

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TRANSFORMATÖRLERİN KAZAN DUVARLARINDA
MEYDANA GELEN KAYIPLARIN AZALTILMASI İÇİN EN
UYGUN ŞÖNT ELEMAN BOYUTLARININ BELİRLENMESİ

SERENAY ÇÜRÜKOVA KALE

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

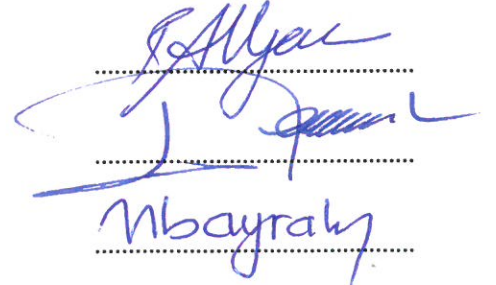
**TRANSFORMATÖRLERİN KAZAN DUVARLARINDA
MEYDANA GELEN KAYIPLARIN AZALTILMASI İÇİN EN
UYGUN ŞÖNT ELEMAN BOYUTLARININ BELİRLENMESİ**

SERENAY ÇÜRÜKOVA KALE

Doç.Dr. Bora ALBOYACI
Danışman, Kocaeli Üniv.

Yrd.Doç.Dr. Mehmet Aytaç ÇINAR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Mehmet BAYRAK
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.


The image shows three handwritten signatures in blue ink, each written over a horizontal dotted line. The signatures are stylized and appear to be the names of the jury members mentioned in the text.

Tezin Savunulduğu Tarih: 22.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Transformatörler enerji dağıtım şebekesinde önemli rol üstlenen elemanlardır. %99'a varan verim düzeylerinde çalışmalarına karşın, ulaşılan yüksek güç değerleri ve dağıtım şebekesinde mevcut olan yüksek transformatör sayısı sebebi ile transformatörlerde kayıpların azaltılması önemini koruyan bir araştırma konusudur. Transformatörlerde meydana gelen toplam kayıpları oluşturan bileşenlerden biri transformatörün metal yapısal elemanlarında ortaya çıkan kayıplardır. Bu kayıplar özellikle, yağlı tip transformatörlerdeki kazan duvarları, kazan kapağı, nüve tutucu elemanlar ve diğer metal yapısal elemanlar üzerinde meydana gelmektedirler. Bu kayıplar gerek sargıların çevresindeki kaçak akımlar gerekse kazan duvarlarına yakın konumda bulunan ve yüksek akım taşıyan iletkenler sebebi ile transformatörün yapısal metal parçaları üzerinde oluşmakta ve bu parçalarda aşırı ısınmaya yol açmaktadır.

Bu çalışmada, kazan duvarları üzerinde meydana gelen bu kayıpları azaltmak amacıyla kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilen şönt elemanların en uygun boyutlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda özel olarak tasarlanan bir transformatör için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiş olup, analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 7140894 no'lu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Prototip transformatörün imalatında ve deneysel çalışmalarda sağladığı imkanlardan dolayı Sönmez Transformatör San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmamda değerli görüşleriyle beni yönlendiren ve yardımcı olan başta tez danışmanım Doç.Dr. Bora ALBOYACI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteklerini hissettiğim, hep yanımda olan sevgili aileme teşekkür ederim.

Benimle hayatı paylaşan, daha iyi ve başarılı işler yapmam için beni yüreklendiren sevgili eşim Erman KALE'ye teşekkür ederim.

Haziran - 2017

Serenay ÇÜRÜKOVA KALE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
GİRİŞ	1
1. TRANSFORMATÖRLER	6
1.1. Giriş.....	6
1.2. Transformatörlerin Çalışma Mantığı	6
1.3. Transformatörlerin Sınıflandırılması	8
1.3.1. Sarım tiplerine göre transformatörler.....	8
1.3.1.1. Kat sargı.....	8
1.3.1.2. Devrik sargı	10
1.3.2. Soğutma şekillerine göre transformatörler.....	11
1.3.2.1. Kuru tip transformatörler.....	11
1.3.2.2. Yağlı tip transformatörler	12
1.3.3. Transformatörlerin bağlantı gruplarına göre ayrılması.....	16
2. TRANSFORMATÖRLERDE KAYIPLARIN İNCELENMESİ	20
2.1. Boşta Çalışma Kayıpları	21
2.2. Yükte Çalışma Kayıpları.....	26
2.2.1. Bakır kayıpları	27
2.2.2. Transformatörün kaçak akı kayıpları	28
3. TRANSFORMATÖR TASARIM PARAMETRELERİ	31
4. TRANSFORMATÖR BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	37
4.1. Giriş.....	37
4.1.1. Transformatör geometrisinin çizimi	37
4.1.2. Transformatör bileşenlerinin adlandırılması ve malzeme tanımlanması	38
4.1.3. Sınır değerler ve uyarma kaynaklarının belirlenmesi	39
4.1.4. Çözüm	40
4.1.5. Sonuç izleme.....	40
4.2. Analizler.....	41
4.2.1. Boşta çalışma analizi.....	41
4.2.2. Kısa devre çalışma analizi	42
4.3. ANSYS Maxwell Yazılımı ile Şönt Elemanların Kaçak Akılara Etkisinin İncelenmesi.....	44
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	51
5.1. Giriş.....	51
5.2. Test ve Ölçümler	53
5.2.1. Rutin testler.....	53
5.2.2. Tip testleri	55

6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	58
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	61
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Bir Fazlı Bir Transformatörün Nüvesi, Sargı ve Akı Gösterimi.....	7
Şekil 1.2. Kat Sargı Gösterimi	9
Şekil 1.3. Kat Sargı Yöntemi ile Sarılan Bobin Örneği	9
Şekil 1.4. Galet Sargı Örneği	10
Şekil 1.5. Devrik Sargı Gösterimi	10
Şekil 1.6. Devrik Sargı ile Sarılmış Bobin Örneği.....	11
Şekil 1.7. Kuru Tip Transformatör.....	12
Şekil 1.8. Genleşme Depolu Transformatör.....	13
Şekil 1.9. Hermetik Transformatör	14
Şekil 1.10. Yağlı Transformatörün Zorlanmış Soğutması	15
Şekil 1.11. OFWF Soğutma Örneği	16
Şekil 1.12. (0) ve (5) Bağlantı Grupları	18
Şekil 1.13. (6) ve (11) Bağlantı Grupları	19
Şekil 2.1. Transformatör Boşta Çalışma Durumu.....	21
Şekil 2.2. Sadece Çekirdek Kayıpları Olan İdeal Transformatörün Yüksüz Akımı.....	22
Şekil 2.3. Demir Kayıplarının Gerilime Göre Değişimi	25
Şekil 2.4. Demir Kayıplarının Gerilimin Karesine Göre Değişimi.....	25
Şekil 2.5. Transformatör Yükte Çalışma Durumu	26
Şekil 3.1. Transformatör Tasarımının Basit Akış Şekli	33
Şekil 3.2. Alçak Gerilim ve Yüksek Gerilim Sargıları	35
Şekil 3.3. Üç Faza Ait Sargılar ve Bağlantı Uçları	36
Şekil 3.4. Nüve Sargılar ve Devre Tutucuların Yandan Görünümü	36
Şekil 4.1. Referans Transformatörün Üç Boyutlu CAD Çizimi	38
Şekil 4.2. M5 Malzeme için Tanımlanan B-H Eğrisi.....	39
Şekil 4.3. M5 Malzeme için Tanımlanan B-P Eğrisi	39
Şekil 4.4. Referans Transformatör için Oluşturulan Sonlu Elemanlar Yüzeyi (Mesh).....	40
Şekil 4.5. Boşta Çalışma - Primer Sargı Gerilimleri.....	41
Şekil 4.6. Nüvedeki Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı	42
Şekil 4.7. Boşta Çalışma – Nüve Kayıpları	42
Şekil 4.8. Kısa Devre Çalışma – Primer Sargı Akımları	43
Şekil 4.9. Kısa Devre Çalışma – Sekonder Sargı Akımları	43
Şekil 4.10. Yarı Modele Ait Sonlu Eleman Ağ Yapısı	44
Şekil 4.11. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Kazanın Uzun Kenar Uzunluğuna Bağlı Değişimi.....	46
Şekil 4.12. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Kazanın Kısa Kenar Uzunluğuna Bağlı Değişimi.....	46
Şekil 4.13. Kazan Duvarlarının İç Yüzeyinde Gözlenen Güç Kayıplarının Dağılımı.....	47
Şekil 4.14. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Yüksekliğine Bağlı Değişimi	48

Şekil 4.15. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Genişliğine Bağlı Değişimi	49
Şekil 4.16. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Kalınlığına Bağlı Değişimi	49
Şekil 5.1. Test-1’de Kullanılan Şönt Elemanların Kazan İçerisindeki Yerleşimi	52
Şekil 5.2. Test-3’te Kullanılan Şönt Elemanların Kazan İçerisindeki Yerleşimi	52
Şekil 5.3. Prototip Transformatör Test Raporu	54

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Transformatörlerde Soğutucu Ortam ve Soğutma Şekillerinin Simgeleri.....	16
Tablo 3.1. Prototip Transformatörün Temel Boyutları	35
Tablo 4.1. Uzun Kenar Uzunluğuna Bağlı Olarak Kazan Kayıpları.....	45
Tablo 4.2. Kısa Kenar Uzunluğuna Bağlı Olarak Kazan Kayıpları	46
Tablo 5.1. Farklı Şönt Uygulamaları İçin Elde Edilen Kısa Devre Kayıplarının Karşılaştırılması.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α	:Transformatörün Dönüştürme Oranı
B	:Akı Yoğunluğu, (T)
B-H	:B akı yoğunluğu, H manyetik alan şiddeti
B-P	:B akı yoğunluğu, P malzemenin kg başına güç kaybı
Co ₂	:Karbondioksit
f	:Frekans, (Hz)
I _o	:Boşta Çalışma Akımı, (A)
I _d	:Demir Kaybı Bileşen Akımı, (A)
I _{μ}	:Mıknatıslama Akımı, (A)
K _h	:Histerezis Kayıp Katsayısı
kV	:Gerilim Birimi, (Kilo Volt)
kVA	:Güç Birimi, (Kilo Volt Amper)
m	:Metre
mm	:Milimetre
MVA	:Güç Birimi, (Mega Volt Amper)
N	:Transformatörün Sarım Sayısı
P _{S/L}	:Stray Losses / Load losses – Kaçak Kayıpların Yük Kayıplarına Oranı
Twh	:Terawatt saat
V, U	:Gerilim, (Volt)
W	:Güç Birimi, (Watt)
\$	:Dolar Birimi
Φ	:Akı, (Wb)
θ_0	:Akım Gerilim Arasındaki Açık, (°)

Kısaltmalar

3D	:Üç Boyut
AC	:Alternative Current (Alternatif Akım)
AG	:Alçak Gerilim
CAD	:Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
DC	:Direct Current (Doğru Akım)
Emk	:Elektromotor Kuvvet
EN	:European Norm (Avrupa Normu)
FEA	:Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM	:Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Metodu)
IEC	:International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
Mmf	:Magneto Motor Force (Manyetomotor Kuvvet)
Prb	:Yalıtkan Malzeme Presbant
Ref.	:Referans
YG	:Yüksek Gerilim

TRANSFORMATÖRLERİN KAZAN DUVARLARINDA MEYDANA GELEN KAYIPLARIN AZALTILMASI İÇİN EN UYGUN ŞÖNT ELEMAN BOYUTLARININ BELİRLENMESİ

ÖZET

Yağlı tip transformatörlerdeki kazan ve diğer metal yapısal elemanlar üzerinde meydana gelen güç kayıpları, toplam kayıpların azaltılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalarda göz önünde tutulması gereken etkenlerden biridir. Bu kayıplar sargıların çevresindeki kaçak akılar sebebiyle transformatörün yapısal metal parçaları üzerinde oluşmakta ve bu parçalarda aşırı ısınmaya yol açmaktadır. Bu çalışmada, kazan duvarları üzerinde meydana gelen bu kayıpları azaltmak amacıyla kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilen şönt elemanların en uygun boyutlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda özel olarak tasarlanan bir transformatör için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiş olup, analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilecek en uygun şönt boyutları transformatörün sargı boyutlarına bağlı olarak ifade edilmektedir. Belirlenen boyutlardaki şönt elemanların kullanımı ile kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların %91,43 toplam kısa devre kayıplarının ise %14,9 oranında azaltılması mümkün olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güç Transformatörleri, Kazan Kayıpları, Manyetik Analiz, Şönt Eleman, Verimlilik.

CALCULATION OF OPTIMUM DIMENSIONS OF MAGNETIC SHUNT ELEMENTS TO REDUCE STRAY LOSSES ON TRANSFORMER TANK WALLS

ABSTRACT

Power losses occurring on tanks and other metal structural elements in oil type transformers are one of the factor to be considered in the work carried out to reduce total losses. These losses occur on the structural metal parts of the transformer due to leakage currents around the windings and cause overheating in these parts. In this study, it is aimed to determine the most appropriate dimensions of the shunt elements placed on the inner surface of the tank walls in order to reduce these losses on the tank walls. Electromagnetic analyzes were carried out using a finite element method for a specially designed transformer and the results of the analysis were verified by experimental studies. With the results obtained, the most suitable shunt dimensions to be placed on the inner surface of the tank walls are expressed in relation to the winding dimensions of the transformer. With the use of shunt elements in specified dimensions, it is possible to reduce the losses occurring in tank walls by 91,43% and the total short-circuit losses by 14,9%.

Keywords: Power Transformers, Tank Losses, Magnetic Analysis, Shunt Element, Efficiency.

GİRİŞ

Elektrik enerjisi üretildiği yerden çok uzak bölgelere kolayca taşınabilmektedir. Bu taşınmanın verimli bir şekilde yapılabilmesi için gerilimin yeteri kadar büyük olması gerekmektedir. Alternatif akımlı elektrik enerjisinin gerilimi transformatörler yardımıyla yükseltip düşürülmektedir. Alternatif akımın gücünü ve frekansını değiştirmeden alçaltmaya veya yükseltmeye yarayan bir elektrik makinesi olarak transformatörlerin, elektrik enerjisinin alternatif akımda taşınmasında önemli bir yeri vardır.

Global anlamda, küresel ısınma ve buna bağlı olarak daha yeşil bir dünya, daha az enerji kullanımı gibi tüm dünyayı ilgilendiren kavramlar, günümüzde enerjinin daha verimli ve daha dikkatli kullanılması ile bilincin giderek daha üst düzeye taşınmasını sağlamaktadır. Bu bilincin artmasıyla, elektrik iletim ve dağıtım şebekeleri ve transformatörlerde de kayıpların azaltılması yönünde çalışmalar hızlanmıştır. Ayrıca, maddi bakımdan bakıldığında, transformatörler devredeyken fazladan oluşan her birim kayıp, fazladan ödenen bir fatura bedeli demektir. Transformatörlerin çalışma verimleri oldukça yüksektir. Yine de ulaşılan yüksek güç değerleri ve enerji şebekesinde var olan toplam transformatör sayısı göz önünde tutulduğunda, transformatör kayıplarının azaltılması amacıyla yapılan çalışmalar önemini korumaktadır.

Düşük kayıplı transformatör üretimi için öncelikli çalışmalar bilinen teknik kayıpları yani bakır ve demir kayıplarını azaltma yönünde olmuştur. Ancak transformatörde bu kayıplara ilaveten, yapısal metal parçalara sirayet eden ve ciddi ısınmalarla kendilerini gösteren kaçak kayıplarda mevcuttur. Bu kayıpların azaltılması, düşük kayıplı ve rekabetçi bir transformatör için üzerine gidilmesi gereken çok önemli bir konudur.

Literatürde, kazan duvarlarında oluşacak kayıpların matematiksel olarak modellenmesine, iki veya üç boyutlu çalışmalar yardımıyla özel güç transformatörlerinin analiz edilmesi ve kazan duvarlarında oluşan kayıpların belirlenmesine ve bu kayıpların en aza indirilmesi için uygulanması öngörülen yöntemlerin etkinliğine yönelik çalışmalar bulunmaktadır.

Yapısal bileşenlerdeki toplam kayıpların büyük kısmının kazan üzerinde meydana gelmesi sebebiyle, literatürdeki mevcut çalışmaların çoğunda bu bileşenin incelendiği görülmektedir. Kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların azaltılması amacıyla manyetik olmayan malzemeler kullanılarak ekranlama yapılması veya yine manyetik olmayan malzemelerden imal edilen şönt elemanların kullanılması yöntemleri yaygın olarak uygulanmaktadır.

50 kVA gücündeki bir transformatörde kazan duvarlarının iç yüzeyine alüminyum malzeme kullanılarak gerçekleştirilen ekranlama uygulanmasının kazan kayıplarında %50 azalmaya neden olduğu ifade edilmektedir [1].

25 MVA 66/11 KV bir transformatörde 3D sonlu elemanlar analizi ile transformatör ile kazan arasındaki uzaklık, kazan duvarında kullanılacak bakır tabakanın kalınlığı ve bunların toplam kazan kayıplarına etkisi incelenmektedir. Gerçekleştirilen kazan açıklıklarının durumlarına ve miktarlarına göre kayıp değerindeki yeni eldeler karşılaştırılmaktadır. Bu çalışmada standart transformatör kaybını düşürmek için uygulanacak en etkili yöntemin bakır tabaka koymak olduğu anlaşılmaktadır [2].

Güç trafolarının ekranlanması kaçak akıları ve bölgesel ısınmaları önlemektedir. Bir diğer çalışmada buna paralel olarak ekranlama işleminin verimine etki eden parametrelerin analiz edilmesi ve en verimli ve düşük maliyetli çözümlerin belirlenmesi hedeflenmektedir. 300 MVA bir trafo üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda en verimli ekranlamanın tek bir parametreye bağlı olmadığı, sargıların geometrisine, sargı ve kazan arası mesafeye ve bunlarla ilgili olan akı dağılımına bağlı olduğu görülmüştür [3].

Yapılan çalışmalarda transformatör üzerinde diğer kayıpların meydana geldiği diğer yapısal parçalara yönelik olarak azaltıcı yönde önlemler alındığı da görülmektedir.

Bu parçalardan biri olan nüve tutucu elemanlarda meydana gelen kayıplar uygun boyut ve şekilde alüminyum malzeme kullanılarak azaltılmaktadır [4]. Özellikle büyük güçlü transformatörlerde, kaçak akının nüve tutucular üzerinde meydana getirdiği kayıplar, sargılar ile nüve tutucular arasına yerleştirilen manyetik şönt elemanlar ile engellenebilmektedir [5]. Kazan üzerinde ise alçak gerilim iletkenlerinin bağlantı bölgelerinin manyetik olmayan malzemeden imal edilmesi ile bu kısımlardaki kayıpların ve bölgesel olarak meydana gelen yüksek sıcaklığın azaltılması sağlanmaktadır [6].

Bir çalışmada, güç transformatörünün devre tutucularındaki ve ekranlanmamış kazan duvarlarındaki eddy akımı kayıpları 3D sonlu elemanlar analizi ile analiz edilmektedir. Kazan ve devre tutucuların permeabilitesinin eddy akımı kayıplarını büyük oranda etkilediği görülmektedir. Eddy kayıpları nüve ve bobinin geometrisi, trafonun gerilim sınıfı ve kazan, devre tutucu malzemesinin cinsine bağlı olarak ifade edilmektedir. Malzemelerinin geçirgenliğinin yüksek tanımlanmış olması kazan ve devre tutucu yüzeylerindeki kaçak akıları azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Bu çalışma 40 MVA bir güç transformatörünün kazan duvarlarında ve devre tutucularında meydana gelen kaçak akıların malzeme cinsine bağlı analizlerini sunmaktadır [7].

