

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SF6 GAZLI TRANSFORMATÖRLER İLE YAĞLI  
TRANSFORMATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Elektrik Mühendisi Ulaş EREN

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP**

İSTANBUL, 2008



**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SF6 GAZLI TRANSFORMATÖRLER İLE YAĞLI  
TRANSFORMATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Elektrik Mühendisi Ulaş EREN

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında  
Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP**

İSTANBUL, 2008

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	v
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. GİRİŞ 1	
2. TRANSFORMATÖRLER.....	2
2.1 Transformatörlerin Sınıflandırılması.....	5
2.2 Çalışma Prensipleri.....	8
2.2.1 Transformatörlerin dönüştürme oranı.....	8
2.2.2 Transformatörlerde kaçak akılar.....	10
2.2.2.1 Kaçak akıyı azaltıcı önlemler.....	10
2.2.3 Transformatörlerde regülasyon.....	10
2.3 Transformatörlerin Kayıpları.....	11
2.3.1 Demir kayıpları.....	11
2.3.2 Bakır kayıpları.....	11
2.4 Transformatörlerde Verim.....	12
2.4.1 Transformatörlerde verim hesabı.....	12
2.5 Transformatörlerde Polarite ve Paralel Çalışma.....	13
2.5.1 Polarite.....	13
2.5.2 Paralel çalışma.....	13
2.5.2.1 Paralel bağlama şartları.....	13
2.6 Akım Transformatörleri.....	13
2.7 Gerilim Transformatörleri.....	14
2.8 Üç Fazlı Transformatörler.....	15
2.9 Transformatör Etiket Plakası.....	15
2.9.1 Etiket plakası bilgileri.....	15
2.10 Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği'nde Transformatörler.....	16
2.10.1 Transformatör merkezleri.....	16
2.10.2 Dağıtım transformatörlerinin bağlama (şalt) düzeni.....	19
2.10.3 Güç transformatörlerinin üst ve alt gerilim tarafındaki şebekelerden elektriksel olarak ayrılması.....	19
2.10.4 Aşırı yüke ve kısa devre akımlarına karşı koruma.....	20
2.10.5 Deneysel yerleri ve laboratuvarlara ilişkin hükümler.....	20
3. YAĞLI TRANSFORMATÖRLER ve YALITIM YAĞI.....	22

3.1 Elektrik Sistemlerinde Transformatörler .....	22
3.1.1 Transformatörlerde yapılan testler.....	24
3.2 Yalıtım Yağları.....	25
3.2.1 Yağlar üzerinde yapılan testler.....	25
3.2.1.1 Transformatör yağı numunelerinin delinme dayanımı ve su içeriği testi .....	28
3.2.1.2 Yağda erimiş gazlar analizi.....	31
4. SF6 (KÜKÜRT HEKSAFLORİD) GAZI.....	33
4.1 SF6 Gazı ve Özellikleri .....	33
4.1.1 SF6 Gazının kimyasal özelliği.....	33
4.1.2 SF6 Gazının fiziksel özelliği.....	33
4.2 Elektrik Sistemlerinde SF6 Gazı.....	34
4.2.1 SF6 Gazının ark söndürme yeteneği.....	35
4.3 SF6 Gazının Diğer Kullanım Alanları.....	36
4.4 SF6 Gazının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri.....	36
4.5 SF6 Gazının Çevresel Etkileri .....	37
4.5.1 SF6 Gazı bozunma ürünleri .....	37
4.5.2 Kyoto protokolü* .....	38
5. GIS (GAZ İZOLELİ TESİSLER).....	39
5.1 GIS' lerin Gelişimi.....	39
5.2 GIS' lerin Yapısı.....	41
5.3 GIS Tesislerinin Tasarımı.....	41
5.3.1 GIS Tesislerinin tasarım özellikleri.....	42
5.4 GIS Tekniğinin Seçiminde Dikkat Edilen Kriterler.....	43
5.5 GIS Tesislerinin Kurulumunun Tercih Edildiği Durumlar.....	44
6. SF6 GAZLI TRANSFORMATÖRLER.....	45
6.1 SF6 Gazlı Transformatörlerin En Temel Özellikleri.....	47
7. GAZ İZOLELİ TRANSFORMATÖRLERİN ÖZELLİKLERİNİN YAĞ İZOLELİ TRANSFORMATÖRLERLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	48
7.1 Yağlı Transformatörlerle Karşılaştırıldığında Gaz İzoleli Transformatörlerin Yapısal Özellikleri.....	48
7.1.1 İzolasyon ve soğutma ortamı.....	48
7.1.2 Çekirdek.....	49
7.1.3 Sargılar.....	49
7.1.4 Sargı iletken kaplamaları.....	49
7.1.5 Konservator.....	49
7.1.6 Tank gaz basıncı.....	50
7.1.7 Soğutma metotları ve soğutucular .....	50
7.2 Gaz İzoleli Transformatör Uygulamalarının Avantajları.....	51
7.2.1 Alev almaz ve patlamaz.....	51
7.2.2 Kolay bakım ve kontrol.....	52
7.2.3 Kolay kurulum.....	52
7.2.4 Kompakt ve hafif yapı.....	53
7.2.5 Yerleşim planında büyük rahatlık.....	54
7.2.6 Düşük gürültü.....	55
7.2.7 Temizlik.....	55
7.3 İzolasyon ve Termal Tasarım Yönünden Karşılaştırılması.....	55

7.3.1 Gaz izoleli transformatörlerin izolasyon karekteristiklerinin karşılaştırılması.....	55
7.3.1.1 SF6 Gazının dielektrik mukavemeti.....	55
7.3.1.2 Darbe oranı.....	55
7.3.1.3 Gaz/katı bileşim izolasyonu.....	56
7.3.2 İzolasyon tasarımı.....	56
7.3.2.1 Sargı iletkenlerine film kaplama.....	56
7.3.2.2 Lokal zorlama reduksiyonu.....	57
7.4 Soğutma Tasarımı Yönünden Karşılaştırılması.....	58
7.4.1 Gaz soğutmasının karekteristiği.....	58
7.4.2 Gaz izoleli transformatörler için soğutma tasarımı.....	59
7.5 İşletme ve Bakım Yönünden Karşılaştırılması.....	60
7.5.1 Gaz izoleli transformatörlerin aşırı yükte çalışması.....	60
7.5.2 Gaz izoleli transformatörlerin işletmedeki acil durum yönünden karşılaştırılması.....	61
7.5.2.1 Soğutma durması (cooler stop).....	61
7.5.3 Gaz basınç düşümü.....	61
7.5.4 Gaz izoleli transformatörlerin bakım yönünden karşılaştırılması.....	62
7.5.4.1 Koruyucular.....	62
7.5.4.2 Gaz analizi vasıtası ile dışsal tanı.....	65
7.5.4.3 Gaz analiz metodları.....	65
7.5.4.4 İçsel problem örnekleri ve ayrışık gazlarla bağlantıları.....	66
7.5.4.5 İzolasyonun aşırı ısınmasından kaynaklı ayrışmış gazlar.....	66
7.5.4.6 Metal aşırı ısınmalarından kaynaklı ayrışmış gazlar.....	66
7.5.4.7 Deşarjlara bağlı ayrışık gazlar.....	67
7.6 Yükte Kademe Değiştirici (On-load tap changer) (LTC).....	68
7.7 Gaz İzoleli Transformatörlerin Uygulama Alanlarının Karşılaştırılması .....	70
7.7.1 Gaz izoleli transformatörlerin uygulama alanları.....	70
7.7.2 Gaz izoleli transformatörlerin uygulaması.....	70
SONUÇLAR .....	74
KAYNAKLAR .....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## SİMGE LİSTESİ

$\%PF$	İzolasyon kayıp faktörü
$AL$	Hava giriş çıkış panjurları alanı (m <sup>2</sup> )
$C$	0,5 g'dir. (g = 9,81 m/sn <sup>2</sup> olarak yerçekimi ivmesidir)
$E_1$	Primerde indüklenen emk.
$E_2$	Sekonderde indüklenen emk.
$f$	frekans
$F$	Her elemanın ağırlık merkezine etki eden kuvveti (kg-kuvvet)
$H$	Transformatör tankı yatay eksenine ile hava çıkış panjuru yatay eksenine arasındaki
$I_1$	Primer akımı
$I_2$	Sekonder akımı
$K$	Dönüştürme oranı
$N_1$	Primer siper sayısı
$N_2$	Sekonder siper sayısı
$P$	Transformatörün toplam kaybı (kW)
$Q$	Manyetik akı
$U_1$	Primer gerilimi
$U_2$	Sekonder gerilimi
$U_s$	Siper başına indüklenen gerilim
$W$	Çelik aksam veya elektrik teçhizatının kütlesi (kg-kütle) yükseklik farkı (m)

## KISALTIMA LİSTESİ

AIS	Air Isolated Substations
ASTM	American Society for Testing and Materials
BMİDÇS	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
EMK	Elektro Motor Kuvveti
GIL	<a href="#">Gas-Insulated Transmission Lines</a>
GIS	Gas Isolated Substations
HFC	Hydrofluorocarbons
IDLH	Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IES	The Illuminating Engineering Society of North America
LTC	Load Tap Changer
PET	Polyethylene terephthalate
PFC	Perfluorocarbons
PPS	Polyphenylene sulfide
RMU	Ring Main Unit
RPM	Revolutions per minute
TSE	Türk Standardları Enstitüsü



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kuvvet çizgileri ve İki transformatör tasarımı ve çekirdek, bağlantı yapısı (Coltman, 1988).....	4
Şekil 2.2 Örnek bir Dağıtım Transformatör Hücresi (Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği, 2006).....	17
Şekil 3.1 Sıvı yalıtkanlar test sistem blok diyagramı (Keleş vd., 2005).....	28
Şekil 3.2 Sıvı yalıtkan test hücresi elektrot sistemi (ASTM Standart).....	28
Şekil 3.3 Numunelerin delinme dayanımı (Keleş vd., 2005).....	30
Şekil 3.4 Numunelerin su içeriğine bağlı delinme dayanımı (IEEE Stantart C57, 2002).....	31
Şekil 5.1 Üç fazlı 72,5-170kV luk bir GIS in klasik kesit görünüşü (Bolin P., 2006).....	41
Şekil 5.2 245kV luk bir GIS in tipik modüler yapısı.....	42
Şekil 5.3 Tamamen gaz izoleli bir tesis (Toshiba).....	43
Şekil 6.1 Japonyada kullanılan ilk SF6 gaz izoleli transformatör, Toshiba.....	46
Şekil 6.2 SF6 Gazlı transformatörün yapısal şekli(Toda, 2002).....	47
Şekil 7.1 Gaz İzoleli Transformatörün Yapısı (Togawa vd., 1995).....	48
Şekil 7.2 Hata anındaki tank basınç artışı (Togawa vd., 1995).....	52
Şekil 7.3 Yer altı dağıtım merkezi (GIS) (Togawa vd., 1995).....	53
Şekil 7.4 Gaz izoleli transformatörün ve radyatörün yerleşim plan örneği.....	54
Şekil 7.5 SF6 gazının izolasyon karakteristiğinin izolasyon yağı ile karşılaştırılması (Togawa vd., 1995).....	56
Şekil 7.6 Yağlı kağıt ve PET filmin dielektrik karşılaştırılması (Inoue vd., 1991).....	57
Şekil 7.7 SF6 Gazı ve Yağın ısı transfer katsayısı.....	59
Şekil 7.8 Gaz sıcaklık göstergesi.....	64
Sekil 7.9 Gaz basınç sayacı.....	64

