



**AYNI KAYIP, PERFORMANS VE ÖZELLİKLERE SAHİP, İKİ ADET 400
kVA KURU VE YAĞLI TİP TRANSFORMATÖRÜN ÜRETİM MALİYETİ
AÇISINDAN KARŞILAŞTIRILMASI**

Moein ATTAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Moein ATTAR

28/12/2021

AYNI KAYIP, PERFORMANS VE ÖZELLİKLERE SAHİP, İKİ ADET 400 kVA KURU
VE YAĞLI TİP TRANSFORMATÖRÜN ÜRETİM MALİYETİ AÇISINDAN
KARŞILAŞTIRMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Moein ATTAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Dağıtım transformatörleri, elektrik dağıtım şebekesinin en önemli elemanlarından. Transformatörleri, kapama yöntemi, yalıtkanlık ve soğutma, güç, işlev vb. açılarından bakıldığında, farklı şekillerde sınıflandırabiliriz. Transformatör seçimi, çevre koşulları, şebekedeki görevi, maliyet gibi etkenler göz önünde bulundurarak yapılır. Yalıtkanlık ve soğutma sistemi açısından, transformatörler yağlı tip ve kuru tip olarak iki gruba ayrılır. Kuru tip transformatörlerde, yalıtkanlık özel epoksi reçineler ve hava ile yapılır. Bu görevi yağlı tip transformatörlerde, yağ ve hava üstlenir. Kuru tip transformatörlerin bakımı ve onarımı daha kolaydır ve çalıştığı yerde yapılabilir. Çevreye daha az zararlıdır, yangına sebebiyet verme ihtimali çok düşüktür. Yağlı tip transformatörlerin ağır bakımları fabrikada yapılmalı, kullanılan yağdan dolayı çevreye daha çok zarar verir ve yangına neden olma ve patlamaya müsaittirler. Kuru tip transformatörler, yağlı tipe göre daha maliyetlidir. Bu çalışmada kayıp ve performans olarak aynı özelliklere sahip 2 adet 400 kVA yağlı tip ve kuru tip transformatör, üretim maliyeti açısından karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma için önce her iki transformatörün optimal tasarımını program ile gerçekleştirilmiştir. Her birinin nüve, sargı ve mekanik aksam projelerini tasarım programının bize verdiği değerlere göre üretilmiştir. Üretimi tamamlanan transformatörler rutin testlere tabi tutulmuştur. İki transformatörün performansları karşılaştırılmıştır. Aynı seviyede olduklarından emin olduktan sonra, İki transformatörün üretim maliyeti karşılaştırılmıştır. Kuru tip Transformatör, yağlı tipe göre yaklaşık %47 daha yüksek maliyetli olduğu görülmüştür. Kuru tip transformatörlerin üretimi daha hassastır. Kullanılan hammadde daha fazladır ve dolayısıyla, fiyatı daha yüksektir, ancak bir çok yerde, yağlı tip transformatörlerin yerini almaktadır. Çalışma yaptığımız fabrika Ankara’da yer almaktadır. Hammadde fiyatları konusunda maliyete dikkat etmek gerekmektedir. Bu tez çalışmasında maliyet hesaplaması, 2021 yılının ilk yarısının ortalaması alınmıştır.

Bilim Kodu : 90513
Anahtar Kelimeler : Kuru tip transformatör, yağlı tip
transformatör, transformatör optimal tasarımı
Sayfa Adedi : 92
Danışman : Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

COMPARISON OF TWO 400 kVA DRY AND OIL TYPE TRANSFORMERS WITH
THE SAME LOSS, PERFORMANCE AND FEATURES IN TERMS OF PRODUCTION
COSTS

(M. Sc. Thesis)

Moein ATTAR

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

Distribution transformers are considered as one of the most important parts of an electrical distribution network. We can classify transformers in different ways from the perspective of production method, insulation, cooling, power, function etc. Transformer selection is made by considering different factors. In terms of insulation and cooling system, transformers are divided into two groups as oil immersed type and dry type. In dry type transformers, insulation is made with special epoxy resins and air. Oil and air undertake this task in oil type transformers. Dry type transformers are easier to maintain and repair and can be done on site. It is less harmful to the environment, the probability of causing a fire is very low. Heavy maintenance of oil-type transformers should be done in the factory, because of the oil used, it causes more damage to the environment and is susceptible to fire and explosion. Dry type transformers are more expensive than oil type transformers. In this paper, the authors tried to compare the production cost of two 400 kVA oil and dry type transformers with the same characteristics like input/output or losses and performance. First, the optimal design of both transformers was carried out with the program. The transformers were manufactured at the factory according to the optimal design. After production was completed, both transformers were subjected to routine tests to see the performance of the two transformers. Then production cost of the two transformers was compared. According to our calculations, Dry type Transformer cost about 47.7% higher than oil immersed type. The production of dry type transformers is more sensitive. The raw material used is more and hence the price is higher, but in many places it is replacing oil type transformers. The factory where we work is located in Ankara. We will have to pay attention to this in terms of raw material prices and the average of the first half of 2021 is taken.

Science Code : 90513

Key Words : Dry type transformer, oil immersed type transformer, transformer optimal design, transformer production cost

Page Number : 92

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

TEŞEKKÜR

Tez oluşumu ve çalışma esnasında tecrübelerini, emeğini ve hoşgörüsünü esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN'a minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Literatür taraması ve çalışmanın diğer aşamalarında desteğini ve bilgilerini esirgemeyen ve yol gösteren sayın 'Prof. Dr. İres İSKENDER'e ve bu çalışmada, tasarım, üretim ve deney imkânlarını sunan TEK TRANSFORMATÖR'e teşekkürlerimi borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	ix
RESİMLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TRANSFORMATÖRLER.....	3
2.1. Giriş.....	3
2.2. Sistem Gerilim Tercihi	3
2.3. Transformatörlerin Eşdeğer Şeması.....	4
2.4. Gerilim Oranı, Gerilim Düşüşü /Yükselişi	5
2.5. Verim..	7
2.6. Enerji Üretimi, İletim ve Dağıtımı.....	8
2.7. Dağıtım Transformatörleri	10
2.7.1. Büyük dağıtım transformatörleri.....	10
2.7.2. Orta ölçekli dağıtım transformatörleri	13
2.7.3. Küçük dağıtım transformatörler.....	16
2.7.4. Kuru tip dağıtım transformatörleri.....	20
2.7.5. Diğer transformatör çeşitleri	23
2.8. Güç Transformatörleri	26

	Sayfa
2.8.1. Geçici aşırı gerilimler.....	27
2.8.2. Manyetik kaçak alanı	28
2.8.3. Mekanik güçler	28
2.8.4. Güç aralığı limitlemesi.....	28
2.8.5. Jeneratör yükseltici transformatörler	28
2.8.6. Düşürücü transformatörler	31
2.8.7. Geçiş köprü transformatörler	31
2.8.8. Endüstriyel transformatörler	33
2.8.9. Traksiyon transformatörler	36
2.8.10. Topraklama transformatörleri	37
3. TRANSFORMATÖR PARÇALARI VE KULLANILAN MALZEMELER.....	39
3.1. Terminaller	39
3.1.1. İzolatörler.....	39
3.1.2. Kablo bağlantıları.....	42
3.1.3. SF6 bağlantıları.....	43
3.1.4. Plug in izolatörler/mono bloklar	43
3.2. Soğutucular	44
3.2.1. Radyatörler.....	44
3.2.2. Dalga duvarlı kazanlar	45
3.2.3. Fanlar	46
3.2.4. Forced oil, forced air ısı eşanjörleri	46
3.2.5. Yağ-su kombine soğutucular	46
3.2.6. Yağ pompaları.....	47
3.3. Gerilim Düzenleme Ekipmanları	47

	Sayfa
3.3.1. Boşta kademe değıştiriciler	48
3.3.2. Yük altında kademe değıştirici	48
3.3.3. Otomatik gerilim regülatörü	49
3.4. Aksesuarlar/ Koruma Ekipmanları	50
3.4.1. Gaz tahrikli röle	50
3.4.2. Sıcaklık göstergesi	51
3.4.3. Dahili akım transformatörleri	52
3.4.4. Silikajel kabı	52
3.4.5. Yağ koruma sistemleri	52
3.4.6. Yağ seviye göstergesi	53
3.4.7. Basınç tahliye cihazları	53
3.4.8. Ani basınç tahliye cihazları	54
3.4.9. Aşırı gerilim koruma cihazları	54
3.4.10. Taşıma tekerlekleri / takozları	55
3.4.11. Yanıcı gaz dedektörü	55
3.4.12. Akış göstergesi	55
3.4.13. DMCR hermetik röleler	55
3.5. Transformatör Malzemeleri	56
3.5.1. Çekirdek malzemeleri	56
3.5.2. İletken malzemeleri	56
3.5.3. Yalıtım malzemeleri	57
3.5.4. Sıvılar	58
3.6. Dış Yüzey Koruma	59

Sayfa

4. AYNI ÖZELLİKLERE SAHİP 400 kVA, 33/,04 YAĞLI VE KURU TİP TRANSFORMATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI.....	60
4.1. Yapılan Rutin Testler ve Sonuçları.....	60
4.1.1. DC direnç ölçülmesi	60
4.1.2. Çevirme oranının ve gerilim vektörü faz kaymasının ölçülmesi	60
4.1.3. Kısa devre empedansı ve yükteki kaybın ölçülmesi	61
4.1.4. Boştaki kayıp ve akımın ölçülmesi	61
4.1.5. Uygulanan gerilim	61
4.1.6. Endüklenmiş alternatif gerilim	61
4.1.7. Transformatör yalıtım direnci ölçümü	62
4.1.8. Yağ delinme gerilimi testi.....	63
4.1.9. Kısmi boşalmanın ölçülmesi	63
4.2. Aynı Özelliklere Sahip 400 kVA, 33/0,4 Yağlı ve Kuru Tip Transformatörlerin Tasarım Bilgileri.....	68
4.2.1. Giriş.....	68
4.2.2. Nüve tasarımı	70
4.2.3. Alçak gerilim sargı tasarımı	74
4.2.4. Yüksek gerilim sargı tasarımı	78
4.2.5. Kayıplar ve verimlilik	81
4.3. Yağlı ve kuru tip transformatörlerin maliyet hesaplaması	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	86
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	93

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Uygulanan gerilim testinde transformatör giriş gerilim seviyesine göre uygulanan gerilim miktarı	62
Çizelge 4.2. Yalıtım direnci ölçümünde uygulanan gerilim miktarı	62
Çizelge 4.3. Yağlı tip transformatör üretimine yönelik genel tasarım bilgileri	69
Çizelge 4.4. Kuru tip transformatör üretimine yönelik genel tasarım bilgileri.....	69
Çizelge 4.5. Yağlı tip transformatörün nüve tasarım bilgileri	73
Çizelge 4.6. Kuru tip transformatörün nüve tasarım bilgileri	73
Çizelge 4.7. Farklı soğutma sistemlerinde seçilmesi gereken iletken akım yoğunluğu.....	75
Çizelge 4.8. Yağlı tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları	77
Çizelge 4.9. Kuru tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları.....	77
Çizelge 4.10. Yağlı tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları...	80
Çizelge 4.11. Kuru tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları....	80
Çizelge 4.12. Bağlantı noktalarında geçen akım miktarına göre eklenen ekstra kayıp..	83
Çizelge 4.13. Yağlı tip transformatörün maliyet tablosu	84
Çizelge 4.14. Kuru tip transformatörün maliyet tablosu.....	85

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Transformatörün eşdeğer şeması	4
Şekil 2.2. Transformatör akım ve gerilimine karşılık gelen vektör diyagramı.....	5
Şekil 2.3. Çıkış geriliminin, Φ açısı ve yük akımlarının değişimi ile bağlantısı	6
Şekil 2.4. Çıkış geriliminin değişik kısa devre reaktans değerleri ve değişik $\cos\phi$ ler ile bağlantısı	7
Şekil 2.5. Çekirdek tip ve Mantel tip nüve	9
Şekil 2.6. Sargı terminaline standart bir yıldırım darbe uygulandıktan sonra sargıda gerilim dağılımı	27
Şekil 2.7. HVDC iletiminin temel şeması.....	33
Şekil 3.1. Kablo bağlantıları	43
Şekil 3.2. Yağ – su soğutucular	47
Şekil 3.3. yükte kademe değiştirici.....	49
Şekil 4.1. Yağlı tip transformatörün nüve tasarım bilgileri	72
Şekil 4.2. Kuru tip transformatörün nüve tasarım bilgileri	74
Şekil 4.3. Yağlı tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları	76
Şekil 4.4. Kuru tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları	78
Şekil 4.5. Yağlı tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları	79
Şekil 4.6. Kuru tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları	81
Şekil 4.7. Sargıdaki iletkenin durumu.....	83

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Transformatörün aktif kısmı ve tamamlanmış hali.....	9
Resim 2.2. Büyük dağıtım transformatörü.....	11
Resim 2.3. Trafo merkezi transformatörleri.....	12
Resim 2.4. Yer tipi transformatör.....	13
Resim 2.5. Orta ölçekli dağıtım transformatörü.....	14
Resim 2.6. Şebeke transformatörü.....	15
Resim 2.7. Yer tipi transformatörü.....	16
Resim 2.8. Küçük dağıtım transformatörü.....	17
Resim 2.9. Tek faz direk tipi.....	18
Resim 2.10. Küçük yer tipi transformatörü.....	19
Resim 2.11. Direk tipi transformatörler.....	20
Resim 2.12. Vakumlu dökme reçineli kuru tip transformatör.....	21
Resim 2.13. Resibloc kuru tip transformatörü.....	22
Resim 2.14. VPI-VPE transformatörü.....	23
Resim 2.15. Rüzgar türbini uygulamaları.....	24
Resim 2.16. Denizaltı transformatörü.....	25
Resim 2.17. Yer altı transformatörü.....	26
Resim 2.18. Güç Transformatörü.....	27
Resim 2.19. Jeneratör yükseltici transformatörü.....	30
Resim 2.20. Geçiş köprü transformatörü.....	32
Resim 2.21. Faz değiştirme transformatörü.....	32
Resim 2.22. Fırın transformatörü.....	35
Resim 2.23. Konvertör transformatörler.....	36

Resim	Sayfa
Resim 2.24. Lokomotif transformatörü.....	37
Resim 3.1. Alçak gerilim izolatörü.....	40
Resim 3.2. Yoğunlaştırılmış izolatör.....	41
Resim 3.3. Yüksek akım izolatörler	42
Resim 3.4. SF6 bağlantıları.....	43
Resim 3.5. transformatör radyatörü.....	45
Resim 3.6. dalga duvarlı kazanlar	46
Resim 3.7. Boşta kademe değıştirici	48
Resim 3.8. Gaz tahrikli röle	50
Resim 3.9. Sıcaklık göstergesi	51
Resim 3.10. Silikajel kabı	52
Resim 3.11. Yağ seviye göstergesi.....	53
Resim 3.12. Basınç tahliye cihazları	54
Resim 3.13. Taşıma tekerlekleri	55
Resim 4.1. Tek transformatör akredite laboratuvarında rutin testlerin yapılması	65
Resim 4.2. Yağlı tip transformatörün test raporu	66
Resim 4.3. Kuru tip transformatörün test raporu.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

AC	Alternatif akım
DC	Doğru akım
hz	Hertz
kg	Kilogram
m	Metre
P_k	Yükteki kayıp
P₀	Boştaki kayıp
U_k	Nispi kısa devre gerilimi
V	Volt
W	Watt

Kısaltmalar

Açıklamalar

Al	Alüminyum
AG	Alçak gerilim
kV	Kilo Volt
kVA	Kilo Volt Amper
MVA	Mega Volt Amper
rms	Root mean square
YG	Yüksek gerilim

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin en önemli özelliklerinden biri üretildiği yerden çok uzaklara taşınabilmesidir. Enerji iletiminin yüksek verimli bir şekilde yapılabilmesi ve kısaca kayıpların minimuma düşürülmesi için, gerilim değerinin mümkün olduğunca yükseltilmesi ve akımının olabildiğince düşürülmesi gerekir. Bu gereklilik, elektrik enerjisinin gerilim değerinin üretildiği yerde yükseltilmesini ve tüketim bölgesinde düşürülmesi temel ihtiyacını doğurmuştur. Üretilen elektrik enerjisinin kullanım noktasına ulaştırılması iletim, alt iletim ve dağıtım gerilim seviyeleri ile sağlanır. Bu gerilim seviyeleri uluslararası standartlarla belirlense de her ülkenin kendi koşullarına göre farklılık oluşturur. Bu nedenle her ülkeden gelen talepler farklılık gösterebilir.

Transformatörlerin ana bileşenleri, nüve, sargılar, bunları bir arada tutan mekanik aksam, soğutma ve yalıtım malzemeleri, koruma ve aksesuarlardır. Transformatörler elektrik enerjisinin elektromanyetik endüksiyon yolu ile gerilim ve akım değerlerini frekansta değişiklik yapmadan ihtiyaca göre değiştiren elektrik makinesidir. Bir transformatör, güçlü manyetik alan ile birbirine bağlanmış iki veya daha fazla bobinden oluşan statik bir cihazdır. Transformatörleri, kapama yöntemi, yalıtkanlık ve soğutma, faz sayısı, güç, işlev vb. açılarından bakıldığında, farklı şekillerde sınıflandırılabilir. Kapama yöntemi, hermetik ve ya normal genleşme depolu olabilir. Hermetik yağlı transformatörlerin üretimi doğru bir şekilde yapılırsa, genleşme depoluya göre daha uzun ömürlü olur. Bunun nedeni transformatör yağının hava ile teması olmadığıdır [1].

Transformatörlerin üretimi tamamen müşteri isteğine göre yapılır. Alıcıdan gelen bilgilere göre, transformatörün optimal tasarımı yapılır. Tasarımcı, en yüksek performansı en az hammadde kullanarak sağlamak zorundadır. Bunu yaparken, tasarım programları kullanılır. Her fabrikanın kendine has programı vardır. Bunu dışardan alabilir veya kendi bünyesinde geliştirebilir. Tasarımcı, tasarım yapılırken, hammadde fiyatı ve teslim tarihi, makine ve ekipmanların kapasitesi, alıcının istekleri, transformatörün çalışacağı yerin çevresel özellikleri, hammaddenin teknik dielektrik ve termal özellikleri ve nakliye koşulları gibi bir çok etkeni göz önünde bulundurmalıdır.

IEC, ANSI, MC vb. gibi standartlarda transformatörlerin sınıflandırılması limitli olsa da, piyasa da bu sınıflandırma yapılmaktadır. Bu çalışmada mümkün olduğu kadar sınıflandırma

detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Transformatörlerde, yapı ve temel kavramlar kadar, kullanılan hammadde özellikleri, aksesuarlar, bağlantı ekipmanları ve koruma cihazları da önemlidir.

Transformatörler fabrikada üretildikten sonra rutin testlere tabi tutulur. Bu testlerin hepsinden başarı ile geçmezse fabrikadan çıkış izni bulmaz.

Dağıtım transformatörleri, elektrik dağıtım şebekesinin en önemli elemanlarından. Farklı etkenleri göz önünde bulundurarak, transformatör seçimi yapılır [2].

Yalıtıklılık ve soğutma sistemi açısından, transformatörler yağlı tip ve kuru tip olarak iki gruba ayrılır. Her birinin diğerine göre bir takım avantaj ve dezavantajları var. Örneğin kuru tip transformatörler çevreye daha az zarar verir, patlama ve yangına sebebiyet konusunda yağlı tipe göre daha korumalıdır ancak maliyet olarak ta daha pahalıdır. Daha net bir bilgi elde etmek ve doğru seçim yapmak için, bu tez çalışmasında kayıp ve performans olarak aynı özelliklere sahip 2 adet 400 kVA yağlı tip ve kuru tip transformatörün üretimi yapılarak, üretim maliyeti açısından karşılaştırması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde literatür taraması yapılmıştır. her iki transformatörün optimal tasarımını program ile gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan transformatörler rutin testlere tabi tutulmuştur. İki transformatör performans olarak karşılaştırılmıştır. Performans olarak eşit olan iki transformatörün üretim maliyeti karşılaştırılmıştır ve kuru tip transformatör, yağlı tipe göre yaklaşık %47 daha yüksek fiyata mal olduğu görülmüştür. Her ne kadar zor olsa da, doğru sonucu elde etmek için mümkün olduğu kadar her iki transformatörün performansına dikkat edilmiştir ki maliyet, eşit şartlar için karşılaştırılsın. Her iki transformatör “Tek Transformatör” fabrikasında üretilmiş, test edilmiş ve maliyetleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar üretimi gerçekleştirilen transformatörlere ait olup gerçek maliyetlerdir.

2. TRANSFORMATÖRLER

2.1. Giriş

Bir transformatör, güçlü manyetik alan ile birbirine bağlanmış iki veya daha fazla bobinden oluşan statik bir cihazdır. Transformatörler, gerilim ve akım ölçümü veya sinyal/elektrik gücü transferi gibi farklı amaçlar için tasarlanırlar [3]. Transformatörlerin tasarım şartları kullanım alanına bağlıdır. Ölçüm transformatörlerinde, ölçülen miktar, giriş devresinden çıkışa mümkün olduğu kadar tam olarak aynı şekilde gönderilir. Sinyal transformatörlerinde, sinyal en az bozuklukla transfer edilir. Bu tezde elektrik gücü transferi şebekesinde kullanılan transformatörleri incelemeye çalışacağız. Bu transformatörlerde, gerilimin bir seviyeden başkasına değiştirilirken, minimum güç kaybı ile, sabit frekans da, elektrik gücü, transfer edilir [3-4].

2.2. Sistem Gerilim Tercihi

Elektrik enerjisinin üretimini yapan büyük santraller, genellikle elektrik enerjisinin çok tüketildiği yerlerdedir. Üç faz iletim hattında, güç kaybı aşağıdaki gibidir.

$$P = 3.R.I^2 \text{ (W)} \quad (2.1)$$

R her fazın direnci ve I her fazın akımıdır. U sistem gerilimi ise, aktif güç aşağıdaki gibidir:

$$P = \sqrt{3}.U.I.\cos\varphi \text{ (W)} \quad (2.2)$$

Burada φ , akım ile gerilim arasındaki açı olup, iki denklemin sonucu:

$$P' = P^2 \frac{R}{U^2 \cdot \cos^2\varphi} \text{ (W)} \quad (2.3)$$

Bu denklem, hattaki güç kaybının, iletilen aktif gücün karesi ile doğrudan ve sistem gerilimi karesi ile ters bir şekilde orantılı olduğunu göstermektedir. Başka bir deyişle, güç kaybı, sistem voltajının arttığı zaman daha düşük olacaktır. Sistem geriliminin seçimi ekonomik denge meselesidir. Bir yüksek gerilim sistemi, iletim kayıplarını azaltır, fakat diğer taraftan daha pahalı direkler, kablolar ve transformatörler gerektirir.