Bir araştırmada ise, alüminyum malzeme kullanılarak ekranlama yapılması ve bunun 500 kVA'lık bir transformatördeki etkisi incelenmektedir. Deneysel çalışmada alüminyum folyo malzeme trafo kazanına uygulanmakta ve 10mm kalınlığındaki bir ekranlama ile eddy kayıplarının %20,9 oranında azaldığı belirtilmektedir.

Aynı çalışmada; 1500 kVA'ya kadar transformatörlerde kaçak akılardan kaynaklı kayıpların yük kaybına oranı;

$$P_{S/L}=0,0393 (kVA)^{0,2056}$$

Olarak formüle edilmektedir.

Söz konusu çalışmada kazan kayıplarını azaltmak için kullanılacak malzemenin kalınlığının; bakır için 10-12 mm, alüminyum için 8-10 mm olması gerektiği belirtilmektedir.

10 mm folyo ile kaplanması durumunda toplam alüminyum maliyeti 311,70 \$, (transformatör malzeme maliyetinin %11,56'sı kadar) olarak verilmektedir [8].

Başka bir çalışmada, Transformatör kazan duvarına; alüminyum levhadan ekran ve manyetik sac dilimlerden şönt eleman yerleştirilmesi durumları için metal kısımlarda oluşan eddy akımı kayıpları karşılaştırılmaktadır. Manyetik sac dilimlerden şönt eleman yerleştirmenin kaybı daha çok düşürdüğü sonucuna varılmaktadır [9].

Buraya kadar bahsedilen çözümleri destekler fakat farklı bir açıdan yaklaşan bir başka çalışmada ise, 44/58/73 MVA, 230/34,5 kV, ONAN/ONAF/ONAF güç transformatörünün alçak gerilim bağlantı iletkenleri yakınındaki kazan duvarında mevcut ısınma problemine karşı bir çalışma yapılmaktadır. Bağlantı iletkenleri ile kazan duvarı arasında bariyer olacak şekilde bir eleman yerleştirerek, bu bariyerlerdeki eddy akımlarının yarattığı manyetik alanların bağlantı iletkenlerinden gelen kaçak akıları yok ettiğini, bu amaçla da alüminyum veya bakır malzeme kullanılabileceğini ifade edilmektedir. Bakır ile kıyaslandığında maliyet avantajı nedeniyle alüminyum kullanılmaktadır. Deneyler transformatörün 82 MVA (aşırı) güçte ONAF çalışması durumu için gerçekleştirilmektedir.

İlk önce, kazanın alçak gerilim tarafında 170 derecelik lokal sıcaklık ölçülmektedir. Ayrıca gaz oluşumları gözlenmektedir. Sonra, Kazan duvarına 25,4 mm uzaklığa 2 m yükseklikte, 609,6 mm / 762 mm genişlikte ve 6,35 mm kalınlıkta bariyerler konulmaktadır. İlave fan ve radyatörler yerleştirilmektedir. Sıcaklık 96,4 derece olarak ölçülmektedir. Başlangıç sıcaklığına göre %43,3 azalma görülmektedir. Bu çalışmada alçak gerilim bağlantıları ile kazan duvarı arasındaki mesafe 101,6 mm olarak tasarlanmıştır [10].

Gerçekleştirilen çalışmalarda bu kayıpların, transformatörün akım, gerilim, kısa devre gerilimi gibi elektriksel parametrelerinin yanı sıra, kazan malzemesinin cinsi, kalınlığı, kazan boyutları ve transformatör ile kazan duvarları arasındaki mesafe gibi mekanik parametrelerle de doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir. Oluşan kaçak akıyı yönlendirmek ve transformatörün kazanı üzerine sirayet ederek kayıplara neden olmasını engellemek amacıyla, transformatör kazanının iç yüzeyine ekranlama yapılması veya kazanın içerisinde manyetik malzemeden imal edilen ve kaçak akıyı toplamayı amaçlayan şönt elemanlar kullanılması yöntemleri tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların azaltılması amacıyla şönt eleman kullanılması yöntemi incelenmektedir. Tasarım aşamasında bir transformatör için en uygun şönt eleman boyutlarının belirlenmesi amacıyla çok sayıda elektromanyetik analiz çalışmasının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Bu sürecin uzun zaman alması sebebiyle transformatör üreticileri kullanılacak şönt elemanların boyutlarını önceki uygulamalarından elde edilen tecrübeler ile tahmini olarak öngörmektedir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar çoğu zaman elde edilebilecek en uygun durumdan çok uzak kalmaktadır.

Bu çalışma ile şönt elemanların kazan kayıplarını tatmin edici düzeyde azaltacak boyutlarına yönelik bir boyutlandırma ifadesinin elde edilmesi hedeflenmektedir. Çalışmada yoğun şekilde üç boyutlu sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiş olup, önem taşıyan bazı analizlere ait sonuçlar deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

İlk olarak transformatör kazanının boyutlarının diğer kayıplar üzerine etkisi incelenmiş olup ardından şönt elemanların boyutlandırmasına ilişkin değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Genelleme amacıyla varılan sonuçlara göre belirlenen şönt eleman boyutları kazan kayıplarını transformatördeki kaçak akının meydana getirmesi sebebiyle sargı boyutlarına bağlı olarak öngörülerek ifade edilmektedir.

1. TRANSFORMATÖRLER

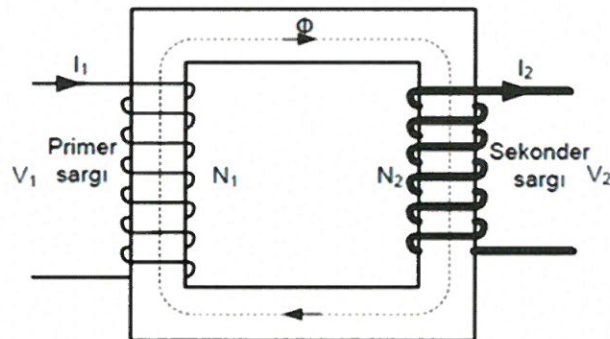
1.1. Giriş

Transformatör çağdaş elektrik güç sistemlerinin ayrılmaz bir parçasıdır. Kısaca işlevi, düşük akımlı yüksek gerilimli elektriği, hemen hiç enerji kaybı olmaksızın yüksek akımlı düşük gerilimli duruma (veya tam tersi) dönüştürmektir. Elektrik güç sistemlerindeki rolüne ek olarak, transformatörler elektrikle çalışan birçok aracın tamamlayıcı elemanıdır. Pek çok kullanım yerine sahip transformatörlerin boyutları bezelye iriliğinde küçük olabildiği gibi, 500 ton ağırlığında olanları da vardır. Transformatörün temel işlevini 1831'de elektrik alanında ilk çalışmaları yapmakta olan İngiliz fizikçi Michael Faraday bulmuştur. Elli yıl kadar sonra da çağdaş örneğinin gerekli tüm elemanlarına sahip, kullanışlı transformatör ortaya çıkmıştır. Yüzyılın sonlarında değişken akımlı (AC) güç sistemleri tüm dünyada kullanılmaya başlamış ve transformatörler elektrik iletim ve dağıtımında anahtar rolünü üstlenmişlerdir. Bu açıdan bakıldığında transformatörler 100 yıllık bir tarihsel gelişmeye sahiptir. Bu süre içinde transformatörler sürekli geliştirmiş ve yenilenmiş; fakat temel transformatör tasarım ve uygulama mantığı esasen aynen süregelmiştir. Son elli yıldaki çalışmalar, transformatörde kullanılabilecek çeşitli manyetik malzemeler ve üretim teknikleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Günümüzde ise çalışmalar, transformatörün çalışma koşullarının iyileştirilmesi, geçici durumlardaki tepkisi, oluşabilecek hasarlar ve hasar analizi, tasarım hızını arttırmak, transformatör verimini arttırmak, maliyetini düşürmek vb. konular üzerinde yoğunlaşmaktadır [11].

1.2. Transformatörlerin Çalışma Mantığı

Transformatörlerin yapısı bir manyetik nüve ve nüvenin üzerine yalıtılmış iletkenlerle sarılan sargılardan oluşmaktadır. Basit bir transformatörde iki adet sargı bulunmaktadır. Bunlar primer ve sekonder sargılardır. Primer sargıya birincil sargı, sekonder sargıya da ikincil sargı denilmektedir. Primer sargı transformatörün giriş sargısıdır ve şebekeye bağlanır. Sekonder sargısı da çıkış sargısıdır ve yüke bağlanır.

Lenz kanununa göre bir iletkende bir gerilim endüklenmesi için iletkenin değişken bir manyetik alan içinde bulunması veya sabit bir manyetik alan içinde hareket etmesi gerekmektedir. Transformatörde hareket eden parça olmadığı için oluşan manyetik alan hareketlidir. Sekonder sargı uçları boşta olan bir transformatörün primer sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında primer sargıdan küçük değerli bir akım geçmektedir. Primer sargıdan dolaşan bu akım primer sargıda değişken bir akı (Φ) meydana getirmektedir. Bu akı aynı transformatörün nüvesi üzerinden devresini tamamlamaktadır. Şekil 1.1’de nüve, sargılar ve Φ akısı görülmektedir [12].



Şekil 1.1. Bir Fazlı Bir Transformatörün Nüvesi, Sargı ve Akı Gösterimi

7

Bu orana transformatörün dönüştürme oranı denilmektedir ve “a” katsayısı ile gösterilmektedir. “a” katsayısının matematiksel ifadesi Eşitlik (1.1)’de verilmektedir;

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{4.44.f.\Phi_m.N_1}{4.44.f.\Phi_m.N_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (1.1)$$

1.3. Transformatörlerin Sınıflandırılması

Transformatör sargılarında kullanılan iletkenler bakır veya alüminyum malzeme kullanılarak imal edilmektedir. İletkenlerin üzeri pamuk, kâğıt veya vernikle izoleli olup kesiti yuvarlak veya dikdörtgen şeklindedir. Küçük güçlü transformatörlerde sargılar yuvarlak kesitli iletkenle yapılırken büyük güçlü transformatörlerde sargılarda kullanılan iletkenlerin kesiti dikdörtgen şeklinde yapılmaktadır [12].

Sargılarda kullanılan iletkenlerin birbiri arasını ve sargılar ile nüve arasını izole etmek için transformatörün gerilim seviyesi ve ısı sınıfına göre yalıtım malzemeleri belirlenmektedir. Kullanılan yalıtım malzemeleri (kağıt, prb vs.) trafo yağına ve ısıya dayanıklı olup yüksek bir delinme ve alan şiddetine sahiptirler. Bu izolasyon kağıtlarının mekanik mukavemetleri ve yağ emme kabiliyetleri normal kağıtlara nazaran yüksektir. YG sargılarını özel sarım uygulamaları ve yalıtım arttırılmaları ile giriş bobinlerine gelen gerilim darbelerinin düzgün dağılımını sağlamak ve giriş sarımlarının fazla zorlanmasını önlemektedirler. Ayrıca bu bobinlerin sarım ve kat arası izolasyonları da normal bobinlere nazaran arttırılmaktadır. Bobinlerde tiplerine göre soğutmalarının sağlanması için aksiyal veya radyal kanallar bulunmakta olup bu kanallar aksiyel yönde dikdörtgen çıtalar, radyal yönde bobin çevresine düzgün dağılmış ara parçalarının uygun düzenlemeleri ile meydana getirilmektedirler [14].

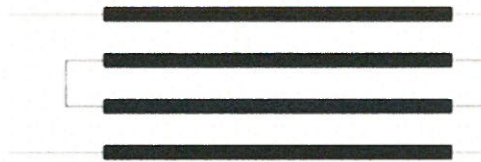
1.3.1. Sarım tiplerine göre transformatörler

1.3.1.1. Kat sargı

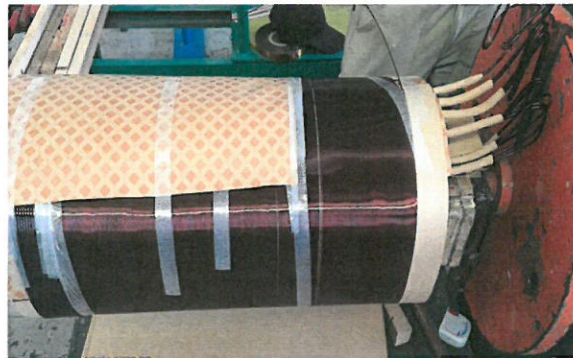
Bu sargı tipinde, iletkene herhangi bir devirme veya transpoze işlemi uygulanmaksızın basit şekilde yan yana ve kat bitimiyle üste geçecek şekilde sarım yapılmaktadır.

Sargı soğuma hesabına göre belli bir kattan sonra araya çıtalar koyularak soğutma kanalı teşkil etmek suretiyle çok katlı bir sistem elde edilmektedir.

Yapısı gereği kat sargılar genellikle düşük güçlü trafolarla ve 45 kV altındaki sargılarda kullanılmaktadır. Yüksek güçlerde kısa devre arızalarına mekanik dayanım açısından, yüksek gerilimlerde de iki kat arasına düşen gerilimi 2 kat arasındaki izolasyonun taşıyamama durumundan dolayı tercih edilmemektedirler. Bu sargıların işletme esnasında soğumalarını katlar arasından geçen transformator yağı sağlamaktadır. Transformator gücüne göre, gerilim değeri küçük olduğunda sargıdan geçen akım çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu durumda sargı ısınması sorun yaratmaktadır. Önlem olarak her katta sipirler arasına izole ara parçalar yerleştirilerek yağın sadece sargı boyunca değil, yatay olarak da sarımlar arasından geçerek soğutmayı daha iyi hale getirmesi sağlanmaktadır.



Şekil 1.3'te kat sargı olarak sarılan örnek bir bobin görülmektedir.



Kat sargı veya başka bir deyişle basit silindirik sargı tipi, örneğin kuru transformatörlerde belli bir gerilim değerinin üzerinde kullanılacaksa galet sargı yöntemi ile birleştirilmektedir. Galet sayısı gerilim seviyesine göre seçilmektedir. Her galetin arasına uygun ısı sınıfından yapılmış ara parçalar konulmaktadır.

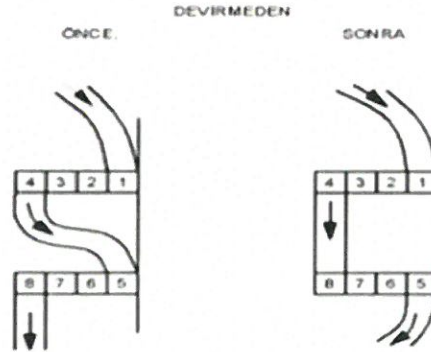
Toplam sipir galetlere dağıtılarak gerilimin bölünmesi sağlanmaktadır. Bu sayede yalıtım da daha sağlıklı olmaktadır. Şekil 1.4'te galet sargı gösterilmektedir.



Şekil 1.4. Galet Sargı Örneği

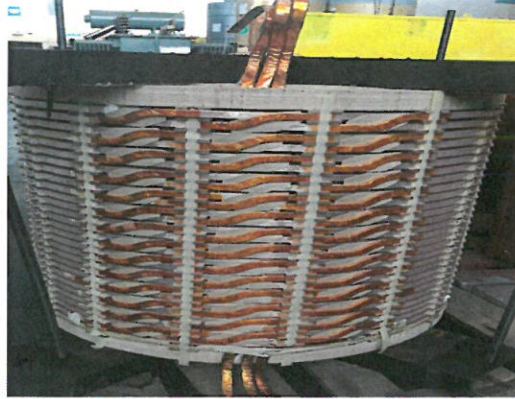
1.3.1.2. Devrik sargı

Kısmi bobinlerden oluşan, sargı girişinde lineer bir dağılım sağlayan, yüksek seri kapasitelere sahip bu sargılar özel bir sarım tekniği ile içten dışa doğru çift bobin sarılır, ikinci bobinin telleri devirme usulü ile yer değiştirilerek devam edilir. Bu uygulama Şekil 1.5'te verilmektedir. Devrik sargılarda da tekli yassı, çoklu yassı iletkenle örgülü bakır iletkenler kullanılmaktadır. Her bobin arasına izole ara parçalar monte edilerek yağın radyal yönde sargının içine kadar işlemesi sağlandığı gibi, bobin içindeki sipirler arasında da kanal teşkil edilerek aksiyal yönde de ilave soğutma imkanı sağlanabilmektedir. İletkenler izolasyon kağıdı ile kaplanmış olup izolasyon kalınlıkları, sarımları, katlar ve bobinler arasında oluşan gerilim farklarını karşılayacak şekilde seçilir.



Şekil 1.5. Devrik Sargı Gösterimi

Şekil 1.6’da devrik sargı ile sarılmış bobin örneği görülmektedir.



Şekil 1.6. Devrik Sargı ile Sarılmış Bobin Örneği

1.3.2. Soğutma şekillerine göre transformatörler

1.3.2.1. Kuru tip transformatörler

Çalışma esnasında cihaz içinde oluşan ısıyı hava dolaşımı (konveksiyon) ve ışıınım (radyasyon) yoluyla dışarı atan trafoları kuru tip trafo denilmektedir. Kuru tip trafo içinde ısınan sargılara temas eden havanın yoğunluğu azalmakta ve yükselerek bir hava sirkülasyonu oluşturmaktadır. Trafo üzerindeki hava kanalları vasıtasıyla ısınan hava cihaz dışına atılarak trafonun soğuması sağlanmaktadır. Radyasyon yolu ile soğutma daha çok trafonun fiziki özelliklerine bağlı olarak değiştiğinden soğutmaya katkısı küçüktür. Güçlü trafoların soğutma işlemi sırasında yukarıda bahsedilen iki yöntem yeterli gelmez ise dışarıdan cebri olarak üzerlerine hava üflenmekte ve daha serin bir ortamda muhafaza edilmektedirler.

Kuru tip trafoları yüksek gerilim sargısını oluşturan bobinlerin etrafı cam elyaf ile sarılmaktadır. Epoksi reçine vakum altında dökülerek fırında kurumaya bırakılmaktadır. Kuruyup sertleşen sargılar kalın bir epoksi reçine tabaka ile kaplanmış olup nemden ve darbelerden yalıtılmış hale gelmektedir. Kuru tip trafonun içeriğinde herhangi bir sıvı madde bulunmadığından sızdırma riski bulunmamaktadır. Yalıtım seviyesi yüksek olduğundan kısa devre oluşumlarına karşı dayanıklıdır. Yanıcı değildir ve çevreye zarar vermez.

Bu özellikleri sayesinde metro, tünel, maden ocakları, havaalanı, alışveriş merkezi, okul, hastane, gökdelen binaları gibi insanların çok yoğun olarak yaşadığı ortamlarda yanma ve patlama riskini minimum seviyeye indirmektedir.

Şekil 1.7’de dökme reçineli tipte bir kuru transformatör resmi görülmektedir. Resimden yüksek gerilim sargısının üçgen bağlı olduğu ve sargıda 5 tane ayar kademesinin bulunduğu anlaşılmaktadır.



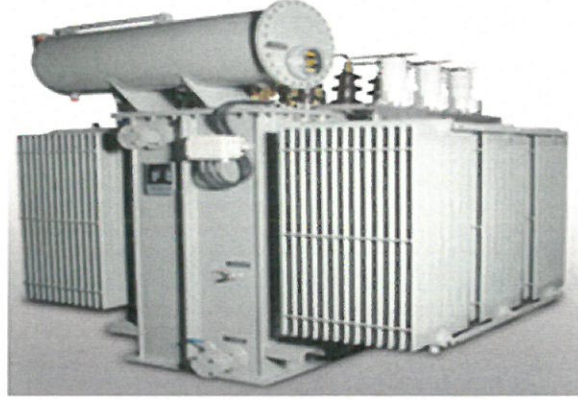
Şekil 1.7. Kuru Tip Transformatör

1.3.2.2. Yağlı tip transformatörler

Sargıları tamamen yağın içerisine daldırılmış olan transformatörlere yağlı tip transformatörler adı verilmektedir. Yağlı tip trafolar, genleşme depolu ve hermetik olmak üzere iki çeşittir.