Şekil 7.9 Sıcaklık ayar basınç siviçi.....	65
Şekil 7.10 Ayrışık gaz yakalama tüpü.....	66
Şekil 7.11 İzolasyon maddelerinden üretilen gaz miktarı.....	67
Şekil 7.12 Dönüştürücü anahtar (diverting switch).....	68
Şekil 7.13 Yükte kademe değıştiricinin (LTC) dış görünüşü.....	69
Şekil 7.14 Dönüştürücü anahtarın (diverting switch) bağlantı diyagramı.....	69
Şekil 7.15 Dönüştürücü anahtarın çalışmasını açıklayıcı diyagramı.....	69
Şekil 7.16 Gaz izoleli transformatörlerin gerilim ve kapasite durumu.....	70
Şekil 7.17 Yer altı merkezindeki 275kV, 300MVA gaz izoleli transformatör (Toshiba).....	71
Şekil 7.18 Doğal soğutmalı tipte SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba).....	72
Şekil 7.19 Gaz zorlamalı, doğal hava soğutmalı SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba).....	72
Şekil 7.20 Gaz zorlamalı, hava zorlamalı soğutma tipli SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba) .....	72

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1 GIS'in 40 yıllık gelişimi (Bolin P., 2006).....	39
Çizelge 7.1 SF6 gazının ve izolasyon yağının soğutma karakteristiği.....	58
Çizelge 7.2 Acil durumlarda tolare edilebilir yük oranı ve süresi (Toshiba).....	61
Çizelge 7.3 Gaz İzoleli Transformatörlerin Korunması (Togawa vd., 1995).....	63
Çizelge 7.4 Gaz izoleli transformatörlerin yağlı transformatörlerle karşılaştırılması.....	73

## ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin keşfi ve insanlığa sunulması ile beraber üretimi, iletimi ve doğru tüketimine ilişkin gelişmelerin kaydedilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Elektrik enerjisinin üretiminin rahat olduğu bölgeler ile insanların yaşamsal faaliyetlerini sürdürdükleri yerler arasında mesafeler oluşunca; enerjinin kayıpsız ve daha düşük yatırım maliyetleri ile nasıl taşınması gerektiği araştırılmıştır. 19. yy da yapılan araştırmalar ile transformatörler bulundu ve teknolojik gelişmeler paralelinde daha verimli ve kompakt bir hal aldı.

Elektrik enerjisinin üretim ve tüketim sahasının iletimini gerçekleştiren ve 19. yüzyılda geliştirilmiş bu yetenekli aygıt transformatördür. Transformatör hareket etmez, hemen hemen tümüyle sessizdir, ve sabit bir noktada muhafaza edilir. Transformatör elektrik güç sistemlerinin en önemli unsurundan biridir. Amacı düşük akımlı yüksek gerilimli elektriği, enerji kaybını minimize ederek yüksek akımlı düşük gerilimli duruma dönüştürmektir, veya bu çevrimi tersten işletmektir. Bu dönüşüm önemlidir, çünkü elektrik enerjisini yüksek gerilimle iletmek verimli bir durumdur ve düşük gerilimle kullanılır vede üretilir.

Transformatörler yapısal özellikleri dikkate alınarak ve çeşitli özellikleri göz önüne alınarak sınıflandırılır. Araştırmamızda yağ izoleli ve gaz izoleli transformatörler ile ilgili bilgi verip karşılaştıracacağız. İzolasyon maddelerinin aynı zamanda bir soğutucu olduklarında göreceğiz. Bir birlerinden üstün taraflarını göreceğiz bunun yanı sıra eksik olan taraflarının geliştirilmesi için nasıl çalışmalar yapıldığını göreceğiz.

Eğitimim için her türlü fedakarlığı yapmış sevgili anne ve babama, tez aşamasında yardım ve katkılarından dolayı Seda Senem DURSUN'a ve tez danışmanın Sn. Yrd. Doç. Dr. Erdin GÖKALP'e değerli katkılarından ve yönlendirmelerinden dolayı teşekkür ederim.

## ÖZET

# SF6 GAZ İZOLELİ TRANSFORMATÖRLER İLE YAĞLI TRANSFORMATÖRLERİN KARŞILAŞTIRILMASI

Ulaş EREN

Elektrik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Bu tezin amacı, enerji sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biri olan transformatörlerin izolasyon maddesi olan transformatör yağı ve SF6 gazının incelenmesidir. Öncelikli bu izolasyon maddeleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve transformatör içerisindeki davranışları incelenmiştir.

Transformatörler içerisindeki izolasyon maddesine göre adlandırılır. İç yapısal özellikleri aynı olan transformatörlerin, izolasyon maddesinin değişmesiyle beraber fiziksel şekilleri ve verimliliğin artırılması için nasıl teknik takviyeler yapıldığı incelenmiştir. Yağlı transformatörlerin ve Gaz izoleli (SF6) transformatörlerin birbirlerine karşı güçlü ve zayıf yanları karşılaştırılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Gaz izoleli transformatörler, GIT, SF6, transformatör yağı

## **ABSTRACT**

### **COMPARISON BETWEEN SF6 GAS INSULATED TRANSFORMERS AND OIL INSULATED TRANSFORMERS**

Ulas EREN

Electrical Engineering, Master Dissertation

The purpose of this dissertation is to analyze the isolation material; SF6 gas and transformer oil which are one of the most important equipments in energy systems. First of all general information about isolation material is given and the behavior of the isolation material in the transformer is studied.

Transformers are named according to the isolation material they have. It is studied that when the isolation material is changed in the transformer which has same interior structure, how technical support should be made in order to increase the efficiency. Oil insulated transformers and SF6 gas insulated transformers are compared according to their weak and strong characteristics.

Key words: Gas insulated transformers, GIT, SF6, transformer oil

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin insan hayatında ki önemi artıkça enerjinin son kullanıcıya daha kaliteli ve güvenli iletilmesi ile ilgili araştırmalar yoğunlaşmıştır. Enerji iletim ve dağıtım sisteminin en önemli ekipmanlarından biri transformatörlerdir. Transformatörlerin alışma yetenekleri sistemin devamlılığını ve enerji kalitesini doğrudan etkilemektedir. Transformatörler içerdikleri izolasyon maddesine göre adlandırılırlar. İzolasyon maddeleri transformatörler için hayati öneme sahiptir. Görülen arızaların büyük çoğunluğu izolasyon maddesi incelenerek tespit edilebilir.

şehirlerde endüstri, ticaret ve yaşam alanlarının nüfus ile birlikte gelişmesinden ötürü daha çok boş alanlara ihtiyaç duyulmuştur. Bu yaşam alanlarının büyümesi ile beraber enerji gereksinimleride artmıştır. Yer sıkıntıları oluşunca, alan olarak daha küçük yerlerde transformatör odalarının kurulması gerekli görülmüş ve araştırmalar neticesinde gaz izoleli transformatörler kullanılmaya başlanmıştır.

Transformatörlerde en yaygın kullanılan izolasyon maddesi yağdır. İzolasyon yağının incelenmesi ile transformatör ile ilgili tanılar ortaya koyulur. Petrol kökenli bu madeni yalıtım yağları uzun yıllardan bu yana, elektrik ekipmanlarında başarıyla kullanılan önemli bir izolasyon sıvısıdır. Yalıtım yağları diğer yalıtım maddelerine göre daha ucuz olması ve yapı malzemesiyle iyi uyum sağlaması nedeniyle, günümüzde halen daha vazgeçilmez bir kullanım alanı bulmaktadır.

Transformatör iç yapısının aynı kalması ve sadece izolasyon maddesinin değişmesiyle işletmede bir takım avantajlar ve dezavantajlar oluşmuştur. İzolasyon yağının SF6 gazına oranla daha iyi bir soğutucu olmasına rağmen SF6 gazıda daha güvenli, yanmaz ve boyut olarak daha kompakt transformatörlerin üretilmesini sağlar.

İzolasyon yağlarının çevresel etkilerinide göz önüne almak gereklidir. İzolasyon yağı akıntı yapabilme özelliğinden dolayı çevresel kirliliğe yol açabilir. SF6 gazı ile ilgili ise sera etkisi yaptığından çevreye zarar verdiği araştırmalar ile tespit edilmiştir.

İzolasyon maddeleri olan yağ ve SF6 gazının hem tek başlarına özellikleri, hemde transformatörler içeresindeki davranışları incelenmiştir.

## 2. TRANSFORMATÖRLER

19. yy'ın sonlarında başlayan ve hızlı bir gelişim göstererek 20. yy'ın ortalarında kendini iyice hissettiren teknolojik gelişim; iletişim, ulaşım ve elektrik gücünde meydana gelen temel gelişmelerden doğmuştur. Teknolojik buluşların insan hayatına girmesi ve vazgeçilmez bir hal alması, elektrik enerjisinin her an her yerde sağlıklı ve kesintisiz kullanılmasının gerekliliğini göstermiştir. Elektrik enerjisinin üretim sahasından tüketim sahasına iletimini sağlayan ve 19. yüzyılda geliştirilmiş bu yetenekli aygıt transformatördür. Bu aygıt hareket etmez, hemen hemen tümüyle sessizdir, ve genellikle yeraltı depolarında veya perde arkasında saklanır. Transformatör elektrik güç sistemlerinin en önemli unsurundan biridir. Amacı, düşük akımlı yüksek gerilimli elektriği, enerji kaybı olmaksızın yüksek akımlı düşük gerilimli duruma dönüştürmektir, veya bu çevrimin tersini gerçekleştirmektir. Bu dönüşüm önemlidir, çünkü elektrik enerjisi en verimli şekilde yüksek gerilimle iletilirken, düşük gerilimlerde kullanılır ve üretilir. Transformatörlerin olmaması durumunda santrallerden üretilen elektriğin tüketicilere ulaştırılması için minimum mesafeler gözetilmeli ve birçok yerleşim ve endüstri merkezlerinin kendilerine ait güç istasyonları kurmaları gerekecek ve elektrik çok daha az kullanışlı bir enerji kaynağı olacaktır.

Elektrik güç sistemlerindeki rolüne ek olarak, transformatörler elektrikle çalışan birçok aracın tamamlayıcı elemanıdır. Transformatör denilince akla devasa yapılar gelmemelidir. Elektronik devrelerden büyük santrallere kadar kullanılma alanları vardır. Önemli olan transformatörlerin boyutlarından bağımsız olarak aynı çalışma tekniğine sahip olduğunu bilmektir.

Transformatörün temel işlevini 1831'de elektrik alanında ilk çalışmaları yapmakta olan İngiliz fizikçi Michael Faraday bulmuştur. Yüzyılın sonlarında değişken akımlı (a.c.) güç sistemleri tüm dünyada kullanılmaya başlamış ve transformatörler elektrik iletim ve dağıtımında anahtar rolünü üstlenmişlerdir. Transformatörün öyküsü 1900'de bitmez. Bugünün transformatörleri yüzyıl başındaki atalarına göre güç bakımından 500, gerilim bakımından 15 kat fazla kapasiteye sahiptir. Güç birimi başına ağırlık 10 kat azalmış ve verimlilik genellikle %99'u aşmıştır.

Faraday'ın çalışmaları, 1820'de bir iletkenin geçen elektrik akımının, iletken etrafında manyetik alan yarattığını göstermiş olan Danimarkalı fizikçi Hans Cristian Oersted için ilham kaynağı olmuştur. Oersted'in bu keşfi o zaman için çok önemlidir, çünkü bu olaya kadar elektrik ve manyetizma birbiriyle ilgisiz kuvvetler olarak bilinmekteydi. Elektrik akımı manyetik alan üretebiliyorsa bir manyetik alan da elektrik akımına yol açabilirdi. 1831'de



Faraday manyetik alanın bir iletkende akım indükleyebilmesi için alanın değişken olması gerektiğini gösterdi. Faraday, alanın değişmesini, alanı yaratan elektrik devresini açıp kapayarak sağlıyordu; aynı etki, yönü zamanla değişen bir akımla da sağlanabilirdi. Elektrik ve manyetizmanın bu büyüleyici etkileşimi elektromanyetik endüksiyon olarak bilinir.