Yakın tüketicilere elektrik alt gerilim seviyelerinde iletilmekte/dağıtılmaktadır. Jeneratör transformatörleri yükseltici oldukları sürece, dağıtım transformatörleri normalde düşürücü olurlar ve transformatör gücü, tüketiciye yaklaştıkça düşer. Gerilim birkaç aşamada düşürülür. Çıkış sargısının uçları açık olduğunda, giriş tarafında uygulanan ve çıkış tarafında görünen gerilim arasındaki oran, iki taraftaki sarım sayısının oranı ile eşittir [3-5]:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

veya

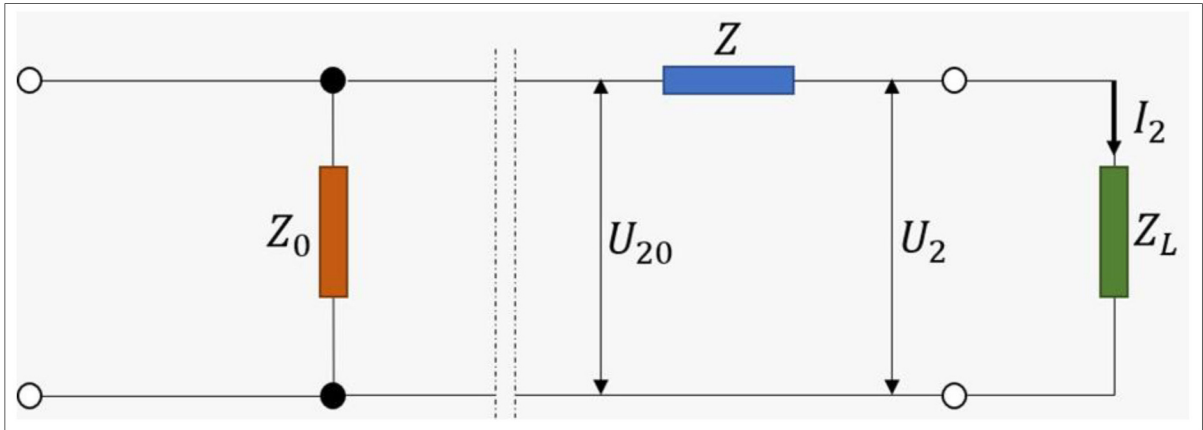
$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (2.5)$$

Giriş ve çıkışın sargılarından geçen akım ile sarım sayısı ters orantılıdır:

$$I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2 \quad (2.6)$$

2.3. Transformatörlerin Eşdeğer Şeması

Boşta ve kısa devre durumunda ölçüm yapmakla transformatöre basit bir eşdeğer şema şekil 2.1'deki gibi çizilebilir.



Şekil 2.1. Transformatörün eşdeğer şeması

Transformatör boşta iken, (çıkış terminalleri açıkken) toplam mıknatıslanma akımı ve aktif güç tüketimi nominal gerilimde ölçülür.

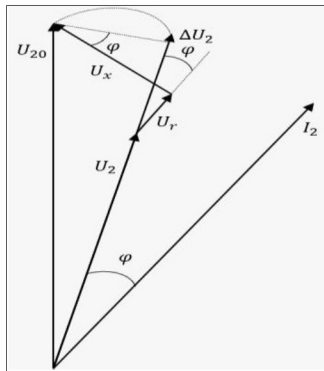
Böylelikle transformatörün boştaki empedansı Z_o ve bileşenleri bulunabilir. Bu empedans sabit değildir ve mıknatıslanma eğrisinden dolayı doğrusal olmayan şekilde uygulanan gerilim ile değişir. Z_o ' sanal kısmı boştaki kayıpları gösterir. Diyagramdaki diğer empedans Z , çıkış terminallerini kısa devre yapıp girişe gerilim uygulamakla elde edilir. Ölçüm sırasında, sargılardaki akım, nominal akım ile eşit olmalıdır. Bu akımı elde etmek için, nominal gerilimin belli bir kısmını uygulamak yeterli olur.

Bu gerilim, kısa devre gerilimi olarak adlandırılır ve genellikle nominal gerilimin bir yüzdesi olarak ifade edilir. Devrenin empedansı, kısa devre gerilimi bölü nominal akımdır. Devre Z_o ve Z 'nin bir paralel bağlantısıdır. ' $Z_o \gg Z$ ' den dolayı, bunların paralel bağlantısının empedansı, göz ardı edilebilir bir farkla Z ile eşittir. Z 'nin real kısmı, transformatörün kısa devre kayıplarını temsil eder ve sanal kısmı manyetik kaçak alanına aittir. Bu nüvenin dışında yer alan manyetik alanların oluşturduğu kayıptır [6].

2.4. Gerilim Oranı, Gerilim Düşüşü /Yükselişi

Bir transformatörün gerilim oranı, normal olarak yüksüz durumda belirtilir ve sargılarda sarım sayısı oranı ile doğrudan eşittir. Transformator yüklendiğinde, boştayken, çıkış gerilimi aşağıdaki koşullara göre değişir [7]:

Transformatörün çıkış gerilimi U_2 ve akımı I_2 arasındaki açı Φ , transformatörün kısa devre empedansı Z ve onun aktif ve reaktif bileşenleri, $r \pm jx$, boşa iken, çıkış gerilimi, U_{20} dur. Z_L yükü bağlandığında, çıkış gerilimi U_2 olur. Karşılık gelen vektör diyagramı Şekil 2.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Transformator akım ve gerilimine karşılık gelen vektör diyagramı

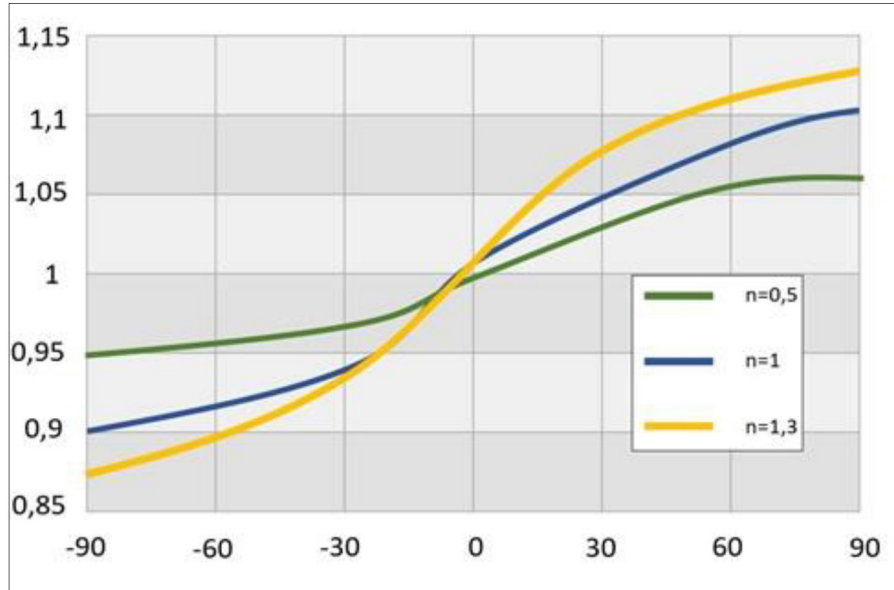
Simetrik yükleme ve küçük mıknatıslanma akımının etkisi ihmal varsayımıyla, Şekil 2.2 'de belirtilen vektör diyagramından aşağıdaki denklem ortaya çıkar:

$$\Delta U_2 = I_2 \cdot r \cdot \cos \varphi + I_2 \cdot x \cdot \sin \varphi + U_{20} - \sqrt{U_{20}^2 - (I_2 \cdot r \cdot \sin \varphi - I_2 \cdot x \cdot \cos \varphi)^2}$$

ΔU_2 gerilim düşümü, U_{20} ve U_2 arasındaki farktır. U_r ve u_x , nominal U_{20} e bağlı nominal akımında ki kısa devre gerilimin aktif ve reaktif kısımlarıdır. Herhangi bir yüklemde n bağlı gerilim düşümünü hesaplamak için:

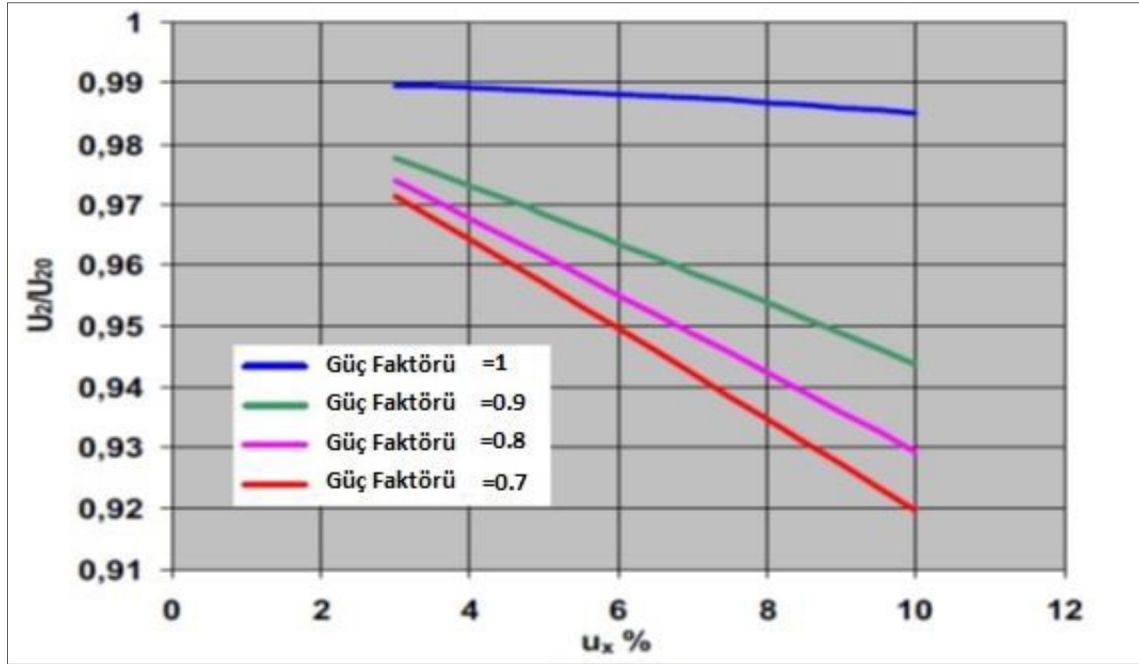
$$\Delta U_2 / U_{20} = n(u_r \cos \varphi + u_x \sin \varphi) + 1 - \sqrt{1 - n^2(u_r \sin \varphi - u_x \cos \varphi)^2} \quad (2.7)$$

Şekil 2.3. çıkış geriliminin, φ açısı ve yük akımlarının değişimi ile nasıl değiştiğini bir örnek ile göstermektedir ($u_r = 0.74\%$ ve $u_x = 10\%$).



Şekil 2.3. çıkış geriliminin, Φ açısı ve yük akımlarının değişimi ile bağlantısı

Eksi Φ açıları, endüktif yük akımı anlamına gelir ve pozitif açılar, kapasitif akım anlamına gelir. Belirli bir pozitif açının üstünde, çıkış gerilimi boşa gerilimine göre yükselir. Şekil 2,4 'te çıkış geriliminin, farklı kısa devre reaktans ve $\cos \Phi$ değerleri ile nasıl değiştiğini göstermektedir. Genel olarak, çıkış gerilimi, U_x in artması ile düşer. Örneğin $U_x = 10\%$ ve $\cos \varphi = 0,8$ de çıkış gerilimi boştaki gerilimin %93' ü kadar olmuştur.



Şekil 2.4. Çıkış geriliminin değişik kısa devre reaktans değerleri ve değişik $\cos\phi$ ler ile bağlantısı

Gerilim düşümü, transformatörde aktif ve reaktif gücün fazla tüketiminden kaynaklanır. IEC 60076-1, 4.1'e göre, iki sargılı bir transformatörün anma gücü, giriş gücüdür. Çıkış gücü, nominal güçten farklıdır. ANSI/IEEE de bu mesele farklıdır ve çıkış gücü, giriş gücü ile eşit olmalıdır ve giriş uygulanan güç, gerilim düşüşü ve yükselişini telafi etmek için ayarlanabilir olmalıdır. Kullanıcılar ve kurulum planlamacıları, transformatör verilerini belirlerken, yükleme sırasında çıkış gerilim değişimini dikkate almalıdırlar. Örneğin büyük bir motor, yük olarak transformatöre bağlandığında, bu meselenin ne kadar önemli olduğunu anlarız. Motorun yüksek endüktif başlangıç akımı transformatörün anma akımından çok daha yüksek olabilir. Sonuç olarak transformatör üzerinde önemli bir gerilim düşüşü olabilir. Besleme güç kaynağı zayıf ise, transformatörün çıkış gerilimi düşüşünü daha da fazla etkiler.

2.5. Verim

Bir transformatörün verimliliği aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$\eta_{\%} = \frac{1}{1 + \frac{P_0 + P_L \cdot n^2}{P_2 \cdot n}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

Burada,

P_0 , Nominal gerilimde boştaki güç kaybıdır ve birimi k(W),

P_L , Nominal akımda kısa devre (yükte) güç kaybıdır ve birimi k(W),

P_2 , Yüke verilen aktif güçtür ve birimi k(W),

n , Yüklemenin nispi derecesidir. Anma akımında $n=1$ olur.

P_2 , Aşağıdaki formülden elde edilir:

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot I_2 \cdot U_{20} \cdot (1 - \frac{\Delta U_2}{U_{20}}) \cdot \cos \varphi \quad (2.9)$$

2.6. Enerji Üretimi, İletim ve Dağıtımı

Enerji İletimi genel olarak iki bölümden oluşmakta; İlk güç transformatörleri tarafından desteklenen yüksek gerilim ile uzun mesafe iletim. İkinci kısmı, istasyondan, çeşitli kullanıcılara enerji dağıtımıdır. Buda farklı hiyerarşilerde dağıtım transformatörleri tarafından desteklenir. Güç transformatörlerinin giriş gerilimleri 800 kV 'a kadar yükselebilir. Yağlı tip dağıtım transformatörlerinin giriş gerilimi 72.5 kV 'a kadar yükselebilir. Kuru tip transformatörlerde 52 kV a kadar yükselebilir.

IEC 60076-1 standardına göre, güç transformatörleri genel olarak, düzeneğin sabit bir parçası olarak, en az iki sargıdan oluşmuş, elektromanyetik endüksiyon yoluyla bir AC gerilim ve akım sistemini başka bir gerilim ve akım sistemine ve genelde aynı frekansta ve güçte transfer eden bir elektrik cihazdır. Aynı tanım uluslararası elektroteknik sözlüğünde vardır: [IEV 421-01-01]. Bu standardın kapsamı, tek faz transformatörlerde 1 kVA ve 3 faz transformatörlerde 5 kVA 'yı içerir. Normalde, yüksek gerilimi, tüketim gerilimine (genellikle 400v veya daha az) dönüştüren transformatörlere dağıtım transformatörleri denir.

Transformatörün boyutu ve işlevi ne olursa olsun, yapısını oluşturan temel parçalar aşağıdaki gibidir:

Nüve ve onun güçlü manyetik alan sağlayan özel, ince, silisli, çelik sacları. Bobinde iletken amaçlı kullanılan alüminyum veya bakır. Katı yalıtım malzemesi olarak yüksek yoğunluklu kağıt ve press board gibi selüloz ürünleri. Mineral yağ hem izolasyon sıvısı olarak hem de soğutucu olarak kullanılır ve bunların hepsini çevreleyen ve koruyan trafo kazanıdır (Resim 2.1).



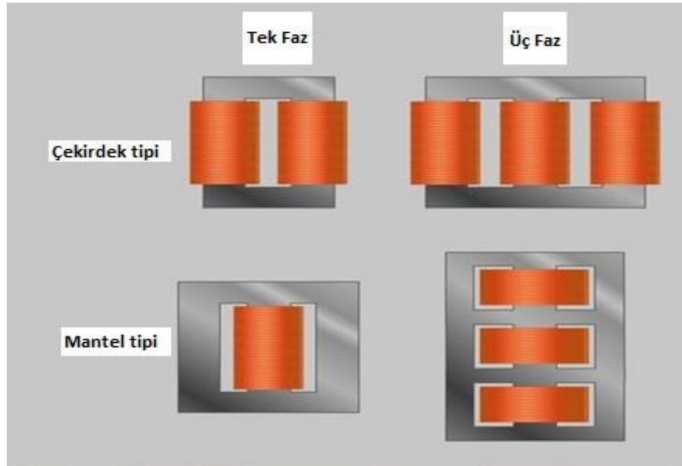
Resim 2.1. Transformatörün aktif kısmı ve tamamlanmış hali

Transformatör tasarımında, üreticinin

1) Çekirdek tipi

2) Mantel tipi

Olmak üzere iki seçeneği vardır (şekil 2.5) [8].



Şekil 2.5. Çekirdek tip ve Mantel tip nüve

Her üretici, kendi açısından bakarak, en uygun şekilde üretim yapmağa çalışır. Özetlersek, çekirdek tipi transformatörde, sargılar, nüveyi çevreler. Mantel tipinde ise nüve, sargıları çevreler. Transformatörün aktif bölümünde, çekirdek tipinde sargılar kolayca görülür. Mantel tipinde ise nüvenin alt ve üst kısmı gözüktür ve nüve, bobinin büyük bir kısmını

saklar. Başka bir fark, mantel tipinde sargının eksenini dikey veya yatay iken, çekirdek tipinde dikey olur. Günümüzde çekirdek tipi, mantel tipinden daha çok üretilmektedir [9].

2.7. Dağıtım Transformatörleri

Dağıtım transformatörleri tüketicilerin ihtiyacı doğrultusunda orta ve alçak gerilim dağıtım hatlarında kullanılırlar.

2.7.1. Büyük dağıtım transformatörleri

Güç aralığı: 5000 kVA ve üzeri,

Giriş gerilim: 72.5 kV a kadar olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağ, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Resim 2.2’de görülen büyük dağıtım transformatörler enerjiyi daha yüksek gerilim seviyesiyle alıp ve onu daha düşük gerilim düzeyli transformatör merkezleri ve ya doğrudan büyük endüstriyel tüketicilere dönüştürüp dağıtmak için kullanılır.

Bu transformatörler 3 fazlılar ve boşta veya yük altında kademe değiştiriciyle üretilebilirler. Yük altında kademe değiştirici ile üretilen transformatörlerde genellikle ayrı bir sargı kademesi vardır. Çekirdek soğuk haddelenmiş çelik plakalardan yapılmıştır. Sargıları çok katmanlı disk ya da spiral sargı formunda kâğıt yalıtımlı dikdörtgen/yuvarlak telden yapılır ve iletken malzemesi bakır ya da alüminyumdur [10]. Kazanlarda genelde radyatör var. Ancak küçük transformatörlerde dalga duvar kullanılabilir.



Resim 2.2. Büyük dağıtım transformatörü

A. Trafo merkezi transformatörleri

Güç aralığı: 5000 kVA – 20 MVA,

Giriş gerilim: 69 kV' a kadar,

Çıkış gerilim: 34.5 kV' a kadar olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Bu transformatörler (Resim 2.3) 3 fazlılar ve boşta veya yük altında kademe değiştiriciyle üretilirler. Yük altında kademe değiştirici ile üretilen transformatörlerde genellikle ayrı bir sargı kademesi vardır. Çekirdek soğuk haddelenmiş çelik plakalardan yapılmıştır. Kazan radyatör ile donatılır. Bu transformatörler havai elektrik hatlarına bağlanacaksa izolatörler kapak kısmındadır. İlgili şaltere bağlanacaksa giriş ve ya çıkış izolatörleri kazanın iki taraftaki duvarlarında yer almaktadır [3].



Resim 2.3. Trafo merkezi transformatörleri

B. Yer Tipi Transformatörler

Güç aralığı: 75 kVA - 20 MVA,

Giriş gerilimi: 46 kV a kadar,

Çıkış gerilim: 25 kV a kadar olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Resim 2.4’de gösterilen bu tip transformatörler alışveriş merkezleri, apartman, ticari kuleler, okullar, endüstriyel alanlar için tasarlanır. Çelik kasası çok sağlam ve dayanıklıdır ve dışarıdan erişilebilir cıvata, menteşeler, vidalar veya bağlantı elemanları yoktur. Yetkisiz personelin girmesini önleyen müstakil bir birimdir. Göze hoş görünmeyen çitler veya diğer kişisel güvenlik korumalara ihtiyacı yoktur [3].



Resim 2.4. Yer tipi transformatör

2.7.2. Orta ölçekli dağıtım transformatörleri

Güç aralığı: 400 – 5000 kVA,

Giriş gerilim: 36 kV a kadar olup,

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Resim 2.5’de gösterilen bu tip transformatörler 3 fazlılar ve yüksek gerilimi alçak gerilime dönüştürmek için genelde metropoliten ve endüstriyel alanlarda kullanılırlar. Normalde bu transformatörler hermetiklerdir. Dalga duvarlar soğutmayı sağlar ve işlem sırasında sıcaklık değişiminden dolayı meydana gelen yağ hacim değişikliğini telafi eder. Hermetik transformatörlerin avantajı yağın atmosfer ile temasta olmamasıdır. Böylece havanın nemini içine çekemez. Müşteri istek üzerine transformatör yağ genleşme deposuyla donatılmış olabilir [3].



Resim 2.5. Orta ölçekli dağıtım transformatörü

A. Şebeke transformatörü

Güç aralığı: 400 kVA – 2500 kVA,

Giriş gerilimi: 34.5 kV a kadar,

Çıkış gerilimi: 600 V a kadar olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Şebeke transformatörleri (Resim 2.6) genellikle büyük şehirlerde yüksek yük yoğunluğu gereken alanlarda GRID-TYPE sistemler de kullanılıyorlar. Şebeke transformatörleri metro veya benzeri uygulamalar için tasarlanmıştır. Şebeke transformatörleri yeraltı kullanımı için uygundur [3].



Resim 2.6. Şebeke transformatörü

B. Yer tipi transformatörler

Güç aralığı: 5000 kVA ya kadar,

Giriş gerilim: 34.5 kV,

Çıkış gerilim: 4.5 kV olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Bu tip transformatörler alışveriş merkezleri apartman, ofisler, okullar ve endüstriyel alanlar vb. için tasarlanmıştır. Kasası çok sağlam ve dayanıklıdır ve dışarıdan erişilebilir cıvata, menteşeler, vidalar veya bağlantı elemanları yoktur. Yetkisiz personelin girmesini önleyen müstakil bir birimdir. Göze hoş görünmeyen çitler veya diğer kişisel güvenlik korumaya gerek yoktur [3].