Yağlı tip trafolarının, kuru tip trafolardan farkı soğutma işleminin yağ ile yapılmasıdır. Şekil 1.8’de gösterilen genleşme depolu transformatör çalışırken kayıpların neden olduğu ısı yağa geçmektedir. Böylece yağın sıcaklığı artmakta ve ısınan yağ genleşmeye başlamaktadır.

Genleşme sonucu meydana gelen hacimsel büyüme genleşme deposu ile giderilmektedir. Isınan yağın yoğunluğu azalmakta ve yükselerek genleşme deposunda toplanmaktadır.



Şekil 1.8. Genleşme Depolu Transformör

Genleşme depolu transformatörlerin içinde oluşabilecek kısa devreleri önlemek amacıyla buchholz koruma tertibatı kullanılmaktadır. Sadece iç arızalara karşı koruma sağlayan buchholz bobinlerinin yanı sıra dış arızalara karşı koruyan diferansiyel koruma röleleri de vardır. Genleşme depolu transformatörler atmosfere açık olduğu için bu tip trafolarla havadaki nemin yağa geçişini engelleyen hava kurutucu sayesinde hava alışverişi sağlanmaktadır. Hava kurutucu aynı zamanda filtreye benzer şekilde toz tutucu olarak da görev yapmaktadır. Manyetik yağ seviye göstergesi ise genleşme deposundaki yağın seviyesini gözlemlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Bir diğer tip yağlı trafo ise hermetik tiptir. Şekil 1.9’da hermetik tip trafo görülmektedir. Genleşme depolu trafonun aksine hermetik trafoda yağ, sızdırmaz ve vakuma dayanıklı bir kazanda bulunduğundan atmosfer ortamına kapalıdır. Isınma ve soğuma gibi olayların sonucunda yağın genleşme ve büzülme durumu elastik ve dalga biçimli olan kazan duvarları sayesinde kontrol edilmektedir. Ayrıca kazanda bulunan yağ atmosfer ile temas etmediğinden nemden etkilenmemekte ve oksitlenme problemi yaşanmamaktadır.



Şekil 1.9. Hermetik Transformatör

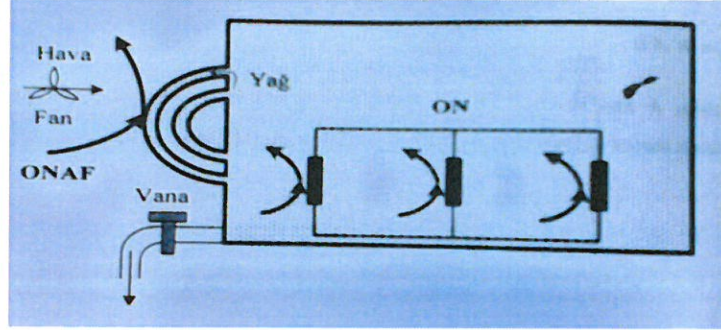
Genleşme depolu trafolarla yağ zamanla yalıtkanlık özelliğini kaybederek bozulmaya uğramakta ve bu durum genleşme depolu transformatörlerin daha kısa ömürlü olmasına neden olmaktadır. Bu tip trafolarla, belirli zaman aralıklarında yağ değişiminin yapılması ve trafonun kurutulması gerekmektedir. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte daha uzun ömürlü, daha az bakım gerektiren ve düşük maliyetli bir sistem olan hermetik trafolar tercih edilmektedir.

Hermetik trafoların genleşme deposu ve onunla ilgili bağlantı kabloları olmadığından ağırlığı ve yüksekliği daha küçüktür. Bu durum küçük mekanlarda çalışma imkanı sağlarken güvenlik açısından da diğer trafolarla göre daha üstün özellikler sağlar [13].

Transformatörlerde soğutma tipi ‘tabii soğutma’ ya da ‘zorlanmış soğutma’ olarak sınıflandırılabilir. Soğuma tiplerinin kodlanmasında ilk olarak soğutulan transformatör, soğutulan yağ ve soğutma türü tabii olduğundan harfleri ON (Oil-Natural) olarak verilmektedir. İkinci soğutulan ise yağ ve kazan yüzeyi, bunları soğutan hava, soğutma türü tabii olduğundan AN (Air-Natural) olarak verilmektedir. İki harf gurubunu birleştirilerek transformatörün soğutma yöntemi (ONAN) olarak saptanmaktadır. Gücü 5- 20 MVA’ya kadar olan transformatörlerde soğutma gücünü artırmak için radyatör kullanılmaktadır. Böylece yüzey genişletilmiş ve tabii soğutma sağlanmış olmaktadır.

Transformatörde ikici tür soğutma olan zorlanmış soğutma türüdür. Eğer tabii soğutma gücü yetersiz kalırsa, bu tür soğutma yöntemi kullanılmaktadır. Tabii soğutmada kullanılan radyatörler yetersiz olursa radyatörlere temas eden havanın miktarını arttırmak için vantilatör kullanılmaktadır.

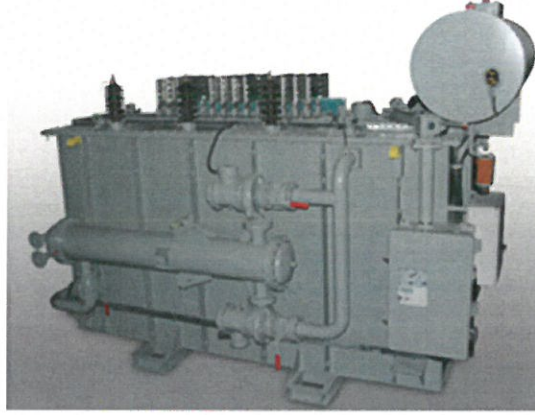
Bu durumda soğutma zorlanmış olduğundan (ONAF) olarak yazılmaktadır. Şekil 1.10'da bu soğutma tipi görülmektedir.



Şekil 1.10. Yağlı Transformatörün Zorlanmış Soğutması

Eğer transformatör çok büyükse, su ile zorlanmış soğutma sağlanabilmektedir. Burada ısınan yağ bir pompa yardımıyla bakırdan yapılmış serpantine basılmaktadır. Serpantin içi soğuk su dolu bir havuzun içindedir. Isınmış yağ ısı enerjisini havuzun soğuk sularına terk ettikten sonra tekrar transformatör kazanına dönerek transformatörü soğutmaya devam etmektedir.

Transformatörden havuza verilen ısı enerjisi kapalı havuz suyunu ısıtmaktadır. Havuz suyunun da soğutulmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle havuz suyu bir başka su pompası ile soğutma kulesine basılmaktadır. Burada sıcak su küçük damlalar haline dönüştürülmektedir. Kevgire benzeyen su eleğinden geçmekte ve milyonlarca su damlasına dönüşmektedir. Bu dönüşümde her damla yüzeyi çok küçük olmasına rağmen, milyonlarcasının meydana getirdiği çok büyük yüzeyden yararlanılarak suyun soğuması sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında soğuyan su buharlaşarak kütlesinin bir kısmını kaybetmekte ve soğutma kulesinde su seviyesi azalmaya başlamaktadır. Bunun için su kulesine arada sırada su seviyesinin durumuna göre, su takviyesi yapmak gerekmektedir. Bu tip soğutma sistemini temsil için (OFWF) harfleri kullanılmaktadır [14]. OFWF soğuma tipli bir transformatör Şekil 1.11'de resmedilmektedir.



Şekil 1.11. OFWF Soğutma Örneği

Adı geçen soğutma sistemlerinin belirlenmesi için simgeler Tablo 1.1’de açıklanmaktadır.

Tablo 1.1. Transformatörlerde Soğutucu Ortam ve Soğutma Şekillerinin Simgeleri

1.HARF	2.HARF	3.HARF	4.HARF
Sargılara değen soğutma ortamı ile ilgilidir.		Dış soğutma sistemine değen soğutma ortamı ile ilgilidir.	
Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü	Soğutma ortamı türü	Dolaşım türü
<u>O</u> <u>N</u> <u>A</u> <u>N</u> Yağ Tabii Hava Tabii	<u>O</u> <u>N</u> <u>A</u> <u>F</u> Yağ Tabii Hava Cebri (vantilatörler fanlar)	<u>O</u> <u>F</u> <u>W</u> <u>F</u> Yağ Cebri Su Cebri	

1.3.3. Transformatörlerin bağlantı gruplarına göre ayrılması

Elektrik santrallerinde senkron alternatörlerden elde edilen gerilim üç fazlı olduğundan bu gerilimin yükseltilecek kullanım yerine kadar taşınması ve kullanım yerinde tekrar alçaltılması üç fazlı olarak yapılmaktadır. Bu amaç için ya üç adet tek fazlı transformatör ya da üç fazlı bir transformatör kullanılmaktadır. Üç adet bir fazlı transformatör kullanılması halinde her fazın manyetik devresi ayrı olduğundan fazlar arasında sadece elektriki bir bağlantı vardır. Primer ve sekonder sargılar yıldız veya üçgen bağlanabilmektedirler. Bu yöntem hem taşımada hem de arıza halinde onarımda kolaylık sağlamaktadır. Bilindiği gibi üç fazlı transformatörlerde, üç fazlı gerilimler arasında 120° faz farkı olduğundan akımların meydana getirdiği akılar arasında da 120° faz farkı vardır ve manyetik akıların toplamı her an sıfırdır. Simetrik olarak yüklenmiş üç fazlı bir transformatörün bir fazına ait fazör diyagramının çizilmesi yeterlidir.

Çünkü diğer fazlara ait fazör diyagramları 120° faz farkı ile aynıdır. Üç fazlı transformatörlerin üst ve alt gerilim sargıları genel olarak yıldız ve üçgen olarak bağlanmaktadır. Bazen alt gerilim sargısında üçüncü bir bağlama çeşidi kullanılır. Buna zig-zag bağlama adı verilmektedir. Yıldız bağlamada nötr noktasının olması bir avantajdır ancak için katı harmoniklerin bu noktada birikmesi önemli bir dezavantajdır. Üçgen bağlantı nötr noktasının olmaması nedeniyle sadece simetrik yüklerde kullanılmaktadır ancak için katı harmonikleri geçirmesi en önemli avantajıdır. Bu bağlantıda sargıların her iki uçları da direkt şebekeye bağlı olduğundan şebekeden gelecek yüksek gerilimlere karşı korunmaları gerekmektedir. Bu da maliyeti artırmaktadır.

Primerleri yıldız bağlı bazı çok fazlı transformatör bağlantılarında, dengesiz yükler halinde nötr noktasını kararlı hale sokmak için sekonder devrede zig-zag bağlantı kullanılmaktadır. Ayrıca faz sayısının artırılmasında da zig-zag bağlantılara başvurulmaktadır. Nitekim üç fazlı sistemlerden altı ve oniki faza geçmek için de zig-zag bağlantıdan faydalanılmaktadır. Üç fazlı transformatörlerde (topraklama transformatörleri hariç) yıldız ve üçgen bağlantı alt ve üst gerilim sargılarında kullanılabilirken, zig-zag bağlantı yalnızca alt gerilim sargısında kullanılmaktadır.

Bağlantı grupları transformatörlerin paralel çalışmasında çok önemlidir. Dört ana bağlama grubu vardır. Bu gruplar (0), (5), (6) ve (11) sayılarıyla temsil edilmektedir. (0) grubunda, alt ve üst gerilim fazörleri arasındaki faz farkı sıfırdır. (5) sayılı grupta alt gerilim sargısına ait fazlar arası gerilimler, üst gerilim sargılarındaki fazlar arası gerilimlerden 150° geridedir. (6) sayılı grupta alt gerilim sargısı fazörleri üst gerilim sargısı fazörlerinden 180° geridedir. (11) numaralı grupta ise fark 330° olur ya da başka bir deyişle alt gerilim sargısı fazörü üst gerilim sargısı fazöründen 30° ileridedir. Yani bu grup numaraları 30° ile çarpılarak, grup açıları elde edilmektedir [15]. Şekil 1.12'de (0) ve (5) için, Şekil 1.13'te (6) ve (11) için çeşitli primer-sekonder sargıların bağlantı grup kombinasyonlarına göre bağlama şekilleri ve fazör diyagramları verilmektedir.

Gösterim		Fazör diyagramı		Bağlantı şeması		Değiştirme oranları
Tanım sayısı	Bağlama grubu	Üst gerilim	Alt gerilim	Üst gerilim	Alt gerilim	
	Dd0					$\frac{a_1}{a_2}$
0	Yy0					$\frac{a_1}{a_2}$
	Dz0					$\frac{2a_1}{3a_2}$
	Dy5					$\frac{a_1}{\sqrt{3}a_2}$
5	Yd5					$\sqrt{3} \frac{a_1}{a_2}$
	Yz5					$\frac{2a_1}{\sqrt{3}a_2}$

Şekil 1.12. (0) ve (5) Bağlantı Grupları

Tanıma sayısı	Gösterim		Fazör diyagramı		Bağlantı şeması		Değiştirme oranları
	Bağlama grubu	Üst gerilim	Alt gerilim	Üst gerilim	Alt gerilim		
6	Dd6						$\frac{180^\circ}{30^\circ} = 6$ $\frac{a_1}{a_2}$
	Yy6						$\frac{a_1}{a_2}$
	Dz6						$\frac{2a_1}{3a_2}$
11	Dy11						$\frac{330^\circ}{30^\circ} = 11$ $\frac{a_1}{\sqrt{3}a_2}$
	Yd11						$\sqrt{3} \frac{a_1}{a_2}$
	Yz11						$\frac{2a_1}{\sqrt{3}a_2}$

Şekil 1.13. (6) ve (11) Bağlantı Grupları

2. TRANSFORMATÖRLERDE KAYIPLARIN İNCELENMESİ

Transformatörler enerji dağıtım şebekesinde büyük rol üstlenen fakat önemli ölçüde kayıplara neden olan elemanlardır. 1 Temmuz 2015 tarihinden itibaren yürürlüğe girmiş olan EN 50588-1 standardı ile dağıtım transformatörlerinde meydana gelen güç kayıplarının sınır değerleri yeniden düzenlenmiştir [16].

Elektrik motorlarının ve transformatörlerin verimi yükseltildiğinde, aynı iş yapılarak yalnız enerji tasarrufu sağlanmaz, aynı zamanda sera etkisinin baş nedeni olan karbondioksitin üretim miktarı azaltılır yani çevre korunmasına önemli bir katkı sağlanmış olur. Bugünkü dünyada enerji artık çevreden bağımsız düşünülemez. Sera etkisinin nedenleri ve sonuçları, dünya ısınmasının yaratacağı değişimler görmezlikten gelinecek veya hafife alınacak konular değildir. Fosil enerji taşıyıcılarını yakmanın sorumluluğunu her birey duymak zorundadır.

Avrupa Birliği'nde bir elektrik şebekesinin toplam kayıplarının %40'ından fazlası transformatörlerde oluşmakta ve standart transformatör yerine düşük kayıplı transformatör kullanıldığında yılda 22 TWh enerji tasarruf edilebileceği hesaplanmaktadır. Korkulan sera etkisi bakımından bu yılda 9 milyon ton CO₂'nin daha az üretilmesi demektir.

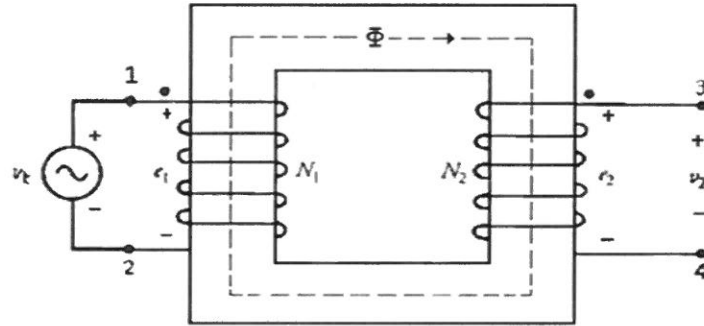
Yüksek verimli transformatörlerin enerji tasarrufunda ve sera etkisini azaltmada sağladıkları yararları rağmen, sanayi kuruluşlarında çok kez düşük verimli transformatörleri ve elektrik motorlarını daha ucuz bir fiyata alma alışkanlığı vardır. Bir transformatörün veya bir elektrik motorunun alış fiyatının değil, kullanım süresindeki enerji kayıplarını da kapsayan toplam giderlerinin önemli olduğu unutulmamalıdır. Toplam giderler karşılaştırıldığında, yüksek verimli transformatör düşük verimli transformatöre göre daha ucuzdur [17].

Güç kayıplarının seviyesini standardın gerektirdiği düzeye indirebilmek için, transformatörde kayıplara neden olan tüm faktörlerin dikkatle göz önünde tutularak iyileştirilmesi gerekmektedir.

Transformatörlerde meydana gelen toplam güç kayıpları, boşa çalışma ve yüklü çalışma kayıplarının toplamı biçiminde ifade edilmektedir.

2.1. Boşa Çalışma Kayıpları

Transformatörün boşa çalışması, primer sargı şebekeye bağlı iken sekonder sargının uçlarının açık olma durumudur. Bu durum Şekil 2.1’de resmedilmektedir. Boşa çalışmada sekonder sargı yüke bağlı değildir. Bu durumda sekonder devreden bir akım akmayacaktır. Sekonder sargısı yüksüz olan bir transformatörün primer sargısına U_1 gerilimi uygulandığında, primer sargıdan çok küçük bir akım geçmektedir. Bu akıma boşa çalışma akımı denilmektedir (I_0). Yüksüz durumdaki primer sargı akımı I_0 , tam yüklü primer sargısının akımıyla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Nominal yük akımının %1-2 civarındadır. Bu değer büyük transformatörlerde %0,2’lere kadar düşmektedir. I_0 çok küçük olduğu için yüksüz durumdaki primer sargısındaki bakır kaybı da önemsenmeyecek miktarda küçüktür. Bu da sekonderi yüksüz durumdaki primer girişinin pratik olarak bir transformatördeki demir kaybına eşit olması anlamına gelmektedir [14].



Şekil 2.1. Transformatör Boşa Çalışma Durumu

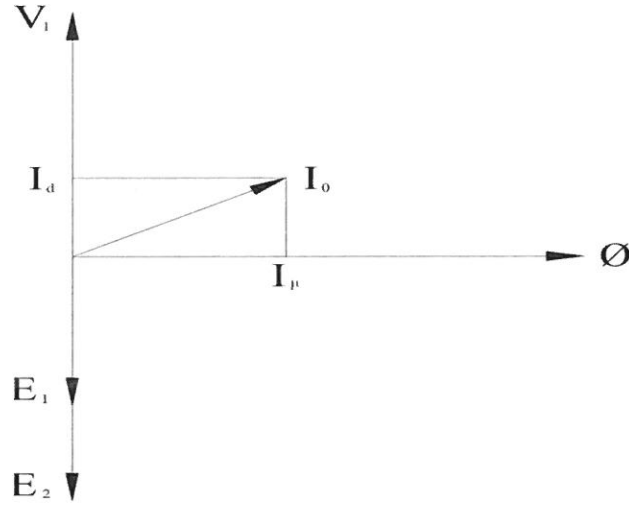
Boşa çalışma kayıpları; transformatör boyunduruk ve bacaklarında oluşan kayıplardır.