Endüksiyon en iyi şekilde Faraday'ın bir manyetik alanın yönünü ve kuvvetini anlatmak için ortaya attığı kuvvet çizgileri yoluyla anlaşılabilir. Çember şeklinde sarılmış bir telden geçen akımın yarattığı manyetik alan için çizilmiş kuvvet çizgileri Şekil 2.1'de görülmektedir. İlkinden bağımsız ikinci bir tel döngü değişken bir manyetik alan içine konulduğunda, döngüde içine aldığı kuvvet çizgilerinin zamana göre değişimiyle orantılı bir gerilim oluşur. Yapılan bobin iki sarımlıysa, böyle bir etkileşim her sarımda meydana gelir ve sonuçta gerilim iki katına çıkar; üç sarım varsa gerilim üç katına çıkar ve bu durum sarım sayısı ile gerilim arasındaki doğru orantıyı gösterir. Gerilim yükleri hareket ettiren basınç, akım da yüklerin akma oranı olarak düşünülebilir. Bunların çarpımı (gerilim volt, akım amper birimiyle) watt olarak elektriksel güce eşittir.

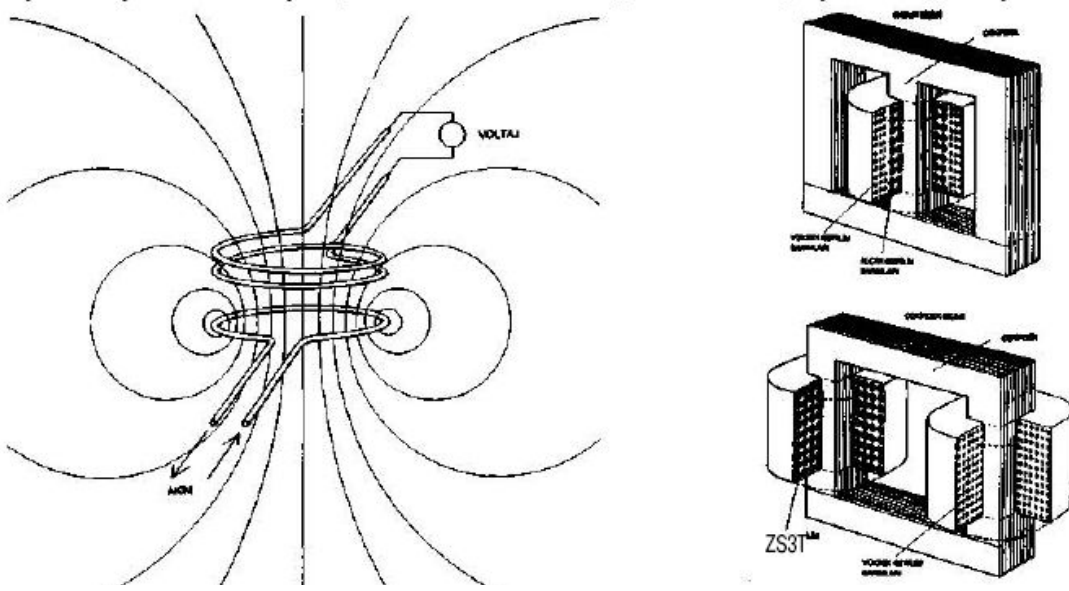
Bir transformatörde akımla beslenen ve manyetik alanı üreten sarıma birincil (primer) adı verilir. Manyetik alanı tutan sarıma da ikincil (sekonder) denir. Birincil ve ikincil sarım arasında karşılıklı endüksiyon vardır; yani ikincil sarımda akan akım birincilde bir gerilim indüklerken, aynı yolla birincil de ikincil sarımda gerilim yaratır. Ayrıca, birincil sarım kendi kuvvet çizgilerini de içine aldığından kendi üzerinde de gerilim indükler, bu olay özendüksiyon (self induction) olarak bilinir ve ikincil sarımda da meydana gelir.

Aynı anda sarımlar arasında oluşan karşılıklı endüksiyon (Mutual induction) ve her sarımda oluşan öz endüksiyon transformatörün en önemli özelliğidir. Güç transformatörlerinde sargıların eşleşmesi ve yüksek öz endüksiyona sahip olmaları önemlidir. Yani birincil sarımın bütün kuvvet çizgilerinin ikincil tarafından da çevrelenmesi ve belli bir akım değişikliğine karşılık üretilen kuvvet çizgilerinin sayıca fazla olması gerekir. Her iki şart da Faraday'ın ilk deneylerinde yaptığı gibi birincil ve ikincil sarımları demirden yapılmış bir çekirdek etrafına sararak sağlanabilir.

Demir, üretilen kuvvet çizgilerini 10000 kat artırabilir, bu demirin geçirgenlik özelliğinden kaynaklanır. Demir ayrıca, kuvvet çizgilerini bir arada tutarak birincil ve ikincil sarımların birbirlerinden uzak olmalarına rağmen manyetik olarak iyi bir şekilde eşleşebilmelerini sağlar.

İdeal transformatörde bütün kuvvet çizgileri birincil ve ikincil sarımlarından tek tek geçer ve değişken bir manyetik alan sarımların her birinde aynı gerilimi üretir, bir sarımda üretilen gerilim sarımdaki döngü sayısı ile orantılıdır.

Transformatörde enerji kaybı yoksa ikincil sarımdan elde edilen gücün birincile verilene eşit olması gerekir; başka bir deyişle ikincil sarımın akım gerilim çarpımının birincildeki akımla gerilimin çarpımına eşit olması gerekir.



Şekil 2.1 Kuvvet çizgileri ve İki transformatör tasarımı ve çekirdek, bağlantı yapısı (Coltman, 1988)

Bu nedenle iki sarımdaki akımlar gerilimlerle ters orantılı olmalıdır. (Güç ifadeleri ancak akım ve gerilimler aynı fazda ise doğrudur, yüksek öz endüktans şartı aynı fazda olmayan akımların ihmal edilebilir büyüklükte olmasını sağlar).

Böyle bir ideal transformatör elektrik mühendisine mekanikteki kaldıraça benzer bir araç olur, fakat kaldıraçtaki kuvvet ve hareket dönüşümü yerine transformatör gerilim ve akımla ilgilenir. Kaldıraç kolunun uzunlukları yerine, sarım sayısı oranı bu aracın etkili ölçütüdür. Doğal olarak ideal transformatör henüz yapılmamıştır, ancak uygulamada ideale çok yaklaşmıştır. Demir çekirdekler bütün güç transformatörlerinin ayrılmaz parçalarıdır ve geçmişte olduğu gibi günümüzde de düşük direnci nedeniyle bakır, sarımlarda kullanılan en yaygın malzemedir.

Metal çekirdeklerde dolaşan akımın enerji harcadığı kanıtlanmıştır. "Eddy akımları" denilen bu kayıpları azaltmak için transformatör içindeki manyetik kuvvet çizgilerine dik doğrultuda iletken olmayan çekirdekler üretildi. Bu tip çekirdeklerde düz demir tel demetleri kullanılıyordu.

Bu süre içinde yapılan bütün deneylerde kaynak olarak doğru akım bataryaları kullanılıyor,

gerekli değişken akımı üretmek için birincil devre açılıp kapatılıyordu. 1860'larda yine Faraday'ın öngörüsüne dayanan bir çeşit üreteç olan dinamonun ortaya çıkışıyla değişken akım kolayca elde edilebilir hale geldi. Bir transformatörü değişken akım kaynağına bağlayan ilk kişi, laboratuarda yüksek gerilimli güce ihtiyacı olan William Grove oldu. Bu düzenlemeye Thomas Edison 1880'lerde elektrikle aydınlatma düşüncesini ortaya atarak değişken akımın kullanılmasını sağladı.

## 2.1 Transformatörlerin Sınıflandırılması

Trafohar hareket etmeyen elektrik makineleri olup belli bir gerilimdeki elektrik enerjisini diğer bir gerilimdeki enerjiyi çevirmeye yararlar. Özellikle enerji iletiminde rolleri çok büyüktür. Bir ve üç fazlı olarak kullanılırlar. Trafoların en büyük özelliği diğer elektrik makinelerine göre veriminin yüksek olmasıdır. Çünkü hareket etmeyen elektrik makinesi olduğundan sürtünme ve rüzgar kayıpları yoktur. Verimleri %99,5 a kadar yükseltilebilmiştir. Kullanıldıkları yer neresi olursa olsun prensip bakımından daima aynıdırlar ve genel olarak bir diğerine ve toprağa karşı izole edilmiş iki sargı ile üzerlerinde taşıyan demir çekirdeklerden oluşurlar. Uyarılan sargıya primer diğerine sekonder denir. Trafolar yükseltici ve alçaltıcı olmasına göre primer gerilimi sekonderden büyük veya küçük olabilir. Generatör çıkış gerilimleri 0,4 - 3,3 - 6,3 – 10,6 – 13,0 – 14,7 – 15,8 – 35 kv. değerlerindedir. Bu gerilimler enerjinin uzak yerlere taşınmasını sağlayacak kadar büyük değildir. Enerji hatlarındaki kayıpların büyük olmaması için gerilimin büyütülmesi gerekir. Gerilimlerin büyütülmesi ise transformatörler ile mümkün olmaktadır. İletim gerilimleri ise orta – yüksek – çok yüksek olarak üçe ayrılır.

Orta gerilim : 6,3 – 10 – 15 – 20 – 33 – 45 – 66 Kv.

Yüksek gerilim : 110 – 154 – 220 Kv.

Çok yüksek gerilim: 380 – 500 – 750 Kv.

Transformatörler sınıflandırılırken aşağıdaki özellikleri dikkate alınır;

- Manyetik nüve tipine göre

Manyetik nüve üretimi dikkate alındığında; nüvelerin, silisyum alaşımlı özel transformatör saçlarından yapıldığı görülür. Kayıplar, işçilik ve ekonomik nedenlerden dolayı nüve 0,35 mm kalınlıktaki saçlar seçilerek imal edilir. Bu saçların birer yüzleri yalıtkan tabaka (lak, kağıt, karlit vb.) ile kaplanmıştır. Nüve kesiti transformatörün gücüne göre tasarlanır. Büyük güçlü transformatörler için nüvelerde soğutma kanalları açılır. Nüveyi oluşturan saç paketi, kayıpları azaltmak amacıyla saf selülozdan yapılmış ince

kağıt levhalarla, küçük paketlere ayrılmıştır. Nüve sıkıştırma plakaları ile sıkıştırıldıktan sonra, epoksi yatay reçine ile emdirilmiş cam elyafı bantlarla iyice sarılır. Daha sonra bu bantlar civatalı kilitlerle gerdirilir. Nüve çeşitleri aşağıdaki gibidir.

- a. Çekirdek tipi nüve
  - b. Mantel tipi nüve
  - c. Dağıtılmış nüve tipi
- İzolasyon tipine göre
    - a. Yağ izoleli transformatörler
    - b. Gaz izoleli transformatörler
    - c. Hava izoleli transformatörler
  - Soğutma şekline göre
    - a. Kuru transformatörler
    - b. Yağlı transformatörler
    - c. Gazlı trafolar
  - Kuruluş yerlerine göre
    - a. İç ortam tipi
    - b. Açık hava tipi
  - Sargı tiplerine göre

Sargı iletkenleri elektrolitik bakır ve alüminyumdan yapılırlar. Kesitleri dikdörtgen ve yuvarlak şeklindedir. Yağlı transformatörlerde sargı izolasyonu kağıtlarla yapılır. Saf selülozdan ince kağıt şeritler, sargı gerilimine göre iletkenlerin üzeri birkaç kat sarılır. Kuru transformatörlerde kullanılan iletkenlerin yalıtılmaları için, iletkenlerin üzerleri, pamuk veya cam elyafı ipliklerle sarılır, daha sonra lak emdirilir.

- a. Silindirik sargı; silindirik boru sargılar dikdörtgen şeklinde büyük kesitli iletkenlerle yapılır. Bunlar tek katlı veya çok katlı olmak üzere transformatör ayağı boyunca sarılır. Boru sargılar, alt gerilim sargısı olarak, sipiri az olan büyük akımlı transformatörlerde kullanılır.