Resim 2.7. Yer tipi transformatörü

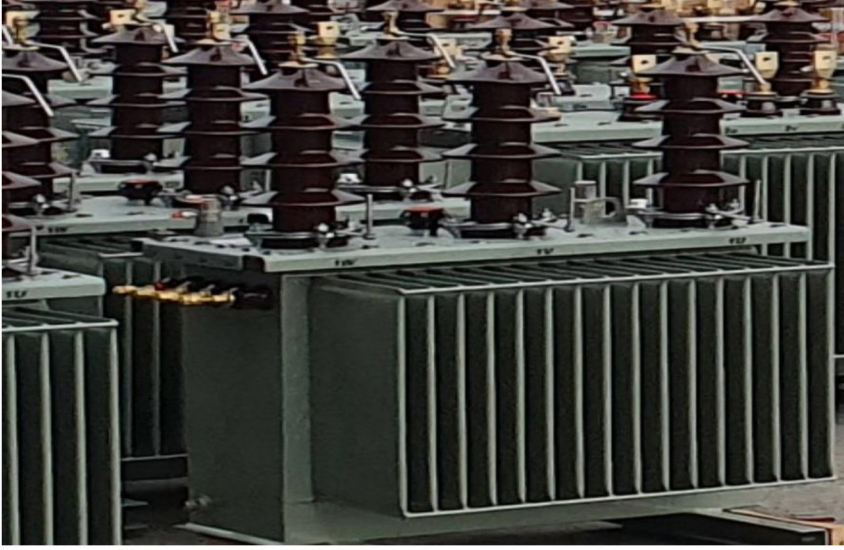
2.7.3. Küçük dağıtım transformatörler

Güç aralığı: 315 kVA ya kadar,

Primer gerilim: 36 kV a kadar olup

Kullanılabilir sıvılar: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Resim 2.8’de görülen bu transformatörler enerji dağıtımında, yüksek gerilimi alçak gerilime dönüştürmek için, nüfusun düşük yoğunluğa sahip olduğu alanlarda kullanılırlar. Bu transformatörler 3 faz, yağlı tip ve hermetiklerdir ve direklere veya köşklere monte edilebilirler. Müşteri istek üzerine transformatör yağ genleşme deposu ile donatılabilir. Dış mekân kullanımı için yüzeyine çinko kaplama uygulanır [3].



Resim 2.8. Küçük dağıtım transformatörü

A. Tek faz direk tipi

Güç aralığı: 5 -100 kVA,

Gerilim: 36 kV a kadar,

Uygun sıvı: madeni yağ olup

bu transformatörler genellikle yağlı tipler ve direklere montaj edilmeye uygundurlardır. Resim 2.9'da gösterilen tek faz direk tipi transformatörler belirli şebekeler için ekonomik bir seçeneklerdir. Özellikle nüfus yoğunluğu düşük olan bölgelerde çok kullanılırlar. Müşteri isteğine göre, 3 fazlı bir sistemin iki fazının (2 YG izolator) veya tek faz ve toprak (tek YG izolator) arasında kullanılabilir [3].



Resim 2.9. Tek faz direk tipi

B. Yer tipi transformatörler

Güç aralığı: 45 kVA – 150 kVA,

Giriş gerilimi : 25 kva ya kadar,

Çıkış gerilimi : 480 V a kadar olup

Uygun sıvı: mineral yağı, dimetil silikon, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Küçük 3 faz yer tipi transformatörler (Resim 2.10) müşterinin giderlerini düşürmek ve estetikliği arttırmak için tasarlanmıştır. Bu transformatörlerin taşınması, kurulumu ve bakımı çok kolaydır. Bu transformatörler bankalar, restoranlar ve mağazalar gibi küçük ticari yerler için uygundur. Mini 3 faz yer tipi transformatörler kapı yerine bir başlık ve çıkarılabilir bir tabana sahiptirler. Bağlantı kabloları transformatörün altında yerleştirilir [3].



Resim 2.10. Küçük yer tipi transformatörü

C. Direk tipi transformatörler

Güç aralığı (1 faz): 5 kVA – 1000 kVA,

Güç aralığı (3 faz): 30 kVA - 500 kVA,

Giriş gerilim: 36 kV' a kadar,

Çıkış gerilimi 480 V' a kadar olup

Uygun sıvılar: Madeni yağ, sentetik hidrokarbonlardır.

Direk tipi dağıtım transformatörleri (Resim 2.11) düşük ticari yükler, endüstriyel aydınlatma gibi enerji uygulamaları için uygundur. Direk tipi transformatörler hem tek hem de üç fazlı tasarımları ile mevcuttur. Yük, büyük motorlar ve ya pompalar gibi şeyler ise piyasada tripleks tasarımlı veya T-bağlantılı, özel tasarımlı transformatörler de bulunur [3].



Resim 2.11. Direk tipi transformatörler

2.7.4. Kuru tip dağıtım transformatörleri

Kuru tip transformatörler yangın tehlikesini ve diğer çevresel kirlenmeleri en aza indirmek için üretilmişler. Bu transformatörler büyük ofis binaları, alışveriş merkezleri, depolar, hastaneler, büyük gemiler, petrol ve gaz üretim tesisleri vb. yerlerde kullanılırlar [3].

A. Vakumlu dökme reçineli kuru tip transformatörler

Güç aralığı: 50 kVA – 30 MVA,

Giriş gerilimi: 52 kV a kadar,

İklim sınıfı: C2 (IEC 60076-11),

İzolasyon sınıfı: 220 °C (ANSI/IEEE) olup

Yüksek gerilim bobinleri tipik disk sargıdan oluşur. Normal şekilde sarılabilir fakat aynı kaliteyi yakalamak için maliyeti çok arttırmak gerekir. Resim 2.12’de vakumlu dökme reçineli kuru tip transformatörler verilmiştir.



Resim 2.12. vakumlu dökme reçineli kuru tip transformatör

B. Resibloc kuru tip transformatör

Güç aralığı: 30 kVA – 40 MVA,

İklim sınıfı: C2 (IEC 60076-11),

İzolasyon sınıfı: 220 °C (ANSI/IEEE) olup

Resibloc, YG sargıları için ABB patentli bir işlemdir. YG sargıları çok katmanlı türündendir. Çapraz şekilde epoksiye batırılmış ve kurutulmuş ve cam elyaf yalıtımı kullanılır (Resim 2.13)[3].



Resim 2.13. Resibloc kuru tip transformatörü

C. VPI-VPE transformatörler

VPI (Vacuum pressure Impregnated), vakum basıncında verniklenmiş ve VPE (Vacuum pressure encapsulated), vakum basıncında kapsüllenmiş anlamına gelir.

Güç aralığı: 15 MVA' a kadar,

Giriş gerilim: 36 kV' a kadar,

Isı yalıtım sınıfı: 220 °C olup

VPI transformatörler tek kat polyester vernik özelliğine ve VPE transformatörler çevreyi koruma amacıyla kaç katlı silikon reçine kaplama özelliğine sahiptirler (Resim 2.14).



Resim 2.14. VPI-VPE transformatörü

2.7.5. Diğer transformatör çeşitleri

A. Sürücü transformatörler

Değişken Hızlı sürücü transformatörler motor sürücüleri uygulamaları için gerekli olan gerilim dönüşümünün yanı sıra elektrik yalıtımı sağlar. Dönüştürücü sürücüler normalde orta gerilim şebekeler ile ve 5 kV-36 kV ile beslenirler. Bu dönüştürücülerde gerekli gerilim 400 v - 4 kV arasındır. Bu transformatör şebeke gerilimini besleme gerilimine dönüştürür.

Bu transformatörler hem yağlı tip hem de kuru tip olarak farklı çıkış gerilimleri için 6 MVA ya kadar üretilmektedir.

B. Rüzgâr türbini uygulamaları

Rüzgâr türbini için yapılmış olan kuru ve yağlı tip transformatör çok düşük kayıplıdır. Taşınması ve yerleştirilmesi kolay olsun diye en olarak küçüktür ve özel tasarıma sahiptir.

1) Kuru tip:

Güç aralığı; 1000 kVA – 2100 kVA (müşteri isteğine göre değişebilir.),

Giriş gerilim: 36 kV' a kadar,

İklim sınıfı: C2 (IEC 60076-11),

Özellikler:

- AG çıkışları transformatörün altındadır.
- Alt tarafta çerçeve ayak veya tekerlek yoktur.
- Normalde yardımcı çıkışa sahiptir ve üçüncü bir sargı seçeneği vardır.

2) Yağlı tip:

Güç aralığı: 4000 kVA' ya kadar,

Giriş gerilim: 36 kV' a kadar,

Uygun sıvılar: Dimetil silikon veya esterler,

Özellikler:

- Hermetiktir, çinko ile kaplanmış veya boyalıdır.
- YG tarafında epoksi reçineli çıkış kullanılmıştır.
- AG taraf izolatörleri korumalıdır.
- Gaz/yağ, sıcaklık ve basınç seviyesi cihazlarla kontrol edilmekte [3].



Resim 2.15. Rüzgar türbini uygulamaları

Resim 2.15’de rüzgar türbinin de transformatör uygulaması gösterilmiştir.

C. Denizaltı transformatörleri

Güç aralığı: siparişe göre,

Giriş gerilim: 72.5 kV,

Çıkış gerilim: 1-12 kV,

Yükseklik: Dikkat edilmeli.

Uygun sıvılar: Madeni yağ.

Bu transformatörler, normalde Deniz altında petrol kuyularında kullanılan özel pompaların gerilimini temin etmektedir. Pompalar ac motorlarla çalışmaktadır. Bu motorların enerjisi uzun Yüksek gerilim kablolarıyla temin edilmektedir. Deniz altı transformatörleri denizin dibinde pompalara yakın bir yerde kurulmaktadır (Resim 2.16).



Resim 2.16. Denizaltı transformatörü

D. Yer altı transformatörler

Güç aralığı: 75-1000 kVA,

Gerilim: 30 kV 'a kadar,

Uygun sıvı: Madeni yağ, esterler ve sentetik hidrokarbonlardır.

Yeraltı ticari transformatör (Resim 2.17), döngü beslemesi ve açık tip uygulamalar için tasarlanmıştır. Bu transformatörler normalde akım sınırlayıcı sigortalar ve anahtarlarla donatılmıştır [3].



Resim 2.17. Yer altı transformatörü

2.8. Güç Transformatörleri

Transformatör üreticileri ekstra yüksek şebeke voltajında çalışan (800 kV 'a kadar) yüksek gerilimli büyük güç transformatörlerinin (Resim 2.18) tasarımında çeşitli sorunlarla karşı karşıyadırlar.

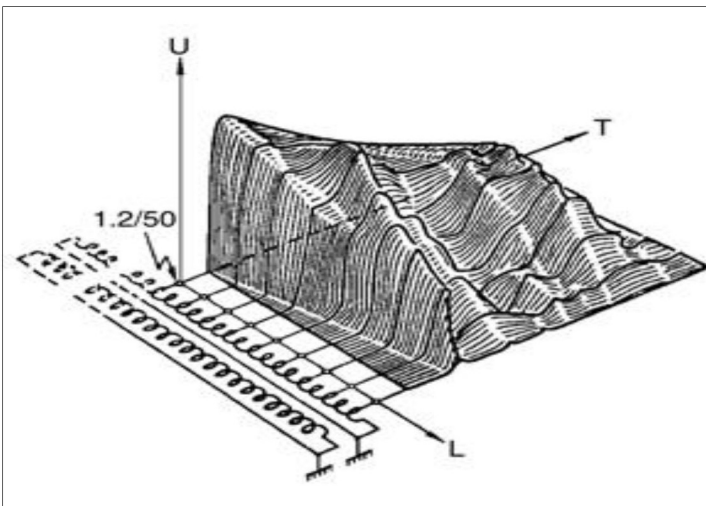


Resim 2.18. Güç Transformatörü

2.8.1. Geçici aşırı gerilimler:

Zorluklardan biri transformatör terminallerine oluşan/uygulanan geçici gerilimin sargılar arasında nasıl dağılacığına dair tahminde bulunmaktır. Bu gerilim dağıtımı birçok parametreye göre değişir.

Şekil 2.6 sargı terminaline normal bir yıldırım darbe uygulandıktan sonra sargıda gerilim dağılımını göstermektedir. Sargının yüksekliği L eksenı boyunca gösterilir ve T de zamanı gösteriyor. Toprakla sargı arası gerilimler ölçülmüştür ve U eksenı boyunca gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Sargı terminaline standart bir yıldırım darbe uygulandıktan sonra sargıda gerilim dağılımı

Yalıtımın dielektrik zorlamalara karşı dayanması sadece gerilimin pik miktarına bağlı değil ve baskının süreside önemlidir.

2.8.2. Manyetik kaçak alanı

Manyetik kaçak alanı, transformatörün güç aralığı ve kısa devre empedansı ile değişir [11]. Bu kaçak alanlar, ısınmaya sebep olabilir. Büyük transformatörlerde manyetik kaçak alanı transformatöre zarar vermesin diye özel önlemler alınmalıdır. Aşırı ısınma gaz kabarcıklarına neden olur ve yağda zayıf noktalar oluşmasına ve arızaya neden olabilir. Yağ ile temas halinde sıcak noktalar yağı bozacaktır [12-13].

2.8.3. Mekanik güçler

Üçüncü önemli konu güç transformatörlerinin sargıların üzerinde oluşan kısa devre akımlarından dolayı meydana gelen mekanik titreşimlere karşı dayanabilmektir. Büyük güç transformatörleri normalde çok yüksek kısa devre gücüne sahip sistemlerde kurulur. Küçük transformatörlerde genelde termal şartlar ya da ekonomik kayıp miktarı ve özellikleri sargı iletkenindeki akım yoğunluğunu belirtir. Büyük transformatörlerde kısa devre akımından dolayı meydana gelen mekanik darbelerin miktarı tel çapı ve özelliğini belirtir.

2.8.4. Güç aralığı limitlemesi

Güç transformatörlerinde karşılaşılabileceğimiz sorunlardan biri, transformatörün uygunsuz gücüdür. Karşılaşılabileceğimiz diğer sorun, transformatörün boyutları ve yüksekliğidir. Transformatör yüksekliği sorun olacaksa tasarımcı 3 bacaklı nüve yerine 5 bacaklı nüve kullanmak zorundadır.

2.8.5. Jeneratör yükseltici transformatörler

Bu transformatörler jeneratör gerilim seviyesini yükselterek sistem gerilim seviyesine çıkarabiliyor. Bu gerilim 800 kV 'a kadar yüksek olabilir. Bu tür transformatörlerin bağlantı şekli genelde Ynd 'dir.

AG tarafının delta bağlantıya sahip olma nedenleri:

Delta bağlantılı transformatörün sıfır bileşen empedansını oldukça düşük tutar.

Büyük transformatörler için alçak gerilim tarafındaki hat akımı çok yüksektir. Delta bağlantılı sargılarda, sargının akımı kök 3 bölü hat akımı ile eşittir. Buda telin kalınlığını iyi yönde etkiler ve fabrikada sarım işi kolaylaştır.

Yüksek gerilim tarafında, nötr normalde çok iyi şekilde topraklanmıştır. Bu yüzden genelde nötr izolasyonu bazı noktalarda faz izolasyonuna göre daha zayıftır.

Bir jeneratörün sisteme vereceği aktif ve reaktif güç kapasitesini ful olarak kullanmak istersek transformatör tasarımında bu dört koşulu önemsemek gerekir:

- Transformatörün kısa devre empedansı,
- Yüksek gerilim değeri,
- Transformatörün MVA değeri,
- Alçak gerilim değeri.

IEEE C57.116 -1989 TM. IEEE Jeneratörlere doğrudan bağlı olan transformatörlerin özelliği ve seçimi ile alakalı belli yöntemler açıklamıştır. Transformatörün jeneratörle sistem arasındaki reaktif gücün değişimini tam anlamıyla yapması için yüksek gerilim tarafında kademe değiştirici kullanılır. Yeraltı hidroelektrik santrallerinde yüksek gerilim tarafına bağlanan devre kesici normalde transformatörlerden birkaç yüz metre mesafede yer almaktadır. Transformatörler ve devre kesiciler kablo vasıtasıyla birbirine bağlanır. Transformatöre yüksek gerilim tarafından enerji verince terminallerde yüksek frekanslı titreşimler ortaya çıkar.

Tüm transformatör sargılarında ölçüm cihazlarıyla tespit edilebilir bir kaç rezonans frekansları vardır. Enerji uygulanırken bu salınımların frekansı sargıların kritik rezonans frekansı ile örtüşürse iç aşırı gerilimler meydana gelir. Bu tehlikeli durum jeneratör, transformatör ve devre kesicileri senkronize etmekle önlenabilir.

Transformatör ve jeneratör arasında sabitlenmiş bir elektriksel bağlantı varsa ikisi tek bir birim olarak çalışırlar. Transformatörün herhangi bir tarafında bir arıza çıkma durumunda röleler hızlı şekilde yüksek gerilim tarafındaki devre kesiciyi tetikleyerek birimi sistemden

ayırırlar. Bu ani yük kesimi jeneratör terminallerinde ve dolayısıyla transformatörde yüksek voltajla aşırı uyarılmaya neden olur. Bu aşırı uyarılmanın büyüklüğü ve süresi jeneratörün özelliklerine bağlıdır. Müşteri bu geçici aşırı gerilim maksimum büyüklüğünü ve süresini fabrikaya ve transformatörün tasarımı bitmeden söylemelidir. Tasarımcı alçak gerilim tarafındaki aşırı gerilim koruması için özel önem vermelidir. Zira YG ve AG tarafındaki gerilim büyüklüğü ve dolayısıyla yalıtım farklıdır ve YG tarafından AG ye gelen geçici ve ani aşırı gerilim transformatörün yanmasına sebep olabilir. AG tarafında her terminal ve toprak arası ve fazlar arasında parafudr ve kapasitör kullanmak tavsiye edilir [14-15].

Jeneratör ve transformatör arasında koruma seviyesini yükseltmek için, baralar da kullanılır. Büyük jeneratör/yükseltici transformatörler için bu hatlarda oluşan akım miktarı yüksektir. Bu akımdan dolayı meydana gelen manyetik alanda baya güçlüdür. Bu alan, transformatör kazan, kapak, izolatörler ve bara kanalların kendisinde bile beklenmeyen, girdap akımlara neden olur. Tasarımda düzeltici önlemler alınmazsa bu beklenmeyen akımlardan dolayı meydana gelen kayıplar aşırı ısınmaya neden olur.

Resim 2.19'da büyük üç fazlı jeneratör yükseltici transformatörün bir örneğini göstermektedir. Anma gücü 1100 MVA ve gerilim oranı 345/19 kV dur. Bu transformatör mantel tip olarak tasarlanmıştır.



Resim 2.19. Jeneratör yükseltici transformatörü

2.8.6. Düşürücü transformatörler

Düşürücü transformatörler, girişine gelen yüksek gerilimi uygun bir dağıtım gerilimine düşürür. Bu transformatörünün güç aralığı iletim hattının güç aralığında olabilir. Bu transformatörler genelde bir yük altında kademe değiştirici ile donatılmışlardır ve %1-1,5 adımlarla %15 çevirme oranını yapabiliyorlar. Elektrik şebekesinde, bir kaç dağıtım gerilimi vardır ve enerji, kaynaktan tüketime gelene kadar bir kaç aşamada gerilim değişikliğe şahit oluyor. Bu farklı gerilim seviyeleri arasında düşürücü transformatörleri vardır ve şebekede tüketiciye yaklaştıkça transformatörün gücü düşüyor. Çoğunlukla düzeltici transformatörlerden oluşuyor ve çıkış gerilimi sabit olsun diye çevirme oranları genelde gerilim düzeltici röleleriyle kontrol edilir. Aslında bir şebekede transformatörün her iki tarafı da önemlidir ve çevirme oranını değiştirmek çok fazla gerilim değişikliğine neden olabilir. Bu değişim sadece transformatörün iki tarafındaki reaktif gücü etkiler. Tecrübe gösterir ki, bu tür durumlarda gerilim regülasyon rölesi çıkış tarafında herhangi bir ciddi gerilim farkı olmadan yük altında kademe değiştiriciyi son kademesine alır.

2.8.7. Geçiş köprü transformatörler

Resim2.20’de gösterilen bu transformatörler farklı aktif ve reaktif gücü ve gerilim seviyeleri olan sistemleri, birbirine bağlar. Bu transformatörlerin güç aralığı normalde çok yüksektir ve taşınması kolay olsun diye tasarımında değişik teknikler kullanılır. Bu transformatörlerde bazen çevirme oranı sabittir. Gerçi bazılarında da müşteri isteği üzere kademe değiştirici kullanılır. Kademe değiştirmek transformatörün iki tarafında ciddi gerilim değişikliğine sebep olamayabilir ama reaktif gücü etkileyebilir.



Resim 2.20. Geçiş köprü transformatörü

A. Faz değiştirme transformatörler

Faz değiştirme transformatörü (Resim 2.21), geçiş köprü transformatörlerinin özel bir türüdür. Güç sistemine, bir faz açısıyla gerilimin eklenmesini sağlar.

Bu iki ana amaç için kullanılır:

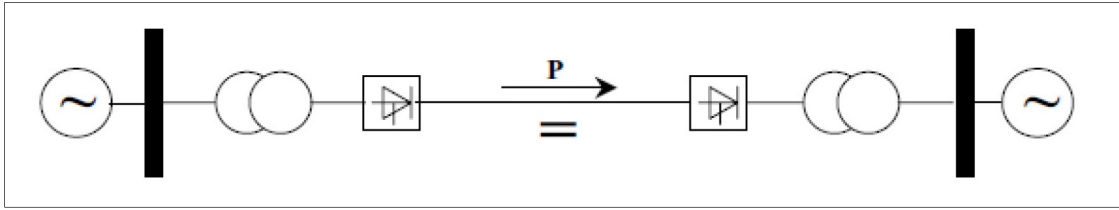
- İki büyük bağımsız güç sistemi arasındaki güç akışını kontrol etmek,
- Güç sistemleri birden fazla noktada birbirine bağlı ise, yüklemeyi dengelemek için.



Resim 2.21. Faz değiştirme transformatörü

B. Yüksek gerilim doğru akım (HVDC) transformatörler

İlk HVDC iletim hattı 1954 yılında İsveç'te kurulmuştur. O zamandan beri birçok HVDC iletim sistemleri dünyada kurulmuştur. HVDC bazen AC iletim sistemlerine göre ekonomik ve teknik açısından avantajlı bir alternatiftir. Bu transformatörler, büyük güç, uzun mesafeler boyunca havai hatlar ve ya deniz altı kabloyla iletiliyorsa kullanılır.



Şekil 2.7. HVDC iletiminin temel şeması [3]

Şekil 2.7’de gösterilen HVDC sisteminde kablunun her iki tarafında bir konvertör istasyonu vardır. Konvertör istasyonlarının en önemli cihazları, transformatörler ve valflerdir. Besleme sisteminin ac gerilimi belirli bir gerilim seviyesine dönüştürüldükten sonra dönüştürücü-doğrultucu aracılığıyla istenilen gerilim haline geliyor. Daha sonra birçok yarı iletken tristörden oluşan kontrollü valfler ile düzeltilir. Kablo veya hattın alıcı tarafında başka bir dönüştürücü istasyon vardır. Bu istasyon bir invertör olarak çalışır ve DC akımını AC şekline geri dönüştürür ve daha sonra istenilen gerilim seviyesine yükseltir/düşürür. İşlem yapılırken güç akış yönü kesintisiz şekilde değiştirilebilir [16].

2.8.8. Endüstriyel transformatörler

A. Fırın transformatörleri

Bu tür transformatörler çelik eritme ve metalürji endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Bu transformatörlerin özelliği çıkış akımının yüksek olmasıdır.