Literatürde boşa çalışma kayıplarının, nüve malzemesinin histerezis eğrisinden ve sarfılardaki kaçak akılardan dolayı oluşan eddy akımlarının yol açtığı kayıpların toplamına eşit olduğu vurgulanmaktadır [18]. Sekonder sargı yüksüz durumda iken, Primer sargı akımı (i) çekirdekdeki demir kaybını (örneğin; histerezis kaybı ve fuko kaybı), (ii) primer sarfıdaki çok küçük bir miktardaki bakır kaybını beslemektedir.

Sekonder sargısı yüksüz durumda iken primer sargı girişindeki akım I_0 , V_1 'in 90° 'lik açıda değil fakat 90° 'den küçük bir açıyla θ_0 ile gerisindedir. Yüksüz durumda, primer sargı girişindeki güç Eşitlik (2.1)'deki gibi ifade edilmektedir;

$$P_0 = V_1 I_0 \cos\theta_0 \quad (2.1)$$

Gerçek bir transformatörün yüksüz durumu vektörel olarak Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Sadece Çekirdek Kayıpları Olan İdeal Transformatörün Yüksüz Akımı

Şekil 2.2'de görüldüğü gibi I_0 primer sargı akımı iki bileşene sahiptir. Birincisi v_1 ile aynı doğrultudadır. Bu bileşen, aktif ya da demir kaybı bileşeni I_d olarak bilinmektedir. Demir kaybının yanında küçük bir miktar primer bakır kaybını da beslemektedir.

I_d Eşitlik (2.2)'deki gibi ifade edilmektedir;

$$I_d = I_0 \cos\theta_0 \quad (2.2)$$

Diğer bileşeniyse v_1 ile dik konumdadır ve mıknatıslayan bileşen olarak bilinmektedir. Çünkü görevi çekirdekteki alternatif akımı sağlamaktır. Mıknatıslama akımı Eşitlik (2.3)'deki gibi ifade edilmektedir;

$$I_\mu = I_0 \sin\theta_0 \quad (2.3)$$

I_0 değerinin I_d ve I_μ vektörlerinin toplamı olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla;

$$I_0 = \sqrt{(I_\mu^2 + I_d^2)} \quad (2.4)$$

Demir kayıpları alternatif akımda meydana gelmektedir. Alternatif akımın bir devir içinde iki defa yön değiştirmesi, aslında iletken malzeme üzerinde manyetik ve elektrik olarak iki türlü etki meydana getirmektedir. Bunlardan birincisi olan manyetik etki, akımın ani değerinin değişmesine bağlı olarak, amper-sarımın ani değerinin ve dolayısıyla B manyetik alan yoğunluğunun değişmesi olarak kendisini gösterir ki, buna “histerezis kaybı” denilmektedir. İkincisi ise, demirin elektrik akımına gösterdiği elektriksel dirençten kaynaklanmaktadır. Bu durumda malzeme bir iletken gibi davranır ve değişken akımın etkisi ile demirde gerilim indüklenmektedir. Bu gerilim malzemenin içinde akımların akmasına neden olmaktadır. Bu akımlara Foucault (fuko-girdap) akımları adı verilmektedir. Bunların demir içinde serbest olarak akması ile demirde “Joule kayıpları” şeklinde hesaplanan ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır. Histerezis kaybı, Eşitlik (2.5)’te verilmektedir;

$$P_H = K_h f B_m^x \quad (W/kg) \quad (2.5)$$

Burada K_h malzemenin histerezis kayıp katsayısıdır, birimi W/kg’dır. B_m , manyetik alan maksimum yoğunluğudur ve birimi Wb/m²’dir. f manyetik akı değişimi frekansıdır. Verilen x faktörü ise, malzemeden malzemeye göre değişen bir faktördür ve değeri 0,5-2,3 arasındadır. Fakat genellikle elektrik makinelerinde bu değer 1,5-2,0 arasında alınır.

Fuko kaybı Eşitlik (2.6)’daki gibi hesaplanmaktadır;

$$P_g = K_f f^2 B_m^2 \quad (W/kg) \quad (2.6)$$

Buradaki K_f fuko kayıp katsayısıdır, birimi W/kg dır. Yukarıda verilen eşitliklerden görüldüğü gibi, her iki kayıp da manyetik alan yoğunluğu B_m ile orantılıdır. Eşitlik (2.4) ve (2.9)’da endüklenen emk’nın B ile orantılı olduğu verildiğinden, yukarıda manyetik alan yoğunluğu B’ye göre yazılmış kayıp ifadeleri, endüklenen gerilim E’ye göre düzenlenebilmektedir.

Bu durum dikkate alınır ve histerisiz kayıplarında kullanılan “x” üstel faktörü de 2 kabul edilirse, toplam demir kayıpları;

$$P_{fe}=f(B^2) \quad (2.7)$$

Şeklinde yazılabilmektedir. Burada P_{fe} , B^2 ile orantılı olduğundan, E_1^2 ile orantılı olarak yazılabilmektedir. Yani kayıplar, endüklenen gerilimin karesi ile doğru orantılı olmaktadır. Buna bağlı olarak toplam demir kayıpları aşağıdaki gibi verilmektedir;

$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{r_{fe}} \quad (2.8)$$

E_1 , gerilimi esas alınarak hayali bir demir direnci ve demir akımı arasındaki ilişki Ohm yasasından yararlanarak, Eşitlik (2.9)’daki gibi tanımlanabilir;

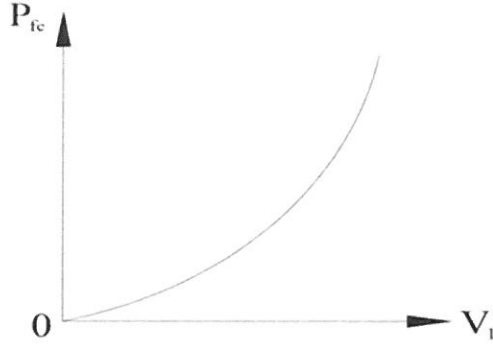
$$I_{fe} = \frac{E_1}{r_{fe}} \quad (2.9)$$

Endüklenen gerilim ile primer sargıya uygulanan gerilim, aradaki gerilim düşümü ihmal edilerek eşit kabul edilirse, demir kayıpları Eşitlik (2.10)’daki gibi gösterilebilir;

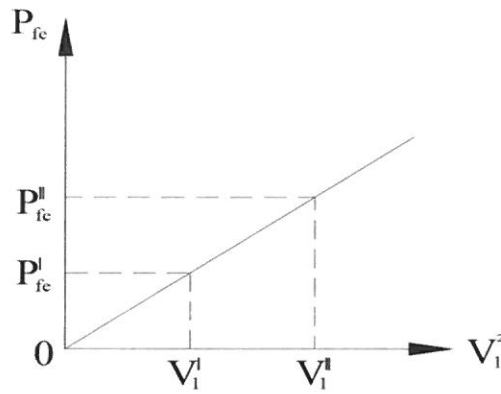
$$P_{fe} = \frac{V_1^2}{e_{fe}} \quad (2.10)$$

Eşitlik (2.10)’dan görüleceği üzere, gerilimin değiştirilmesi ile demir kayıplarının değişimi parabolik olmaktadır. Bu durum Şekil 2.3’te verilmektedir. Demir kayıplarının gerilimin karesi ile değişimi de Şekil 2.4’te gösterilmektedir.

Şekil 2.4’teki eğri üzerinden iki nokta tespit edilip doğrunun matematiksel ifadesinin çıkarılması oldukça kolaydır [14].



Şekil 2.3. Demir Kayıplarının Gerilime Göre Değişimi



Şekil 2.4. Demir Kayıplarının Gerilimin Karesine Göre Değişimi

Boşta kayıpların azaltılması için nüve bacak kesitini arttırarak, manyetik akı yoğunluğunu azaltmak ve buna bağlı olarak transformatörün boşta kayıplarını azaltmak yöntemlerden biridir. Ancak bu yöntem transformatörün imali için gerekli sac, iletken, yağ miktarını, bunlar ile beraber de transformatörün üretim maliyetini önemli ölçüde arttırmaktadır.

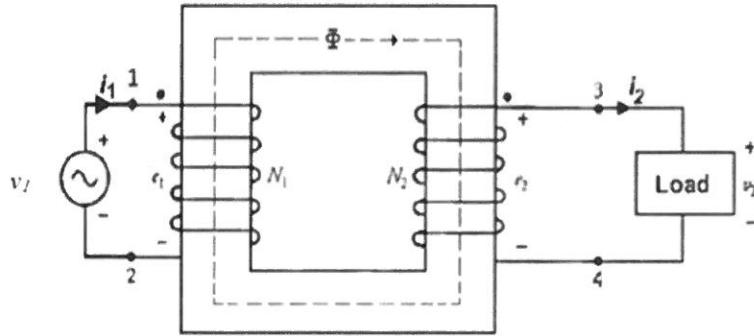
Trafonun imalatı sırasında kullanılacak malzeme miktarını kayıpları arttırmadan sınırlandıracak en önemli yöntem nüvede kullanılan materyalin manyetik akı yoğunluğunu düşürmeyi gerektirmeyecek, düşük kayıplı malzemeden seçilmesidir. Transformatörlerin üretilmeye başlamasından bu yana nüve materyali özelliklerinde önemli gelişmeler olmuştur. Son yıllarda özellikle yüksek indüksiyonlu sacların üretilmesi ile büyük güçlü transformatörlerde dahil olmak üzere, boşta kaybı düşük transformatörlerin üretimi daha kolay ve düşük maliyetli olmaktadır.

Yüksek indüksiyonlu sacların yanında kristal yapıya sahip olmayan amorf metal malzemelerde düşük kayıplı transformatör üretiminde kullanılmaktadır.

Amorf metal Demir-Bor-Silikon malzemenin eritildikten sonra çok hızlı bir biçimde soğutulularak katı hale geçirilmesi ile elde edilmektedir. Amorf malzeme kalınlığı 0,025 mm civarındadır ve folyo şeklinde üretilmektedir. Bu ince yapı sayesinde yüksek dirence sahiptir ve yine bu nedenle amorf nüvelerde Eddy kayıpları son derece düşüktür. Bunun yanı sıra histeresiz bandının dar oluşu, histeresiz kayıplarının da düşük olmasını sağlamaktadır. Amorf nüveli transformatörlerin boşa kayıpları geleneksel yığma nüveli transformatörlerin boşa kayıplarına göre yaklaşık %74 daha düşüktür. Bütün bunlara karşın amorf metalin doyma noktasının düşük olması, malzeme olarak çok ince olması gibi olumsuzlukları da vardır [19].

2.2. Yükte Çalışma Kayıpları

Transformatörün yükte çalışması sekonder sargısının bir şebekeyi veya tüketicileri beslediği, yani sekonder sargıdan da bir akımın geçtiği durumdur. Sekonder sargı akımını transformatörde yeni bir amper-sarım ve yeni kayıplar oluşturmaktadır. Şekil 2.5'te yükte çalışma durumunda bağlantı şekli gösterilmektedir. Sekonder sargı akımını I_2 olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 2.5. Transformatör Yükte Çalışma Durumu

I_2 'nin büyüklüğü yükün özelliğiyle belirlenmektedir. Sekonder sargı akımını kendi mmf'ini ($N_2 I_2$) oluşturmakta ve dolayısıyla I_0 nedeniyle oluşan ana primer akısına (Φ), ters olan kendi manyetik akısını Φ_2 'yi oluşturmaktadır. Karşı sekonder sargı manyetik akısı Φ_2 , primer sargı manyetik akısını bir an için zayıflatmakta ve primer geri emk E_1 azalmaya eğilim kazanmaktadır.

Bir anda, v_1 , E_1 üzerinden yukarı kolun akımını kazanmakta ve dolayısıyla primer sargıdan daha fazla I_2' akımın geçmesine neden olmaktadır. I_2' akımı primer sargısındaki akımın yük bileşeni olarak bilinmektedir. Bu akım I_2 akımına karşı doğrultudadır. Ek primer sargı mmf'i $N_1 I_2'$, Φ_2' 'ye ters (fakat Φ ile aynı yönde) ve eşit büyüklükte Φ_2' manyetik akısını oluşturmaktadır. Böylece sekonder sargıdaki akımın I_2 manyetik etkileri primer sargıdaki ek akım I_2' ile hemen hemen nötr hale gelmektedir. Dolayısıyla, yük koşulları ne olursa olsun çekirdekten geçen net manyetik akı yüksüz durumdaki ile hemen hemen aynıdır. Bu nedenle, çekirdek kaybı pratikte tüm koşullar altında aynıdır [14].

Genel olarak ifade edilirse, yüklü çalışma kayıpları, transformatörün sargılarından akan yük akımının karesi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Bu kayıplar; sargı iletkenlerinde meydana gelen sargı direnci kaynaklı kayıplar, sargı iletkenlerinde eddy akımları nedeniyle oluşan kayıplar ve transformatörlerin devre tutucuları ve kazan duvarları gibi metal yapısal bileşenlerinde oluşan diğer kayıplardan oluşmaktadır [20].

2.2.1. Bakır kayıpları

Bu kayıplar da demir kayıplarında olduğu gibi iki kısma ayrılmaktadır. Birincisi akımın sargı üzerinde meydana getirebileceği bakır kaybı (iletken direncinden dolayı meydana gelen kayıp) ve ikincisi de alternatif akımdan dolayı bakırda meydana gelen fuko akımlarının sebebiyet verdiği kayıplardır. Fuko akımlarının sebebiyet verdiği kayıplar iletkenin şekli ile frekansa bağlıdır. Pratikte transformatörün bu kayıplarının toplamı önemli olduğundan, kısa devre deneyinden tesbit olunan bakır kayıplarının nominal akıma düşeni nominal bakır kayıplarını vermektedir.

Bir transformatörün yüksek verime sahip olabilmesi için bütün kayıpların minimuma indirilmesi gerekmektedir.

Yük akımlarından dolayı meydana gelen bakır kayıpları I^2R dir. Akım değerleri sabit olduğundan, bakır kaybını azaltmak için dizaynı yapan tarafından değiştirebilecek faktör, sargı direnci olmaktadır. Dirençleri minimuma indirmek için iletkenlerin toplam kesitleri mümkün olduğu kadar büyük, ya da toplam uzunluklarını mümkün olduğu kadar kısa tutmak gerekmektedir.

Kesit artışı, direncin küçülmesini, I^2R kaybının kesinlikle azalmasını sağlamaktadır. Ancak boyut büyümesine ve bu nedenle manyetik devredeki kayıpları artırmaya da neden olmaktadır. Bu bakımdan en makul çözüm mümkün olduğunca sargıların toplam uzunluğunu azaltmaktır. Bu bobinin şekline, siper sayısına, sargı içerisinde kullanılan malzemelerin kalınlıklarına bağlıdır. Bobin çapı ne kadar büyük olursa sargı uzunluğu o oranda artacaktır.

İyi dizayn edilen bir transformatörde, belirli bir frekans, gerilim oranı ve ısınma için verilen belirli güçteki toplam kayıplar neredeyse sabittir. Bakır kaybı yüksek tutulup, demir kaybının mümkün mertebede düşük tutulması doğaldır. Zira demir kaybı 24 saatlik bir yük olarak ifade edilmektedir [14].

Yağlı tabii soğutmalı transformatörlerde aşırı yüklenmeye müsaade edilmez. Tam yükte ve maksimum bir çevre sıcaklığında yağdaki ısınma IEC 60076-2:2011'e göre 60°C'dir [21]. Bu nedenle böyle transformatörlerde bakır kayıplarının, demir kaybına oranı oldukça yüksek olabilmektedir. Bu oran güç, gerilim ve frekansa göre 4/1 den 7/1'e kadar düzenlenebilmektedir.

Şayet transformatör çevre sıcaklığı düşük bir bölgede çalışacak ise, belirli aşırı yüklenmelere izin verilebilmektedir. Yukarıda verilen oranlar sargılarda aşırı ısınma olmaksızın, düşük çevre sıcaklarında belirli aşırı yüklemelere ulaşılmasına müsaade edilecek durum içindir. Transformatör sürekli aşırı yükleme için dizayn edilirse, tam yükte bakır kaybının, demir kaybına oranı düşmektedir.

2.2.2. Transformatörün kaçak akı kayıpları

Transformatörlerde yükte çalışma durumundaki kayıp, sarımların akım, direnç ve kaçak manyetik alan kayıplarından kaynaklanan kayıplar nedeniyle oluşmaktadır. Bu kaçak kayıpları yüklü ve yüksüz sarımlarda, sıkıştırma levhalarında ve transformatör tanklarında görülmektedir.

Bu kayıplar kaçak manyetik alan ve bobin iletkenlerini saran manyetik alana bağlıdır. Transformatörlerdeki toplam kaçak kayıp genellikle şu elemanlardan oluşmaktadır:

(a) Sarımlardaki kaçak manyetik alandan kaynaklanan transformatör tankındaki kaçak kayıp,

- (b) Tanktaki bobin iletkenlerinden kaynaklanan kaçak kayıp,
- (c) Sarımlardaki kaçak manyetik alandan kaynaklanan sıkıştırma çatısındaki kaçak kayıp,
- (d) Sıkıştırma levhasındaki bobin iletkenlerinden kaynaklanan kaçak kayıp,
- (e) Yüklü sarımlardaki kaçak kayıp,
- (f) Yüksüz sarımlardaki kaçak kayıp.

Bir transformatörün primer sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargıdan geçen akımın oluşturduğu manyetik akının tamamı ikinci devre iletkenlerini kesmemektedir. Akımın küçük bir kısmı devresini havadan tamamlamaktadır. Devresini havadan tamamlayan bu akıların tamamına kaçak akılar denilmektedir. Kaçak akı ne kadar çok olursa faydalı akı o kadar azalmaktadır. Bunun sonucunda ikinci devrede siper başına endüklenen gerilim birinci devrede endüklenen gerilimden çok daha az olmaktadır. Bunun sonucunda sekonder sargıda emk azalmaktadır. Yüksüz çalışma durumunda kaçak akı faydalı akının %5'i kadardır.

Kaçak manyetik alanın bir kısmı tüm transformatör çeşitlerinde daima bulunmaktadır.

Toplam kaçak manyetik alanı transformatörün MVA değerinin kareköküne yakın bir miktarda artmaktadır. Dolayısıyla, artan transformatör kapasitesi daha büyük değerdeki kaçak manyetik alan ile sonuçlanmakta ve kaçak kaybı artışına neden olmaktadır. Bu kaçak manyetik alan bazen bölgesel aşırı ısınmalara neden olabilmektedir.

Kaçak manyetik alan çizgilerinin izlediği yolların kontrolüyle, kaçak kayıpları bir ölçüde azaltılabilmekte ve böylece bölgesel ısınmaların azaltılması sağlanabilmektedir. Bu kaçak akı çizgilerinin kontrolü giriş bölümünde çeşitli yayınlardan yapılan alıntılardan da anlaşılacağı üzere en etkili olarak şönt eleman yerleştirme metoduyla sağlanmaktadır [14].

Güç transformatörlerinin yapısal bileşenlerinde meydana gelen ve diğer kayıplar olarak ifade edilen bu kayıplar, transformatörün yüklü çalışması durumunda meydana gelen toplam kayıpların %20-50'si düzeyindedir[22].