- b. Dilimli sargı; dilimli sargılarda önce çift bobinli dilimler sarılır. Her dilim için çok katlı iki ayrı bobin bulunur. Bu bobinler içerde birbirleri ile bağlantılıdır. Bu yüzden dilim dışında yalnız iki uç bulunur. Her iki bobinin sarım yönleri manyetik alanı aynı olacak yönde olmalıdır. Hazırlanan dilimler transformatör ayağı üzerine yerleştirilen yalıtkan silindirin üzerine geçirilir.
  - c. Basit bobin sargılar; basit bobin sargılarda yalıtkan makara üstüne ikinci kat, daha sonra üçüncü kat ve öteki katlar atılır. Bu tür sarımda her defasında, bir katın başlangıcı ile öteki katın bitimi üst üste gelir. Bu iki kat arasında yüksek gerilim meydana geldiğinden aralara pres bant koyulur. Basit bobinli sargılar daha çok küçük güçlü transformatörlerde kullanılır.
- Çalışma prensibine göre
    - a. Sabit akımlı
    - b. Sabit gerilimli
  - Sargı durumlarına göre
    - a. Yalıtılmış sargılı
    - b. Oto transformatörler; şebeke gerilimini yükseltmek veya düşürmek amacıyla kullanılan tek sarımlı bir transformatördür. Sabit ve ayarlı olmak üzere iki tiptir. Değişken olan transformatöre halk dilinde varyak adı verilir.
  - Soğutucu cinsine göre
    - a. Hava ile soğutma
    - b. Yağ ile soğutma
    - c. Gaz ile soğutma
    - d. Su ile soğutma
  - Kullanış amaçlarına göre
    - a. Güç transformatörleri
    - b. Ölçü transformatörleri
    - c. Çeşitli aygıt ve makinelerde kullanılan transformatörler

## 2.2 Çalışma Prensibi

Transformatörün primer sargısına alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargı değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu alan, üzerinde sekonder sargının da bulunduğu manyetik demir nüve üzerinde devresini tamamlar. Primere uygulana alternatif gerilimin zamana bağlı olarak her an yön ve şiddeti değiştiğinden oluşturduğu manyetik alanında her an yönü ve şiddeti değişir. Bu alanın sekonder sargılarını kesmesi ile sargılarda alternatif bir gerilim indüklenir.

Transformatörlerin primer sargılarına doğru gerilim uygulandığında gene bir manyetik alan meydana gelir. Ancak bu manyetik alan, sabit bir alandır. Bu alanın yönü ve şiddeti değişmeyeceğinden sekonder sargılarında bir (elektro motor kuvveti) emk indüklemesi söz konusu olmaz.

### 2.2.1 Transformatörlerin dönüştürme oranı

Bir iletkende emk. indüklenebilmesi o iletkenin sabit bir manyetik alan içerisinde hareket ettirilmesi veya değişen bir manyetik alan içine bulundurulması gerekir. Bir transformatörün birinci devre sargılarına alternatif bir gerilim uygulandığında ikinci devre uçlarına bir yük bağlanmasa yani ikinci devre uçları açık olsa da, birinci devre sargılarında çok küçük bir boş çalışma akımı geçer. Geçen bu akımın oluşturduğu değişken (alternatif) akı, sekonder sargılarını keserek bu sargılar etrafında alternatif bir emk. indüklenir.

Transformatör boştaki akımın oluşturduğu manyetik akımın sekonder sargılarını kestiği ve boştaki nüve kayıplarının sıfır olduğu var sayılırsa böyle bir transformatör ideal bir transformatördür. İdeal bir transformatörde sekonder sargısının kesen kuvvet çizgilerinin tamamı primer sargısında keser. Bu durumda transformatörün her iki sargısında da sipir başına aynı gerilim indüklenir. Primer ve sekonder sargılarda indüklenen bu gerilimler aynı Q akısı tarafından oluşturulduğundan aralarında bir faz farkı yoktur.

Transformatörün primerinde oluşan  $E_1$  emk. Lenz kanuna göre kendisini oluşturan  $U_1$  gerilimine ters yönde olup yaklaşık olarak eşit değerdedir. (Gerçekte  $E_1$  emk.  $U_1$  den %1 ila %2 oranında küçüktür.)

Transformatörün dönüştürme oranlarının ve diğer bilgileri şu şekilde bulabiliriz:

$E_1$ : Primerde indüklenen emk.

$E_2$ : Sekonderde indüklenen emk.

$U_1$ : Primer gerilimi

$U_2$ : Sekonder gerilimi

$N_1$ : Primer siper sayısı

$N_2$ : Sekonder siper sayısı

$I_1$ : Primer akımı

$I_2$ : Sekonder akımı

$U_s$ : Siper başına indüklenen gerilim

$K$ : Dönüştürme oranı

$f$ : frekans

4.44: Sabit sayı

$10^{(-8)}$ : İndüklenen E.M.K.'nin Volt cinsinden çıkması için kullanılan sabit sayıyı ifade eder.

$Q$ : Manyetik akı

Bir fazlı transformatörde indüklenen e.m.k. değeri genel olarak şu formülle yazılır;

$$E=4,44 \cdot f \cdot Q \cdot N \cdot 10^{(-8)} \quad (2.1)$$

Bu formülden yararlanarak primer ve sekonder için;

$$U_1=4,4 \cdot f \cdot Q \cdot N_1 \cdot 10^{(-8)} \dots \text{Volt} \quad (2.2)$$

$$U_2=4,44 \cdot f \cdot Q \cdot N_2 \cdot 10^{(-8)} \dots \text{Volt} \quad (2.3)$$

bulunur.

Siper başına indüklenen gerilim ise

$$U_s=U_1 / N_1 \quad (2.4)$$

Veya

$$U_s=U_2 / N_2 \quad (2.5)$$

(Volt/siper)'dir.

$$K=U_1 / U_2=N_1 / N_2=I_2 / I_1 \quad (2.6)$$

Bu orana dönüştürme oranı denir.

## 2.2.2 Transformatörlerde kaçak akılar

Bir transformatörün primerine alternatif bir gerilim uygulandığında, bu sargıdan geçen akımın oluşturduğu manyetik akının tamamı ikinci devre iletkenlerini kesmez. Akımın küçük bir kısmı devresini havadan tamamlar. Devresini havadan tamamlayan bu akıların tamamına kaçak akılar denir. Kaçak akı ne kadar çok olursa faydalı akı o kadar azalır. Bunun sonucunda ikinci devrede siper başına indüklenen gerilim birinci devrede indüklenen gerilimden çok daha az olur. Bunun sonucunda sekonderde emk. azalır.

Boş çalışma durumunda kaçak akı faydalı akının % 5'i kadardır.

### 2.2.2.1 Kaçak akıyı azaltıcı önlemler:

- Primer ve sekonder sargılarının uygun bir şekilde sarılmış olmaları
- Nüve için kullanılan saçların manyetik gerginliğe ve havaya göre çok yüksek olması
- Transformatör primer ve sekonder sargılarının üst üste ve aynı ayağa sarılması kaçak akıyı azaltır.

Primer ve sekonder sargılardan geçen akımların oluşturdukları kaçak akılar, faydalı akıyı azalttıklarından, primer ve sekonder iç gerilimlerinin düşmelerine neden olmaktadır. Bunun sonucunda sekonder çıkışında gerilim azalması görülür. Kaçak akıların oluşturdukları gerilim düşümleri tam indüktif özellikte olup, akımdan  $90^0$  ileridedir. Kaçak akıları transformatör devresine seri bağlanmış reaktanslar şeklinde gösterebiliriz. Bu reaktansalar primer ve sekonder için ayrı ayrı gösterilir ve kaçak akı reaktansı adını alırlar.

Bazı özel transformatörlerde ise kaçak akılar istenir. Kaynak makinelerinde, kısa devre akımlarının azaltmada, paralel çalışmayı kolaylaştırmada ve ark fırınlarının güç devrelerinde kullanılan transformatörün kaçak reaktansı büyük istenmektedir.

### 2.2.3 Transformatörlerde regülasyon

Bir transformatörde primer gerilimi anma akımı değerinde sabit tutulup, sekonderden anma yük akımı çekilirse sekonder geriliminin boştaki değerine göre değişme görülür. Sekonderin boş ve tam yüklü durumdaki gerilimleri arasındaki farka, transformatörün gerilim regülasyonu denir. Bu farkın tam yüklü durumdaki sekonder gerilimine oranına gerilim regülasyonu yüzdesi denir.



### 2.3 Transformatörlerin Kayıpları

Bütün elektrik makinelerinde olduğu gibi transformatörlerinde kayıpları vardır. Bu kayıplar ikiye ayrılırlar:

- Demir Kayıpları
- Bakır Kayıpları

Transformatörlerin döner parçaları olmadığından sürtünme ve rüzgar kayıpları gibi bir takım kayıpları yoktur, bu nedenle verimleri diğer elektrik makinelerine göre daha yüksektir. Demir kayıpları boş çalışma deneyi ile bakır kayıpları ise kısa devre deneyi ile bulunur.

#### 2.3.1 Demir kayıpları

Transformatörde boş çalışmada oluşan kayıplara, demir kayıpları denir. Çok küçük olan boştaki akımın oluşturduğu bakır kayıpları dikkate alınmazsa boş çalışmada yalnız demir kayıpları söz konusu olur. Demir kayıpların nüve veya çekirdek kayıpları da denilmektedir. Demir kayıpları histersiz ve fuko kayıpları olmak üzere ikiye ayrılır.

- Histerisiz Kayıpları: Nüve moleküllerinin frekansa bağlı olarak yön değiştirmesi sırasında birbirleri ile sürtünmeleri sonucu ısı şeklinde ortaya çıkar.
- Fuko Kayıpları: Nüve üzerine indüklenen akımların neden olduğu kayıplar ısı şeklinde ortaya çıkan kayıplardır.

#### 2.3.2 Bakır kayıpları

Bakır kayıplarını sargılar oluşturmaktadır. Bakır kayıpları kısa devre deneyi ile bulunur. Transformatörün sekonderine bir yük bağlandığı zaman hem primerden hem sekonderden bir akım geçer.

Geçen akımlar primerde

$$I_1^2 \cdot R_1 \quad (2.7)$$

ve sekonderde

$$I_2^2 \cdot R_2 \quad (2.8)$$

şeklinde bakır kayıpları oluşur.

Bakır kayıpları 1000kVA'nin altındaki güçlerde transformatörün görünür gücünün % 3 ile

% 4'ü kadardır.

## 2.4 Transformatörlerde Verim

Transformatörlerde verim, diğer elektrik makinelerinde olduğu gibi, alınan gücün verilen güce oranı şeklinde bulur. Buna göre verim:

$$P_{\text{alınan}} / P_{\text{verilen}} = P_A / P_V \quad (2.9)$$

'dir.

Kayıpları nedeni ile  $P_A < P_V$  dir. Transformatörde verilen güç primer gücü alınan güç ise sekonder gücüdür. Transformatörlerin güçleri büyüdükçe verimleri artar. Transformatörlerin verimleri yük ile değişirler.

Transformatörlerde verimi şöyle açıklayabiliriz:

- Demir kaybı transformatörün anma yükünde, bakır kaybına eşit olursa, transformatörün verimi anma yükünde en büyük olur.
- Demir kaybı anma yükünde bakır kaybindan daha küçük ise transformatörün verimi, anma yükünün altındaki bir yükte en büyük değerindedir.
- Demir kaybı anma yükünde bakır kaybindan büyük ise, transformatörün verimi anma yükünün üzerinde bir yükte en büyük değerdedir.

### 2.4.1 Transformatörlerde verim hesabı

Transformatörlerde verim iki şekilde bulunur:

- a. Direkt metotla verimin bulunması;

Bu metotla daha çok küçük güçlü transformatörlerde uygulanır. Sekonder yükü sıfırdan başlanarak tam yüke kadar yavaş yavaş artırılır. Her yükte primer ve sekonderdeki wattmetreden okunan değerler alınarak

$$n = P_2 / P_1 \quad (2.10)$$

şeklinde verimi bulunuz.

- b. Endirekt metotla verimin bulunması;

Endirekt metotla verimin bulunması büyük güçlü transformatörlerde uygulanır. Bunun için boş çalışma deneyi ile, transformatörün demir kayıpları; kısa devre deneyi ile bakır

kayıpları bulunur.

