad, A., Omar, R., & Sulaiman, M. Application of zig-zag transformers to mitigate triplen harmonics in 3 phase 4 wire electrical distribution system. In: 2006 4th Student Conference on Research and Development. IEEE, 2006. p. 266-269.
16. Beverly, L., Hance, R., Kristalinski, A., & Visser, A. Comments about the use of a Zig-Zag transformer to reduce the neutral current created by unbalanced nonlinear loads. Fermi National Accelerator Lab., 1993.
17. Karthi, K., Radhakrishnan, R., Baskaran, J. M., & Titus, L. S. Role of zig-zag transformer on neutral current reduction in three phase four wire power distribution system. In: 2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT). IEEE, 2017. p. 138-141.
18. Kumar, S. R., Surendhar, S., Negi, A., & Raja, P. Zig Zag Transformer performance analysis on harmonic reduction in distribution load. In: International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE). IEEE, 2011. p. 107-112.
19. Ropp, M., Schutz, D., & Mouw, C. Sizing of and Ground Potential Rise Calculations for Grounding Transformers for Photovoltaic Plants. In: proceedings of the Western Protective Relay Conference. 2014.
20. Detjen, E. R., & Shah, K. R. Grounding transformer applications and associated protection schemes. IEEE Transactions on Industry applications, 1992, 28.4: 788-796.
21. Eduful, G., & Mensah, G. Sizing and selection of grounding transformers-decision criteria. In: 2011 World Congress on Sustainable Technologies (WCST). IEEE, 2011. p. 45-49.
22. Dashti, N., Gökçe, C., Başağaç, Z., Öner, H., Yener, U., Süslüoğlu, B., ... & Özçelik, O. Modelling and Analysis of Delta-connected Power Transformers Grounded Using Zig-Zag Transformer. In: 2022 4th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM). IEEE, 2022. p. 406-413.
23. Short, T. A. Electric power distribution handbook. CRC press, 2003.
24. Heathcote, M. J. The J & P transformer book: a practical technology of the power transformer. Newnes, 1998.
25. Gross, E. T. B., & Rao, K. J. Analysis of the Delta-Grounded Transformer [includes discussion]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, 1953, 72.4: 817-826.
26. Khaparde, S. A., & Kulkarni, S. V. Transformer Engineering: Design and Practice. Taylor & Francis Limited, 2004.
27. Abdullah, M. F., Hamid, N. H., Baharudin, Z., Razak, M. H. S. A., & Hisham, M. I. B. The influence of cable capacitance, generator neutral grounding and zig-zag transformer to third harmonic produced by synchronous generator. In: 2012 10th International Power & Energy Conference (IPEC). IEEE, 2012. p. 380-385.
28. Bernardić, A., & Anane, Z. Neutral Point Connections In Mv Power Networks With Grounding Zig-zag Transformers—Analysis And Simulations. Journal of Energy: Energija, 2019, 68.1: 0-0.
29. Kulkarni, S. V., & Khaparde, S. A. Transformer engineering: design, technology, and diagnostics. CRC press, 2017.
30. El-Sherif, N., & Kennedy, S. P. A design guide to neutral grounding of industrial power

systems: The pros and cons of various methods. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2018, 25.1: 25-36.

31. Song, J. Actual measurement and analysis of power transformer dynamic stability diagnosis by low voltage reactance method based on short circuit test check. In: 2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS). IEEE, 2020. p. 104-108.
32. Dawood, K., Kömürgöz, G., & Işık, F. Evaluation of the Electromagnetic Forces in the Zigzag Transformer using a Computational Method. In: 2022 2nd International Conference on Digital Futures and Transformative Technologies (ICoDT2). IEEE, 2022. p. 1-6.
33. Jamali, S., Ardebili, M., & Abbaszadeh, K. Calculation of short circuit reactance and electromagnetic forces in three phase transformer by finite element method. In: 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2005. p. 1725-1730.
34. Castaneda Hernandez, R. L., Diaz Florez, G. A., Perez Gelves, J. J., & Mombello, E. E. Analytic formulation for the calculation of leakage reactance in wound-core transformers. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2021, 65.2: 197-213.
35. Kersting, W. H., & Carr, W. Grounded wye-delta transformer bank backfeed short-circuit currents. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 53.1: 65-70.
36. Jaraczewski, M., & Sobczyk, T. Leakage inductances of transformers at arbitrarily located windings. *Energies*, 2020, 13.23: 6464.
37. Salkoski, R., & Chorbev, I. Design optimization of Earthing Transformers based on Differential Evolution Algorithms. 2020.
38. Arand, S. J., & Abbaszadeh, K. The study of magnetic flux shunts effects on the leakage reactance of transformers via FEM. 2010.
39. Naderian, J. A., FAEYZ, J., & Mohseni, H. A fast method for calculation of transformers leakage reactance using energy technique. 2003.
40. Opačak, H., Čalić, T., Jergović, S., & Elektroistra-Croatia, H. E. P. The influence of grounding transformer on ground fault current in mv networks. In: The 24th International Conference on Electricity Distribution. 2017.
41. Tsili, M., Kladas, A., Georgilakis, P., Souflaris, A., & Paparigas, D. Numerical techniques for design and modeling of distribution transformers. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 161.1-2: 320-326.
42. Sherwood, H. Practical fault simulation on an earthing transformer using SFRA: A unique analysis approach towards simplifying SFRA results to assist with deformation diagnosis in Earthing Transformers. 2017. PhD Thesis. Murdoch University.
43. Hameed, K. R. Finite element calculation of leakage reactance in distribution transformer wound core type using energy method. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 2012, 16.3: 297-320.