Bu nedenle literatürde diğer kayıplar üzerine gerçekleştirilen çalışmaların neredeyse tamamında güç transformatörlerinin incelendiği görülmektedir. Buna karşın ilgili uluslararası düzenlemelerin gerektirdiği kayıp güç sınırları, diğer kayıpların standart ve özel tip dağıtım transformatörleri için de değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada, büyük ölçüde kazan duvarları üzerinde meydana gelen bu kayıpları azaltmak amacıyla kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilen şönt elemanların en uygun boyutlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda özel olarak tasarlanan bir transformatör için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elektromanyetik analizler gerçekleştirilmiş olup, analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ile kazan duvarlarının iç yüzeyine yerleştirilecek en uygun şönt boyutları transformatörün sargı boyutlarına bağlı olarak ifade edilmektedir. Belirlenen boyutlardaki şönt elemanların kullanımı ile kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların %91,43, toplam kısa devre kayıplarının ise %14,9 oranında azaltılması mümkün olmuştur.

3. TRANSFORMATÖR TASARIM PARAMETRELERİ

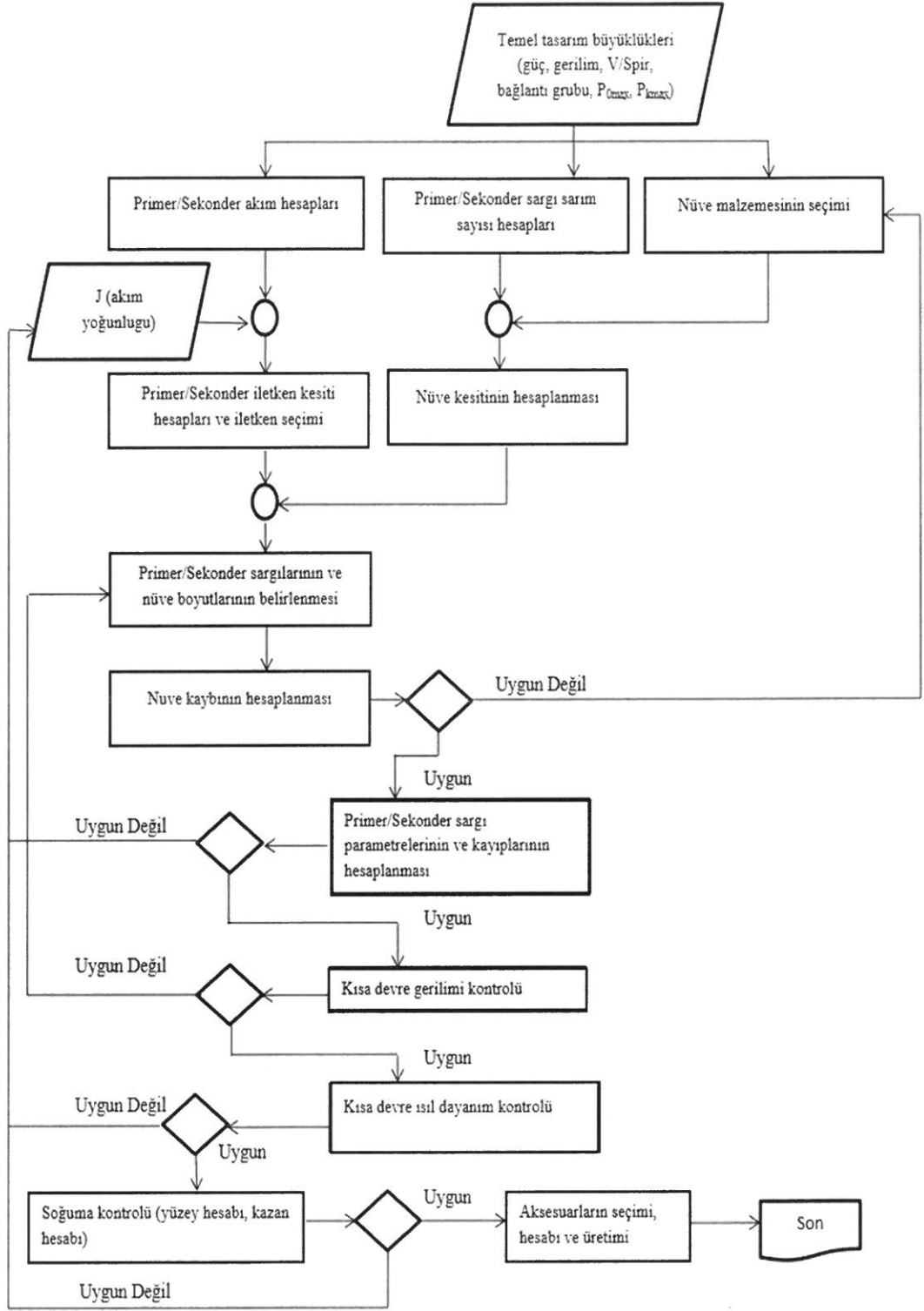
Bir transformatör tasarımı yapılırken öncelikle güç ve gerilime göre akım belirlenmektedir. Bu akımı taşıyacak iletken kesiti iletkenin alüminyum veya bakır olmasına göre tespit edilmektedir. Alüminyum iletken bakıra nazaran daha düşük akım yoğunluklarında çalışmaktadır. İletken cinsi ne olursa olsun akım yoğunluğu çok düşük seçilir ise bakır kaybı düşük olacaktır. Ancak iletken kalınlaşacağı için bobin boyutları büyüyecektir. Bunun optimizasyonunu yapabilmek önemlidir.

Tasarımda diğer bir aşama manyetik devreyi oluşturmaktır. Nüve kesitini doğru tespit etmek demir kaybı açısından önem taşımaktadır. Kesitin büyük seçilmesi indüksiyon değerini düşürecek ve demir kaybını azaltacaktır ancak bu da boyutsal olarak artışa sebep olacağından iletkeninde olduğu gibi bu aşamada da optimizasyon önem taşımaktadır. Doğru seçilen bir nüve kesiti ile artık transformatörün çalışma alanına göre indüksiyonu da belirlendikten sonra volt/sipir oranı hesaplanabilmektedir. İndüksiyon değeri, transformatörün dağıtım veya güç trafosu olmasına göre değişmektedir. Harmonikli sistemde çalışan transformatörlerde toplam harmonik distorsiyonu hesaplanarak buradan eşdeğer gerilime geçilir. Bu eşdeğer gerilim örneğin %10 oranında bir artışa sebep oluyorsa, indüksiyon değeri %10 arttığında sacın doyum bölgesinde olmamasına özen gösterilerek tasarım yapılmaktadır. Volt/sipir değeri hem demir kaybı hem indüksiyon, hem de bobinin katlar arası yalıtımında hesaba giren bir parametredir.

İletkeni ve nüvesi belirlenmiş transformatörün bir sonraki aşamada sargı tipi belirlenmektedir. Sargı tiplerine göre de sargı soğuma yöntemleri uygulanmaktadır. Sargı boyutları oluşturulduktan sonra nüveyi tutan devre tutucu seçimi yapılır. Devre tutucu demir, ağaç veya paslanmaz malzemeden yapılabilmektedir. Malzeme seçimi transformatörün çalışacağı alana ve akımına bağlıdır. Devre tutucular bobinden yayılan kaçak akıların halkaladığı yerlerden biridir ve bölgesel ısınmalar oluşabilmektedir.

Devre tutucudan sonra aktif kısım ağırlığına göre sıkıştırma amaçlı saplama seçimi ve bobin boyutlarına uygun olarak sargıları tutacak baskı elemanları seçimi yapılır. Saplamlar izole edilerek kullanılmaktadır.

Transformatör yağlı ise yağ içindeki atlama mesafeleri kullanılarak kazan boyutlandırılması yapılmaktadır. Kazan boyutlandırılması yapılırken kaçak akıların kazana sirayet etmesini önlemek amacı mesafeleri açmak mümkündür ancak bu hem fazladan yağ ve metal maliyeti hem de boyutu arttırılmış bir transformatör demektir ki bu hiç rekabetçi olmamaktadır. Bu nedenle kazanı büyütmekten ziyade başka çözümler araştırılmaktadır. Transformatörün toplam kaybına göre kazana, bu kaybı atacak ve soğumayı sağlayacak radyatör veya dalga duvarlar eklenmektedir. Eklenecek soğutucu yüzey transformatörün kaybı ve çalışma sıcaklığı ile ilgilidir. Transformatör kuru fakat muhafaza var ise, muhafaza yüzeyinin bu kaybı atıp atamadığı kontrol edilmektedir. Trafo gücü büyük ve havada atlama mesafeleri normuna göre bıraktığımız açıklardaki muhafaza yüzeyi toplam kaybı atamıyorsa fan eklemek çözüm olabilmektedir. Muhafaza yok, sadece aktif kısım var ise tasarımsal başka bir işlem kalmamaktadır. Şekil 3.1’de tasarımın akış şekli görülmektedir.



Şekil 3.1. Transformatör Tasarımının Basit Akış Şekli

Transformatörün bakır ve demir kaybı dışındaki diğer kaybı olan kaçak akılardan kaynaklı kayıplar, transformatörlerin tam akımlarıyla yüklenmesine, sargı yapısına, yapısal bileşenler ile sargılar arasındaki uzaklığa, yapısal bileşenlerin imal edildiği metal malzemenin elektromanyetik özelliklerine, kısa devre gerilimine ve bunun gibi birçok parametreye bağlı olarak üretilmektedir. Bu kayıplar yapısal bileşenler üzerinde yüksek sıcaklıklar meydana getirmekte ve zaman zaman transformatörün işletme dışı kalmasına sebep olmaktadır [23].

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda literatürde adı diğer kayıplar olarak geçen kaçak akılardan kaynaklı kayıpları azaltmak amacıyla uygulanacak yöntemlerin etkinliğinin belirlenmesinde deneysel çalışmalar önem taşımaktadır. Prototip bir güç transformatörünün ve gerekli şönt elemanların üretimi zaman almakta ve maliyeti oldukça yüksek olmaktadır. Standart bir dağıtım transformatöründe diğer kayıpların düşük seviyede olması sebebiyle, deneysel aşamada kullanılacak şönt eleman boyutlarındaki değişimlerin diğer kayıplar üzerine olan etkilerinin hassas biçimde ölçülmesi ve yorumlanması zorluklar içermektedir. Bu sebeplerle, bu çalışmada diğer kayıpların ve kullanılacak farklı boyutlardaki şönt elemanların etkinliğinin belirlenmesi amacıyla özel olarak tasarlanmış bir dağıtım transformatörü kullanılmaktadır. Bu amaçla üretilen transformatör üç fazlı, 1000 kVA gücünde, 34,5/0,4 kV gerilim seviyesinde bir dağıtım transformatörü olup, bağıl kısa devre gerilimi %16,5 olacak şekilde tasarlanmıştır. Transformatörün sargıları bakır iletken kullanılarak, nüvesi ise M5 malzeme kullanılarak, tasarım aşamasında nüve indüksiyonu 1,72 Tesla olacak şekilde tasarlanmıştır.

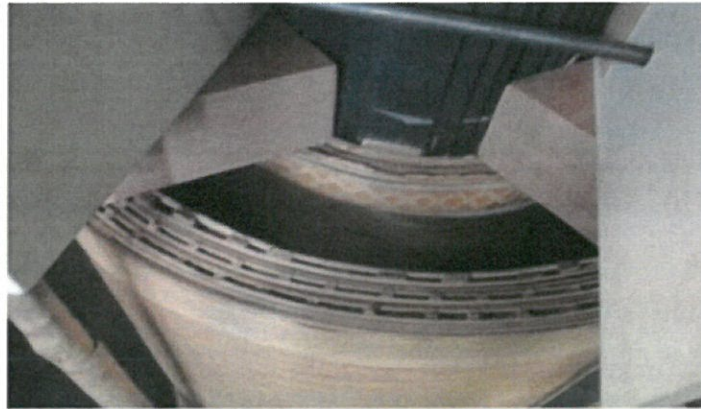
Bir transformatör tasarımı yapılırken gerekli manyetik akı yoğunluğu (B) değeri doğrusal ve doyum bölgesinde seçilmemelidir. Doğrusal bölgede B değerinin küçük olması nüvenin kesit alanının büyümesine ve dolayısıyla gücün azalmasına yol açmaktadır. Yüksek indüksiyon değerlerinde yani doyum bölgesinde de bobinlerin aşırı yüklenmesi nedeniyle ciddi ısınma problemleri ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ısı enerjisi ise bakır kayıplarını artırarak verimin düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenlerden dolayı manyetik indüksiyon büküm bölgesinde seçilmektedir. Büküm bölgesinde malzemenin optimum özelliklerine ulaşılmakta ve kayıplar en az seviyeye indirilerek en büyük verim değerine ulaşılmaktadır [13].

Prototip transformatörün kaçak akılara sebep verecek özel tip bir dağıtım transformatörü olmasını istediğimiz için kısa devre gerilimlerinin yüksek çıkması amacı ile alçak gerilim ve yüksek gerilim sargıları arası mesafe açılmıştır.

Tasarlanan transformatör ve diğer yapısal bileşenlerine ilişkin boyutlar Tablo 3.1’de verilmektedir. Üretilen prototip transformatörün alçak ve yüksek gerilim sargılarını gösteren fotoğraf Şekil 3.2’de, transformatörün 3 fazına ait sargıları ve bağlantı uçlarını gösteren fotoğraf Şekil 3.3’te, nüve, sargılar ve devre tutucuların yandan görünümü ise Şekil 3.4’te verilmektedir. Şekil 3.2’de aynı zamanda yağ kanalları ve bobinleri sıkıştırmaya yarayan takozlar görülmektedir. Şekil 3.3’te aynı zamanda ayar uçlarının komutatör bağlantıları ve faz uçlarının bushinglere çıkışı görülmektedir.

Tablo 3.1. Prototip Transformatörün Temel Boyutları

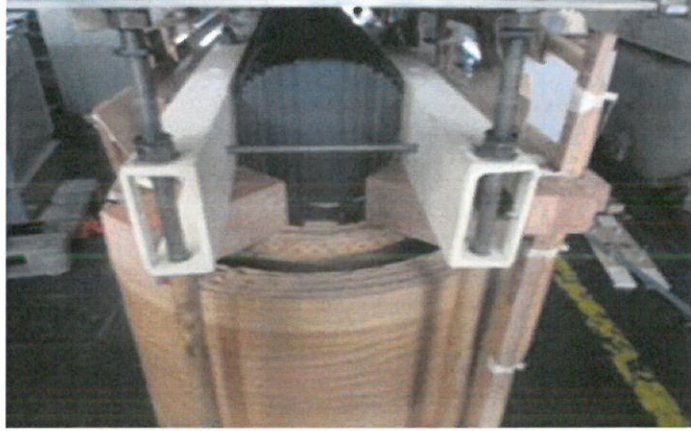
Manyetik Devre Boyutları	Sargı Boyutları	Kazan Boyutları
Bacak Çapı: 215 mm	AG sargı iç çapı: 225 mm	Boy: 1900 mm
Nüve Yüksekliği: 1130 mm	AG sargı dış çapı: 287 mm	En: 690 mm
Pencere Yüksekliği: 710 mm	AG sargı yüksekliği: 690 mm	Yükseklik: 1340 mm
Pencere genişliği: 400 mm	YG sargı iç çapı: 486 mm	Yan duvarların kalınlığı: 5 mm
Nüve kesiti: 336 cm ²	YG sargı dış çapı: 574 mm	Kapak ve alt taban kalınlığı: 6 mm
Nüve ağırlığı: 1273 kg	YG sargı yüksekliği: 690 mm	



Şekil 3.2. Alçak Gerilim ve Yüksek Gerilim Sargıları



Şekil 3.3. Üç Faza Ait Sargılar ve Bağlantı Uçları



Şekil 3.4. Nüve Sargılar ve Devre Tutucuların Yandan Görünümü

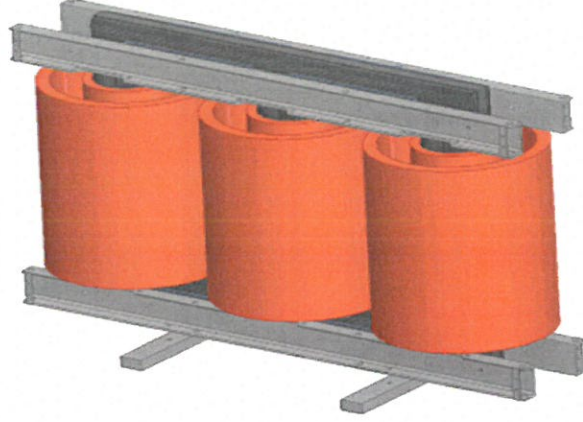
4. TRANSFORMATÖR BENZETİM ÇALIŞMALARI

4.1. Giriş

Tasarlanan referans transformatörün statik manyetik analizi ve geçici durum dinamik analizleri, üç boyutlu analiz yazılımı Maxwell ile gerçekleştirilmiştir. Transformatör kazanının yanı sıra [24] diğer bileşenlerin geometrik tasarımlarından dolayı, bu elemanlar üzerindeki kayıplar özellikle üç boyutlu analizler ile yüksek doğrulukla hesaplanabilmektedir [25]. Ayrıca, yapısal bileşenlerin imal edildiği metal malzemenin elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliği gibi elektromanyetik parametrelerinin de diğer kayıpları önemli düzeyde etkilemesi sebebiyle sonlu elemanlar yöntemi kolaylık sağlamaktadır. Bu yazılımla, tanımlanan problemin çözümü aşağıda açıklanan beş adımda gerçekleştirilmektedir.

4.1.1. Transformatör geometrisinin çizimi

Analiz sonuçlarının doğru biçimde elde edilmesi için en önemli noktalardan biri, transformatörün çiziminin yüksek doğrulukla yapılmasıdır. ANSYS Maxwell V16 yazılımı, analizi yapılacak modelin geometrisinin oluşturulması amacıyla bir çizim modülü içermektedir. Bununla birlikte, özellikle transformatörün yardımcı bileşenlerinin çiziminde kolaylık ve yüksek doğruluk sağlaması sebebiyle CAD yazılımından faydalanılmıştır. Böylelikle ilk adım olarak tasarım parametrelerine uygun olarak transformatörün üç boyutlu CAD çizimi tamamlanmıştır. Şekil 4.1’de referans transformatörün üç boyutlu CAD çizimi görülmektedir.

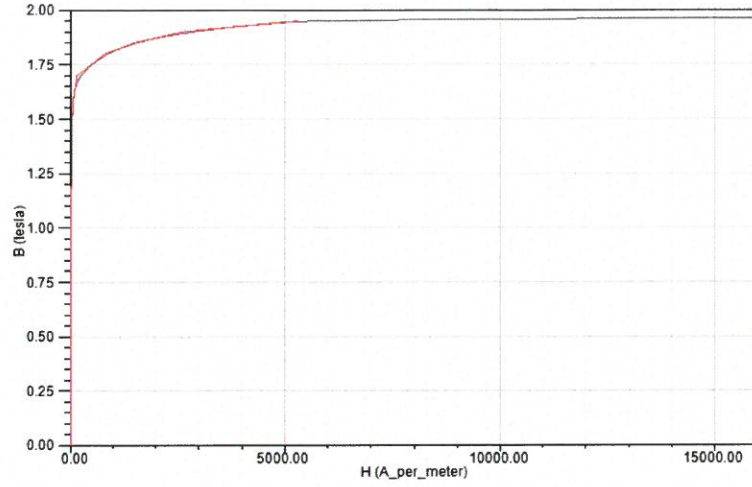


Şekil 4.1. Referans Transformatörün Üç Boyutlu CAD Çizimi

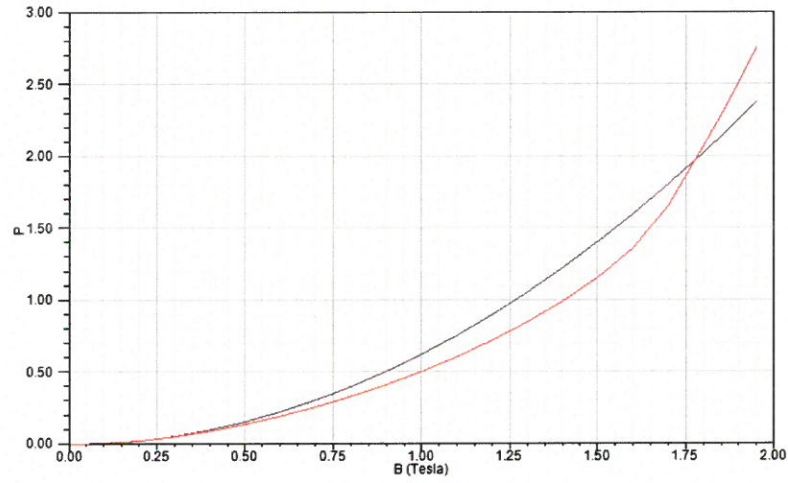
4.1.2. Transformatör bileşenlerinin adlandırılması ve malzeme tanımlanması

Elde edilen üç boyutlu çizim ANSYS Maxwell V16'ya aktarılarak nüve, faz sargıları, metal tutucular ve ayaklar gibi transformatörü ve bileşenlerini oluşturan parçalar, çalışmaların sonraki aşamalarında kolaylık sağlanması amacıyla uygun şekilde isimlendirilmiştir. Bunun ardından yukarıda sayılan transformatörün farklı kısımları ve diğer bileşenlerin malzeme tanımları, sayısal tasarım aşamasındaki kriterler göz önünde tutularak gerçekleştirilmiştir.