## **2.5 Transformatörlerde Polarite ve Paralel Çalışma**

### **2.5.1 Polarite**

Transformatörler paralel bağlanmalarında polarite çok önemlidir. Polarite sargılarda indüklenen gerilimlerin ani yönlerini gösterir. Transformatörlerin primer ve sekonder sargılarının her iki uçları, alternatif gerilim frekansına bağlı olarak zaman zaman işaretleri değişir. Bunu için transformatörlerin hangi uçlarının hangi işareti taşıdığı bilinmesi gerekir.

### **2.5.2 Paralel çalışma**

Elektrik enerjisinin sürekliliğini sağlamak, transformatörlerin bakımı veya arıza hallerinde yedekte bulunan transformatörleri devreye alabilmek için transformatörler kendi aralarında paralel bağlanırlar. Transformatörlerin besledikleri yüklerde artma olursa ikinci veya çok sayıda transformatör birinciye paralel bağlanırlar. Aynı yerde bulunan transformatörler ortak bir bara sistemi, uzak mesafede bulunan transformatörler ise enterkonnekte sistemi ile paralel bağlanırlar.

#### **2.5.2.1 Paralel bağlama şartları**

- Transformatörlerin primer ve sekonder gerilimleri birbirine eşit olmalıdırlar.
- Transformatör normal yükündeki kısa devre gerilimleri birbirine eşit ve ya birbirine yakın olmalıdırlar.
- Transformatörlerin güçleri birbirine eşit veya yakın olmalıdırlar.
- Transformatörlerin sekonder sargılarının aynı adlı ve aynı polariteli uçlarını birbirine bağlanmalıdır.

## **2.6 Akım Transformatörleri**

Akım transformatörü, sekonder akımı primer akımı ile orantılı olan ve bu akımlar arasında yaklaşık  $0^\circ$  faz farkı bulunan bir transformatördür. Akım transformatörünün primer sargısından ölçülmesi istenen yük akımı, sekonderden ise ölçü aletleri, röle benzeri aygıtların akımları geçer.

Akım transformatörleri gerilimin yüksek veya alçak olmasına bakılmaksızın büyük akımların

ölçülmesinde kullanılır. Buna göre;

- Alçak gerilim şebekelerinde ölçü aletleri ile ölçülemeyecek kadar büyük akımların ölçülmesi için,
- Yüksek gerilim şebekelerinde de akımın güvenlik içinde ölçülmesi için yani ölçü aletini yüksek gerilimden yalıtım için akım transformatörleri kullanılır.

Akım transformatörleri primer sargıları kalın telden az sipirli, sekonder sargıları ise ince telden çok sipirli olarak sarılır. Nüveleri mantel ve çekirdek tipinde olabilir. Bu ölçme yanlışlıklarını azaltmak için önemlidir. Primer akımları 10-12,5-15-20-25-30-40-50-60-75-100-150-200-300-500-600-1000-2000 amper ve daha yüksek olabilirler. Sekonder akımları ise daha 5 amper olabilir.

Akım Transformatörlerinin kontrolünde; Primer akımı, ayarlı direnç ile yavaş yavaş arttırılır. Her durumda primer ve sekonder akımları ölçülür ve birbirlerine bölünür, dönüştürme oranı bulunur. Çıkan sonuç her yükte aynı olması gerekir.

## 2.7 Gerilim Transformatörleri

Genel olarak 600 volttan daha büyük gerilimlerin doğrudan doğruya ölçü aletleri ile ölçülmesi tehlikelidir. Çünkü ölçü aletlerini yüksek gerilimden yalıtması çok zordur. bu nedenle yüksek gerilimin ölçülmesinde gerilim transformatörleri kullanılır.

Gerilim transformatörleri yapılışı, normal iki sargılı gerilim düşürücü transformatörlere benzer. Primer ölçülmek istenen yüksek gerilim şebekesine bağlanır. Bunun için primerin çok iyi yalıtılması gerekir. Sekonder ise ölçü aletine bağlanır.

Ölçü transformatörlerine gerektiğinde sekondere birden fazla ölçü aleti bağlanır. Ancak bunların güçleri toplamı, transformatörün anma gücünden büyük olamaz. Gerilim transformatörlerinin anma güçleri 10-15-25-30-50-75-100-150-200-300-400 ve 500 VA dir. Duyarlılık sınıfları ise 0,1-0,2-0,5-1-3 ve 5 dir. Gerilim transformatörlerinde sekondere bağlanan ölçü aletlerinin dirençleri çok fazladır.

Gerilim Transformatörlerinin kontrolünde; Oto transformatör ile primer gerilimi değiştirilir. Her durumda primer ve sekonder gerilimleri ölçülür. Dönüştürme oranları hesaplanıp kontrol edilir. Sonuçlar duyarlı şekilde kontrol edilmelidir.

## 2.8 Üç Fazlı Transformatörler

Üç fazlı bir alternatif akım sisteminde aralarında  $120^\circ$  faz farkı bulunan üç ayrı faz bulunur. Bu sistem, üç adet ayrı bir fazlı transformatörün bağlama şekli olarak yıldız veya üçgen bağlanmasından oluşur. Primer ve sekonder sargıları aynı ayakta olan çekirdek tipi transformatörlerden üçünün sargısız ayakları yan yana getirilir. Sargısız üç ayağın oluşturduğu orta ayak her üç transformatörün manyetik akılarını bir araya getirir. Yıldız bağlı sistemlerde faz akımlarının yıldız noktasındaki toplamları sıfır olduğundan, orta ayaktaki manyetik akı sıfır olur ve bu ayaklar kaldırılabilir. Böylece üç adet bir fazlı transformatörden oluşan bir adet üç fazlı transformatör elde edilir. Bu düzenlemenin en önemli unsuru kullanılan transformatör özellikleri aynı olmasıdır.

## 2.9 Transformatör Etiket Plakası

Her transformatörün atmosferik koşullara dayanıklı bir maddeden yapılmış ve aşağıdaki bilgileri içeren bir etiket plakası vardır. Transformatörün etiket plakası üzerinde bulunan bilgiler, transformatörün kimliğini oluşturur ve transformatör ile ilgili detaylı bilgi elde edilmesini sağlar. Kuruluş, işletme, bakım ve laboratuvar deneyleri sırasında bu bilgilere başvurulur.

### 2.9.1 Etiket plakası bilgileri

Transformatör plakası üzerinde bulunması gereken bilgilerin neler olduğu, Türk Standartları Enstitüsü'nün Mart-1978 tarihli ve 267 sayılı standardında belirtmiştir. Buna göre etiket üzerinde bulunması gereken bilgiler şunlardır:

- Transformatörün tipi
- Standardın işaret ne numarası
- Yapımcının ticaret unvanı veya kısa adı
- Yapımcının verdiği seri numarası
- Yapım yılı
- Faz sayısı
- Anma gücü
- Anma frekansı

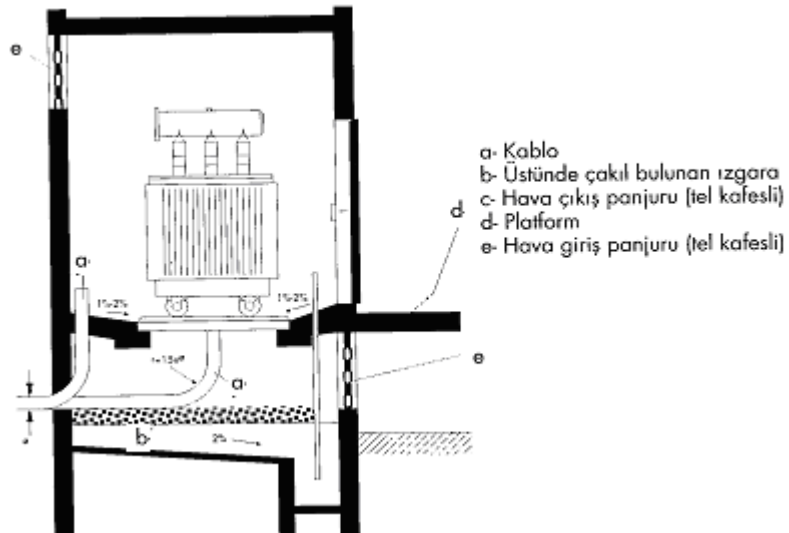
- Anma akımları
- Bağlantı simgesi
- Anma akımının kısa devre gerilimi
- Soğutma türü
- Toplam ağırlık
- Yalıtkan yağın ağırlığı

## 2.10 Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği'nde Transformatörler

### 2.10.1 Transformatör merkezleri

#### a. Dağıtım transformatörlerinin havalandırılması:

1. Transformatörlerin havalandırılması için gerekli önlemler alınmalıdır. Dağıtım transformatörlerinin havalandırılması için özel koşullar dışında (kompakt transformatör merkezleri vb.) örnek bir şekil aşağıda verilmiştir. Bu çözümün uygulanamayacağı yerlerde (özel koşullarda) cebri veya özel doğal havalandırma yapılmalıdır. Hava girişi kurangalez (Havalandırmanın yağ çukuru vasıtasıyla alttan yapılması) ile de sağlanabilir.
2. Doğal havalandırma için gerekli panjur boyutlarına örnek bir hesap şekli aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.2 Örnek bir Dağıtım Transformator Hücresi (Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği, 2006)

H: Transformator tankı yatay eksenini ile hava çıkış panjuru yatay eksenini arasındaki yükseklik farkı (m)

P: Transformatorün toplam kaybı (kW)

AL: Hava giriş çıkış panjurları alanı (m<sup>2</sup>) olmak üzere:

$$AL = 0,188P / \sqrt{h} \quad (2.10)$$

şeklinde hesaplanır. Ancak çıkış panjuru alanının hesaplanan (AL) değerinden %10 büyük olması tavsiye edilir.

3. Cebri havalandırma yapılan yerlerde termostat kontrolü gereklidir. Transformator odası ortam sıcaklığı 40°C yi geçmemelidir.
4. Panjur tel kafesleri, yabancı madde ve canlıların girmesini engellemek için en fazla 0,5x0,5 cm<sup>2</sup> 'lik gözlerden oluşmalıdır.

b. Transformator yağ çukurları

Yağ hacmi 1500 lt.'ye kadar olan yağlı transformatorler için, transformatorün bulunduğu bölümde bu yağın tümünü alabilecek büyüklükte bir yağ toplama haznesi yapılabilir yada uygun yükseklikte eşiği bulunan ve yağ geçirmeyen zemin bu amaçla kullanılabilir. Yağ hacmi 1500 lt.'den fazla olan yağlı transformatorler için transformator bölmesinin altına (Örnek şekildeki gibi) veya dışına sızdırmaz betonarme olmak koşuluyla yağ çukuru yapılacaktır. Bu çukurun galvanizli çelik ızgaranın altındaki yağ toplanan bölümünün hacmi en az transformator yağ hacmi kadar olmalı ve yağ ızgarasının üzerinde en az 5 cm. kalınlıkta çakıl bulunmalıdır.

Yapının içindeki veya dışındaki yağ çukurlarının kanalizasyon şebekesine, toprağa, akarsu, göl ve denize bağlanması kesinlikle yasaktır.

c. Transformator odaları

1. Transformatorler duvarlarla en az 60 cm mesafe olacak şekilde yerleştirilmelidir. Eğer transformatorün tüm boyu boyunca iki taraflı açılan kapı (kapaklar) var ise bu mesafe (hava sirkülasyonu sağlaması için) 30 cm'ye indirilebilir. 36kV'a kadar transformatorlerin en üst noktası ile tavan arasında en az 60 cm mesafe bulunmalıdır. Kompakt trafo merkezleri için bu bent (c.1) geçerli değildir. İlgili standartlar ve özel

şartnamelerde belirtilen koşullara göre düzenlenir.