Çelik için 90 kA ve ferro alyaj için 160 kA ’e kadar elektrot akımı ve geniş bir çıkış gerilim aralığına sahiptir. Çıkış gerilimi normalde, yüksek gerilim tarafında ve ya kazan içinde çift nüve (booster regulation) tasarımının ara devresinde yer alan bir yük altında kademe

değiştirici (OLTC) ile kontrol edilir. Fırın transformatörlerinde çıkış gerilimi 1500 V a kadardır. Fırın transformatörler kabaca iki gruba ayrılabilir:

- AC fırınlar
 1. Ark fırınları,
 2. İndirgeme fırınları,
 3. Özel amaçlı fırınlar,
- DC fırınlar

Ark ocağı transformatörleri hurda metal eritmesi için kullanılır. Ark fırın transformatörleri genelde 3 faz olarak tasarlanır. İndirgeme fırın transformatörler normalde metalürji endüstrisinde kullanılmaktadır. Demir alaşımları üretimi sanayide çok önemlidir. Önemli alaşımlar ferro silikon, silikon metal ve ferro manganezdır. Diğer önemli alaşımlar ferro nikel ve ferro kromdur. İndirgeme fırınları, aynı zamanda, bakır, nikel, kalay, kurşun ve çinko gibi demirsiz metaller üretiminde de kullanılır.

İndirgeme fırınlar, kalsiyum karbit üretiminde de kullanılır.

İndirgeme fırın transformatörler için en yaygın tasarım tek fazdır. Özel amaçlı fırın transformatörlerine örnek vermek istersek, elektrot malzemesi üretimi ve yüksek kaliteli çelik üretilmesi için elektro cüruf arıtmasıdır.

AC fırın transformatörler tek ve üç fazlı olarak yapılır. Birçok fabrikada fırın transformatörleri mantel tip olarak tasarlanmaktaydı. Yeni AC fırın transformatörleri imalatı, birkaç istisna dışında çekirdek tip olarak yapılmaktadır. DC fırın transformatörler de hurda metal (çelik) eritmek için kullanılır. Normalde 3 fazlıdır. Doğru akım eritme işleminde kullanıldığından, bu transformatör, fırını besleyen bir redresör ile kombinasyon halinde monte edilir (Resim 2.22).



Resim 2.22. Fırın transformatörü

B. Konvertör transformatörler

Konvertör transformatörlerinin en yaygın kullanım alanları:

- Değişken hız sürücüleri –VSD,
- Alüminyum elektroliz.

Diğer uygulamalar, kimyasal elektroliz, DC ark ocağı, çekiş santraller, gemiler, maden sektörü, bakır arıtma vb. olabilir. VSD transformatörler bir motora ihtiyacı olduğu değişken hızı sağlamak için bağlanılır. Bu transformatör 2 adet 6 pals (toplam 12 pals) doğrultucuyu besler. Bu iki doğrultucu iki invertöre bağlı olan iki yumuşatma reaktör içeren DC-bağlantı ile birbirine bağlıdır ve çıkış bir senkron motora bağlıdır (Resim 2.23). Ayrıca normalde, bu transformatörler de bir filtreye bağlı olan üçüncü sargı da mevcuttur. Filtrenin amacı yükün güç faktörünü artırarak yanı sıra YG besleme sisteminde gerilimin harmonik bozulmasını azaltmaktır.



Resim 2.23. Konvertör transformatörler

2.8.9. Traksiyon transformatörler

Traksiyon sistemleri genel olarak AC akım kullananlar ve DC akım kullananlar olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Avrupa'da aşağıdaki sistemler bulunur [3]:

- 15 kV-AC 16 2/3Hz,
- 25 kV-AC 50 Hz,
- 1,5 kV- DC,
- 3 kV- DC
- 1.2 W- DC.

A. Hat besleyici transformatörler

AC dağıtım sistemlerinde besleme transformatörleri hakkında üç önemli sistem vardır:

1. Geri dönüş iletkeni Tek fazlı besleme sistemi,
2. Yükseltici transformatör ile tek fazlı besleme sistemi,
3. Otomatik transformatör ile iki fazlı besleme sistemi,

Bu transformatörler, 3 sistemden birinde kullanılır.

B. Lokomotif transformatörleri

Resim 2.24’de gösterilen bu transformatör lokomotifte yüklenir. Bu tür transformatörler için önemli faktörler boyut ve ağırlıktır. Bu faktörler transformatörün kayıplarını ve ısınma riskini artırır. Yüksek sıcaklıkların üstesinden gelmek için, dayanabilir yalıtım kullanılır. Örneğin, aramid, poliimid veya polyester cam malzemeler ve çeşitli yüksek sıcaklık yalıtım sıvıları da yalıtım malzemeleri olarak kullanılır.



Resim 2.24. Lokomotif transformatörü

2.8.10. Topraklama transformatörleri (Nötr bağlantı elemanları)

Topraklama transformatörler üç-fazlı bir sistem içinde, bir nötr nokta oluşturmak için kullanılır. Buda nötr topraklama imkanı yaratır. Bu topraklama, ark- bastırma reaktörü, nötr topraklama reaktörü, direnç ile veya doğrudan yapılabilir. Tasarımı, tek sargılı zikzak bağlantılı bir transformatör olabilir. Böyle bir sargının sıfır bileşen empedansı çok düşük olur, ancak amaç sistemin her hangi bir topraklamasındaki sorundan dolayı meydana gelen aşırı akım kontrolü ise, yükseltilebilir. Zigzag bağlantısına bir alternatif olarak, yıldız/delta bağlantısını kullanabiliriz. Delta bağlantısı, sıfır bileşen manyetik alanı dengeler. Bu alan,

delta ve yıldız sargısının arasında limitlenir ve transformatörün sıfır bileşen empedansını küçük tutar. Sıfır bileşen empedansını yükseltmek istenirse, delta bağlantısını açıp yerine reaktör ya da direnç kullanılır. Sekonder sargı ayarlanarak, transformatör kesintisiz, yardımcı istasyon kaynağı için hazırlanabilir. Bu transformatörler genelde yağlı tiptir. Bu transformatöre reaktör bağlamak zorunda kalırlarsa, hem transformatör hem de reaktör aynı kazan içine koyulabilir.

3. TRANSFORMATÖR PARÇALARI VE KULLANILAN MALZEMELER

Bu bölümde transformatörlerde kullanılan malzemeler ve transformatör parçaları mümkün olduğu kadar incelenmiştir.

3.1. Terminaller

Kuru ve yağlı tip transformatörlerinde terminal çeşitleri ortak veya farklı olabilir.

3.1.1. İzolatörler

Bu terminaller bağlantıyı iç yalıtım ortamından dış yalıtım ortamına taşır. Dış yalıtım ortamı genelde havadır ama bazen kablo kutularında, yağ ve gaz olabilir. Gaz zararını azaltmak amacıyla izolatörün alt kısmı uzun olmak zorunda ve transformatörün iç yalıtım ortamına ulaşmalıdır. İzolatörler sargıların elektriksel bağlantıları ve toprak potansiyelinde olan kazan arasında gerekli yalıtımı sağlar. Ayrıca, dış ortamda gerekli korumayı sağlar. Bu izolatörler gerekli akım kapasitesini karşılamak zorundadırlar.

A. Alçak gerilim izolatörleri

Porselen boru içine yerleştirilmiş iletken bir bara olabilir (Resim 3.1). Normalde bara, bakırdan yapılmış olabilir ve yalıtımı transformatör yağı ve porselen kombinasyonunun dan oluşabilir. İzolatörün yağda kalan kısmı kısadır. İzolatörün hava ile temasta olan kısmı daha uzundur ve yağışlı koşullara uygun üretilir. Yağ sızıntısını önlemek için porselen ve bara arasında ve porselen ile kazan arasında conta kullanılır. Bu porselen izolatör için normal limit, 45 kV ve 10 kA 'dır. Tasarımda çok düşük kısmi deşarj seviyeleri elde etmek istenirse özel alçak gerilim izolatörleri kullanılır.

Daha yüksek gerilimli izolatörler 25 kV 'tan başlar 52 kV 'a kadar devam eder. Gerçi bu aralık müşteri isteğine göre veya tasarım gerektirirse daha da yüksek olabilir. Özel AG izolatörü kullanımında, kapasitif gerilim dağılımı dikkate alınır ve genelde baranın ve izolatörün genel izolasyonu daha güçlendirilir.



Resim 3.1. Alçak gerilim izolatörü

Uzun bir süre için fenolik kağıt laminatları (bakalit) neredeyse dünyanın her yerinde kullanılmıştır. Bakalit mekanik olarak güçlüdür, ancak tam anlamıyla büzülme ve çatlamalardan kurtulamaz. 1970 ten sonra izolatör üretim teknolojisi değişmiştir ve transformatör yağı emdirilmiş kağıt kullanılmaya başlanmıştır. Bu izolatörlerin üretiminde porselen kaplama kullanılır. Gövde, topraklanmış flanş ve hava geçirmez yalıtım içinde konumlandırılır. Bu yalıtım iki parçadan oluşabilir. Üst kısım porselen ve silikon polimerden oluşur ve alt kısım normalde yağ altında porselen ve epoksi reçineden oluşur. Hava kısmı ve yağ kısmı porselenleri, montaj flanşına karşı ve alt ve üst armatürlere karşı eksensel olarak contalarla sıkıştırılır. Montaj basıncı, sıcaklık değişimi sırasında, farklı parçaların genişleme ve kasılmasını sağlayan yaylar tarafından sürdürülür. İzolatör içinde, merkezi iletken ve dış kılıf arasındaki boşluk transformatör yağı ile doldurulur. İzolatörün üst kısmı yağ genişleme alanını sağlar ve yağ seviyesini gösteren bir gözetleme camı ile donatılabilir. Üst kısım yağ genişleme ve büzülmesine yer sağlar ve hava yada gaz zararını azaltır. Bu genişleme alanı yeterince atmosferik hava ve dolayısıyla nem girişine karşı sızdırmaz olmalıdır. Yağ emdirilmiş yoğunlaştırılmış gövdeli izolatörler genelde dikey konumda kurulmak için tasarlanır. Ama tasarımda özel tedbirlerle yatay montaj içinde uygun olabilirler. Gerekli anma akımı ve diğer özelliklere göre, izolatörler farklı şekillerde tasarlanırlar. Merkezi iletken bakır olabilir ve kalınlığı geçecek olan akıma göre değişebilir.

B. Yoğunlaştırılmış izolatörler

Yoğunlaştırılmış izolatörler (Resim 3.2), yüksek gerilim iletkeninin güç trafosunun topraklanmış duvarlarından geçmesine izin veren cihazlardır. Yoğunlaştırılmış izolatörler, uygulandığı yerlerde, transformatörün ve sistemin elektriksel, ısıl ve mekanik gereksinimlerini karşılamalıdır.

Yoğunlaştırılmış izolatörler 15 kV ile 800 kV arası için temel yapısı ayndır.

Yoğunlaştırılmış izolatörler dünya genelinde kullanılan üç ana yalıtım sistemi vardır ve bunlar aşağıdaki gibidir:

- Reçine sarılmış kâğıt
- Yağ Emdirilmiş kâğıt
- Reçine Emdirilmiş kâğıt



Resim 3.2. Yoğunlaştırılmış izolatör

C. Yüksek akım izolatörleri

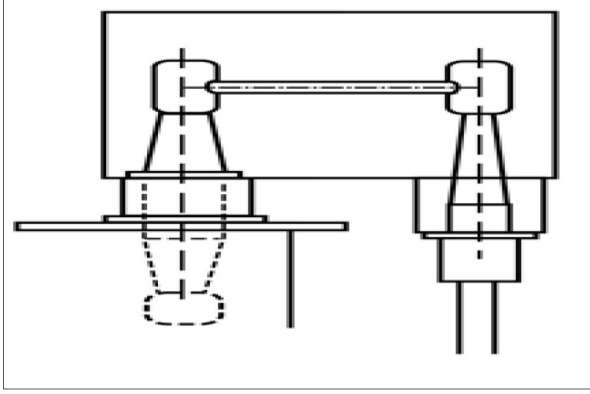
Yüksek akımlar için yapılmış olan izolatörler, (30 kA kadar) çok büyük merkezi iletkene (bara) sahiptir (Resim 3.3). Yüksek akım izolatörü, gerilim, akım ve çalışacağı ortama göre farklı şekillerde tasarlanabilir.



Resim 3.3. Yüksek akım izolatörler

3.1.2. Kablo bağlantıları

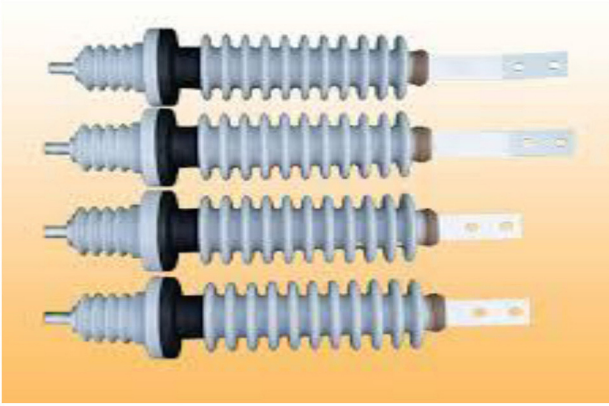
Genellikle bu tür bağlantılar, yağ ile dolu bir kutunun içinde ayrılabilir şekilde yağdan yağa bir izolatöre bağlanır. Ayrılabilir bağlantı herhangi bir durumda ve özellikle yalıtım testi yapılırken kablonun transformatörden ayrılmasını sağlar (Şekil 3.1). Aynı zamanda transformatörün iç kısmının korunmasına da yardımcı olur. Düşük gerilimli sistem için üretilmiş yeni plastik kablolar normalde bu şekilde bağlanmaz, açık havada bağlanır. 145 kV seviyesine kadar kullanılacak epoksi reçineli izolatörler de vardır. AG tarafında transformatör yüksüzken, yalıtımlı bir malzeme ile bağlantıyı keserek transformatörü devre dışı bırakmak olur.



Şekil 3.1. Kablo bağlantıları

3.1.3. SF₆ bağlantıları

SF₆ gaz izoleli transformatörleri özel işletmelerinde güç iletim sistemlerinin alev almasını engelleyecek şekilde tasarlanır [17]. Doğrudan SF₆ kanalına bağlı olan transformatör uçları özel izolatörlere sahiplerdir (Resim 3.4).



Resim 3.4. SF₆ bağlantıları

3.1.4. Plug in izolatörler/mono bloklar

Bu tip izolatörler, özel reçine ve iletkenlerden oluşurlar. Daha hızlı operasyon için kullanılırlar. Başlıkların değişimi veya çıkarılıp takılması normal porselen izolatörlere göre çok daha hızlı yapılır.

3.2. Soğutucular

Soğutucu ekipmanları, sıcak yağı transformatörün üst kısmından alıp, soğutup aşağıya gönderir. Soğutma sistemi iç yağ devresi ve dış yağ devresi olmak üzere iki yağ devresinden oluşur. İç devre kayıplardan dolayı meydana gelen sıcaklığı yağa transfer eder. Dış devrede yağ, sıcaklığı ikinci bir soğutma sistemine gönderir. Genelde çevredeki hava transformatörlerin soğutmasında önemli rol alır. Yeraltı kullanımında havanın olmadığı ortamlarda, suda kullanılabilir.

Bu iki devre farklı şekillerde kombine edilebilir. Örneğin iç devredeki yağ hareketi doğal olarak değil de pompalarla olduğunda, yağ pompalı (oil forced) olarak adlandırılır. IEC' e göre bu kombineler aşağıdaki gibidir [5]:

- ONAN – Yağı ve havası doğal dolaşır, (Oil natural – Air natural),
- ONAF – Yağı doğal dolaşır, fanlar ile hava pompalanır (Oil natural – Air forced),
- OFAN – Yağı pompalanır, Hava doğal dolaşır (Oil forced – Air natural),
- OFAF – Yağ ve hava pompalanır (Oil forced – Air forced),
- OFWF – yağ ve su pompalanır (Oil forced – Water forced).

Yağ, ısı üreten yüzeylere doğrudan pompalanırsa buna, OD – Doğrudan pompalama (Oil directed), denilir.

Pompalar tıpkı fanlar gibi bozulabilirler. Bu durumda onların tamiri ve değişimi transformatör durdurulmadan veya yağ boşaltılmadan mümkün olmalıdır. Her devrenin kendine ait aç kapa anahtarı olmalıdır.

3.2.1. Radyatörler

Radyatörler piyasada farklı modellerde bulunurlar. Radyatörleri azıcık transformatör kazanından yüksek şekilde yapıp monte edilirse yağ soğutmasında daha da etkili olabilir. Radyatörlerin üst kısmında bir gaz tahliye ve alt kısmında boşaltma vanası vardır (Resim 3.5). Radyatörler doğrudan transformatör kazanına monte edilirler. Radyatörler ayrılabilir şekilde tasarlanır, bu durum hem bakım onarımda hem de taşımak açısından çok faydalıdır. Radyatörlerin kumlanması ve sağlam boyanması tavsiye edilir.



Resim 3.5. Transformatör radyatörü

3.2.2. Dalga duvarlı kazanlar

Dalga duvarlı kazan küçük ve orta ölçekli dağıtım transformatörleri kullanılır. Esnek yapıya sahip bu dalga duvarlar, yağın sıcaklığa göre hacim değişimi ile birlikte genişip kasılırlar. Kazanın her tarafındaki dalgaların sayısı ve derinliği, soğutma ve dinamik basınç değişimini göz önünde bulundurarak hesaplanır ve optimize edilir. Hermetik kapama transformatörlerin genişleme depolu transformatörlerine göre birçok avantajları vardır. Yağın hava ile temasta olmadığı için nem ve havadaki diğer şeyleri ememez. Bu transformatörün daha bakım onarım maliyetinin azalması ve ömrünün uzaması demektir.



Resim 3.6. Dalga duvarlı kazanlar

3.2.3. Fanlar

Daha büyük transformatörler için fanlar transformatörün altında veya kenarlarında bir ONAF soğutma düzeni oluşturmak için monte edilir. Fanlar transformatörün 25% kadar yüklenme kapasitesini artırır. Soğutma fanları düşük frekanslı gürültü üretir. Bu gürültü transformatörün gürültüsüne eklenir. Şiddeti fanın büyüklüğü, dönüş hızı ve bıçaklarının tasarımına bağlıdır. Fanlar farklı tasarımlara sahiptirler.

3.2.4. OFAF (yağ ve hava pompalayan) ısı eşanjörleri

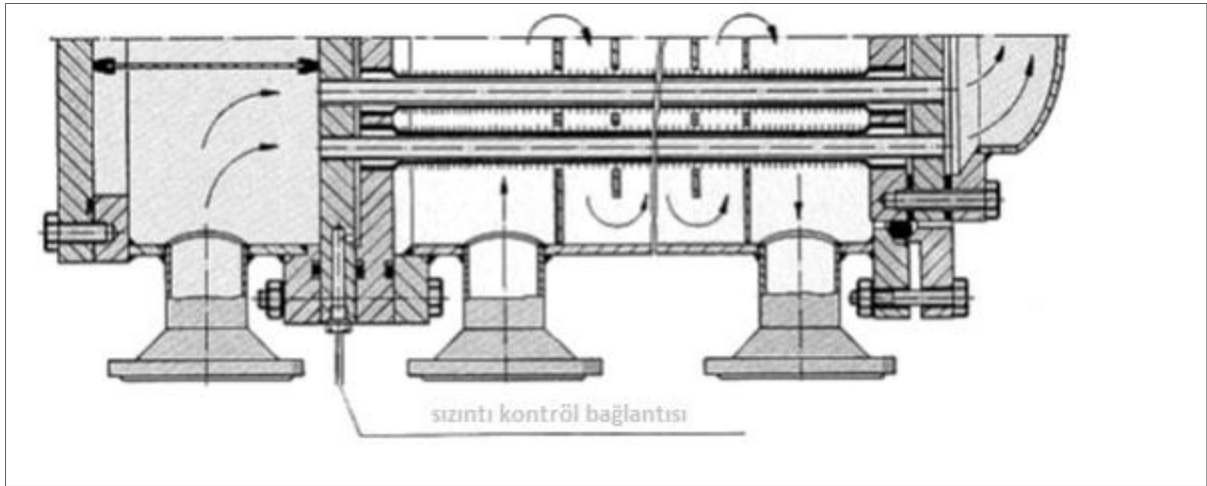
Büyük transformatörlerde, doğal şekilde soğutma işini yapan radyatörler büyük bir alan kapsar. Kompakt soğutucular bu sorunu çözer. Bu şekilde pompalar yağ dolaşımını sağlar ve güçlü fanlar havayı üfleyerek hareket ettirir.

3.2.5. Yağ-su soğutucuları

Transformatör ağır sanayide (çelik işleri gibi) kullanılıyorsa ve ya hava dolaşımı zor olan bir yerde çalışıyorsa, en iyi alternatiflerden biri su ile soğutma yöntemi olabilir. Bu yöntemin risklerinden biri kullanılan suyun bazı iklimlerde donmasıdır. Çok sıcak ortamlarda da başka sorunlar çıkabilir. Su soğutucuları kompaktlardır. Çıkarılabilir tüpler ve normal silindirik

borudan oluşurlar. Bu soğutucuların en önemli sorunu malzemenin paslanmasıdır. Yağ sisteminin içine su sızıntısı, bir transformatör için ölümcüldür ve bu tür sistemlerin dikkatle izlenmesi gerekir. Montajı, yağ tarafındaki basınç su tarafındaki basınçtan daha yüksek olacak şekilde ayarlanabilir, ancak bunu her zaman sağlamak mümkün olmayabilir. Paslanması zor, titanyum gibi maddeler kullanılabilir.

Bazen çifte boru soğutucu uygulanabilir. Bu sistemde yağ ve su devreleri bir ara boşluk ile ayrılır ve böylece herhangi bir sıvı sızıntısı bu alanda toplanır ve alarmla bildirilir. Şekil 3.2’de yağ-su soğutucusu görseli verilmiştir.