Transformatör nüvesi M5 olarak da adlandırılan elektriksel çelik malzeme kullanılarak tanımlanmış olup bu malzemeye ait B-H (B-akı yoğunluğu, H-manyetik alan şiddeti) ve B-P (B-akı yoğunluğu, P-malzemenin kilogram başına güç kaybı) eğrileri Şekil 4.2-4.3'te verilmektedir. Transformatörün faz sargıları bakır malzeme, devre tutucular ve ayaklar demir malzeme, devre tutucular ile nüve arası izolasyon katmanları ise pleksiglas malzeme olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. M5 Malzeme için Tanımlanan B-H Eğrisi



Şekil 4.3. M5 Malzeme için Tanımlanan B-P Eğrisi

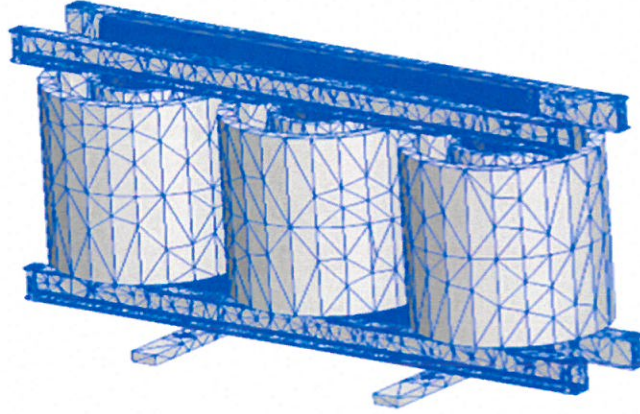
4.1.3. Sınır değerler ve uyarma kaynaklarının belirlenmesi

Bu adımda, tanımlanan probleme göre uyarma kaynakları ve elektrik veya manyetik alanların etkileyeceği sınır koşullar tanımlanmaktadır.

Model üzerinde gerçekleştirilecek analize uygun olarak faz sargıları gerilim kaynağı veya akım kaynağı ile uyarılabilmektedir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında transformatörün boşa ve yükte çalışmaları başta olmak üzere uygulanan analize göre bu uyarma kaynaklarından faydalanılarak analizler gerçekleştirilmiştir.

4.1.4. Çözüm

Çözüm aşamasında, öncelikle kaba bir sonlu elemanlar yüzeyi (finite element mesh) otomatik olarak oluşturulur. Bu yüzeye göre yapılan çözüm ile elde edilen enerji hatası değeri (error energy) hedeflenen değer ile karşılaştırılarak sonlu elemanlar yüzeyinde çeşitli iyileştirmeler otomatik olarak yapılır. Şekil 4.4'te referans transformatör için oluşturulan sonlu elemanlar yüzeyi görülmektedir.



Şekil 4.4. Referans Transformatör için Oluşturulan Sonlu Elemanlar Yüzeyi (Mesh)

4.1.5. Sonuç izleme

Analizi tamamlanan transformatörün manyetik akı dağılımı, alan şiddeti, gerilim ve akım başta olmak üzere elektriksel büyüklükleri gibi değerler analiz sonucunda elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar gerek görsel gerekse sayısal büyüklükler olarak izlenebilmektedir.

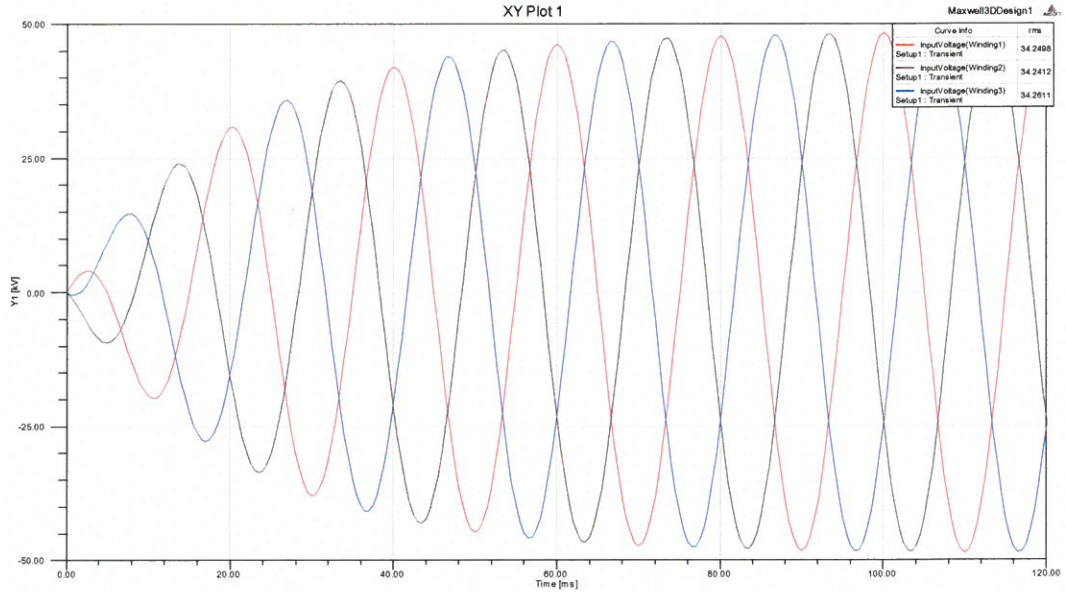
Tasarlanan referans transformatörün bilgisayar ortamında gerçekleştirilecek benzetim çalışmaları esnasında analizi yapılacak ve sonuçları değerlendirilecek başlıca çalışma durumları transformatörün boşa çalışma ve kısa devre çalışma durumlarıdır. Bu iki çalışma durumu ile transformatörün analitik tasarım aşamasında öngörülen kayıp güç değerleri başta olmak üzere birçok farklı durumun değerlendirilmesi ve yorumlanması mümkün olabilecektir. Bu doğrultuda ilk olarak transformatörün boşa çalışma durumu için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.

4.2. Analizler

4.2.1. Boşta çalışma analizi

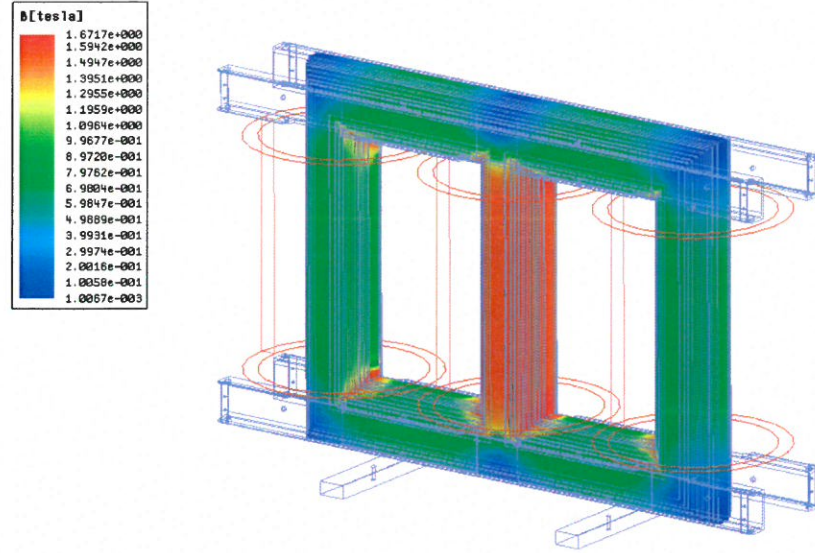
Transformatörün boşta çalışma analizi, deneysel boşta çalışma testine benzer şekilde transformatörün primer (yüksek gerilim) sargılarına anma geriliminin uygulanması ile gerçekleştirilmektedir.

Deneysel test esnasında transformatörün sekonder sargıları açık devre konumunda bırakılırken, bilgisayar benzetimi için sekonder devre direnç değerleri gigaohm düzeyinde yüksek olarak belirtilir ve açık devre durumunun benzetimi gerçekleştirilir. Şekil 4.5'te transformatörün primer faz sargılarına uygulanan anma gerilim dalga şekilleri gösterilmektedir.



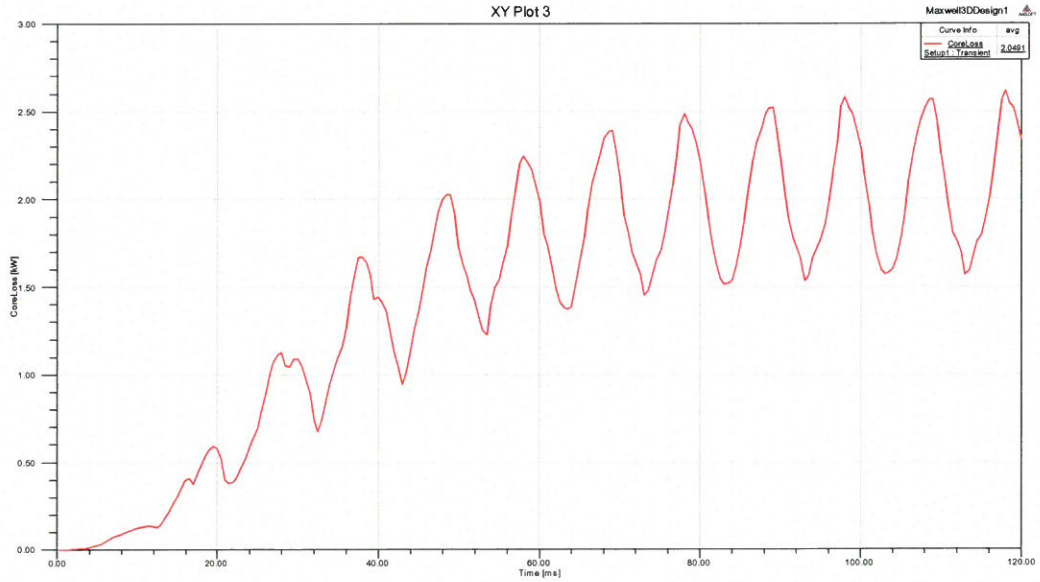
Şekil 4.5. Boşta Çalışma - Primer Sargı Gerilimleri

Referans transformatörün analizi ile gözlenen büyüklüklerden biri, transformatör çekirdeği (nüve) üzerindeki manyetik akı yoğunluğudur. Transformatörün analitik tasarımı sonucunda transformatör nüvesinin endüksiyon değeri $B=1,72$ T olarak hesaplanmıştır. Benzetim çalışması sonucunda ise Şekil 4.6'da görüldüğü gibi nüve endüksiyonu $1,672$ T olarak elde edilmiş olup sayısal tasarım değerinin doğrulanması mümkün olmuştur.



Şekil 4.6. Nüvedeki Manyetik Akı Yoğunluğu Dağılımı

Transformatörün boşa çalışma analizi ile elde edilen büyüklüklerden bir diğeri ise nüvede oluşan boşa çalışma kaybıdır. Sayısal tasarım prosedürü sonucunda 2075 W olarak öngörülen kayıp değeri, manyetik analiz çalışması sonucunda ise 2049 W olarak elde edilmiş olup Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

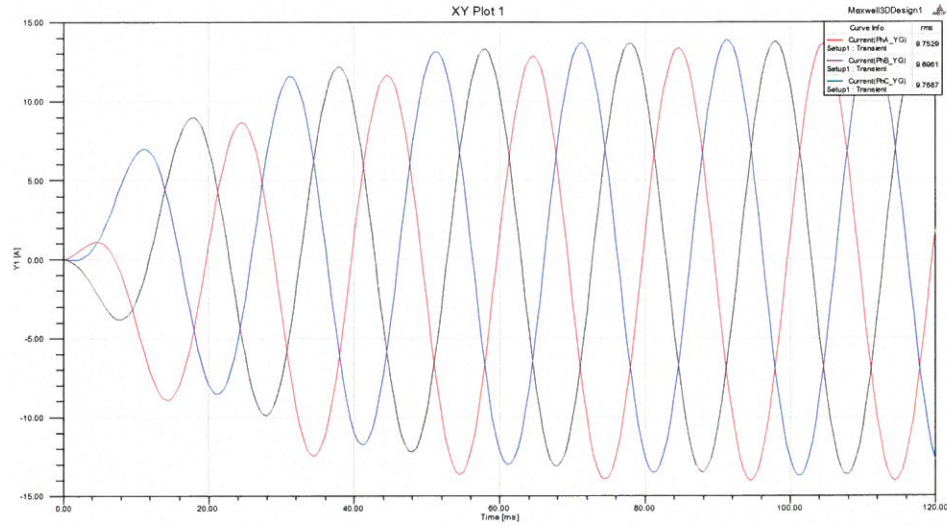


Şekil 4.7. Boşa Çalışma – Nüve Kayıpları

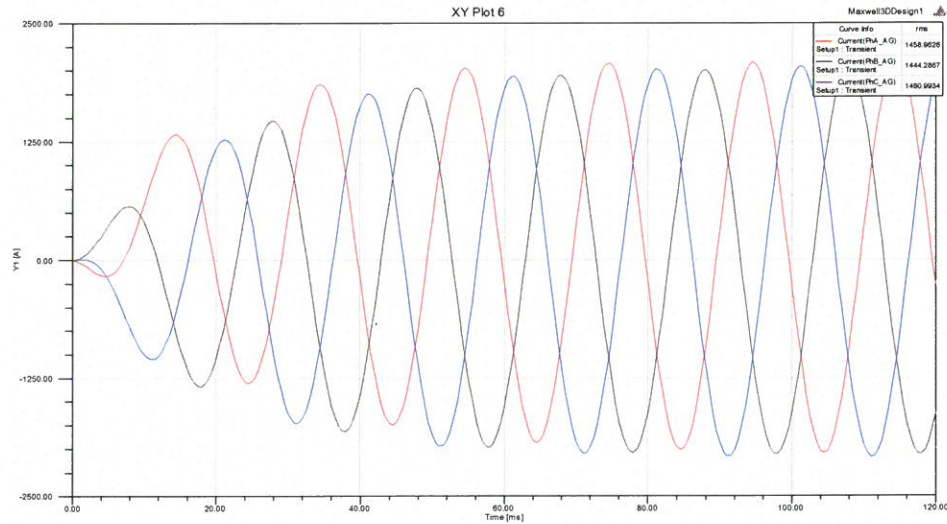
4.2.2. Kısa devre çalışma analizi

Transformatörün kısa devre çalışma durumu için benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir.

Boşta Çalışma benzetiminde sekonderin yüksüz durumunu temsil etmesi için gigaohm mertebesinde direnç kullanılmakta idi. Kısa devre çalışma analizinde ise kısa devre durum benzetimi için direnç değeri çok küçük belirlenmektedir. Bu değer 1 mikroohm seviyesindedir. Şekil 4.8’de kısa devre çalışma anında primer sargı akımları, Şekil 4.9’da ise kısa devre çalışmada sekonder sargı akımları verilmektedir.



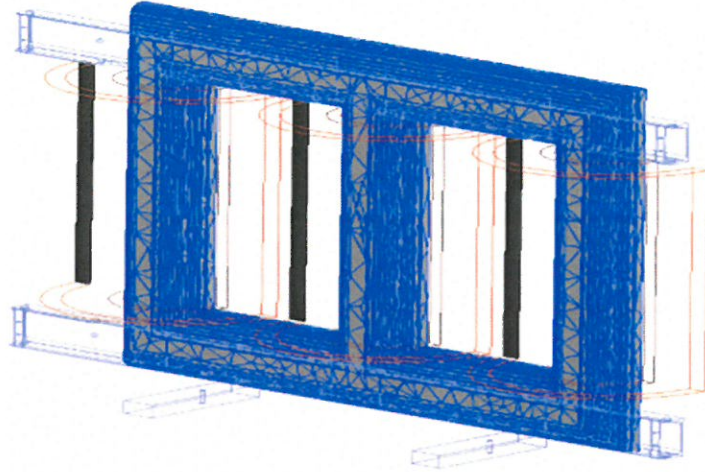
Şekil 4.8. Kısa Devre Çalışma – Primer Sargı Akımları



Şekil 4.9. Kısa Devre Çalışma – Sekonder Sargı Akımları

Transformatörün benzetim çalışması sonucunda sargı kayıpları 15799 W olarak belirlenmektedir. Tasarlanan transformatörün tam modelinin analizi için sonlu elemanlar yazılımı tarafından yaklaşık 400000 adet sonlu elemandan oluşturulan bir ağ yapısı oluşturulmakta ve analizi yapılmaktadır.

Çözüm süresinin azaltılması ve analizin hızlandırılması amacıyla, tasarlanan transformatörün yarı-model ve çeyrek-modeline ait benzetim çalışmaları yapılmıştır. Şekil 4.10’da yarı modele ait sonlu eleman ağ yapısı verilmektedir.



Şekil 4.10. Yarı Modele Ait Sonlu Eleman Ağ Yapısı

Magnetostatic analiz ile, statik manyetik alan değerleri hesaplanmaktadır. Bu alan kaynağı iletkenlerden akan DC akımlar veya mıknatıs malzeme olabilmektedir. Sonuç olarak kuvvet, moment, enerji ve endüktans değerleri hesaplanabilmektedir.

Transient analiz ile zaman domeninde anlık olarak manyetik alan değerleri hesaplanmaktadır. Bu alan kaynağı iletkenlerden akan ve değeri zamana bağlı olarak anlık değişen gerilim ve akımlar, sargılara akuple edilen harici elektriksel devreler veya mıknatıs malzeme olabilmektedir. Sonuç olarak kuvvet, moment, akı ve kayıp değerleri hesaplanabilmektedir.

4.3. ANSYS Maxwell Yazılımı ile Şönt Elemanların Kaçak Akılara Etkisinin İncelenmesi

Kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların başlıca sebebi, sargılarda meydana gelen ve kazan duvarlarına sirayet eden kaçak akılardır. Bu nedenle, sargılar ile kazan duvarları arasındaki uzaklık, meydana gelen diğer kayıpları etkilemektedir. Bu uzaklığın artırılması ile kazan kayıplarının azaltılması mümkün olmakla beraber, kazan boyutlarındaki artış kazan hacmini ve ihtiyaç duyulacak yağ miktarını da artıracığından transformatörün toplam ağırlığı ve maliyetinde de artışa neden olmaktadır.

Bu sebeplerden dolayı, kazan kayıplarının azaltılması amacı doğrultusunda kazan boyutlarının artırılmasının ne kadar etkili sonuçlar meydana getireceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, geliştirilen prototip transformatörün kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların kazan boyutlarına bağlı değişimi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen elektromanyetik analizler ile belirlenmiştir.