2. Transformator odalarında döşemede kademe bulunması yasaktır. Odanın iç yüzeyleri toz yapmayacak bir malzeme ile kaplanmalıdır. Tavanlara kesinlikle boya yapılmayacaktır.
3. Transformatorlerin elektriksel bağlantıları tesadüfen temas edilmeyecek şekilde yapılacaktır.
4. Yapı içinde kullanılan transformatorlerin yüksek gerilim geçit izolatörlerinin elektriksel bağlantılarının yalıtımı, uygulama gerilimine uygun bir malzeme veya geçmeli tip ile sağlanmalıdır.
5. Transformatorler yer altına, bodrumlara ve yüksek katlı yapıların üst katlarında da tesis edilebilir. Yeraltı ve bodrumlardaki transformatorlerde, rutubet, havalandırma ve su baskınına karşı önlemler alınmalıdır. Transformatorlerin yerine konulması ve gereğinde değiştirilmesi durumlarında ağırlığı ve en büyük boyutları göz önünde bulundurulmalı ve gerekli önlemler alınmalıdır.
6. İnsanların yoğun bulunduğu paninin yaşanabileceği tüm yapılar, bodrumlar, yüksek katlı binalar, hastaneler, tiyatrolar, alış-veriş merkezleri, okullar gibi yapılar bağımsız olarak yüksek gerilimle enerjilendirildiğinde ana bina içindeki transformatorler güvenlik açısından kuru tip olmalıdır.
7. Yönetmelik değişikliğinin yürürlüğe girdiği tarihten itibaren iki yıllık geçiş süresini müteakip, primer gerilimi 36 kV'a kadar transformatorlerin (transformatorle ayrılmaz bir bütün oluşturan donanımları dahil) en büyük dıştan dışa (dış) boyutları; A (cm) transformatorün boyu, B (cm) transformatorün eni, C (cm) transformatorün yüksekliği olmak üzere;
 

gücü 630 kVA'ya kadar olan transformatorler için A = 170 cm, B = 135 cm, C = 195 cm; gücü 1600 kVA'ya kadar olan transformatorler için A = 210 cm, B = 185 cm, C = 245 cm; gücü 2500 kVA'ya kadar olan transformatorler için A = 230 cm, B = 215 cm, C = 265 cm'yi aşamaz.
8. Deprem yükleri

Transformator merkezlerinin yapımında yatay deprem yükleri göz önüne alınacaktır. Deprem bölgelerinde oluşacak deprem yükleri

$$F = C.W \quad (2.11)$$



formülü ile hesaplanacaktır. Burada:

F: Her elemanın ağırlık merkezine etki eden kuvveti (kg-kuvvet),

W: Çelik aksam veya elektrik teçhizatının kütlesi (kg-kütle),

C: 0,5 g'dir. ( $g = 9,81 \text{ m/sn}^2$  olarak yerçekimi ivmesidir)

Transformatör merkezlerindeki çelik aksam ile elektrik teçhizatı yukarıda verilen formül ile hesaplanacak kuvvetlere dayanmalıdır. Özellikle izolatörler ve bağlantı noktalarının davranışı tahkik edilmelidir.

### **2.10.2 Dağıtım transformatörlerinin bağlama (şalt) düzeni**

Her dağıtım transformatörünün alçak gerilim çıkışına termik manyetik açıcılı ana kesici konulmalıdır. Ancak sekonder kısma konulacak aşırı akım rölesinin primer taraftaki yük ayırıcısını, bir kısa devre halinde sigortanın kesme süresinden daha geç uyarması koşulu ile (primer kısma sekonder korumalı kesici konulması halinde koşulsuz) elektrik üretim-iletim-dağıtım hizmetlerini yürüten şirketler alçak gerilim kısmına ana kesici koymayabilir.

Alçak gerilim besleme hatları çıkışlarına mutlaka koruyucu düzenler ve en azından yük altında açma kapama yapabilen düzenler konulmalıdır.

### **2.10.3 Güç transformatörlerinin üst ve alt gerilim tarafındaki şebekelerden elektriksel olarak ayrılması**

Her güç transformatörü (yükseltici-indirici merkezler arası enerji iletiminde kullanılan YG/YG transformatör), primer ve sekonder taraflarına sekonder korumalı kesici ile teçhiz edilecektir. Bu kesicinin gerilimden ayrılması için gerekli düzenlemeler yapılmalıdır.

Sekonder taraftaki kesicilerin kesme gücü ve mekanik dayanımı transformatörün bağlandığı alt gerilim barası kısa devre gücüne göre boyutlandırılmalıdır. Röleli kesicilerin röleleri ve koruma devreleri, transformatörün arıza ve aşırı yük akımlarına uygun olarak seçilmiş olmalıdır.

Transformatör merkezlerinde baraya giren tüm hat fiderleri topraklanabilmelidir. Açık ve kapalı çalışan ring sistemlerde, bu topraklama düzeni bağımsız çalışan topraklama ayırıcıları olmalıdır. Bu topraklama ayırıcıları hat gerilimli iken toprak temasını önleyecek elektriksel ve/ veya mekanik kilitleme düzenlerini ihtiva etmelidir. Bu düzenler sağlanmadığı takdirde

hattın gerilimsiz olduğunun anlaşılması sağlanarak topraklama ayırıcısı kapatılmalıdır.

Kesicilerle kendi ayırıcıları arasında kilitleme düzenleri bulunmalı, bu durumda kesiciler kapalı konumda iken ayırıcılar açılıp, kapatılmamalıdır. Bu kilitleme düzenleri mekanik, elektriksel yada mekanik - elektriksel tipte olabilir.

Primer ve sekonderde bulunan kesici, ayırıcı, akım transformatörü bara kısa devre akımına göre seçilmelidir. Sekonder tarafta kullanılan aynı cihazlar transformatörün bağlandığı alt gerilim barası kısa devre akımı göz önüne alınarak seçilmelidir. Her iki halde de kesme akımının dinamik zorlamalarına karşı dayanabilmelidir.

#### **2.10.4 Aşırı yüke ve kısa devre akımlarına karşı koruma**

- a. Anma gücü 400 kVA'ya kadar (400 kVA dahil) olan dağıtım transformatörlerinin giriş tarafına sigortalı ayırıcı tesis edilerek transformatör korunmalıdır. Mümkün olabilen hallerde primerdeki sigortalı yük ayırıcısı ile sekonderdeki ana şalter arasında kilitleme düzeni sağlanmalıdır. Anma gücü 400 kVA'dan büyük dağıtım transformatörlerinin besleme tarafında röleli bir kesici kullanılarak transformatör kısa devre ve aşırı yüke karşı bütün kutuplarında korunabileceği gibi, anma gücü 1600 kVA'ya kadar (1600 KVA dahil) olan dağıtım trafolarında kısa devre kesme gücü uygun sigortalar ile donatılmış sigortalı yük ayırıcısı bileşik cihazları da kullanılabilir. Kısa devre akımlarına karşı koruma bulunmayan sadece yük akımının açılıp kapatıldığı yerlerde, uygun anma akımı ve kısa süreli dayanma akımı özelliklerinde yük ayırıcıları kullanılabilir.
- b. 36 kV kademesine kadar trafo merkezlerinde, gerilim transformatörleri baraya sigortalı ayırıcı üzerinden bağlanmalıdır. Ölçü transformatörlerinin sınıfları, enerji ölçüm için akım transformatörlerinde 0,5, gerilim transformatörlerinde 1, koruma için her ikisinde en az 3 sınıfı olacaktır. Enerji ölçümü dışındaki ölçü aletleri için ölçü transformatörleri 1 sınıfı olmalıdır. Bu konuda ilgili elektrik şirketlerinin kurallarına da uyulmalıdır. 24 kV'un üstündeki gerilimlerde, 36 kV'luk sistemlerde gerilim ölçü transformatörlerinde bağlantı faz-toprak arası olacaktır.
- c. Bir transformatör merkezinden çıkan alçak ve yüksek gerilim hatları aşırı akıma karşı ayrı ayrı korunmalıdır.

#### **2.10.5 Deney yerleri ve laboratuvarlara ilişkin hükümler**

Deney yerleri ve laboratuvarlar, öteki bölümlerden tesis olarak ayrılmalı ve bu bölümlere yalnızca özel izni olan kimseler girebilmelidir. Yazılı levhalarla ve başka özel yöntemlerle

görevlilerin korunması sağlanmalıdır.

Montaj ve yapım yerlerinde elektrik makinaları deneyleri, ancak deneyler süresince geçici olarak kullanılan tüm koruyucu düzenler yeterli olursa ve dikkatsizlikle bu yerlere yaklaşılması önlenmek kaydıyla yapılabilir.

### 3. YAĞLI TRANSFORMATÖRLER ve YALITIM YAĞI

#### 3.1 Elektrik Sistemlerinde Transformatörler

Enerji sistemlerinin en temel görevi enerjiyi güvenilirlik ve kalite seviyesinde ekonomik olarak tüketiciye sunmaktır. Bu sistemi oluşturan elamanların tek tek güvenilirliği sistemin genel güvenilirliğini tayin eder. Düzenli bir çalışma sistemi oluşturan elamanların durumu ve çevresel koşullara bağlıdır. Transformatörler, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinin en önemli ekipmanlarından biridir. Arızaların giderilmesi ve transformatörlerin iyi işletme şartlarında çalıştırılması enerji sistemlerinde çok önemlidir. Bu nedenle kesintisiz bir enerji için belirli sürelerde trafoların bakımlarının yapılması ve sürekli ölçüm ve gözetim altında tutulması gerekmektedir. Meydana gelen bir arızadan, enerji kesintisinden dolayı geçecek sürede tüketiciler büyük zarar görür ve transformatörlerin pahalı olması sistemi ekonomik açıdan sarsacaktır. Transformatörlerin arızalanması; yıldırım veya anahtarlama aşırı gerilimleri, koruyucu ekipmanların yetersizliği, aşırı yüklenme, kısa devre arızaları, yağ kaçakları, rüzgar, sis, aşırı sıcaklık gibi olumsuz hava şartları, kağıdın ve yağın yaşlanması sonucu dielektrik dayanımın zayıflaması gibi nedenlerden olmaktadır. Bu kontrollerin en önemlisi transformatörün sağlıklı çalışmasını sağlayan yağın durumudur. Kullanılan yağ, hem izolasyon yani yalıtımı sağlamalı hemde yüksek ısıyı taşıyarak soğutma görevinde bulunmalıdır. Transformatörlerdeki izolasyon yağları ve selülozik maddeler normalin üzerinde elektriksel ve ısıl strese maruz kaldıklarında parçalanırlar ve bazı karakteristik gazlar oluşur. Bu gazların dağılımı elektriksel arızanın cinsini, gaz oluşum hızı da arızanın şiddetini gösterir.

Transformatöre uygulanan bakımlar sayesinde oluşabilecek arızaların başlangıç aşamasında tespit edilmesi ile

- Enerji kesintisinin önlenmesi,
- Büyük hasarların önlenmesi,
- Arızanın ilerlemesinin önlenmesi,
- Ekonomik kayıpların azaltılması,
- Tamirat süresinin kısaltılması sağlanır.

Yeni tesis edilecek bir transformatörün düzgün çalışma süresini uzatmak ve büyük arızaları engellemek için transformatörde tesis edilecek yağın kalitesi çok önemlidir. Bir transformatör yağının standartlara uygunluğu, bu yağ üzerinde yapılan testlerden sonra anlaşılır. Kalitesiz

bir yağ kullanılması ile birlikte işletme ömründe bir kısalma ve sık sık gerçekleşen enerji kesintilerinden ötürü sisteme büyük maliyetler oluşturmaktadır. İşletmedeki transformatör yağları ve transformatörün aktif kısımlarında bulunan yağ emdirilmiş yalıtım malzemelerinin özellikleri, işletme koşullarına ve yüke bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Isınma, soğuma ve kısmi deşarjlardan ötürü yalıtım malzemesi okside olmaktadır. Hava ile temas eden sentetik yağlar ve madeni yağlar bir bozunuma uğrarlar. Bu esnada oluşan oksidasyon ile birlikte yağda bir dizi kimyasal reaksiyon oluşur ve yağda bir bozunma görülür. Kimyasal reaksiyonlarla birlikte bozunmaya uğrayan yağda asit, su, karbon içeren maddeler ve oksidasyon yükselir ve yağın akışkanlığı artar. Transformatör yağı bu etkilerden dolayı elektriksel ve kimyasal olarak bozulur, çamurlaşır ve havanın rutubetini alarak dielektrik özelliğini yitirir. Dielektrik özelliğini yitirmiş bir yağ görevini yapamaz ve transformatör sargılarının dayanımının azalmasına sebep olur.