Şekil 3.2. Yağ – su soğutucular

3.2.6. Yağ pompaları

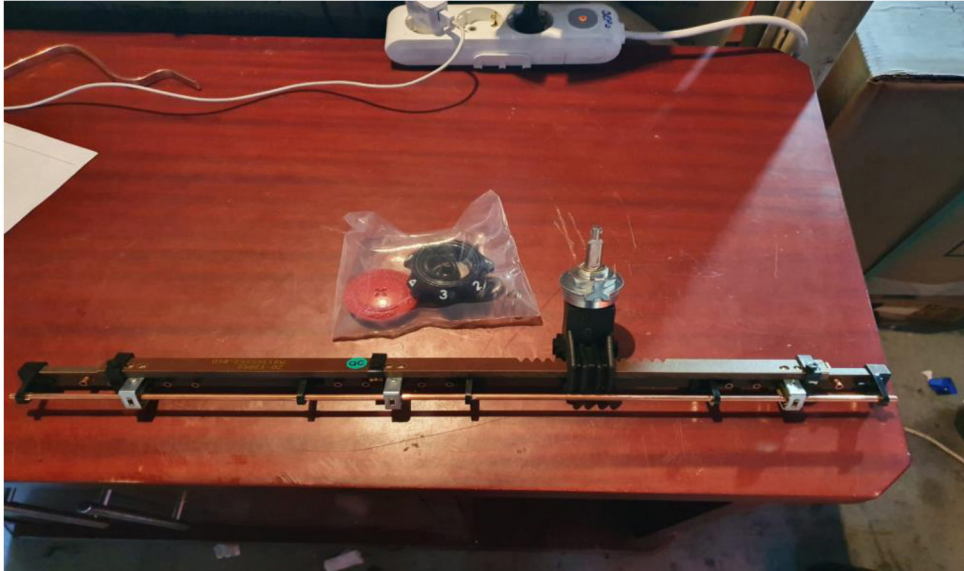
Yağ sirkülasyon pompaları özel, kompakt, mühürlüdür. Pompa, transformatör yağı içine daldırılır. Bu pompaların ses seviyesi transformatör ses seviyesine göre düşüktür.

3.3. Gerilim Düzenleme Ekipmanları

Transformatörlerin çoğunda, onların gerilim oranını ayarlamak için bir cihaz vardır. Bu ayar, yük altında ve ya boşta kademe değiştirici ile veya daha eski ve özel transformatörlerde, onu devre dışı bırakarak ve topraklayarak, cıvatalı bağlantılar ile yapılır [18]. Kademe değiştiricinin gelişmişlik seviyesi, çalıştığı frekans ve transformatörün büyüklüğü ve önemine bağlıdır.

3.3.1. Boşta kademe değıştirciler

Boşta kademe değıştircisi tasarım olarak çok basit bir parçadır ve bobindeki seçilen kademeye bağlantı verir (Resim 3.7). Adından da belli olduğu gibi bu parça transformatörün enerjisi kesildikten sonra çalışır. Boşta kademe değıştircilerde, transformatörün yıllarca aynı kademede çalışması, bozulma ve oksidasyon ve dolayısıyla kontaktın direncinin artmasına neden olabilir. Isı pirolitik karbon birikmesine neden olur ve zaman içerisinde direnç artar. Sonuçta transformatörün gaz koruma rölesi uyarmaya başlar veya daha kötü durumlarda, bir kısa devre oluşur. Bunu önlemek için, periyodik bakım sırasında parçayı devre dışı bırakarak temas yüzeylerini silinmesi gerekir. Aynı tavsiye yük altında kademe değıştircisi için de geçerlidir.



Resim 3.7. Boşta kademe değıştirici

3.3.2. Yük altında kademe değıştirici

Yük altında kademe değıştirici (Şekil 3.3), adından da belli olduğu gibi transformatör çalışırken kademe değıştirir ve kesintisiz akım akışını sağlar. Akım akışı değışen kademelerde kısmi kısa devre olmadan devam etmelidir. Bu sistem 1905-1910 da geliştirilmiştir. Bu cihaz bir kademedan çıkan gücü komşu kademeye transfer eder. Bu işlem sırasında iki kademe geçiş empedansı ile bağlanmış olacaklar. Bu aşamada iki kademe yük akımını paylaşır. Bir sonraki aşamada eski kademe ile bağlantı kesilecek ve yük tamamen

yeni kademeye transfer edilir. Bu geçiş imkânını sağlayan parçanın adı yönlendirici anahtardır.



şekil 3.3. Yükte kademe değiştirici

3.3.3. Otomatik gerilim regülatörü

Her zaman sabit bir çıkış gerilimi mümkün olmayabilir. şebekede bir gerilim düşüşü olabilir ve bunun telafi edilmesi gerekebilir. Kademe değiştirici kontrol sistemi transformatör merkezindeki röle sistemine bağlıdır. Prensip olarak kademe değiştirici sadece emirleri alır: yükselt, düşür.

Ancak aynı istasyonda çalışan transformatörler arasındaki koordinasyonu sağlamak kademe değiştiricilerin görevidir. Bu transformatörler doğrudan paralel şekilde bağlılar ise kademe

değiştiricileri bir biri ile koordineli şekilde hareket etmelidir. Bu koordinasyonu otomatik gerilim regülatörü sağlar.

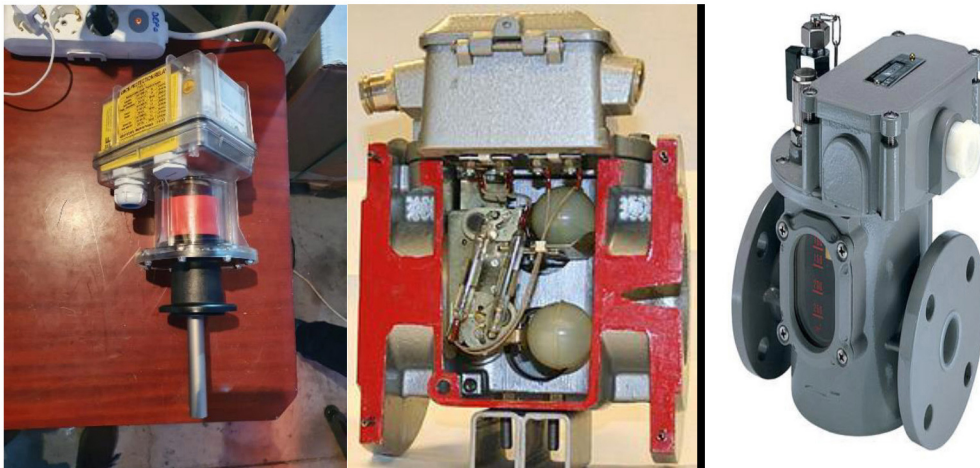
3.4. Aksesuarlar / Koruma Ekipmanları

3.4.1. Gaz tahrikli röle

Genleşme depolu transformatörlerde kazan ve deponun bağlantı borusunda normalde bir gaz tahrikli röle vardır (Resim 3.8). Bu rölenin iki işlevi vardır [19]:

Kazandan depoya doğru harekette olan serbest gaz kabarcıklarını toplar. Kazan ve depo arasındaki yağ akışı önceden ayarlanmış değerden fazla ise hassasiyet gösterir. Bu rölenin mucidi vefat ettikten sonra ona buchholz röle ismini verdiler.

Gaz transformatör içinde başlayan arızanın bir göstergesi olabilir. Gaz, rölenin içinde toplanır, yağın yerini alarak şamandıranın aşağı inmesine neden olur. Az miktarda gaz toplandığında alarm sinyali harekete geçer. Gaz miktarı artarsa açma kontaktı çalışabilir. Transformatörde ark gibi ciddi bir arıza meydana geldiğinde oluşan gaz, yağı depoya doğru itekler ve çarpma sesi gerçekleşir. Bunun gibi ciddi durumlarda, çok gaz toplandığında, röle kontaktı açarak harekete geçer.

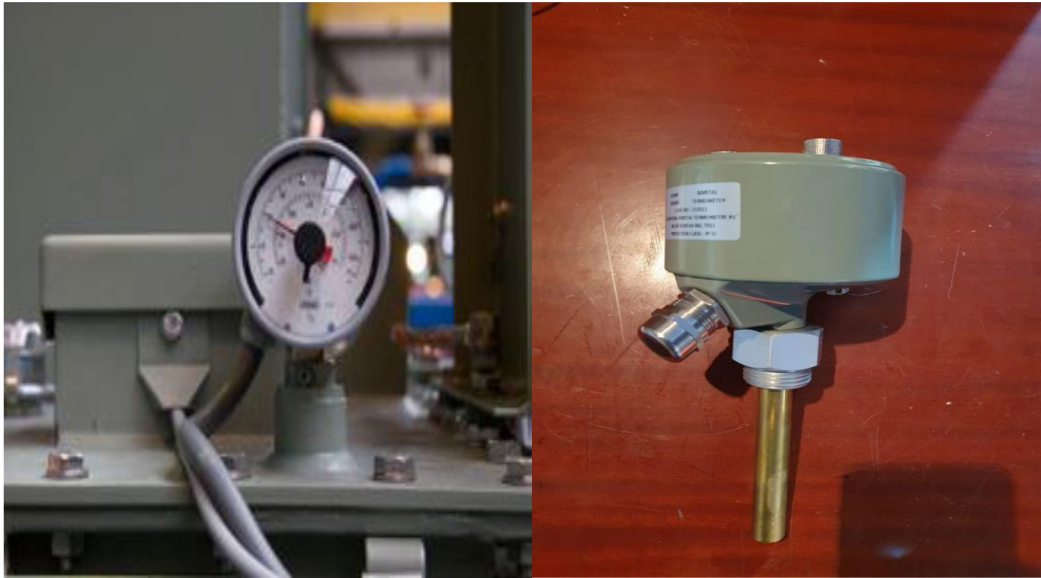


Resim 3.8. Gaz tahrikli röle

3.4.2. Sıcaklık göstergesi

Termometreler normalde yağ ve sargıların özel noktalarının sıcaklığını ölçmek için kullanılır. Yağ sıcaklığı, sensör ile doğrudan yağın üst tabakasının sıcaklığını ölçerek elde edilebilir. Pt 100, termometre sensörü olarak ayarlanabilir. Resim 3.9’da sıcaklık göstergesi verilmiştir.

Sargı sıcaklığının ölçümü, dolaylı bir şekilde yapılır. Sargının sıcak noktası üst kısmında yağın en sıcak olduğu alanın en yakın yeri varsayılır [12-20]. Ayrıca sargı sıcak nokta ve yağ arasındaki sıcaklık oranı, akımla orantılı olan sargı kayıplarına bağlıdır [12-20]. Termometre tüm bunları hesaplayarak sıcaklığı ölçer. Sargı termometresi, bobinin üst kısım yağına daldırılmış rezistör içinde yerleştirilmiş bir sensör olarak ayarlanır. Sargı akımını yansıtan bir akım transformatörü rezistörü besler. Testler ve hesaplamalar sonucunda elde edilen sargı sıcaklık gradyanını temsil eden paralel devre, rezistöre bağlanır. Sargı termometreleri farklı şekillerde de tasarlanabilir. Termometreler elektrik kontaklarla birlikte çalışır. Önceden ayarlanmış belli bir sıcaklıkta alarm sinyali verilir. Bu sinyal devre kesicileri çalıştırır. Sıcaklığı ölçüp kontrol etmek için farklı yöntemlerde kullanılabilir. Normalde özel tip transformatörlerde ve güç transformatörlerinde hassasiyet daha yüksektir.



Resim 3.9. Sıcaklık göstergesi

3.4.3. Dahili akım transformatörleri

Güç transformatörlerinde, özellikle alçak gerilim tarafında müşteri isteğine göre, dâhili akım transformatörleri kullanılır. Bu transformatörler sargılardan geçen akımı ölçerek, oluşabilecek büyük zararları önler [21].

3.4.4. Silikajel kabı

Genleşme depolu transformatör yağının kuruluğunu sağlamak için genleşme deposunda yağ seviyesinin üstündeki boş alanda olan havanın rutubetini alınmalıdır. Bu boşluk normalde silika jel kutusu diye bir kurutma parçası ile korunur (Resim 3.10). Silika jelin özelliği yüksek nem emme gücüdür. Kendi ağırlığının %30 - %40 kadar su emdiğinde doygunluğa ulaşır. Yakın zamanlara kadar kobalt klorid kullanılmaktaydı. Bu maddenin rengi 50% doyduğu zaman maviden pembeye değişir. Şimdi çevre dostu olan bir organik madde kullanılmaktadır. Bu madde turuncudan renksiz hale dönüşür. Özel iklimlerde ve özel kullanımlarda, farklı çeşitler de kullanılır.



Resim 3.10. Silikajel kabı

3.4.5. Yağ koruma sistemleri

Transformatörün genleşme deposuna bir hava yastığı sistemi monte edilir. Sentetik kauçuk yastık, yağın üstünde yer alır. Yastığın iç kısmı atmosfere bağlanır. Böylece transformatör soğukken ve yağ seviyesi düşükken havayı içeri teneffüs eder ve ısınınca dışarı verir. Bunun

değişik versiyonu, depoyu yatay olarak bir diyafram sistemi ile ikiye bölüp, havayla doğrudan teması olmadan genişip büzülmesine izin verir.

Genleşme deposunda yağ üzerindeki boşluk nitrojen ile doldurulabilir. Bu işlem, bir basınç düşürme valfi ve basınçlı bir gaz tüpü ile gerçekleştirilir. Transformator nefes aldığı anda basınç düşürme valfi daha fazla nitrojen salınmasına olanak tanır. Yağın hacmi arttıkça, nitrojen havalandırma vanası vasıtasıyla atmosfere atılır.

3.4.6. Yağ seviye göstergesi

Yağ seviye göstergeleri (Resim 3.11), genleşme deposu üzerine doğrudan yerleştirilen bir malzemedir ve genleşme deposundaki yağ seviyesini göstermek için kullanılır. Çok büyük transformatörler de yağ seviye göstergesi yerden de görülmelidir. Bu yüzden seviyeyi uzaktan gösterebilecek göstergeler kullanılır ve bazen açma anahtarlarıyla birlikte çalışır. Yağ seviyesi düştüğü ve normalden fazla arttığı zaman açma yapar. Hermetik transformatörlerde dikey olarak kapağın üzerine monte edilir [19].



Resim 3.11. Yağ seviye göstergesi

3.4.7. Basınç tahliye cihazları

Yağ ile dolu transformatörlerde, meydana gelen kısa devre, basınç fazlalığına sebep olur. Bu basıncın nedeni gazın ayrışma ve yağın buharlaşmasıdır. Resim 3.12’de de gösterilen bu tahliye cihazı, basınç fazlalığını atar ve böylece kazanın zarar görmesi ve yağın kontrolsüz dökülmesini engeller. Basınç fazlalığı çıktıktan sonra valf tekrar kapanır.



Resim 3.12. Basınç tahliye cihazları

3.4.8. Ani basınç tahliye cihazları

Ani basınç rölesi ciddi bir arıza meydana geldiğinde transformatör kazanındaki yağ basınç dalgasını almak için kullanılır. Cihaz basınç artış hızının yavaş veya yüksek olduğunu ayırt etmektedir ve belirtilen orandan daha hızlı olduğunda anahtarla transformatörü hızlı şekilde devre dışı bırakır.

3.4.9. Aşırı gerilim koruma cihazları

- İç aşırı gerilim koruması

Özel amaçlı ve bazı büyük transformatörlerinde, tasarımcı sistemden, bobinleri korumaya çalışır. Bu iş normalde ZnO varistörleri ile yapılır.

- Dış aşırı gerilim koruması

Transformatör terminalleri hep aşırı voltaja karşı korunmalılar. En basit yolu izolatörün üzerindeki ark boynuzu ile yapılır. Daha iyi koruma, transformatöre yıldırım koruyucu monte etmektir. Ayrıca koruyucu ve kazan arasındaki topraklama bağlantısı mümkün olduğu kadar kısa olmalıdır. Transformatör izolasyon seviyesini seçerken ve tasarlarken, aşırı gerilim koruması mesafesini dikkate alınmalıdır.

3.4.10. Taşıma tekerlekleri / takozları

Normalde vinç ile taşımak her yerde mümkün değildir. Önceden ray döşendi ise tekerlek kullanılır (Resim 3.13). Bu tekerlekler çift yönlüdür ve taşıma işini kolaylaştırır. Tekerlekler müşteri isteği ve standartlara göre yapılıp monte edilir. Plastik ve metal çeşitleri vardır.



Resim 3.13. Taşıma tekerlekleri

3.4.11. Yanıcı gaz dedektörü

Yanıcı gaz dedektörü yağ içindeki hidrojeni gösterir. Bu cihaz hassastır ve gaz kabarcıklarının çıkmasından önce hidrojeni toplar ve alarm verir.

3.4.12. Akış göstergesi

Yağ pompalı soğutma sistemlerinde pompalardan çıkan yağın kontrolü için kullanılır. Bu cihaz su pompalı soğutma sistemlerinde de kullanılır. Bu sistem normalde bir alarm sistemi ile donatılır.

3.4.13. DMCR hermetik röleler

Dağıtım hermetik trafolarında koruma amaçlı kullanılır. Isı, basınç, gaz ve dielektrik seviyesini kontrol eder.

3.5. Transformatör Malzemeleri

3.5.1. Çekirdek malzemeleri

Transformatör çekirdekleri ince çelik levhalardan yapılır. Bu levhalar transformatörlerde kullanılmak için üretilir [22]. Çekirdek çeliği, düşük karbon içerir ($< 0.1\%$).

Karbon fazlalığı histerzis kayıpların artması ve transformatörün hızlı yaşlanmasına neden olur. Çekirdek çeliği silikon (Si) ile alaşımlandırılır. Silikon, girdap akım kayıpları azaltır. Silikon çeliği kırılgan yapar. Bu nedenle %3'ün altında tutulur. Çelik levhaları manyetik alandan soğuk haddeleme yönünde, etkilenir. Haddeleme süreci çok yüksek yüzey basınçlı ve özel ekipman gerektirir. Çekirdek çeliği çeşitli kalitelerde mevcuttur. Ürünlerin çeşiti, hammadde özelliği, soğuk haddeleme işlemi ve derecesi ve bitirme işlemlerine bağlıdır. Örneğin lazer işlemi vb.

Lazer işlemi, manyetik alanı küçük alanlara bölerek düşük kayıplara neden olan mekanik bir işlemdir. Girdap akım kayıplarını en aza indirmek için, levhalar birbirinden izole edilmelidir. Daha önce vernik veya izolasyon kağıdı kullanılıyordu. Günümüzde çekirdek çeliği hazır izoleli, üretici tarafından teslim edilir. İzolasyon, transformatör yağı ile uyumludur. Sıcaklığa ve korozyona karşı dayanıklıdır. İzolasyon katı çok incedir (< 4 p.m.). İnce kaplama daha iyi dolgu faktörü anlamına gelir. Çekirdek, çok katmanlı çelik levhalarından yapılır. Çekirdek bacalarının demirden yapıldığını varsayalım. Çekirdek kısa devre yapar ve transformatör çalışmaz. Karşılıklı yalıtım bu kısa devreyi önler. Çekirdekteki girdap akım kayıpları, kalınlığın karesi ile orantılıdır. Bu nedenle çelik levhalar yüksüz kayıplarını azaltmak için ince olmak zorunda. Normalde kalınlığı 0,30 mm ile 0,18 mm arasındadır [23].

3.5.2. İletken malzemeleri

Ticari ve teknik açıdan kullanılacak iki uygun malzeme var: Bakır ve alüminyum. İletken malzeme seçiminde fiyatı etkilidir. Bakır sargılı transformatörlerin normalde alüminyum sargılı transformatörlerden daha küçüklerdir. İletken folyo, yuvarlak veya dikdörtgen tel olarak mevcuttur. Folyo doğrudan yalıtılmış değildir. Yuvarlak ve dikdörtgen tel, vernik ile kaplanır. Kağıt izolasyon yerine kullanılan vernik, sargı boşluk faktörünü iyileştirir ve yağlı tip transformatörlerde, sargı-yağ sıcaklık gradyanını ve kuru tip transformatörlerde sargı-

hava sıcaklık gradyanını azaltır. Transformatörün çalışma sıcaklığı da iletkenin izolasyon seçiminde etkilidir. İletkenin soğuk işlenmesi mekanik mukavemet ve kısa devre kuvvetlerine karşı direncini arttırmaktadır.

3.5.3. Yalıtım malzemeleri

İyi bir yalıtım malzemesi aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Yüksek dielektrik direnci,
- İyi mekanik özellikler,
- Çalışma sıcaklığında uzun kullanım ömrü,
- Kolayca uygulanabilir.

Yalıtım malzemesi, transformatör ömrü boyunca meydana gelen sıcaklığa dayanabilir olmalıdır. Yağlı tip transformatörlerde yalıtım malzemesi kullanılan sıvıya uyumlu olabilir.

A. Selülozik malzemeler

Genelde termal 105 sınıflı yağlı tip transformatörlerde kullanılır. Selüloz yalıtım, uzun elyaflı, özel ağaçlardan yapılır. Uzun lifler, uzun ömür ve yüksek dansite, yüksek dielektrik gücüne sebep olur. Selülozik ürünler yağ ile uyumlu ve yağı kolayca emer. Emdirme, vakum ve yüksek ısı eşliğinde yapılır, ve küçük boşluklar yağ ile doldurulur. Bu şekilde dielektrik gücü daha da artar. Boşlukları yağ ile dolmazsa, kalan küçük hava kabarcıklar kısmi deşarjlara neden olur. Kağıt selülozik yalıtım özellikleri IEC 60554-3 ve mukavva selülozik yalıtım özellikleri IEC 60641-3 de belirlenmiştir.

B. Ahşap

Lamine ahşap, yağlı tip transformatörlerde farklı yerlerde destek ve yalıtım amaçlı kullanılır. Bununla ilgili standart: IEC 61061-1/2/3.

C. Porselem

Porselen aslında yağlı tip transformatörlerin izolatörlerinde kullanılır. Bazen kuru tip Transformatörlerde destek ve ayırıcı olarak kullanılır.

D. Katı sentetik yalıtım malzemeleri

Bu malzemeler genelde kuru tip transformatör/reaktörlerde veya yüksek termal seviyelerde olan transformatör/reaktörlerde kullanılır. Bu malzemeler selüloz yalıtımdan daha pahalıdır.

Emayeler iletken izolasyon maddesi olarak kullanılır ve genellikle çift kaplanır. Farklı uygulamalar için çeşitli nitelikleri vardır. Referans olarak IEC 60317 a bakılabilir. Epoksi reçineler, cam elyafı gibi dolgu maddeleri ile kombinasyon halinde, kullanılır. Polyesterler, yalıtım bariyerleri, aralama malzemesi olarak kullanılır.

Referans olarak IEC 60893-3 ve IEC 61212-3 e bakılabilir. Aramid elyaf farklı kalınlıklarda yalıtım kağıdı veya mukavva levhalar olarak üretilir. Malzeme yüzeyi düz ya da gözenekli olabilmektedir. Gözenekli tipi yağ emdirilmiş olmalıdır. Malzeme çok iyi termal özelliklere sahiptir (termal sınıfı 220) [24].

3.5.4. Sıvılar

Transformatördeki sıvı malzemeler, çeşitli işlevlere sahiptir. En önemlisi, soğutma ve izolasyondur. Ana fonksiyonu transformatör içindeki aktif kısmının durumu hakkında bilgi taşımaktır [25].

A. Madeni yağ

Madeni yağın önemli özelliklerini IEC 60296 de bulabilirsiniz. Alevlenme noktası 145°C, yoğunluğu 0,88 kg / dm³, dielektrik 2,2 olarak belirtilmiştir. Madeni yağ en çok kullanılan sıvıdır ve genelde diğer kullanılacak sıvılar için referanstır. Maliyet ve teknik açıdan madeni yağ en iyi sıvıdır ve transformatörün diğer parçaları ile de uyumluluk sağlıyor. İnhibitörleri yağ yaşlanma sürecini geciktirir.