Kazanda meydana gelen güç kayıplarının %92,8'i kazanın yan duvarlarında gözlenmiştir. Bu nedenle, kazanın üst kapak ve alt tabanındaki diğer kayıplar ihmal edilerek sadece yan duvarlarda meydana gelen kayıplar göz önünde tutulmaktadır.

Orijinal kazan tasarımında yüksek gerilim sargıları ile kazan duvarı arasındaki uzaklık 50 mm olarak belirlenmiştir. Bu uzaklık, uzun ve kısa yan duvarların her biri için 50 mm'lik adımlar ile 250 mm'ye kadar sırasıyla artırılarak benzetim çalışmaları tekrarlanmış ve kazan duvarları üzerinde meydana gelen diğer kayıplardaki değişim belirlenmiştir.

İlk olarak, kısa yan duvarın uzunluğu sabit tutularak orijinal kazan tasarımında 1900 mm olan uzun yan duvarın uzunluğu 100 mm'lik adımlar ile 2400 mm'ye kadar artırılmıştır. Tablo 4.1'den görüldüğü üzere, kazanda meydana gelen toplam kayıpların (2900,78 W) yaklaşık %90'ı (2612,61 W) yan duvarlar üzerinde oluşmaktadır.

Tablo 4.1. Uzun Kenar Uzunluğuna Bağlı Olarak Kazan Kayıpları

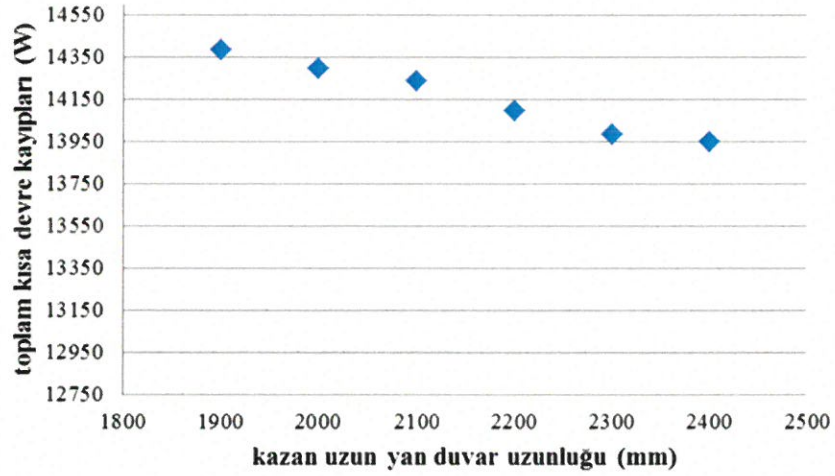
Kazan			Güç Kayıpları (W)			
Kısa kenar (mm)	Uzun kenar (mm)	Yükseklik (mm)	Yan duvarlar	Alt taban	Üst kapak	Kazan toplamı
690	1900	1340	2612,61	143,30	144,86	2900,78
	2000		2341,63	120,82	150,32	2612,77
	2100		2153,84	117,42	128,34	2399,60
	2200		2094,87	113,86	112,61	2321,33
	2300		1945,85	110,75	120,05	2176,64
	2400		1812,35	107,50	121,10	2040,95

Bu analizin ardından uzun yan duvarın uzunluğu orijinal tasarım değerinde sabit tutularak, orijinal kazan tasarımında 690 mm olan kısa yan duvarın uzunluğu 100 mm'lik adımla 1190 mm'ye kadar artırılmıştır. Tablo 4.2'de kısa yan duvar değişiminin kayıplara etkisi gösterilmektedir.

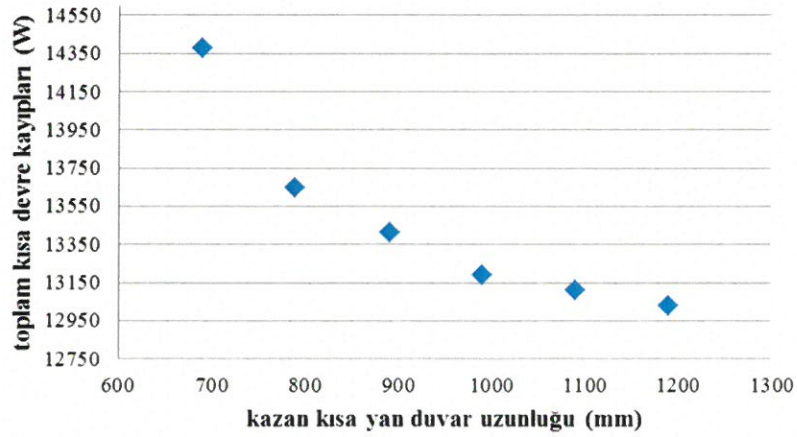
Her iki durumda kazan kayıplarının değişimi grafiksel belirlenmiş olup Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmektedir.

Tablo 4.2. Kısa Kenar Uzunluğuna Bağlı Olarak Kazan Kayıpları

Kazan			Güç Kayıpları (W)			
Kısa kenar (mm)	Uzun kenar (mm)	Yükseklik (mm)	Yan duvarlar	Alt taban	Üst kapak	Kazan toplamı
690	1900	1340	2612,61	143,30	144,86	2900,78
790			1798,66	158,71	108,61	2065,97
890			1443,23	122,75	127,91	1693,88
990			1213,86	118,51	123,52	1455,89
1090			1117,67	123,40	137,39	1378,46
1190			1016,57	129,9	122,99	1269,46



Şekil 4.11. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Kazanın Uzun Kenar Uzunluğuna Bağlı Değişimi

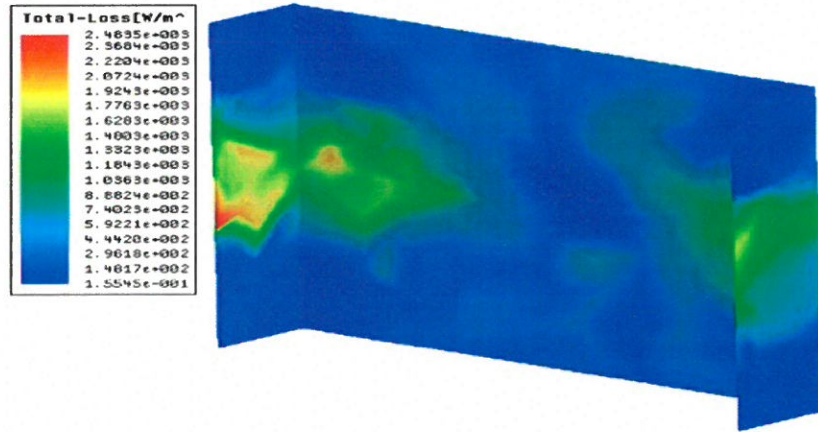


Şekil 4.12. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Kazanın Kısa Kenar Uzunluğuna Bağlı Değişimi

Elde edilen sonuçlar, kazan duvarlarında meydana gelen kayıpların kazan duvarı ile sargılar arası uzaklık ile ters orantılı olarak değiştiğini göstermektedir.

Yüzey alanına bağlı olarak, kazan kayıplarının büyük kısmı uzun yan duvarlar üzerinde meydana gelmektedir. Uzun kenarının transformatör sargılarından uzaklaştırılmasının kazan kayıpları üzerinde önemli oranda azaltıcı etkisi olacağı görülmektedir. Bununla birlikte, orijinal tasarımda kazanın uzun yan duvarı ile sargı arasındaki uzaklığın her 100 mm'lik artışı kazan hacminde 0,0925 m³ artışa ve dolaylı olarak 81,46 kg ilave yağ gereksinimine neden olmaktadır. Benzer şekilde, kazanın kısa yan duvarı ile sargı arasındaki uzaklığın her 100 mm'lik artışı ise kazan hacminde 0,255 m³ artış ve 224,3 kg ilave yağ ihtiyacı meydana getirmektedir. Bu değerler göz önünde tutularak, kazan boyutlarını artırarak kazan kayıplarının azaltılabileceği, buna karşın uygulamada yaratacağı ağırlık ve maliyet artışının uygulanabilirliği ortadan kaldıracak sonucuna varılmaktadır. Bu sebeple, daha büyük kazan boyutları öngörülerek ilave analizlere gerek duyulmamıştır.

Kazan duvarının iç yüzeyinde meydana gelen akı yığılmaları ve bunun sonucunda ortaya çıkan güç kayıpları Şekil 4.13'ten görüldüğü üzere, kazan duvarının sargılar ve nüve tutucu elemanlara karşılık gelen bölgelerinde yoğunlaşmaktadır.



Şekil 4.13. Kazan Duvarlarının İç Yüzeyinde Gözlenen Güç Kayıplarının Dağılımı

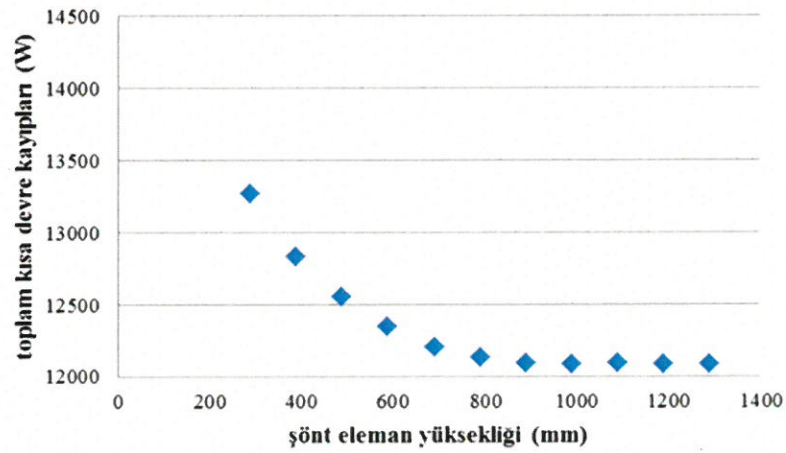
Alüminyum ve paslanmaz çelik gibi manyetik özellikli olmayan malzemeler kullanılarak uygulanan ekranlama yönteminin etkin bir yöntem olduğu literatürde ifade edilmektedir. Bununla birlikte malzeme ve imalat maliyetleri transformatörün toplam maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır.

Bu nedenle, transformatör nüvesinin imalatında da kullanılan M5 malzemeden imal edilen şönt elemanların kullanımı düşük maliyetli ve etkin bir yöntem olarak ön plana çıkmaktadır. Kazan duvarının iç yüzeyine yerleştirilen bu elemanlar, yüksek manyetik geçirgenlik değerleri sebebiyle kaçak akı önünde bir bariyer oluşturarak kazan duvarlarına etki etmesini engellemektedirler. Kullanılacak manyetik şönt elemanların en uygun boyutlarını ve kazan kayıpları üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla yoğun benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

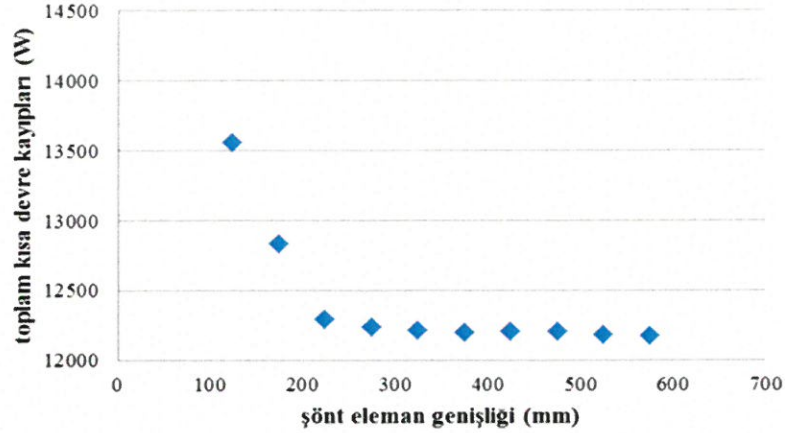
Analizlerde kazan duvarlarının iç yüzeyine her bir uzun kazan duvarına üç adet, her bir kısa kazan duvarına da bir adet olmak üzere toplam sekiz adet şönt eleman yerleştirilmiştir. Kullanılan her bir şönt eleman, kendisine karşılık gelen sargı ile yatay ve dikey yönlerde simetrik olarak yerleştirilmiştir.

Şönt elemanların en, boy ve kalınlıklarına bağlı olarak kazan kayıpları üzerine etkileri incelenmiştir. Elektromanyetik analizler esnasında bu üç parametreden iki tanesi sabit tutularak üçüncü parametre değiştirilmiştir.

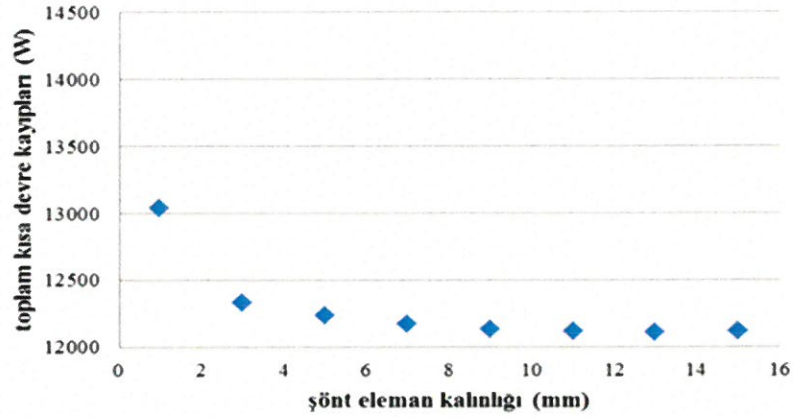
Analiz sonuçları şönt eleman boyutlarına bağlı olarak Şekil 4.14-4.15 ve 4.16'da verilmekte olup, şönt elemanların kazan duvarlarında meydana gelen kayıpları önemli miktarda azalttığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.14. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Yüksekliğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.15. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Genişliğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.16. Kısa Devre Çalışma Kayıplarının Şönt Eleman Kalınlığına Bağlı Değişimi

İlk olarak, şönt elemanların yüksekliği 290 mm ile 1290 mm arasında 100 mm'lik adımlar ile artırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde her bir şönt elemanın genişliği 475 mm, kalınlığı ise 5 mm değerinde sabit tutulmaktadır.

290 mm yükseklikteki şönt elemanın kullanıldığı durumda kazan duvarlarındaki kayıplar 1216,04 W olarak hesaplanmaktadır. Yükseklik değerinin artışına bağlı olarak kazan kayıplarının azaldığı görülmekle beraber, kullanılan şönt eleman yüksekliğinin 690 mm olan sargı yüksekliğini aşmasının ardından kayıplardaki azalma eğiliminin yaklaşık olarak sıfıra düştüğü gözlenmiştir.

Benzer şekilde, kazan duvarlarındaki kayıpların kullanılan şönt elemanların genişliği ile ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir.

Bu azalmanın belirlenmesi için her bir manyetik şönt elemanın genişliği 50 mm'lik adımlar ile 125 mm ile 575 mm arasında artırılmıştır.

Bu analizler esnasında şönt elemanların yüksekliği bir önceki aşamada belirlenen 690 mm değerinde, kalınlığı ise 5 mm değerinde sabit tutulmaktadır. En düşük genişlik değeri olan 125 mm için kazan duvarlarındaki kayıplar 1506,16 W olarak hesaplanmış olup, genişlik değerinin artmasıyla beraber kazan kayıpları da azalmaktadır. 275 mm genişlik değerine kadar azalma eğilimi oldukça fazla olup, daha geniş ölçüler için azalma eğiliminde düşüş gözlenmektedir. Prototip transformatörün tasarım büyüklükleri göz önünde tutulduğunda, 275 mm'lik genişlik değerinin yaklaşık olarak alçak gerilim sargısının dış çapına eşit olduğu görülmektedir.

Son olarak ise, şönt elemanların kalınlıkları 2 mm'lik adımlar ile 1 mm ile 15 mm arasında artırılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, şönt elemanların yükseklik ve genişlik değerleri önceki analiz sonuçlarından faydalanılarak sırasıyla 690 mm ve 275 mm olarak belirlenmiştir. 1 mm kalınlıktaki şönt elemanların kullanıldığı durumda kazan duvarlarında oluşan kayıpların %38,01 oranında azaldığı, artan kalınlık değeriyle birlikte kayıpların azalmaya devam ettiği görülmektedir. 5 mm kalınlıktaki şönt elemanlar kazan kayıplarını %90'dan fazla miktarda azaltmış olup, daha kalın şönt elemanların kullanımının diğer kayıplar üzerinde önemli oranda etkisi gözlenmemiştir. Şönt elemanların kalınlıklarına yönelik analizlerde, şönt elemanlar üzerinde meydana gelen manyetik indüksiyon değerleri de izlenmiştir. 5 mm kalınlık değerinden daha ince şönt elemanların kullanıldığı durumlarda, şönt elemanların indüksiyon değerinin, bu elemanların imalatında kullanılan M5 malzemesinin doyma değeri olan 1,7 T'lık değer üzerinde olduğu gözlenmiştir. Bu aşırı değer şönt elemanlarda yüksek kayıplar meydana gelmesine ve bunun sonucunda ısı artışına neden olacaktır. Bu sebeple, şönt elemanların en uygun kalınlık değerinin belirlenmesinde, transformatörde meydana gelen kaçak akı miktarı, sargılar ile arasındaki uzaklık, şönt elemanların üretiminde kullanılan manyetik malzemenin elektromanyetik değerleri gibi birçok parametrenin değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmaktadır.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Önceki bölümde verilmekte olan sonuçların doğrulanması amacıyla deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Manyetik şönt elemanların üretim maliyetleri ve deneysel çalışmaların gerektirdiği zaman dikkate alınarak, analizleri hali hazırda gerçekleştirilmiş olan dört farklı şönt eleman boyutları için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Her bir ölçüm esnasında toplam güç kayıpları, anma akım değeri kullanılarak gerçekleştirilen kısa devre çalışma testi ile belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda transformatör kazanının farklı kısımlarında meydana gelen diğer kayıpların ayrı ayrı belirlenmesi mümkün olmadığından, manyetik şönt elemanların etkinliğinin belirlenmesinde kısa devre kayıp değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, her bir şönt eleman için benzetim çalışmalarında hesaplanmış olan toplam kısa devre kayıpları deneysel ölçümlerde elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Kullanılan şönt eleman boyutları ile kısa devre kayıplarının hesaplanan ve ölçülen değerleri Tablo 5.1’de verilmektedir.