Transformatörlerde standart donanım elemanları mevcuttur ve bu eleman yerleri belirtilmiştir.

1. Üç adet yüksek gerilim çıkış ucu
2. Dört adet alçak gerilim çıkış ucu
3. 500 KVA ve yukarı güçler için 4 adet alçak gerilim bara bağlantı pabuçları
4. Yağ genleşme deposu
  - Yağ doldurma ağzı ve kapağı
  - Yağ seviye göstergesi
  - Yağ cinsini gösteren etiket
5. Termometre cebi (315 kVA'ya kadar 1 adet, 315 kVA ve daha büyük güçler için 2 adet)
6. 315 kVA ve üstü için Buchholz rölesi takılmasına uygun sökölüp takılabilen flanşlı ara parçası
7. Aktif kısmı kapakla kaldırmak için 2 adet kaldırma halkası
8. Boşta gerilim ayar komitatörüne ait kumanda kolu ve pozisyon göstergesi
9. Topraklama ucu
10. Yağ boşaltma ve örnek alma vanası

11. 90° dönebilen tekerlekler (160 kVA'ya kadar istenirse konur.)
12. Soğutucu radyatörler
13. İsim plakası
14. 315 kVA ve üstü için Buchholz rölesi ek donanımı
15. Alkollü termometre
16. Kadranlı kontaklı termometre (0-120° C, çift kapama kontaklıdır.)
17. Hava kurutucusu

### 3.1.1 Transformatörlerde yapılan testler

Transformatörler imalat aşamasında ve işletme süresince bir takım testlere tabi tutulurlar. Trafo imal edildikten sonra hemen işletmeye verilmeyip fabrikada 3 aylık bir gözetim ve test süresi geçirir, ve bu süre transformatörün çalışma ömrü içerisine dail edilmez. Transformatörün fabrikadan kullanıcıya nakliyesi veya ilk montajı aşamasında ekipmanda olabilecek kırılma, bozulma gibi problemleri belirlemek için, transformatöre montajından sonra da aynı fabrikadaki gibi kabul testleri uygulanır. Bu testlerin ardından transformatörün 12 ay süreyle problemsiz bir şekilde çalışması enerji altında kısa süreli testleri geçmesi demektir.

İşletmedeki transformatörlere bazı testler uygulanır ve bu testler rutin ve özel tesler olarak iki kısma ayrılır.

#### a. Rutin testler

- Sargı %PF ve Kapasiteleri, (%PF: yalıtkan olarak kullanılan malzemelerde, çalışma sınırları içerisindeki gerilim ve frekansta eser miktarda dielektrik kaybı vardır. Güç faktörü ölçülmesi istenilen izole malzemeye uygulanan gerilim ile izole malzemedan alınan akım arasındaki açının kosinüsüdür. Sargının toprağa veya birbirlerine yalıtkanlıklarının akım ve kayıp değerleri Dobbble cihazı ile %PF değeri olarak tespit edilir)
- Sargı yalıtım dirençleri,
- Buşing %PF ve kapasiteleri sarım oranları,
- Sargı DC dirençleri,

- Uyarma akımları,
- Yağ elektriksel testleri,
- Yağda erimiş gaz analizi.

b. Özel testler

- Kısmi deşarj ölçümü,
- Frekans analizi,
- Vibrasyon analizi,
- Kızılötesi inceleme,
- Gerilim düzeltme ve polimerizasyon derecesi testleri.

Çalışmamızda transformatörlere uygulanan testler arasında yalıtım yağları ile ilgili yapılan testleri inceleyeceğiz.

### 3.2 Yalıtım Yağları

Yalıtım yağları, transformatör, reaktör, kapasitör, regülatör, devre kesici, elektrik kabloları ve diğer elektrik ekipmanlarında izolasyon sıvısı ve ısı transfer maddesi olarak kullanılmak üzere özel amaçla üretilen petrol kökenli madeni yağlardır. Yalıtım yağları incelendiğinde genel olarak dört temel görevi vardır:

- Soğutma
- Yalıtım
- Ark söndürme
- Ekipmandaki diğer malzemeyi koruma

Petrol kökenli bu madeni yalıtım yağları uzun yıllardan bu yana, elektrik ekipmanlarında başarıyla kullanılan önemli bir izolasyon sıvısıdır. Yalıtım yağları diğer yalıtım maddelerine göre daha ucuz olması ve yapı malzemesiyle iyi uyum sağlaması nedeniyle, günümüzde halen daha vazgeçilmez bir kullanım alanı bulmaktadır.

#### 3.2.1 Yağlar üzerinde yapılan testler

Yağ ışık altında tortusuz , temiz, şeffaf , berrak görünmelidir. Rengi mümkün olduğunca uçuk

sarı olmalıdır. Yağın 15 °C 'deki yoğunluğu 0,895 kg/dm<sup>3</sup> olmalıdır. Yalıtım yağının kalitesini ve özelliklerini belirlemek için yağ numunesi üzerinde birtakım testler yapılmaktadır. Yapılan testler sayesinde yalıtım yağı ile ilgili sağlıklı veriler elde edilmektedir. Yapılan testler 3 gruba ayrılır.

**Fiziksel Testler** (Bu testler yoğunluklu olarak üretim aşamasında yapılır)

- Viskozite,
- Akma Noktası,
- Parlama
- Yanma Noktası,
- İç Yüzey Gerilme

**Elektriksel Testler**

- Dielektrik Dayanma Gerilimi
- Gaz Oluşumu,
- Güç Faktörü,
- Direnç testleri,

**Kimyasal Testler**

- Asidite,
- Karbon Bileşimi,
- Gaz içeriği,
- Gaz Analizi,
- Sabunlaşma Sayısı,
- Su Miktarı,
- Oksidasyon Stabilitesi,
- Tortu ve Çamur,
- Bakır İçeriği



Yalıtım yağlarını tanıyıp, transformatörlerde kullanılma sebeplerini incelediğimizde, madeni yağların üç temel görevi olduğunu görürüz. Bunlar;

1. Gerilim altındaki kısımları birbirlerine ve toprağa karşı yalıtılmak.
2. Transformatör içinde oluşan kayıp ısıları soğutmak için dışarıdaki ortama (havaya) iletme.
3. Transformatör içinde bulunan dielektrik dayanımı zayıflatacak maddeleri sargılar arasından emerek dışarıya taşımak (hava, su ve katı yalıtım malzemelerin yaşlanması ile oluşan atıklar)

Transformatör yağı tarafından yukarıdaki görevler tesisin emniyetini ve ömrünü olumsuz olarak etkilemeden senelerce güvenle yerine getirmelidir. Bu nedenle transformatör yağları gerektiği şekilde hazırlanmalıdır.

Güç transformatörleri üzerinde yapılan çalışmaların sonucunda transformatörlerin devre dışı kalma oranlarının %70-%80 nini iç sargı arızaları oluşturmaktadır. Bu kısa devreler sargı yalıtımlarının bozulması sonucunda yakın sargılar arasında veya sarımların kendi üzerinde oluşmaktadır. Genel olarak bu kısa devreler sarım-sarım ve sarım-toprak arızaları olarak adlandırılmaktadır.

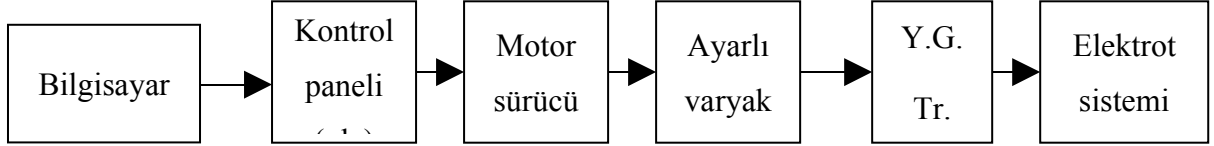
Transformatör iç arızaları iki ana gruba ayrılır. Bunlardan ilki iç kısa devre arızalarıdır ve genellikle sarım-sarım ve sarım-toprak arızaları şeklinde ortaya çıkar. Bu arızalar çok hızlı oluşur ve genellikle koruma röleleri tarafından transformatörün güç sisteminden mümkün olan en kısa sürede ayrılması istenir.

İkincil iç arızalar ise genellikle yalıtımın giderek azalması sonucu çok yavaş bir şekilde ortaya çıkar elektriksel, termal veya bazı kimyasal olayların sonucunda yalıtım malzemesinin özelliğini kaybetmesi sonucunda bu arıza akımları güç sistemi içerisinde kendini göstermeye başlar. Şayet her iki tip arıza akımları da yeterli sürede algılanamaz ise çok daha ciddi arızalara yol açarak hem enerji kalitesini hemde sistemin sürekliliğini büyük ölçüde etkilemektedir.

Servisteki transformatörlerden alınacak yağ numunelerine 6 ayda bir dielektrik yağ testi yapılmalı ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmeli. Bu sonuçlara göre bakım işleminin türü ve boyutu belirlenmelidir. Deney sonunda elde edilen sonuçlardan transformatörün sağlıklı olarak çalışmasına engel olacak veriler elde edilmiş ve yağdaki uygunsuzluk yağ testi ile tespit edilemeyecek türden ise transformatör yağına diğer testler de uygulanmalıdır.

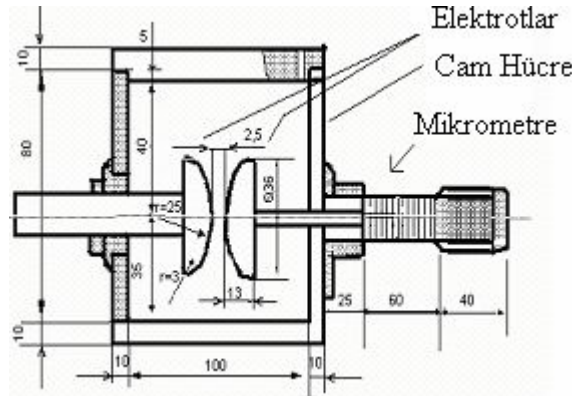
### 3.2.1.1 Transformatör yağı numunelerinin delinme dayanımı ve su içeriği testi

Bu kısımda transformatörlerden alınan yağ numunelerini delinme dayanımına ve su içeriğine göre incelenmesi gösterilecektir. Deney düzeneklerinin IEC, ASTM ve TSE standartlarının hepsini gerçekleştirecek şekilde esnek olarak tasarlanmalı. Test sistemi kontrol ünitesi, güç birimi, elektrod düzeneği olmak üzere üç ana bölümden oluşur. Şekil 3.1 de yalıtkanların test sistemi blok diyagramı gösterilmektedir. Güç sistemi tek fazlı bir transformatörden (örneğin: 100kV 5 KVA) oluşur ve giriş gerilimini değiştiren bir varyak vardır.



Şekil 3.1 Sıvı yalıtkanlar test sistem blok diyagramı (Keleş vd., 2005)

Deney hücresi 200 °C ısıya dayanıklı camdan yapılmıştır. Cam hücrede biri sabit diğeri hareketli elektrodlar yerleştirilmiştir. Elektrod sistemi Şekil 3.2’de görülmektedir. Hatalı yöntemlerle alınacak yağ numuneleri, yapılacak deneylerin geçerliliğini büyük ölçüde etkiler veya tamamen yanlış deney sonuçlarına ulaşmamızı sağlar. Numune alma oldukça önemlidir ve çeşitli standartlarda belirtilmiştir.