B. Diğer sıvılar

Bu sıvılar, özel uygulamalar için üretilmiştir ve mineral yağdan daha pahalıdır. Bu sıvıları kullanmaya ana motivasyon, yangın güvenliği ve çevresel etkilerinin iyileştirilmesidir. Bu

sıvılar yüksek sıcaklıklarda çalışabilir ancak çok soğuk iklimlerde limitlere dikkat etmek gerekir.

B1. Dimetil Silikon

Silikon sıvısının önemli özellikleri, IEC 60836 da vardır. Alev alma ısısı 310°C , yoğunluğu $0,96 \text{ kg/dm}^3$, geçirgenlik 2,7 'dir. Bu sıvı, mineral yağ ile karşılaştırıldığında daha düşük dielektrik ve soğutma özelliğe sahiptir tutuşunca, kendiliğinden söner. Çünkü oksit katmanı oluşturur. Silikon sıvısı yük altında kademe değiştiricilerin bulunduğu transformatörlerde kullanılmaz. Nedeni ise zayıf kayganlaştırma özelliğidir.

B2. Sentetik Ester

Bu sıvının önemli özellikleri, IEC 61099 de vardır. Alev alma ısısı 275°C , yoğunluğu $0,97 \text{ kg / dm}^3$, dielektrik 3,2 olarak belirtilmiştir.

B3. Sentetik Hidrokarbon

Bu sıvının önemli özellikleri, IEC 60867 de vardır. Alev alma ısısı 230°C , yoğunluğu $0,83 \text{ kg / dm}^3$, göreceli dielektrik 2,1 olarak belirtilmiştir.

B4. Tarımsal Ester

Alev alma ısısı 330°C , yoğunluğu $0,91 \text{ kg / dm}^3$, dielektrik sayısı 3,2'dir. Bazı büyük transformatör üretim fabrikaları kendilerine özel sıvılarda üretilip kullanılır. Örneğin ABB, ay çiçek yağından, BIOTEMP adlı sıvı üretir.

3.6. Dış yüzey koruma

Transformatörlerin kazan ve kapakları normalde ST37, ST14 gibi saclardan yapılıyor. Sacın paslanmasını önlemek için ülkelerin şartnamesine göre boya yapılır veya galvaniz işleminden geçer.

4. AYNI ÖZELLİKLERE SAHİP 400 kVA, 33/0.4 kV, YAĞLI VE KURU TİP TRANSFORMATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bir yağlı ve kuru tip transformatörü farklı açılardan (Tasarım, üretim, maliyet, şebekede ki kullanım, bakım ve onarım ve çevre ile olan bağlantıları vs.) karşılaştırılabilir.

Bu çalışmada kuru ve yağlı tip transformatörlerin üretim maliyetlerin karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, yükte ve boşa kayıpları eşit ve aynı performansa sahip alüminyum iletkenden oluşan iki adet 400 kVA, 33/0,4 yağlı tip ve kuru tip transformatörün üretimini, optimal bir şekilde tasarım programı ile tasarladıktan sonra, tamamlanmıştır. Transformatörlerin sağlam olduğunu ve sonuçların proje ile uyumlu olduğunu görmek için her iki transformatöre rutin testler yapılmıştır.

4.1. Testler ve Sonuçları:

4.1.1. DC direnç ölçülmesi:

Sargı dirençlerini ölçmek için, doğru akım uygulanır ve bu direnç sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklıkla direnç arasındaki bağlantı, [26]:

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{235 + t_2}{235 + t_1} \quad (\text{bakır için}) \quad (4.1)$$

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{225 + t_2}{225 + t_1} \quad (\text{alüminyum için}) \quad (4.2)$$

Eşitlikleri ile verilir.

4.1.2. Çevirme oranının ve gerilim vektörü faz kaymasının ölçülmesi:

Her kademedeki yüksek gerilimin bölü alçak gerilime oranı demektir.

Bağlantı Grubu: Üç fazlı transformatörlerde yüksek ve alçak gerilim sargısı bağlantılarının yıldız (Y) , üçgen (D) , veya zik-zak (Z) olarak bağlanmasıdır.

Faz Kayması: Yüksek gerilim sargısı ile alçak gerilim sargısı arasındaki faz açısına göre hesaplanır.

Gerilim çevirme oranındaki sapma $\leq \pm \%0,05$ olmalıdır [27].

4.1.3. Kısa devre empedansı ve yükteki kaybın ölçülmesi

Kısa-devre gerilimi, alçak gerilim tarafını kısa devre yaparak, alçak gerilim tarafında anma akıma sebep olan, yüksek gerilim tarafındaki gerilimdir. Bu sırada ölçülen kayıplar, kısa-devre kayıpları veya yükteki kayıplar veya iletken kayıpları olarak adlandırılır [28]. Yükteki kayıplar, akımın sargıda oluşturduğu kayıplar, kaçak akıların sargı, çekirdek sıkıştırma düzenleri, kazan duvarları ve varsa manyetik ekranlama üzerinde oluşan ek kayıplardan meydana gelir. Sargı sıcaklığının yükselmesini önlemek için ölçme işlemi hızlı bir şekilde yapılmalıdır. Kısa-devreyi oluşturan baranın kesitinin, yeterince büyük seçilmesi gerekir. Aksi takdirde bara da meydana gelen kayıplarda sonucu etkiler [29].

4.1.4. Boştaki kayıp ve akımın ölçülmesi:

Yüksek gerilim tarafı boшта iken; alçak gerilim tarafına anma gerilimi uygulanır. Boştaki kayıplar, transformatör çekirdeğindeki demir kayıpları, yalıtkan malzemedeki di-elektrik kayıpları ve boştaki akımın ortaya çıkardığı bakır kayıplarından oluşur. Yalıtkan malzemedeki di-elektrik kayıpları ve boştaki akımın ortaya çıkardığı bakır kayıpları dağıtım transformatörlerinde çok küçüktür. Besleme geriliminin sinüs formundan farklı olması durumunda ölçülen boştaki kayıpların hesaplama düzeltilmesi gerekir.

4.1.5. Uygulanan gerilim:

Test geriliminin frekansı, transformatörün anma frekansında ya da bu frekansın $\%80$ ' inden az olmayan bir frekansta yapılmalıdır. Uygulanan gerilim olabildiğince sinüs biçimli ve tek fazlı olmalıdır. Test süresi 1 dakikadır [30]. Çizelge 4.1'de uygulanan gerilim testinde transformatör giriş gerilim seviyesine göre uygulanan gerilim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.1. Uygulanan gerilim testinde transformatör giriş gerilim seviyesine göre uygulanan gerilim miktarı

Giriş gerilim seviyesi (kV , r.m.s.)	Uygulanan gerilim (kV , r.m.s.)
3,6	10
7,2	20
12	28
17,5	38
36	70

4.1.6. İndüklenmiş alternatif gerilim:

Deney gerilimi, alçak gerilim tarafına uygulanır ve yüksek gerilim sargısı açık bırakılır. Transformatör kazanı ve nötr terminali topraklanmalıdır. Transformatör çekirdeğinin aşırı doymasını önlemek için test frekansı anma frekansından en az iki kat yüksek olmalıdır. Test edilen transformatör üç fazlı simetrik alternatif gerilimle beslenir. Deney gerilimi, normalde alçak gerilim tarafının anma geriliminin iki katıdır [30].

Deney süresi = $120 \times (\text{Anma frekansı}) / (\text{Deney frekansı})$ saniye

4.1.7. Transformatör yalıtım direnci ölçümü

Test geriliminin frekansı transformatörün anma frekansında ya da bu frekansın %80' inden az olmayan bir frekans olmalıdır. Yalıtım direnci; 30 uncu sn. ve 60 'ıncı sn. de not edilip test raporuna yazılır. Test süresi 1 dakikadır [30]. Çizelge 4.2'de yalıtım direnci ölçümünde uygulanan gerilim değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.2. Yalıtım direnci ölçümünde uygulanan gerilim miktarı

Donanım için en yüksek Um gerilimi kaynaklı a.a. (kV r.m.s.)	Uygulanan gerilim (kV , r.m.s.)
A.G / Y.G	5
Y.G / TANK	5
A.G / TANK	2,5

4.1.8. Yağ delinme gerilimi testi

Bu testin amacı, yağlı tip transformatörlerde kullanılan yağın dielektrik özelliklerini tespit etmektir. Yağın delinme noktası, yağın kendi kalitesi, içindeki rutubet ve saflığını etkileyen diğer şeylerden etkilenir.

Yağ test cihazının yağ kabının temiz ve tozsuz olduğu kontrol edilir. Yağ kabına test edilecek yağ ile doldurulur. Prop uçlarını 2.5 mm ayarına aparat yardımıyla getirilir. Test başlatılır. Ekranda çıkan test voltajı kaydedilir ve bu işlem 6 kez tekrarlanıp çıkan sayıların ortalaması alınır [31].

4.1.9. Kısmi boşalmanın ölçülmesi

Kuru tip transformatörlerin kalitesinin tespitinde en önemli konulardan biri bobinleri yalıtım için kaplanan epoksi reçinenin dökümü ve vakumlanma işlemidir. Reçine içindeki yabancı maddeler, tozlar ve hava boşlukları kuru tip transformatörün bobinlerinde elektrik deşarjlarının oluşmasına ve zamanla artan deşarj miktarı ise bobinlerin hasar görmesine sebep olur. Bu testin amacı konu ile ilgili arızalı veya zayıf bobinleri tespit etmektir [31].



Resim 4.1. Tek transformatör akredite labratuvarında rutin testlerin yapılması



Resim 4.1. (devam) Tek transformatör akredite labratuvarında rutin testlerin yapılması

Resim 4.1 de test görselleri verilmiştir. Resim 4.2 ve 4.3’ de sırasıyla yağlı tip ve kuru tip transformatörün test raporları görülmektedir.

TEK TRANSFORMATÖR		TRANSFORMER TEST REPORT				KEMA Laboratories		DNV-GL		
Customer :		Order No	2021/02	Serial No	208100	Vector Group	Dyn11	Project No	TK-1	
Power 400 kVA		Voltage	33 kV	Phase No	3	Frequency	50 Hz	Mark	TEK	
t= 14 °C										
POS	Nominal Primary Voltage (V)	Nominal Secondary Voltage (V)	Nominal Primary Current (A)	Nominal Secondary Current (A)	HV Windings Resistance			LV Winding Resistance		
					R _{AB} (Ω)	R _{BC} (Ω)	R _{CA} (Ω)	R _{ab} (mΩ)	R _{bc} (mΩ)	R _{ca} (mΩ)
1	36000									
2	34500									
3	33000	400	7,00	577,4	23,60	23,64	23,66	4,08	4,11	4,09
4	31500									
5	30000									
6	28500									
7										
POS	Nominal Ratio	AB/ab	FAULT RATIO	BC/bc	FAULT RATIO	CA/ca	FAULT RATIO			
1	155,88	155,99	0,001	155,99	0,001	155,94	0,000			
2	149,39	149,44	0,000	149,44	0,000	149,45	0,000			
3	142,89	142,95	0,000	142,95	0,000	142,94	0,000			
4	136,40	136,44	0,000	136,44	0,000	136,47	0,001			
5	129,90	129,99	0,001	129,99	0,001	129,90	0,000			
6	123,41	123,51	0,001	123,51	0,001	123,55	0,001			
Applied Voltage	HV Windings	LV Windings	f= 50 Hz	Induced Voltage	U: 800 V	f= 150 Hz	t= 40 sn			
70 kV	3 kV	t= 60 sn								
NO LOAD LOSSES AND CURRENT MEASUREMENT										
U1:	400 V	I1:	8,17 A	Measured Value		Guaranteed Value				
U2:	400 V	I2:	9,54 A	% Io:	1,52 A	% Io:	1,50	±%30	A	
U3:	400 V	I3:	8,66 A	Po:	864 W	Po:	870		W	
SHORT CIRCUIT VOLTAGE AND LOAD LOSSES MEASUREMENT										
°C	Voltage (V)	Current (A)	Pk (W)	% Uk						
75	1973	7,00	4764	6,02						
% Short Circuit Voltage ABS (75°C)				6,00	±% 10	Copper Losses ABS (75°C): 4950 W ±% 10				
INSULATION RESISTANCE (Mega Ω t= 20°C)										
	0	15	30	45	60	P.E.	NYNAS NYTRO LYRA-X			
LV Tank 2500 V		11900	23000	27100	30400	1,32	Oil	Active Part	Total Part	
HV Tank 5000 V		29500	36500	40200	43300	1,19	520 Kg	1156 Kg	1985 Kg	
HV-LV 5000 V		37600	46900	52300	56500	1,20				
ACCORDING STANDARDS				LOAD (%)	EFFICEINCY		INT VOLTAGE INCREASE			
IEC 60076				100	98,57	98,21				
X				75	98,80	98,73				
TSE				50	98,96	98,85				
				25	98,83	98,62				
TEK TRANSFORMER										
Quality Control					Test Department Manager					
Date: 24.02.2021					Date: 24.02.2021					
Name:					Name: İNNA ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.					
Signature:					Signature: İNNA ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.					
Signature: İNNA ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.					Signature: İNNA ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.					

Resim 4.2. Yağlı tip transformatörün test raporu

TEK TRANSFORMATÖR		TRANSFORMER TEST REPORT				KEMA Laboratories		DNV-GL		
Customer :		Order No	2021/02	Serial No	208101	Vector Group	Dyn11	Project No	TK-1	
Power	400 kVA	Voltage	33 kV	Phase No	3	Frequency	50 Hz	Mark	TEK	
								t=	15 °C	
POS	Nominal Primary Voltage (V)	Nominal Secondary Voltage (V)	Nominal Primary Current (A)	Nominal Secondary Current (A)	HV Windings Resistance			LV Winding Resistance		
					R _{AB} (Ω)	R _{BC} (Ω)	R _{CA} (Ω)	R _{ab} (mΩ)	R _{bc} (mΩ)	R _{ca} (mΩ)
1	36000									
2	34500									
3	33000	400	7,00	577,4	23,64	23,61	23,71	4,11	4,17	4,15
4	31500									
5	30000									
6	28500									
7										
POS	Nominal Ratio	AB/ab	FAULT RATIO	BC/bc	FAULT RATIO	CA/ca	FAULT RATIO			
1	155,88	155,99	0,001	155,99	0,001	155,98	0,001			
2	149,39	149,44	0,000	149,44	0,000	149,43	0,000			
3	142,89	142,86	0,000	142,86	0,000	142,86	0,000			
4	136,40	136,46	0,000	136,46	0,000	136,46	0,000			
5	129,90	130,00	0,001	130,00	0,001	130,01	0,001			
6	123,41	123,44	0,000	123,44	0,000	123,45	0,000			
Applied Voltage	HV Windings	LV Windings	f= 50 Hz	Induced Voltage	U : 800 V	f = 150 Hz	t = 40 sn			
	70 kV	3 kV	t= 60 sn							
NO LOAD LOSSES AND CURRENT MEASUREMENT										
U1 :	400 V	I 1:	8,00 A	Measured Value		Guaranteed Value				
U2 :	400 V	I 2:	8,51 A	% Io:	1,52 A	% Io:	1,50 ±%30 A			
U3 :	400 V	I 3:	9,74 A	Po :	868 W	Po :	870 W			
SHORT CIRCUIT VOLTAGE AND LOAD LOSSES MEASUREMENT										
°C	Voltage(V)	Current(A)	Pk (W)	% Uk						
75	1975	7,00	4770	6,02						
% Short Circuit Voltage ABS (75°C)		6,00	±% 10	Copper Losses ABS (75°C) :		4950 W	±% 10			
INSULATION RESISTANCE (Mega Ω t= 20°C)						DRY TYPE				
	0	15	30	45	60	P.E.				
LV Tank 2500 V		12800	20000	24200	29900	1,50	Active Part			
HV Tank 5000 V		30000	34900	39900	43400	1,24	Total Part			
HV-LV 5000 V		37400	43300	48900	55000	1,27	1200 Kg			
1985 Kg										
ACCORDING STANDARDS				LOAD (%)	EFFICEINCY		INT VOLTAGE INCREASE			
					cosφ=1	cosφ=0,8	cosφ=1			
IEC 60076				100	98,57	98,21				
X				75	98,80	98,73				
TSE				50	98,96	98,85				
				25	98,83	98,62				
TEK TRANSFORMER										
Quality Control				Test Department Manager						
Date: 24.02.2021				Date: 24.02.2021						
Name: CHECKED BY				Name: TEK TRANSFORMATÖR						
Signature:				Signature: KEMA ELEKTRİK SAN. VE TİC. A.Ş.						
				Sancaktepe OSB 28. Cad. No: 2 Sincan/ANKARA						
				Tel : 0312 396 40 02 Fax : 0312 396 40 03						
				Sincan V. 0613 049 5292						
				Mühür No: 0495 0292 0001						
F. No. : F 03 F. Y. T. : 01 / 05 / 2009 F. R. No. : 03 F. R. T. : 30 / 04 / 2012										

Resim 4.3. Kuru tip transformatörün test raporu

4.2. Aynı Özelliklere Sahip 400 kVA, 33/0.4 Yağlı ve Kuru Tip Transformatörlerin Tasarım Bilgileri

4.2.1. Giriş

Transformatörlerin tasarımında kullanılan temel formüller, transformatörün çeşidi ne olursa olsun hep aynıdır. Yağlı tip transformatör esas olarak nüve, sargılar, tank, yağ ve aksesuarlardan oluşur. Nüve ve sargılar bir transformatörün aktif kısmını oluşturur. Bu kısımda gerilim dönüştürülür. Kazan, aktif kısmı ve yağı çevreler. Yağ, soğutma ve yalıtımı sağlar. Normalde, transformatörü manuel olarak tasarlamak istersek, nüve, sargılar ve diğer parçaları üzerinde tek tek çalışmamız gerekir. Transformatörün termal özellikler, atılması gereken ısı miktarı ve yağın dielektrik özelliklerine göre kazan tasarlanır. Sonra bu parametrelerin bir birine uyumu sağlanır. Ve en son üretim hattındaki makinelerin ve alınan hammaddenin özellikleri göz önünde bulunarak optimal hale getirilir. Buda sadece bir transformatör için günlerce çalışmak demektir ki bir fabrikada işler bu şekilde ilerleyemez. O yüzden transformatör tasarım programları kullanılır ve bunun sayesinde tecrübeli bir mühendis, birkaç dakika içinde normal bir transformatörün tasarımını gerçekleştirebilir [32-33].

Bir transformatörün tasarımının yapılabilmesi için

- Çevirme oranı, frekans, gücü, kayıpların üst limiti,
- Çalıştığı ortamın koşulları,
- Nakliye sınırlamaları,
- Makine ve ekipmanların kapasitesi gibi bilgilere ihtiyaç duyulur. Çizelge 4.3' de ve çizelge 4.4' de sırasıyla yağlı tip ve kuru tip transformatörün üretimine yönelik genel tasarım bilgileri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Yağlı tip transformatör üretimine yönelik genel tasarım bilgileri

Genel		İletken	
Güç (kVA)	400	Cins	Al
U Anma (V)	33000/400	AG Ebat	537*0,55
U Max (V)	36000	YG Ebat	2
U Nom (V)	33000/400	YG İzoleli	2,11
U Min (V)	28501	Akım Yoğ. AG/YG	1,95/1,29
YG I Anma (A)	7	Nüve	
AG I Anma (A)	577,35	Endüksiyon	1,8
F (hz)	50	En Büyük sac Gen.	130
B. Grubu	Dyn 11	Sac Cinsi	M3
Garanti Değerler		Sarım Nom.	
Po (kW)	0,865	YG	4430/4833
Pk (kW)	4,950	AG	31
Uk (%)	6	Kat	22/31
Kazan Bilgileri		Aktif Kısım Bilgileri	
İç/Dış Genişlik	480/866 mm	Nüve Çapı	138 mm
İç/Dış Uzunluk	1120/1486 mm	Pencere Yük.	572 mm
İç/Dış/top. Yükseklik	950/1014/1504 mm	Bac. Arası	406 mm
Dalga duvar	700-25C180 *25-2 700-10C170 *42,5-2	YG/AG İzolatör	30 NF 250 / DT1 630
		Ür. Isı / Atılan Isı	5,31 / 6,81 kW

Çizelge 4.4. Kuru tip transformatör üretimine yönelik genel tasarım bilgileri

Genel		İletken	
Güç (kVA)	400	Cins	Al
U Anma (V)	33000/400	AG Ebat	537*0,55
U Max (V)	36000	YG Ebat	2
U Nom (V)	33000/400	YG İzoleli	2,11
U Min (V)	28501	Akım Yoğ. AG/YG	1,95/1,29
YG I Anma (A)	7	Nüve	
AG I Anma (A)	577,35	Endüksiyon	1,8
F (hz)	50	En Büyük sac Gen.	130
B. Grubu	Dyn 11	Sac Cinsi	M3
Garanti Değerler		Sarım Nom.	
Po (kW)	0,865	YG	4430/4833
Pk (kW)	4,950	AG	31
Uk (%)	6	Kat	22/31

4.2.2. Nüve tasarımı

Bir transformatörde enerji, manyetik alan yoluyla bir elektrik devresinden diğerine aktarılır. Lamine edilmiş tabakalardan yapılmış transformatör nüvesi, elektrik devrelerini karşılıklı olarak birbirine bağlayarak manyetik akının akışını sağlar. Haddelenmiş ve ince kesilmiş silisli saclardan oluşan bu nüveler, boştaki kayıplar olarak diğer çeşitlere göre en alt ve performans olarak en üst seviyededirler [34-35].

Giriş voltajı, güç ve frekansı göz önünde bulundurarak, çekirdek doygunluğu olasılığını önlemek için uygun bir akı yoğunluğu değeri seçilir. Manyetik akı yoğunluğunun (manyetik yüklenme) çalışma değerini artırarak, çekirdeğin net ağırlığı azaltılabilir, ancak bu, çekirdek kayıplarında artışa yol açar [36]. Tüm bu hususları göz önünde bulundurularak, manyetik akı yoğunluğunun optimum bir değeri hesaplanmalıdır[34].

Bacak kesit alanı hesaplanarak çekirdek tasarımı başlatılır. Alan birkaç faktöre bağlıdır ve temel formül şu şekildedir [16-37]:

$$q_c = C \sqrt{\frac{S \cdot p_i \cdot 10^9}{f \cdot s \cdot B \cdot \delta \cdot P_c}} \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte:

S = Transformatörün anma gücü,

f = Transformatör çalışma frekansı,

s = İletken akım yoğunluğu,

B = Manyetik akı yoğunluğu,

δ = Toplam iletken ve çekirdek kayıpları arasındaki oran,

p_i = şartnamede iletken kayıpları,

P_c = şartnamedeki çekirdek kayıplardır

C katsayısı, trafonun tipi ve geometrisi ile ilgilidir ve bu katsayı için ortalama değerler aşağıda verilmiştir.

- Yuvarlak kesit için: 0.40 (3 faz) – 0.45 (tek faz),
- Dikdörtgen kesit için: 0.45 (3 faz) – 0.55 (tek faz).