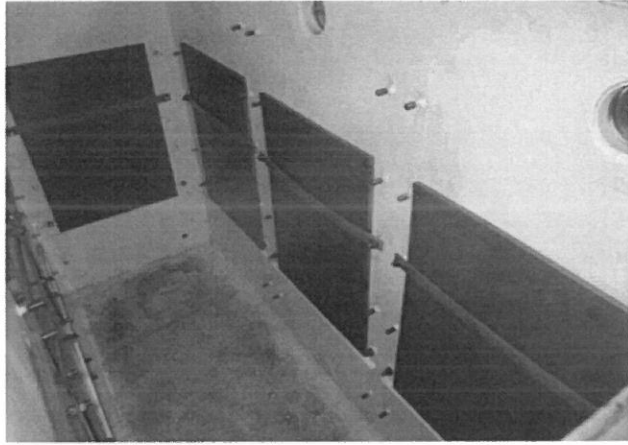
Tablo 5.1. Farklı Şönt Uygulamaları İçin Elde Edilen Kısa Devre Kayıplarının Karşılaştırılması

Test No	Şönt eleman boyutları, mm			Kısa devre kayıpları, W		Hata(%)
	Yükseklik	Genişlik	Kalınlık	Hesaplanan	Ölçülen	
1	290	475	5	13268,43	12670	-4,7
2	690	475	5	12203,18	12040	-1,36
3	690	275	5	12237,61	12161	-0,63
4	690	475	13	12102,71	11890	-1,79

Bir ve üç numaralı testlerde kullanılan şönt elemanların kazan duvarları içerisine yerleştirildiği durumlar Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Test-1’de Kullanılan Şönt Elemanların Kazan İçerisindeki Yerleşimi



Şekil 5.2. Test-3’te Kullanılan Şönt Elemanların Kazan İçerisindeki Yerleşimi

Her bir test için elde edilmiş olan ölçüm değerlerinin oldukça yüksek doğruluk oranı ile benzetim çalışması sonuçlarını doğruladığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, deneysel olarak doğrulanmamış olan benzetim çalışmalarının sonuçlarının da benzer şekilde yüksek doğrulukta olduğu öngörülmektedir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, kazan duvarlarının iç yüzeylerine yerleştirilen şönt elemanlar ile transformatörün kısa devre kayıplarında yaklaşık %16’ya kadar azalma sağlandığı görülmektedir. Bu değer, yaklaşık olarak kaçak akıların kazan duvarlarında meydana getirdiği kazan kayıplarının tamamına karşılık gelmektedir.

Belirlenmiş olan en uygun boyutlardaki şönt elemanların kullanımı ile azaltılan kazan kayıpları, hesaplanan toplam kazan kayıplarının %91,43'üne karşılık gelmekte olup, bu değerin transformatörün kısa devre kayıplarının ise %14,9'una eşit olduğu hesaplanmaktadır. Buradan yola çıkarak, önerilen en uygun boyutların oldukça tatminkar sonuçlar verdiği belirlenmektedir.

Önerilen boyutlardaki her bir şönt elemanın ağırlığı 7,26 kg olup, kullanılan sekiz adet şönt elemanın toplam ağırlığı 58,06 kg'dır. Bu değer, kazan boyutlarının artışı ile ortaya çıkan ağırlık değeri ile kıyaslandığında oldukça düşüktür. Kayıp değerinde sağlanan azalma oranı ile birlikte değerlendirildiğinde, şönt elemanlar kullanarak diğer kayıpları azaltmanın üstünlüğü açıkça görülmektedir.

5.2. Test ve Ölçümler

5.2.1. Rutin testler

Rutin testler sonucunda ölçümü yapılan ve tasarımın doğrulanması amacıyla kullanılan diğer temel büyüklükler kayıp güç değerleridir. Prototip transformatörün tasarımı sonucunda 2075 W, benzetim çalışması ile ise 2049 W olarak öngörülen boşa çalışma kayıpları, test sonucunda 1916 W olarak ölçülmüştür.

Bakır kayıplarına ilişkin sonuçlarda benzetim çalışmalarında bulunan analiz değeri ile ölçülen arasında daha büyük farklılık görülmüştür. Bunun başlıca sebebi olarak, tasarlanan ve üretilen sargılar ile benzetim çalışmasında kullanılan sargı modeli arasındaki farklar gösterilebilir. Üretilen prototip transformatör sargıları dairesel kesitli bakır iletkenler kullanılarak üretilmiş olup, aynı zamanda katmanlar arasında soğutma amacıyla hava boşlukları bulunmaktadır. Analizlerde ise, çözüm süresini kısaltmak ve bilgisayar gücünü daha etkin kullanabilmek amacıyla sargılar blok şeklinde katı model olarak modellenmiştir. Bu sebeple, yazılım tarafından sargı direncinin ve dolayısıyla sargı kayıplarının belirlenmesinde hata payı daha yüksek değerde gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, test sonuçlarının tasarım ve analiz sonuçlarına kıyasla daha düşük çıkması sebebiyle bu hata payı kabul edilebilir nitelikte değerlendirilmektedir. Tüm ölçülen değerlerin yazdığı test raporu Şekil 5.3'te verilmektedir.


SÖNMEZ TRANSFORMATÖR SAN. VE TİC. A.Ş.

İstanbul Mah. 14591 Sok. No: 2/4 Kat: 10 BEŞİKÖZÜ YERİNE 34365 54 50 Fax: 0212 655 17 82


TRANSFORMATÖR TEST RAPORU

Rapor No 16770	Güç(k VA) 1000	Grup Dyn 11	Soğutma ONAN	Makina No 11147	Sipariş No Tİ-15/057	Standard EN 60076-1	Tasarım No 4170
-------------------	-------------------	----------------	-----------------	--------------------	-------------------------	------------------------	--------------------

Tip No H	İmal Yılı 2016	Fr.(Hz)/Faz 50 / 3	Isınma 60 / 65 °C	MÜŞTERİ TEYDEP
-------------	-------------------	-----------------------	----------------------	-------------------

PRİMER GERİLİMİ(V)	PRİMER AKIM(A)	SEKONDER GERİLİMİ(V)	SEKONDER AKIM(A)	ANA KADEME SARGI DİRENÇLERİ	MEGGER ÖLÇMELERİ(MΩ)
1 30000				t=20 °C	t=20 °C 30 sn 80 sn
2 31500				R 1U1V 14,005	YG- T (5000V) (5000V)
3 33000				YG(Ω)R 1V1W 14,089	76300 85400
4 34500 10,73		400	1443,38	R 1W1U 14,089	YG-AG (5000V) (5000V)
5 36000				R 2U2N 1,150	79900 88800
				AG(mΩ)R 2V2N 1,158	AG- T (2500V) (2500V)
				R 2W2N 1,185	57000 63800

KADEME NO	BOŞTA ÇEVİRME ORANI	ÖLÇÜLEN BOŞTA ÇEVİRME ORANLARI	% BOŞTA ÇEVİRME ORANLARI HATALARI
		1U/2U2N 1V/2V2N 1W/2W2N	1U/2U2N 1V/2V2N 1W/2W2N
1	75,000	74,909 74,909 75,071	-0,1227 -0,1427 0,0947
2	78,750	78,642 78,663 78,814	-0,1371 -0,1105 0,0813
3	82,500	82,369 82,411 82,564	-0,1588 -0,1076 0,0776
4	86,250	86,119 86,107 86,322	-0,1519 -0,0962 0,0835
5	90,000	89,963 89,925 90,073	-0,1522 -0,0633 0,0811
		Wdc= 9558	
		Ws= 2643	

BOŞTAKI KAYBI(W)	GARANTİ EDİLEN 2000	TOLERANS + %0	ÖLÇÜLEN 1916	BOŞTAKI AKIM % Io(A)	GARANTİ EDİLEN 1,10	TOLERANS + %30	ÖLÇÜLEN 0,53
---------------------	------------------------	------------------	-----------------	-------------------------	------------------------	-------------------	-----------------

BAKIR KAYBI(W)	GARANTİ(75 °C) 15000	TOLERANS + %0	ÖLÇÜLEN 13827	KISA DEVRE GERİLİMİ(%)	GARANTİ(75 °C) 20,00	TOLERANS ± %10	ÖLÇÜLEN 15,97
-------------------	-------------------------	------------------	------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------	------------------

YG-(TANK+AG)	70 kV	50 Hz,60 sn	YAĞ CİNSİ	NYTRO LYRA X
AG-(TANK+YG)	3 kV	50 Hz,60 sn	DELİNME GERİLİMİ(ORT.)	62 kV/2,5mm
SARIM MUAYENESİ	800 V	200 Hz,30 sn	GÜÇ FAKTÖRÜ(%P.F.)	t=20 °C

PF	0,721	VArs	3,00	kVar
----	-------	------	------	------

VERİMLER (%)						REGÜLASYON (%)	
YÜK	1 / 4	2 / 4	3 / 4	4 / 4	5 / 4	Cosθ=1	Cosθ=0,8
Cosθ=1	98,60	98,94	98,72	98,45	98,15	2,05	11,35

BOYUTLAR	UZUNLUK	GENİŞLİK	YÜKSEKLİK	AĞIRLIKLAR	YAĞ	K.Ç.KAĞIRLIĞI	TOPLAM
mm	2355	1415	2254	kg	1655	3530	6400

Detaylar için BİZ ÇİZİM No:4170 - 00031511

TARİH

4.3.2016

Müşteri veya Temsilcisi
SÖNMEZ TRAFO A.Ş.

Oluş SÖNMEZ

Şekil 5.3. Prototip Transformatör Test Raporu

5.2.2. Tip testleri

Tip testi olarak gerçekleştirilen sıcaklık artışı testi EN 60076-1 [26] ve EN 60076-2 [18] standartlarının gerekliliklerine uygun olarak uygulanmıştır. Transformatörün tasarım kriterleri olarak tam yükünde yağ ve sargıdaki sıcaklık artışı ilgili standartlara göre sırasıyla 60°C ve 65°C'dir. Toplam kayıpla çalışma durumunda 25°C'lik ortam sıcaklığında gerçekleştirilen test sonucunda en yüksek yağ ısınması 40,3°C olarak belirlenmiştir. Bu değer kabul kriteri olan 60°C'nin altında olduğu için test sonucu başarılı olarak değerlendirilmektedir. Testin ikinci aşamasında ise nominal akımla çalışma durumunda primer sargı sıcaklığı 59,1°C, sekonder sargı sıcaklığı ise 59,6°C olarak hesaplanmaktadır. Bu sıcaklık değerleri ilgili sargılardaki yağa göre sıcaklık artışının sırasıyla 28,56°C ve 29,03°C olduğunu ortaya koymaktadır. Sargı sıcaklıkları için elde edilen değerler kabul kriteri olan 65°C'nin altında olduğu için test sonuçları başarılı olarak değerlendirilmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bir transformatörün verimini yükseltmek için transformatörün toplam kaybını düşürmek gerekmektedir. Toplam kayıp ifadesi demir kaybı, bakır kaybı ve kaçak akılardan kaynaklı kayıpları içermektedir. Kaçak akılardan kaynaklı kayıpların azaltılması, verimi yükseltilmiş transformatör üretiminde ayırt edici bir özelliktir. Bu nedenle tasarım sürecinde kaçak akılardan kaynaklı kayıplara etki eden parametreleri belirlemek ve bu kayıpları önlemek oldukça önemlidir.

Kaçak akılardan kaynaklı kayıplara etki eden parametrelerin ilki, kazan duvarları ile transformatörün faz sargıları arasındaki mesafe olarak ortaya çıkmaktadır. Bu mesafenin artırılması kazan üzerinde meydana gelen kayıpların azalmasını sağlamaktadır. Fakat bununla birlikte kazanın boyutlarının artışı, ihtiyaç duyulacak yağ miktarını artıracığından dolayı transformatörün toplam ağırlığının da artmasına neden olacaktır. Bu sebeple, kazan boyutlarının artırılması yerine uygulanacak diğer önlemler ile kaçak akının kazan üzerine sirayet etmesinin ve kayıplara neden olmasının önüne geçilmektedir. Giriş bölümünde verilen konuyla ilgili araştırmalardan hareketle, diğer önlemler arasında en etkili olan çözümün kazan içerisine şönt elemanlar yerleştirmek olduğu bilinmektedir.

Bu çalışmada, bir transformatörün kaçak akılardan kaynaklı kayıplarının azaltılması amacıyla en uygun boyutlardaki şönt elemanların belirlenmesi hedeflenmektedir. Çalışmalar, bu amaçla özel olarak tasarlanmış olan 1000 kVA gücündeki bir dağıtım transformatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar yönteminden faydalanılarak statik analizler ile transformatörün nüve indüksiyonu, nüve kayıp değerleri, dinamik analizler ile ise zamana bağlı olarak sargı akım ve gerilimleri, sargı kayıpları, kazan kayıpları gibi değerler belirlenmiştir. Gerçekleştirilmiş olan analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile doğrulanmıştır.

Kazan kayıplarını meydana getiren başlıca faktörün transformatördeki kaçak akılar olması sebebiyle, kazan duvarlarındaki kayıpları tatmin edici ölçüde azaltılmasını sağlayacak en uygun şönt eleman boyutlarının belirlenmesi için literatürden ve analizlerden faydalanılarak bir çıkarıma gidilmiştir.

Şönt elemanın yükseklik değerinin artışına bağlı olarak kazan kayıplarının azaldığı görülmekle beraber, kullanılan şönt eleman yüksekliğinin sargı yüksekliğini aşmasının ardından kayıplardaki azalma eğiliminin yaklaşık olarak sıfıra düştüğü gözlenmiştir. Benzer şekilde, kazan duvarlarındaki kayıpların kullanılan şönt elemanların genişliği ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Genişlik değerinin artmasıyla beraber kazan kayıpları azalmaktadır. Yaklaşık olarak sargı dış çapının %48'i olan genişlik değerine kadar azalma eğilimi oldukça fazla olup, daha geniş ölçüler için azalma eğiliminde düşüş gözlenmektedir. Bu çalışmanın neticesinde gerekli şönt eleman boyutu, transformatörün sargılarının tasarım boyutları cinsinden ifade edilmiştir. Bu şekilde belirlenmiş olan şönt eleman boyutları ile kazan duvarlarındaki kayıpların %91,43 oranında azaltılması sağlanmıştır.

Ek olarak, transformatörün kaçak akılardan kaynaklı kayıplarını düşürmek için kullanılacak malzemelerin yaratacağı ek maliyet de göz önünde tutulması gereken bir konudur. Bu maliyeti hem en düşük seviyede tutup hem başarılı sonuç veren malzemenin, nüve üretiminde de kullanılmakta olan manyetik malzeme olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Kirar M., Gupta G., Kumar M., Sharma V. K., Study of Stray Losses Reduction through Finite Element Method, *Annual IEEE India Conference*, DOI:10.1109/INDCON.2013.6726143.
- [2] Saleh A., Omar A., Amin A., Adly A., Fawzi T., El-Debeiky S., Estimation and Minimization Techniques of Transformer Tank Losses, *In Proceedings of the CIGRE conference*, Paris, France, 16 April 2004.
- [3] Janic Z., Valkovic Z., Optimisation of Transformer Tank Shields, *XII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering*, Spain, 15-17 September 2005.
- [4] Mokkapaty S. P. K., Weiss J., Schramm A., Magdaleno-Adame S., Schwarz H., Olivares-Galvan J.C., 3D Finite Element Analysis of Magnetic Shunts and Aluminum Shields in Clamping Frames of Distribution Transformers, *IEEE*, DOI: 10.1109/ROPEC.2015.7395069.
- [5] Li L., Fu W. N., Ho S. L., Niu S., Li Y., Numerical Analysis and Optimization of Lobe-Type Magnetic Shielding in a 334 MVA Single-Phase Auto-Transformer, *IEEE Transactions on Magnetics*, DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326465.
- [6] G. B. Kumbhar, S. M. Mahajan, W. L. Collett, Reduction of Loss and Local Overheating in the Tank of a Current Transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2049131.
- [7] Susnjic L., Haznadar Z., Valkovic Z., 3D Finite-Element Determination of Stray Losses in Power Transformer, *Electric Power Systems Research*, DOI:10.1016/j.epsr.2008.03.009.
- [8] Olivares J. C., Canedo J., Moreno P., Driesen J., Escarela R., Palanivasagam S., Experimental study to reduce the distribution-transformers stray losses using electromagnetic shields, *Electric power systems research*, DOI:10.1016/S0378-7796(02)00096-2.
- [9] Milagre A. M., Ferreira da Luz M. V., Cangane G. M., Komar A., Avelino P. A., 3D Calculation and Modeling of Eddy Current Losses in a Large Power Transformer, *IEEE International Conference on Electrical Machines*, DOI:10.1109/ICEIMach.2012.6350200.
- [10] Magdaleno-Adame S., Olivares-Galvan J. C., Escarela R., Raichenko O., Kladas A. G., Hot Spots Mitigation on Tank Wall of a Power Transformer using Electromagnetic Shields, *IEEE International Conference on Electrical Machines*, DOI:10.1109/ICELMACH.2014.6960495.

- [11] Altıntaş A., Üç Fazlı Transformatör Tasarımı İçin Bir Arayüz Programı, *AKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2008, **8**(2), 37-45.
- [12] Çanakoğlu A. İ., Ünsal A., Tunaboğlu N. S., *Elektrik Makinaları*, 1.Baskı, T.C. Anadolu Üniversitesi Yayını, Eskişehir, 2012.
- [13] Aygören M., Elektrik Trafolarında Oluşan Güç Kayıplarının Uzaktan Manyetik Algılama Yöntemiyle Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2016, 432269.
- [14] Mahmoud S. K., Yağlı Dağıtım Transformatörlerinde Kayıpların Hesaplanması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Temmuz 2008, 233827.
- [15] <http://www.yildiz.edu.tr/~nbekir/ders%20notlari.doc> (Ziyaret Tarihi: 26 Kasım 2016)
- [16] EN 50588-1, Medium Power Transformers 50 Hz with Highest Voltage for Equipment Not Exceeding 36 Kv-Part 1: General requirements, *European Standards*, 2015.
- [17] Çetin İ., *Sanayiide Enerji Tasarrufu Nasıl Edilir*, 2.Baskı, İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 2004.
- [18] Bertotti G., General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials, *IEEE Transactions on magnetics*, DOI:10.1109/20.43994.
- [19] Zağlı M., Transformatörlerde Enerji Verimliliği ve Çevresel Etkisi, İyileştirme Boyutları, *EMO II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi*, İzmir, Türkiye, 24-27 Kasım 2011.
- [20] Scholand M., Blackburn T., Hopkinson P., Sampat M., Distribution Transformers Energy Efficiency Class Definitions, *SEAD*, Report No: 3, 1-36, 2013.
- [21] IEC 60076-2, Power Transformers Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers, *International Electrotechnical Commission*, 2011.
- [22] Valkovic Z., Some Aspects of Stray Losses in Large Power Transformers, *Institut Koncar*, 2002, **36**(25), 238-243.
- [23] Venegas Vega M. A., Escarela Perez R., Niewierowicz T., 3D Finite Element Estimation of Stray Losses in Three-Phase Transformers, *Journal of Applied Computer Science*, 2008, **16**(1), 89-99.
- [24] Schmidt E., Hamberger P., Seitlinger W., Finite Element Calculation of Eddy Current Losses in the Tank Wall of Power Transformers, *Electric Machines and Drives Conference IEEE*, DOI: 10.1109/IEMDC.2003.1210388.

- [25] Adalja C. C., Jain M. L., Analysis of Stray Losses in Power Transformers by 3-D Magnetic Field Simulation, *Fifteenth National Power Systems Conference*, IIT Bombay, India, 16 December 2008.
- [26] IEC 60076-1, Power Transformers Part 1: General, *International Electrotechnical Commission*, 2011.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] ÇINAR M.A., ALBOYACI B., **ÇÜRÜKOVA S.**, SÖNMEZ O., YAPICI R., Transformatörlerin Kazan Duvarlarında Meydana Gelen Kayıpların Azaltılması İçin En Uygun Şönt Eleman Boyutlarının Belirlenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2017, Kabul Edildi.
- [2] ÇINAR M.A., ALBOYACI B., **ÇÜRÜKOVA S.**, SÖNMEZ O., YAPICI R., Reduction of Eddy Current Losses Around Bushing Holes On The Top-Plate of A High Efficient Transformer, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2017, Kabul edildi.

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Kırklareli’nde doğdu. İlk ve ortaöğretimi Kırklareli Atatürk İlköğretim Okulu’nda, liseyi Kırklareli Fen Lisesi’nde 2009 yılında tamamladı. Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2013 yılında Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans eğitimine 2014 yılında başladı. 2017 yılında tamamladı. 2013’ten bu yana Sönmez Transformatör A.Ş.’de transformatör tasarımı alanında çalışmaktadır.