Transformatörün gücü, makine ve ekipmanların kapasitesi ve kayıplar sargı ve nüve şekil seçiminde etkilidir. Nüvenin alt ve üst bölümünün kesiti bacaklara göre o bölgedeki demir kayıplarını minimuma indirmek için biraz daha büyüktür [39].

Bacakların ve alt ve üst kısmın kesiti hesaplandıktan sonra pencere aralığı ve bacakların uzunluğu hesaplanır.

$$\alpha = \frac{4 \cdot w_1 \cdot q_1}{10 \cdot k_i \cdot L_s} \quad (4.4)$$

Burada:

w_1 = Alçak gerilim sarım sayısı,

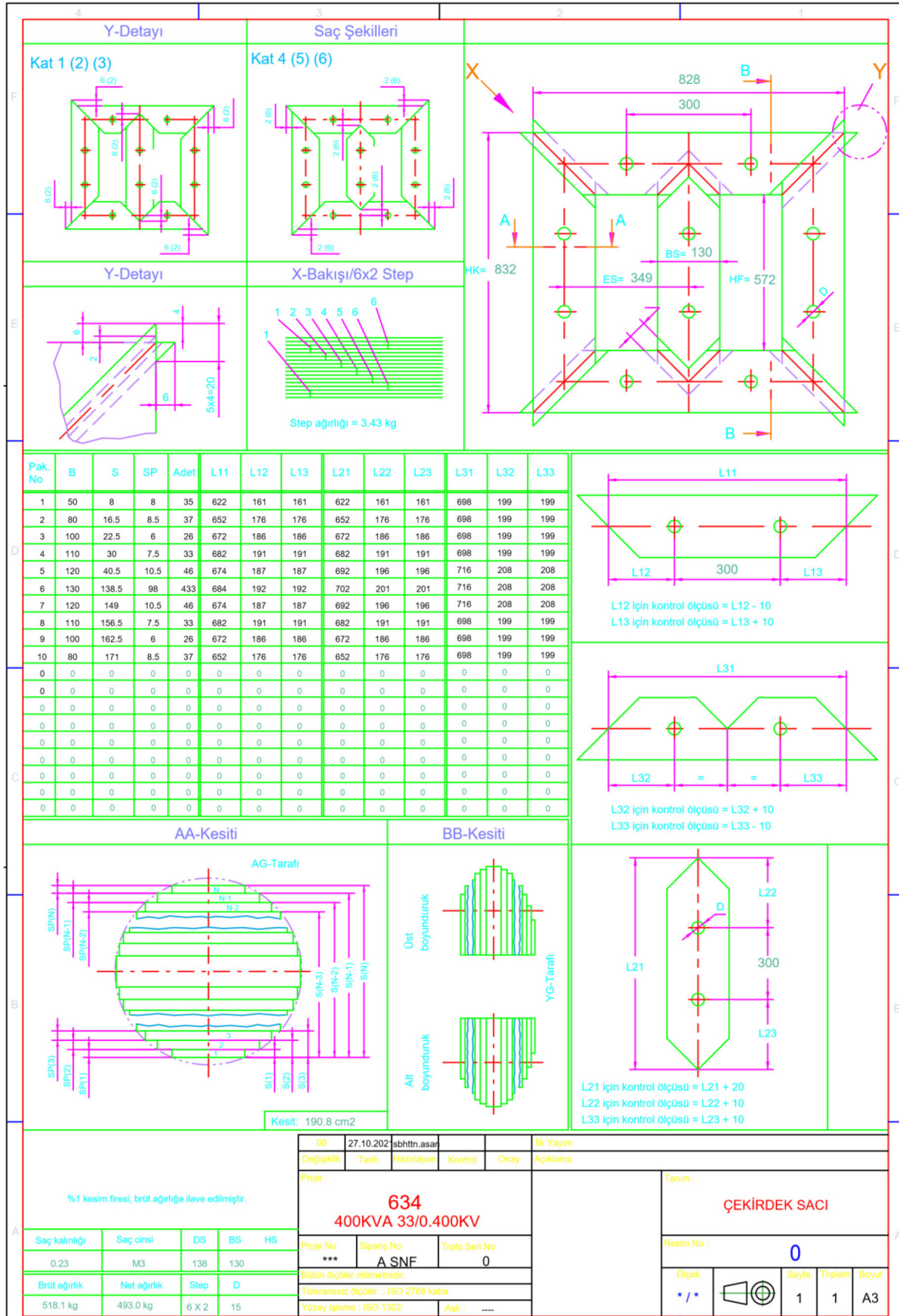
q_1 = İletken alanı,

k_i = İletken pencere doldurma faktörü,

L_s = bacak uzunluğudur.

Pencere yüksekliği ve genişliği arasındaki oran sınırlamalar içinde olmalıdır. Çekirdek tipi transformatörler için $L_s > 2$ ve $\alpha < 4.5$ sağlanmalıdır.

Şekil 4.1' de yağlı tip transformatörün nüve tasarım bilgileri görülmektedir.



Şekil 4.1. yağlı tip transformatörün nüve tasarım bilgileri

Çizelge 4.5. Yağlı tip transformatörün nüve tasarım bilgileri

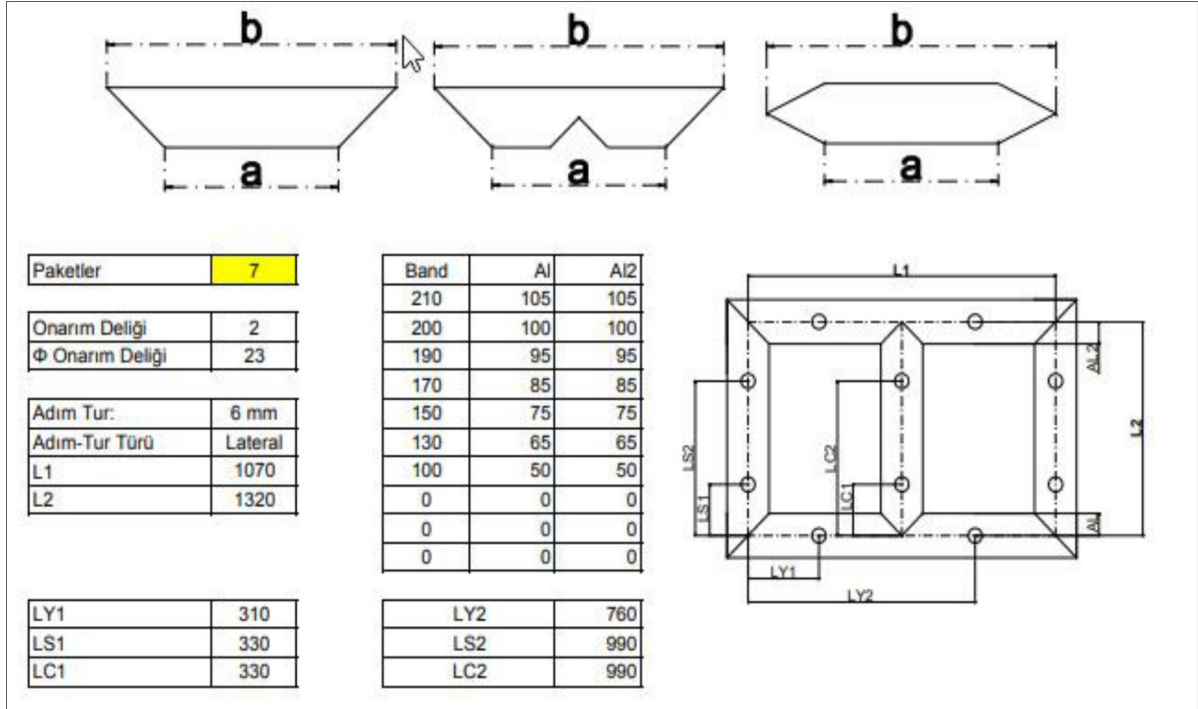
Pak No.	B	S	SP	AD ET	L11	L12	L13	L21	L22	L23	L31	L32	L33
1	50	8	8	35	622	161	161	622	161	161	698	199	199
2	60	16,5	8,5	37	652	176	176	652	176	176	698	199	199
3	100	22,5	6	26	672	186	186	672	186	186	698	199	199
4	110	30	7,5	33	682	191	191	682	191	191	698	199	199
5	120	40,5	10,5	46	674	187	187	692	196	196	716	208	208
6	130	138,5	98	433	684	192	192	702	201	201	716	208	208
7	120	149	10,5	46	674	187	187	692	196	196	716	208	208
8	110	156,5	7,5	33	682	191	191	682	191	191	698	199	199
9	100	162,5	6	26	672	186	186	672	186	186	698	199	199
10	80	171	8,5	37	652	176	176	652	176	176	698	199	199

Sac Kalınlığı	0,23	Brüt Ağ. / Net Ağ.	516,1 / 493 kg
Sac Cinsi	M3	Step	6 * 2
DS/BS	138 / 130	D	15

Çizelge 4.6. Kuru tip transformatörün nüve tasarım bilgileri

Sac Genişliği	Boyunduruk x 2 1070 mm			Yan Bacak x 2 1320 mm			Orta Bacak x 1 1320 mm			Paket Kalınlığı	Sıra Sayısı	Ağırlık kg
	Adet	a	b	Adet	a	b	Adet	a	b	189,06	Ad. / 6	
210	198	860	1280	198	1110	1530	198	1110	1320	45,54	33	419
200	144	870	1270	144	1120	1520	144	1120	1320	33,12	24	291
190	99	880	1260	99	1130	1510	99	1130	1320	20,70	15	173,2
170	138	900	1240	138	1150	1490	138	1150	1320	31,74	23	238,9
150	96	920	1220	96	1170	1470	96	1170	1320	22,08	16	147,4
130	78	940	1200	78	1190	1450	78	1190	1320	17,94	13	104,3
100	78	970	1170	78	1220	1420	78	1220	1320	17,94	13	80,8

Çizelge 4.5 ve 4.6’da sırasıyla yağlı tip ve kuru tip transformatörlerin nüve tasarım bilgileri verilmiştir. Şekil 4.2’de kuru tip transformatörün nüve tasarım bilgileri görülmektedir



Şekil 4.2. Kuru tip transformatörün nüve tasarım bilgileri

4.2.3. Alçak gerilim sargı tasarımı

Çekirdek tipi, transformatörler için, bobinleri sarmanın iki ana yöntemi vardır. Katmansal sarım ve disk sarım. Günümüzde, özellikle dağıtım transformatörleri için, yağlı tipte katmansal ve kuru tipte disk sarımı yapılmaktadır. Tabi ki bu yöntemler fabrikaların makine kapasitesine de bağlıdır.

Aynı zamanda sarım yöntemi, soğutmayı sağlamak ve dielektrik zararı önlemek için minimum mesafeyi etkilemektedir. Buda doğrudan bobin ölçülerini etkiler.

Bu bobinler birden fazla tel veya kabloyla paralel olarak sarılırsa, paralel kabloların konumlarını sarım boyunca çeşitli noktalarda değiştiren çapraz geçişler veya transpozisyonlar eklemek gerekir [4]. Bu, stray akının neden olduğu loop gerilimlerini iptal etmek için yapılır. Aksi takdirde, bu tür gerilimlerin sebep olduğu akımlar, ekstra kayıplar yaratır [1]. Alçak gerilim sargı tasarımı için önce sarım sayısı hesaplanır. Alçak gerilim sargıları için kullanılan temel formüller [34]:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \quad (4.6)$$

$$\Phi = B \cdot q_{Fe} \quad (4.7)$$

Bu eşitliklerde,

$E = \text{emf}$,

$f = \text{çalışma frekansı}$,

$w_1 = \text{alçak gerilim sarım sayısı}$,

$\Phi = \text{toplam maksimum manyetik akı}$,

$B = \text{maksimum manyetik akı yoğunluğu}$,

$q_{Fe} = \text{bacak kesit alanıdır}$.

İki denklemin sonucunda w_1 , alçak gerilim sarım sayısı, elde edilir.

Sargı kesit alanı, faz akımı ve iletken akım yoğunluğu kullanılarak elde edilir. Bakır bobinler için yoğunluklar çizelge 4.7.'de verilmiştir [37-42].

Çizelge 4.7. Farklı soğutma sistemlerinde seçilmesi gereken iletken akım yoğunluğu

soğutma	Akım yoğunluğu
Hava (kuru tip transformatör)	1,7 – 2,0
ONAN	2,2 – 3,5
ONAF	3,5 – 5,0

Alçak gerilim sargısının hesaplanan kesit alanı, yalıtımsız iletken alanıdır. Sargı iletkenleri dikdörtgen veya dairesel kesite sahiptir. 250 kVA ve üzerinde folyo iletken kullanılır.

Genel olarak kesit alanı 4 mm^2 'nin altında olan sargılar için dairesel iletkenler, daha kalın sargılar için dikdörtgen iletkenler kullanılır. Yine de makinelerin kapasitesi ve satın alma ve tasarımcının deneyimi bu seçimde etkilidir. Yüksek faz akım seviyelerine sahip olan güç transformatörlerinin alçak gerilim sargıları genellikle dikdörtgen iletkenlerle yapılır. Bazen tasarımcı, üst üste veya yan yana paralel iletkenler kullanır. Bunu yaparken gerekli izolasyonu sağlamak yüksek önem taşır. Şekil 4.3'de yağlı tip transformatörlerin alçak

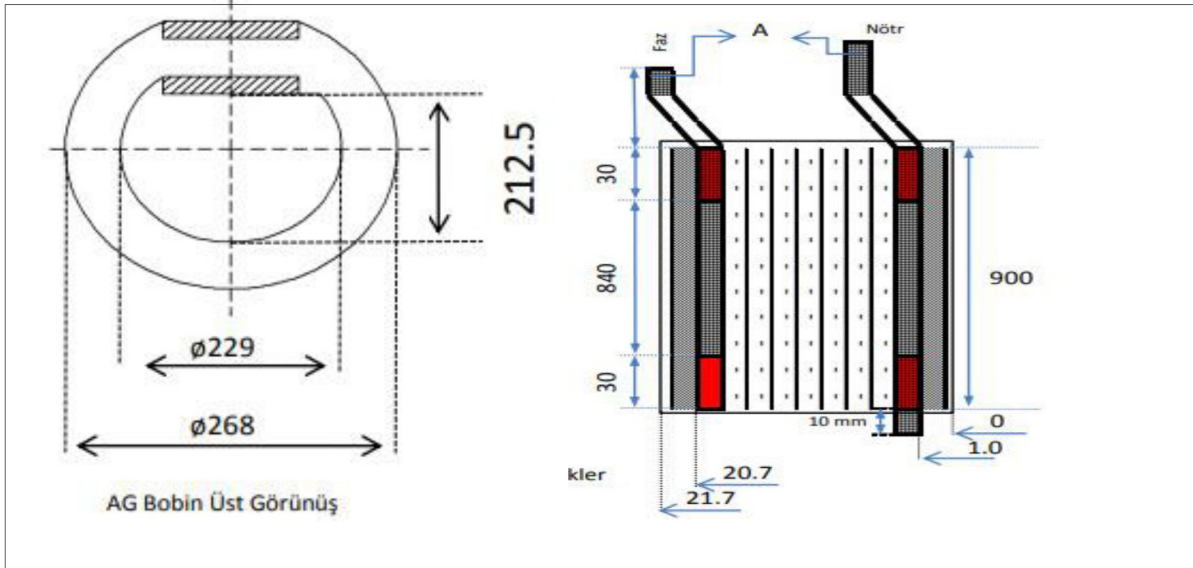
Çizelge 4.8. Yağlı tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları

AG Bobini	
Kalıp Çapı	135*182 mm
Bobin İnşa Boyu	557 mm
Soğutma Kanalı	1
Kat İzolasyonu	0,125*555
Alt İzolasyon	1 psp + 1 *0,130
İletken	0,55*535 Al
Toplam Sarım Sayısı	31
Kanal Genişliği	4
1. Kanal	15 kat
Üst İzolasyon	5*0,13+8+5*0,13
Çıkış İletkeni	50 * 6 Al
Kenar Şerit	0,55 * 10
Bobin Ağırlığı	17 kg

Çizelge 4.9. Kuru tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları

AG Bobini	
Reçine Kalıp İç Çapı	227 mm
Bobin iç Çapı	229 mm
Reçine Kalıp Dış Çapı	270
Bobin Dış Çapı	268
İletken	Al , 840 x 0,60
Bara	80 x 5
Bara Ağırlık x 3	7,5 kg
Toplam spir	24
Başlangıç İzolasyonu	Kalınlık : 1 mm
	Boy : 900 mm
	Toplam Rulo: 2,2 mm
Sonlandırma İzolasyonu	Kalınlık : 1 mm
	Boy : 900 mm
	Toplam Rulo : 2,5 mm
Kenar Şerit	Kalınlık : 0,5 mm
	Boy : 30 mm
	Toplam Rulo : 112,5 mm
Kat İzolasyon	Kalınlık : 0,18 mm
	Boy : 897 mm
	Toplam Rulo : 56,3 mm
İç/Dış İzolasyon Kalınlığı	1 mm / 6,06 kg
Bobin Ağırlığı x 1	31,03
İletken Ağırlığı x 3	75,6 kg

Şekil 4.4’de kuru tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları verilmiştir.



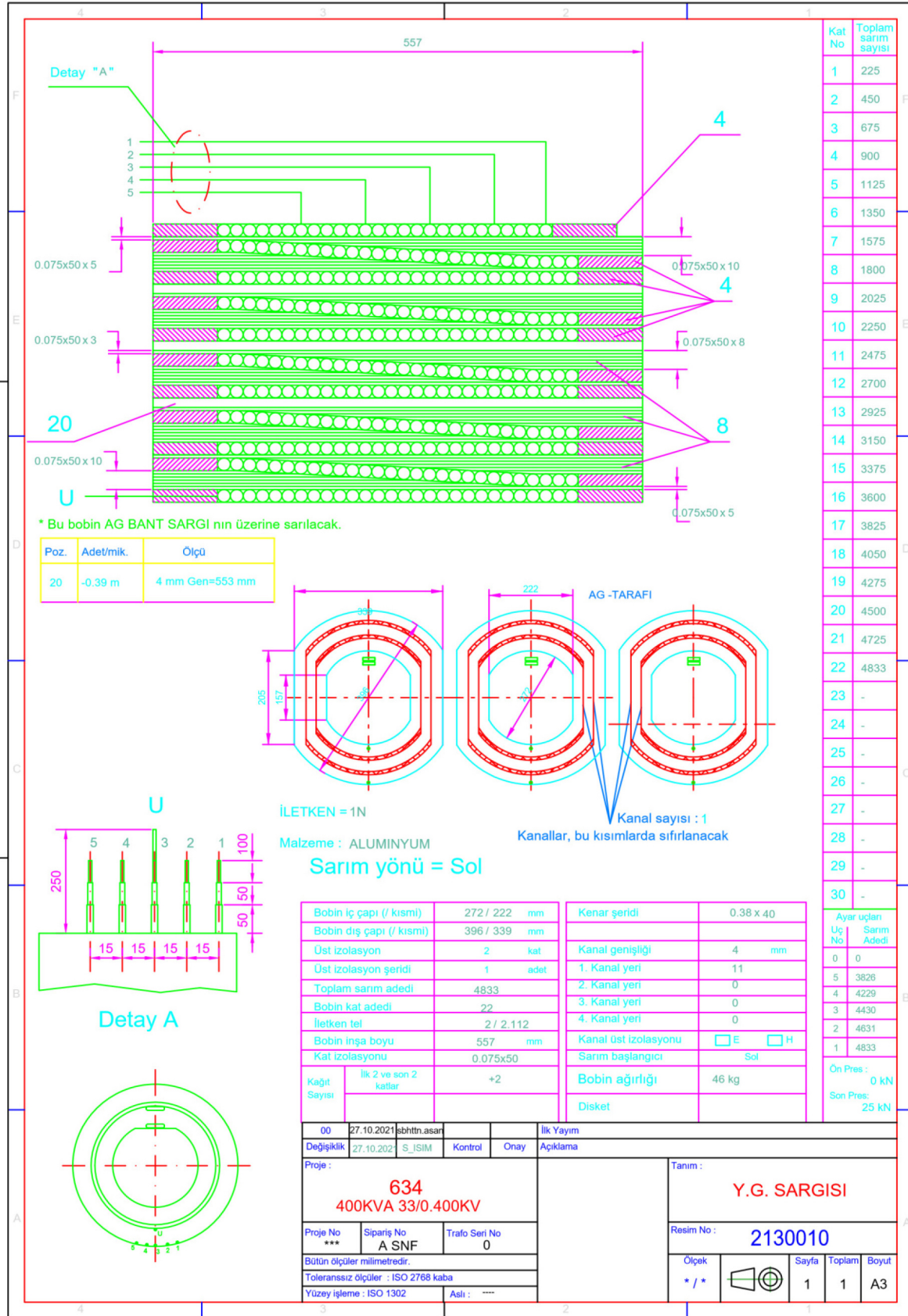
Şekil 4.4. Kuru tip transformatörün alçak gerilim sargısının tasarım sonuçları

4.2.4. Yüksek gerilim sargı tasarımı

Yüksek gerilim sargı tasarımında da aynı prosedürler yapılır. Aynı formülle dönüştürme oranı ve sarım sayısı ve faz akımı hesaplanır. Belirli bir güce kadar yüksek gerilim sargılarında yuvarlak tel kullanılır. Daha büyükleri için dikdörtgen tel tercih edilir (normalde 1600 kVA ve üzeri). Yüksek gerilim sargısını yaparken, yalıtım konusuna ve gerekli mesafeleri bırakmaya dikkat etmek gerekir.

Sarım başına gerilim daha düşük olduğundan, kademe çıkışları normalde yüksek gerilim tarafına yerleştirilir [43]. Sarım teknikleri farklıdır. Transformatör gücüne, çalışan personelin tecrübesine ve makinelerin kapasitesine göre karar verilir.

Şekil 4.5’ te ve Şekil 4.6’da sırasıyla yağlı tip ve kuru tip transformatörlerin yüksek gerilim sargılarının tasarım sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar ayrıca Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11’ de de görülmektedir.



Şekil 4.5. Yağlı tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları

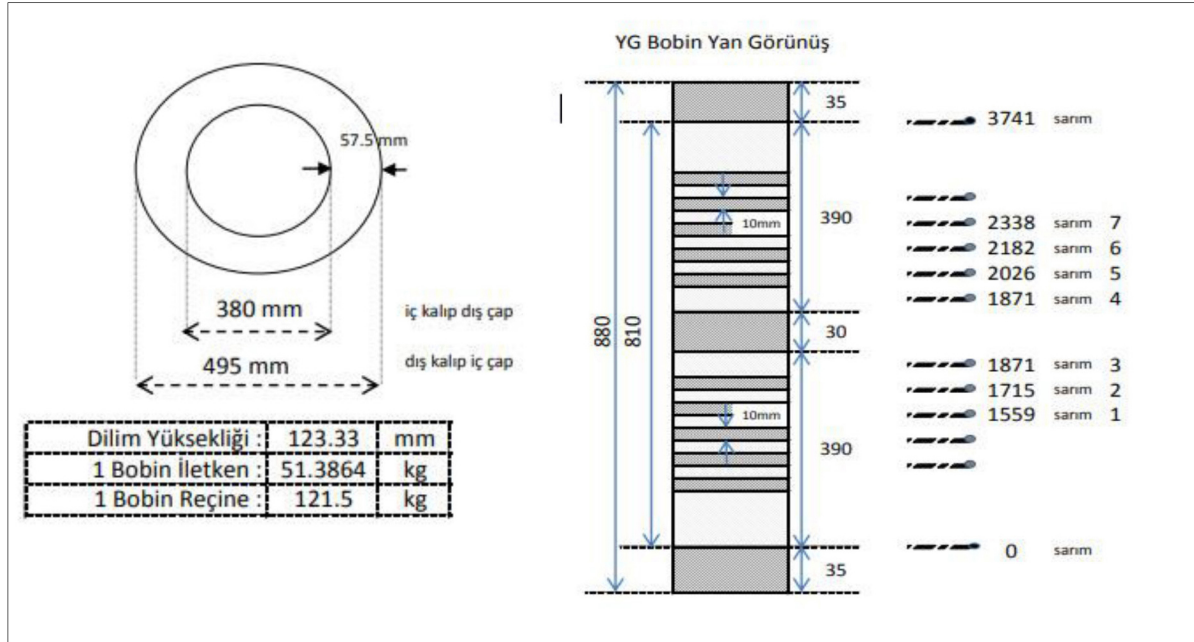
Çizelge 4.10. Yağlı tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları

YG Bobini	
Bobin İç Çapı	272 / 222 mm
Bobin Dış Çapı	396 / 339 mm
Üst İzolasyon	2 kat
Üst İzolasyon Şeridi	1 adet
Toplam Sarım	4833
Kat	22
İletken	2 / 2,112
Bobin İnşa Boyu	557
Kat İzolasyonu	0,075 * 40
Kenar Şeridi	0,38 * 40
Kanal Genişliği	4
1. Kanal	11 kısmi
Bobin Ağırlığı	46 kg

Çizelge 4.11. Kuru tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları

YG Bobini	
Reçine Kalıp İç Çapı	380 mm
Bobin iç Çapı	400 mm
Reçine Kalıp Dış Çapı	495
Bobin Dış Çapı	475
Toplam Sarım	3741
1. Kademe	1-7 , 2962
2. Kademe	1-6 , 3118
3. Kademe	2-6 , 3274
4. Kademe	2-5 , 3429
5. Kademe	3-5 , 3585
6. Kademe	3-4 , 3741
İletken	Al , 2 +0,40 mm
Takoz İki Bobin Arası	30 mm
Takoz Dilim Arası	10 mm
Takoz Başlık	35 mm
İç/Dış Reçine Kalınlığı	10 mm
Başlangıç İzolasyonu 1	Kalınlık: 2,10 mm
	Boy: 875 mm
	Toplam rulo: 3,58 m
Başlangıç İzolasyonu 2	Kalınlık: 0,35 mm
	Boy: 875 mm
	Toplam rulo: 3,60 m
Bobin Ağırlığı x 1	173 kg
İletken Ağırlığı x 3	154,2 kg

Not : Her 624 sipirden sonra 10 mm lik çıtalar konulacaktır.



Şekil 4.6. Kuru tip transformatörün yüksek gerilim sargısının tasarım sonuçları

4.2.5. Kayıplar ve verimlilik

Transformatör kayıpları genel olarak yüksüz ve yük kayıpları olarak sınıflandırılır. Transformatöre girişe nominal gerilim uygulandığında ve çıkış tarafı açıkken, yük akımı akmaz. Bu durumda, çekirdekte ful akı oluşur ve sargılarda sadece uyarma akımı akar. Bu durumda, transformatör kayıpları, çekirdek saclarındaki zamanla değişen akı tarafından üretilen histerezis ve girdap akımlarından kaynaklanan kayıplardan oluşur [39].

Çıkışa bir yük bağlandığında yük kayıpları meydana gelir. Böylece akım transformatörün girişinden çıkış terminallerine akar. Bu durumda çekirdek kayıpları da meydana gelse de, yük kayıplarının bir parçası sayılmaz. Yük kayıplarını ölçerken, çıkış terminalleri kısa devre yapılır ve istenen tam yük akımını üretmek için sadece küçük bir empedansla gerekli gerilim uygulanır. Bu durumda, nüve kayıpları, küçük akısından dolayı önemsiz derecededir [40].

Yük kayıpları, genel olarak, bobinlerdeki akım akışı tarafından üretilen Joule ısınmasına (I^2R) ve aynı zamanda kazan duvarlarında, boyunduruklarda ve diğer metal parçalardan

oluşan stray akıdan dolayı meydana gelen stray kayıplara bağlıdır. I²R kayıpları genellikle sargıların DC direnci olarak bilinir.

Kayıplar istenen değerlerden yüksekse sıcaklık artışı garanti edilmiş sınırları aşar. Bu, sargı izolasyonunda hasara ve genel olarak transformatörde kısa devreye neden olabilir.

Alçak / yüksek gerilim sargısı için, formülasyonlar:

$$P_i = P_{i1} + P_{i2} \quad (4.8)$$

$$P_{i1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \cdot n \quad (4.9)$$

$$R_1 = r_1 \cdot k_r \quad (4.10)$$

$$r_1 = \frac{lm_1 \cdot w_1 \cdot p}{q_1} \quad (4.11)$$

$$P_{i2} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot n \quad (4.12)$$

$$R_2 = r_2 \cdot k_r \quad (4.13)$$

$$r_2 = \frac{lm_2 \cdot w_2 \cdot p}{q_2} \quad (4.14)$$

$$k_r = 1 + \frac{(m^2 - 0,2)}{9} \left(2 \cdot \pi \cdot h \sqrt{\frac{z \cdot b \cdot f}{l_s \cdot p \cdot 10^5}} \right)^4 \quad (4.15)$$

Olarak verilir. Burada:

P_{i1} = Yüksek gerilim sargı kaybı,

P_{i2} = Alçak gerilim sargı kaybı,

I_{1-2} = Sargılardan geçen akım,

r_1 = Yüksek gerilim sargı direnci,

r_2 = Alçak gerilim sargı direnci,

k_r = Dirençteki artış katsayısı,

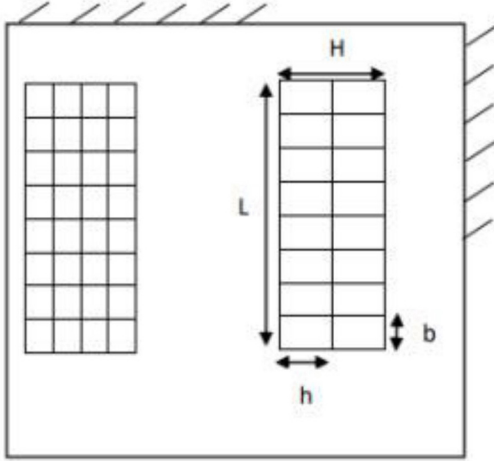
b = İletkenin eksenel yüksekliği,

f = Çalışma frekansı,

p = İletkenin özgül direncidir.

$l_s = L + 2H$ [1]:

Şekil 4.7' de sargıda iletkenin durumu gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Sargıdaki iletkenin durumu [3]

Lehim ve bağlantı noktalarından kaynaklanan ekstra kayıplar, akıma bağlı bir katsayı ile dikkate alınır. Çizelge 4.12’ de yaklaşık olarak bu ekstra kayıpların katsayısını vermektedir.

Çizelge 4.12. Bağlantı noktalarında geçen akım miktarına göre eklenen ekstra kayıp

I (A)	100	200	300	500	700	1000	1500
% Ekstra kayıp	7,5	10	12	15	17,5	20	25

Çekirdek kaybı, bacaklardaki ve boyunduruklardaki kaybın toplamıdır. Bacaklar ve boyunduruklar farklı ağırlıklardadır ve farklı maksimum akı yoğunluklarında çalışırlar. Her bölgenin kaybı ayrı ayrı hesaplanır ve toplam kayıp elde edilir. Çelik laminasyonlarda ağırlık başına kayıp:

$$p_{fe} = A \cdot \gamma \cdot p_s \cdot \frac{B^2}{10^8} \quad (4.16)$$

Eşitliği ile verilir. Burada:

A = çekirdek ağırlığı,

γ = Çekirdek kayıp faktörü,

p_s = Çelik kayıp faktörü,

B = Maksimum akı yoğunluğudur.

Transformatörün verimi aşağıdaki formülden elde edilir.

$$\eta = \frac{p_{\text{çıkış}}}{p_{\text{giriş}}} = \frac{p_{\text{çıkış}}}{p_{\text{çıkış}} + p_i + p_{fe}} \quad (4.17)$$

diğer makinelerden farklı olarak transformatörlerde sürtünmeden kaynaklanan mekanik kayıplar yoktur. Bu sayede transformatör verimi, dönen makinelere göre çok daha yüksektir.

4.3. Yağlı ve Kuru Tip Transformatörlerin Maliyet Hesaplaması:

Çizelge 4.13 ve Çizelge 4.14’de sırasıyla yağlı ve kuru tip transformatörler için maliyet analizleri görülmektedir.

Çizelge 4.13. Yağlı tip transformatörün maliyet tablosu

Kullanılan Malzeme	Miktar	Birim Fiyat (\$)	Toplam fiyat (\$)
Alüminyum Tel (kg)	118.7	4	474,8
Alüminyum Folyo (kg)	44.6	3,75	167,25
Diğer İletken (kg)	3	3,25	9,75
Nüve Sacı (kg)	493	2,65	1306,45
İzolasyon kağıdı, PSP vs. (kg)	58.7	3	176,1
Transformatör Yağı (kg)	390	1,5	585
Mekanik Aksam (Kazan, Kapak, Boyunduruklar, Saplamalar vs.) (kg)	300	2	600
AG Terminalleri (Set)	4	14	56
YG Terminalleri (Set)	3	18	54
Koruma ve aksesuarlar	1	60	60
İşçilik (saat)	8	10	80
Diğer(Enerji Tük. vs.)	1	50	50
Toplam Maliyet			3619,35 (\$)

Çizelge 4.14. Kuru tip transformatörün maliyet tablosu

Kullanılan Malzeme	Miktar	Birim Fiyat (\$)	Toplam fiyat (\$)
Alüminyum Tel (kg)	169,6	4	678,4
Alüminyum Folyo (kg)	83.1	3,75	311,625
Diğer İletken (kg)	7,5	3,25	24,375
Nüve Sacı (kg)	1440	2,65	3816
Prepeg, DMD, Glass Mesh, Mylar, (kg)	22,5	20	450
Reçine ve diğer kimyasaller(kg)	370	3,5	1295
Mekanik Aksam (Boyunduruklar, Saplamalar,Reçine takozlar vs.) (kg)	40	1,5	60
AG Terminalleri (Set)	4	8	32
YG Terminalleri (Set)	3	12	36
Koruma ve aksesuarlar	1	70	70
İşçilik (saat)	10	10	100
Diğer(Enerji Tük. vs.)	1	50	50
Toplam Maliyet			6923,4

5. SONUÇ

Günümüzde, üreticiler, yapılan bilimsel çalışmalar neticesinde, transformatörleri daha ucuz maliyetle ve daha kaliteli bir şekilde üretebilmektedirler. Hammadde kalitesinin artışı, optimal tasarım programlarının geliştirilmesi, üretim makinelerinin geliştirilmesi ve yeni tekniklerin ortaya çıkışı, daha ucuz transformatörler üretimini sağlamaktadır. Aynı zamanda çevrenin korunmasının önem kazandığı ve yağlı tip transformatörlerin patlama ve yangına sebebiyet verdiği gibi nedenlerden dolayı, kuru tip transformatörlerin üretimi önem kazanmıştır [44-45].

Temel tasarım kuralları her iki transformatör için aynı olsa da, üretim metot, hassasiyet, soğutma yöntemleri, tasarım farklılıkları, hammadde miktarı ve özellikleri vb. gibi etkenler fiyat farklılığına sebep olmaktadır.

Tasarımcı, her iki tip transformatörün özelliklerini göz önünde bulundurmalıdır. Bu tez çalışmasında tüm teknik özellikleri aynı olan iki adet 400 kVA kuru ve yağlı tip transformatörü maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, her iki transformatörün tasarımını ve üretimini/simülasyonu yapılmıştır. Daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için üretimini yapmanın doğru olacağı düşünülmüştür. Bu nedenle “Tek Transformatör” fabrikasının desteği ile, her iki transformatörün tasarımını, fabrikaya özel optimal tasarım programlarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu programlar ile çalışmak, tasarım işini çok kolaylaştırmıştır. Programların çıktısı, nüve, sargı, mekanik aksam (kazan, kapak boyunduruklar vs.), montaj ve son montaj ve genel sonuçlar olarak bir kaç bölümde yapılmıştır ve üretimin farklı bölümleri gerçekleştirilmiştir. Her iki transformatörün üretimi bittikten sonra, transformatörlerin sağlam olup olmadığı ve kayıplar, verim ve diğer teknik özellikler açısından aynı değerlere sahip olup olmadıklarını görmek için rutin testlere tabi tutulmuştur. Sonuçları gördükten sonra, maliyet karşılaştırması gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak, yağlı tip ve Kuru tip transformatörleri birçok açıdan karşılaştırılabilir. 4. bölümde, aynı performans ve özelliklere sahip iki transformatörü karşılaştırılmış, kuru tip transformatörler daha büyük olmaları nedeniyle kullanılan hammadde daha fazladır. Üretimi daha hassastır ve daha fazla özen göstermek gerekir.

Kuru Tip transformatörlerin bakımı ve onarımı daha kolaydır ve yerinde yapılabilir. Yağlı tip transformatörlerin bakımını ve onarımını yapabilmek için, transformatörü fabrikaya götürmek gerekir.

Çevre koruma açısından ise, özellikle sahillerde ve genel olarak yağ sızıntısının zarar verebileceği her yerde kuru tip tercih edilir. Maden ocakları, hastaneler, ormanlar gibi yangın tehlikesinin ve patlamanın çok korkunç sonuçlara yol açabileceği yerlerde, kuru tip transformatörler tercih edilmelidir. Son dönemlerde, yağlı tip transformatörlerde, çeşitli yağlar kullanılmaya başlanmıştır. Ancak birçok ülkenin şartnamesinde daha yer almamıştır. Bitkisel esther yağlar, Poliklorlü Bifeniller, Perkloretilen vs. gibi yağlar, normal yağlar dışında kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip yağların kullanmasının nedeni, bu yağların bazılarının doğada çözünabilirliği ve yangın noktasının yüksek olmasıdır. Örneğin bitkisel yağlar 21 günde %97'ye kadar çözünür. Yağ seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar, transformatörün boyutlarını etkileyen ısı iletkenlik, dielektrik özellikler, fiyat, yanma derecesi, akışkanlık ve doğada çözünürlüktür.

Bu çalışmada iki adet aynı performansa ve kayıplara sahip 400 kVA, 33 kV / 0,4 kV, kuru ve yağlı tip transformatörün optimal tasarımı TEK TRANSFORMATÖR fabrikasındaki özel programlarla yapılmış, üretilmiş ve rutin testlere tabi tutulmuştur. Maliyet tablolarına bakıldığında kuru tip transformatörün daha pahalı olduğu ve yağlı tipten yüzde %47,7 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Sonuçlara göre, 400 kVA kuru tip transformatörde yağlı tipe göre, iletken ağırlığı yaklaşık, %36, nüve ağırlığı yaklaşık, %65 daha fazladır. Soğutma ve yalıtım için kullanılan yağ ve katı yalıtım malzemesini bedeli karşılaştırıldığında ise, çok fazla fark görünmemektedir.

KAYNAKLAR

1. Kamaledin, B. (2016). *Transformatörün Çalışma Durumlarını Uzaktan İzleme Sistemi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 20-73.
2. Tören, M. (2018). *Dış Ortamlarda Kullanılabilir Kuru Tip Transformatörün Grafen Temelli Isıl Analizi*, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 38-67.
3. ABB Group, (2004). *Transformatör El Kitabı*, Zürih, 30-200.
4. McGraw, T. (2003). *Transformers*, New Delhi, Bharat Heavy Electricals Limited, 40-120.
5. Çilliyüz, Y. (2014). *The Loadability Analysis And Investigation Of Aging Of Power Transformers Under Various Conditions*, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 5-20.
6. Bozkurt, İ. (2005). *Pencere tipi bir transformatörde kaçak akı dağılımının deneysel ve sayısal yöntemlerle analizi*. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 44-79.
7. Najafi, A. (2016). *Thermal Modeling And Evaluation Of Unbalanced Voltage Effects On Distribution Transformer Based On Finite Element Method*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 10-39.
8. Özüpak, Y. (2020). *Realization Of Electromagnetic Field And Thermal Analysis Of Transformers Using Finite Elements*. Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 5-67.
9. Salahlı, T. (2019). *Düzlemsel Dizim Nüveli Kuru Tip Dağıtım Transformatörü İle Üçgen Sarma Nüveli Kuru Tip Dağıtım Transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun, 18-33.
10. Çeçen, M. (2018). *2 and 3 Dimensional Design And Lost Analysis Using The Finite Element Medhods For Power Transformers*. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 44-52.
11. Jin S. H. and Scott H. D., Power transformer, Editors: James H. H., Richard C. D. (2007). *Electric Power Engineering Handbook*, (2nd edition), California, CRC Press, 26-48.

12. Kaymaz, Ö. (2015). *Investigation Of Transformer Oil Flow And Heat Transfer In Transformer Radiator*. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Teknoloji Enstitüsü, İzmir, 12-39.
13. Xiao, M. and Du, B.X., (2016), Effects of high thermal conductivity on temperature rise of epoxy cast winding for power transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23(4), 2413-2419.
14. Yıldız, M. (2017). *Güç Transformatörlerinde K-Ortalama Kümeleme Yöntemi İle Bakım-Onarım Stratejilerinin Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 38-51.
15. Yapıcı, R. (2017). *Transformatörler İçin Ömür Tayini, Olay İzleme Ve Değerlendirme Yazılımı Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 49-71.
16. Yıldız, M. (2018). *Güç Transformatörlerinde Meydana Gelen Arızaların Gelişmiş Test Yöntemleri İle Belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Pamukkale, 13-68.
17. Eren, U. (2008). *Sf6 Gazlı Transformatörler İle Yağlı Transformatörlerin Karşılaştırılması*. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-27.
18. Dasgupta I. and Tata McGraw-Hill, *Design of Transformers*, (1st edition), New Delhi, India, 2005.
19. Doğan, E. (2016.) *Güç Transformatörlerinde Gürültü Seviyesinin Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-69.
20. Sönmez, O. (2012). *Determination Of Hot-Spot Temperature For Onan Distribution Transformers With Dynamic Thermal Modelling*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-45.
21. Kaya, O. (2018). *Yüksek Gerilim Model Transformatöründe Frekansa Bağlı Kayıp Katsayısının Yalıtkanlık Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 11-62.
22. Battal, F. (2019). *Investigation Of Vibration Effects Caused By Harmonics Medium Frequency Nanocrystalline Core Power Transformers*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 28-44.

22. Battal, F. (2019). *Investigation Of Vibration Effects Caused By Harmonics Medium Frequency Nanocrystalline Core Power Transformers*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 28-44.
23. Fassbinder, S. (2015), *Application Note Transformers in Power Distribution Networks*. Woluwe-Saint-Pierre, 65-70.
24. Aksoy, C. (2019). *Üç Boyutlu Farklı Nüve Geometrisine Sahip Güç Transformatörlerinin Tasarım ve Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 41-56.
25. Arabul, A. (2016). *Doğal Soğutmalı Silindirik Sargılı Dağıtım Transformatörlerinin Ömür Hesabında En Sıcak Nokta Sıcaklığı Hesabının Geliştirilmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-36.
26. International Electrotechnical Commission. (2017). *Güç Transformatörleri (60076-1)*. Madde 11.2. Londra, IEC.
27. International Electrotechnical Commission. (2017). *Güç Transformatörleri (60076-1)*. Madde 11.3. Londra, IEC.
28. Teke, İ. (2019). *Güç Transformatörlerinin Modellenmesi Ve Elektromanyetik Alan Analizlerinin Gerçekleştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 19-30.
29. International Electrotechnical Commission. (2017). *Güç Transformatörleri (60076-1)*. Madde 11.4. Londra, IEC.
30. International Electrotechnical Commission. (2017). *Güç Transformatörleri (60076-3)*. Londra, IEC.
31. International Electrotechnical Commission. (2006). *Güç Transformatörleri (60076-11)*. Londra, IEC.
32. Dawood, K. (2017). *Çok Sargılı Transformatörler İçin Kısa Devre Empedansı Ve Sargılara Etkiyen Kuvvetlerin Belirlenmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 8-29.
33. Çeçen, M. (2018). *Güç Transformatörünün Sonlu Elemanlar Yöntemini Kullanarak 2 Ve 3 Boyutlu Tasarımı Ve Kayıp Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, 27-35.

34. Mc-Graw, H. (2005). *Transformers*. Bharat Heavy Electricals Limited, New York.
35. Erdem, S. (2006). *Transformatör Çekirdeklerinde Kullanılan Elektrik Çelikleri Ve Amorf Şeritlerin Uç Uca Gelen Birleşim Yerlerindeki Manyetik Akı Dağılımının Deneysel Ve Kuramsal İncelenmesi*. Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 47-63.
36. Heathcote, M. (2007). *Transformer book*, 1st edition. Newnes, U.K.
37. Boduroğlu, T. (1982). *Elektrik Makinaları Dersleri: Teori, Hesap, Konstrüksiyon*. İstanbul.
38. Chapman, S. (2005). *Electric Machinery Fundamentals*. Fourth Edition, Australia.
39. Kaya, S. (2015). *Contributions To Analysis Of Effect Of Winding Geometry On Forces And Mechanical Deformations On Distribution Transformers Windings Caused Under Short-Circuit Operation*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 22-61.
40. Del Vecchio, R. (2002). *Transformer Design Principals with Applications to Core Form Power Transformers*. Boca Raton.
41. Kulkarni, S. V. and Khaparde, S. A., 2004, *Transformer Engineering Design & Practice*, New York, 41-96.
42. Erdoğan, M. (2016). *Kuru Tip Transformatörlerde Darbe Gerilimi Dağılımının Üç Farklı Sargı Tipi İçin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 29-68.
43. Çetiner, B. A. (1993). *Güç Transformatörlerinde Ayar Bobinlerinin Yerleştirilmesinin Sargı Kuvvetleri Bakımından incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 8-29.
44. Çukurova, S. (2017). *Calculation Of Optimum Dimensions Of Magnetic Shunt Elements To Reduce Stray Losses On Transformer Tank Walls*. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 29-51.
45. Özdoğan, A. (2020). *Thermal Analysis Of Dry Type Transformer At The Hottest Point In Different Load Conditions*, Yüksek Lisans Tezi. Adana Alparslan Türkeş Üniversitesi, Adana, 23-48.



GAZİ GELECEKTİR..