Şekil 3.2 Sıvı yalıtkan test hücresi elektrot sistemi (ASTM Standart)

Numune alınırken şu durumlar sağlanmalıdır;

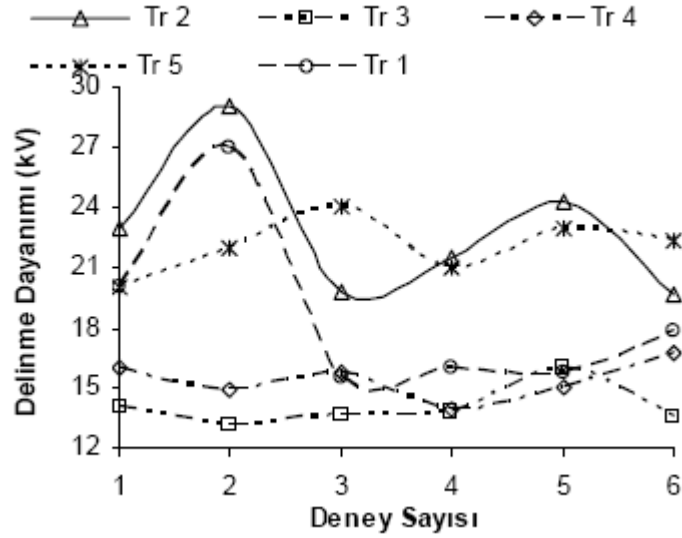
- Yağ numunesi temiz ve kuru 1,5 litrelik bir kaba alınmalı mümkünse kap 100 °C ‘ye kadar ısıtılarak kurutulmalıdır. En uygun numune kapları renkli cam, paslanmaz çelik, alüminyum şişeler ya da paslanmaz saç kaplardır.

- Örnekler mümkün olabildiğince kuru havalarda alınmalı yağın kirlenmesi ve rutubet alması önlenmelidir.
- Numune kabının içine ve yağa elle temastan kaçınılmalıdır.
- Numune alınacak vana önceden mümkün olduğunca temizlenmelidir.
- Vanayı açarak bir iki litre yağın boşa akması sağlanmalıdır.
- Kap örnek yağ ile iyice çalkalanmalıdır.
- Kap hacmi tamamen yağ ile doldurulmalıdır.
- Kabın ağzı hava almaması için iyice kapatılmalı yağın içine yabancı madde girmemesi için önlem alınmalıdır. Mümkünse kabın kapağı conta olmalıdır.
- Kap, ışığın ve sıcaklığın etkisinden uzak serin bir yerde saklanmalıdır.
- Numune üzerine trafonun markası modeli gerilimi gücü numune alınan tarih yazılmalıdır.
- Mümkün olduğunca kısa bir zamanda test edilmelidir.

**Delinme dayanımı:** Bir transformatör yağının durumu hakkında karar verebilmek için en pratik ölçme metodu delinme dayanımıdır. Delinme Gerilimi Numune alınan yağ 2,5 mm aralığında 36 mm çapında iki küresel elektrot arasındaki yağ tabakasını delen gerilime denir. Test hücresi, standartlarda olduğu gibi 36 mm çapında küresel elektrotlar arasında 2,5 mm boşluk bırakılarak ayarlanır. Test kabında hava kabarcıkları oluşmamasına dikkat edilerek numune yavaş yavaş cam hücreye doldurulur ve deney hücresine yerleştirilerek on dakika bekletilir. Sabit hızla gerilim verilerek delinme meydana geldiğinde gerilim kesilir delinme süresi ve gerilimi kaydedilir. Ardından numune beş dakika karıştırılır ve aynı teste tekrar tabi olur. Bu işlem birkaç kez tekrarlanır ve değerlerin aritmetik ortalaması alınır. Şekil 3.3 beş ayrı transformatörden alınan yağ örneklerinin delinme gerilim diyagramı vardır ve her bir yağa birkaç defa delinme gerilim testi uygulanmıştır.

Delinme gerilimi, transformatör yağı içindeki su miktarına, erimiş katı yalıtım maddelerinin yağı kirlenme derecesine bağlı olarak dayanımını yitirir. Bu yöntemle transformatör yağının durumu hakkında genel bir kaniya varmak mümkündür ancak bazı durumlarda bu yöntem yetersiz olabilir. Örneğin delinme dayanımı yüksek çıkan bir yağın yaşlanması veya kimyasal özelliklerini yitirmesi gibi.

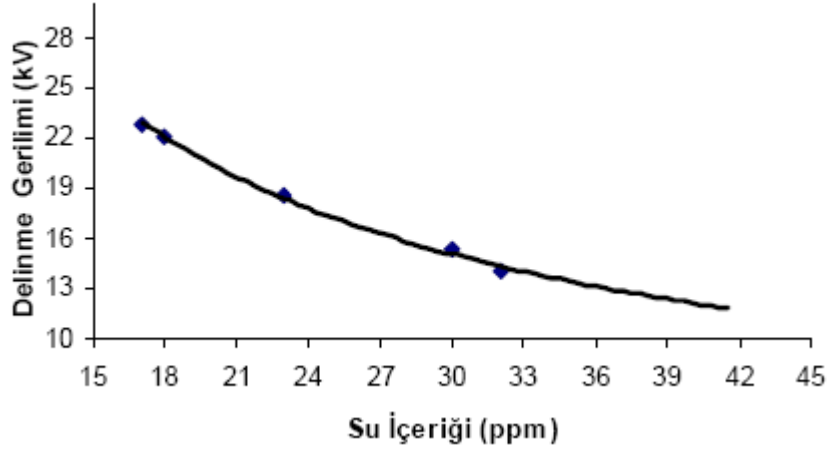
**Kapsadığı hava miktarı:** Transformatör yağlarının içinde gazlar eriyik halinde bulunabilir. Transformatör yağının içinde eriyik halinde bulunan hava , su kadar hızlı bir şekilde yağın yalıtkanlığını düşürmez. Ancak havanın içinde bulunan oksijen, yağın kimyasal olarak yaşlanmasını hızlandırır. Transformatör içinde bulunan hava serbest halde sargıların içinde dolaşıyorsa transformatör için büyük bir risk oluşturur. Bu nedenle bu havanın ve diğer gazların ilk yağ dolum işlemleri sırasında atılması gerekir. Vakumlama işlemi gaz eriyiklerin yağdan ayrışmasını çabuklaştırır.



Şekil 3.3 Numunelerin delinme dayanımı (Keleş vd., 2005)

**Kapsadığı su miktarı:** Bir yağın delinme dayanımı yağın nemliliğine bağlı olarak çok düşer. Yüksek gerilim transformatörlerine yalnızca kurutulmuş yağ doldurulabilir. Su veya nem serbest halde , erimiş, veya kimyasal olarak yağda bağlı olarak bulunabilir. Numunelerin su içeriğini tespit etmek için ise ısıya dayanıklı deney kabına numune sıvısı doldurulur ve elektronik hasas bir terazi üzerinde kayıt altına alınıp 100°C de ısıtılır ve tekrar tartılır. İki ağırlık arasındaki fark ise su içeriği olarak kabul edilir. Su içeriğinin delinme dayanımı ile değişimi Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

**Dielektrik kayıp faktörü:** Kayıp faktörü ölçümü ile yağın akışkan ve elektriksel kalitesinin değerlendirilmesinde en geçerli yöntemdir. İşletmede yaşanan yağda ölçülen bu büyüklüğün değerlerindeki değişimleri yağın ve içerideki katı yalıtım malzemelerinin değişim derecesini verirler. Bu değerlerin tespiti ile yaşlanmış bir yağın durumu hakkında daha net bilgi sahibi olunabilir.



Şekil 3.4 Numunelerin su içeriğine bağlı delinme dayanımı (IEEE Stantart C57, 2002)

**Vizkozite (Akışkanlık) :** Transformatörlerde yeterli soğutmayı gerçekleştirecek bir yağın dolanımı için kinematik vizkozitesinin düşük olması gerekir.

**Nötralizasyon Ve Sabunlaşma Sayısı :** Bu değer yağdaki serbest asitlerin miktarını gösterir. Nötralizasyon sayısının yüksek olması yağın yaşlanmasının bir kanıtıdır.

**Çamur Oluşumu :** İşletme koşullarına bağlı olarak yaşlanan ve zamanla çözülen katı yalıtkan maddeler karbonlaşan yağ molekülleri ile birleşirler dibe çökerler.

### 3.2.1.2 Yağda erimiş gazlar analizi

Yağda erimiş gaz analizi, insan sağlığı ile karşılaştırıldığı zaman, kan testine benzetilebilir. Nasılki insan kanındaki verileri inceleyerek hastalığın tespiti yapılabiliyorsa; transformatörlerde de yağda erimiş gaz analizleri yapılarak arızalar tespit edilebilir. Transformatörlerin çalışma durumlarını izlemek için uzun yıllardan beri yağda erimiş gaz analizleri bir arıza belirleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Transformatörlerde oluşan termik ve elektriksel arızalar sırasında ortaya çıkan yüksek ısılardan dolayı yağ molekülleri ve diğer katı yalıtım malzemeleri parçalanarak yeni kimyasal oluşumlar meydana gelir. Biraz daha açıklarsak, çok yüksek değerlerde elektriksel ve ısıl zorlamalarla karşı karşıya kalan izolasyon yağında delinme gerçekleşir ve bu esnada bazı gazlar oluşur. Bu gazların bileşimi incelendiğinde transformatörün içerisinde oluşan arızanın tipine ve şidetine ilişkin yorumlar yapılabilir ve uygun tanı konulur. Bununla beraber arızanın durum hakkında bilgi edinilir.

Transformatörde meydana gelen korona, ark , deşarj ve yüksek sıcaklık arızalarında yağ molekülleri parçalandığından ve bazı gazların açığa çıktığından söz etmiştik. . Bu gazlar zamanla yağ içinde çözünmeye başlar, diğer bir deyişle yağ tarafından absorbe edilir.

Erimeyen ve serbest halde kalan kısımlar buchholz rölesinde birikmeye başlar.

Gaz analizi yıllardır gaz kromatografi kullanılarak yapılmaktadır. Eriyen gazlar ekstraksiyon yöntemi ile numune yağdan çıkarılarak kalitatif ve kantitatif analizleri yapılır. Yağda Erimiş Gaz Analizi dünya çapında standart olmuştur. Bu yöntem elektrik ekipmanlar içinde kullanılan yalıtım yağlarındada yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gaz analizinin en büyük kolaylığı, çoğu ekipmanda herhangi bir zamanda, ekipmanı devre dışı bırakmadan yağ numunesinin alınabilmesidir. Bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel bu yöntemler dahada kullanışlı hale gelmiştir.

Yağda erimiş gaz analizinde çoğunlukla Hidrojen ( $H_2$ ), Metan ( $CH_4$ ), Asetilen ( $C_2H_2$ ), Etilen( $C_2H_4$ ), Etan ( $C_2H_6$ ) ve Karbonmonoksit ( $CO$ ), Karbondioksit ( $CO_2$ ), Azot ( $N_2$ ) ve Oksijen ( $O_2$ ) miktarları tespit edilir. Arızaların belirlenmesinde izolasyon yapısı ile birlikte numunelerden elde edilen gazların yoğunlukları, oranları ve toplamaları kullanılmaktadır.

Analiz sonuçları değerlendirilirken bazı yöntemler izlenir ve transformatör arızaları hakkında önemli bulgular elde edilir. Böylece arızanın türü, yeri ve şiddeti saptanabilir. Bu analizler sayesinde henüz büyük boyutlara ulaşmamış arızalar önceden tespit edilip, küçük ve ucuz maliyetler ile işletme kesilmeden mudahale edilir ve büyük çaplı arızaların önüne geçilir.

Gaz analiz sonuçlarının yorumlanması ve arızaların teşhisi için kullanılan başlıca yöntemler:

- Kılavuz Gaz Metodu,
- Oran Metodu,
- Grafikselleştirme Teknikleri ,
- Yapay Zeka tabanlı incelemeler ,

Bu yöntemlerde izolasyon yağının maruz kaldığı sıcaklığa göre gaz oluşma karakteristiklerindeki değişimleri esas alınır.

## 4. SF6 (KÜKÜRT HEKSAFLORİD) GAZI

### 4.1 SF6 Gazı ve Özellikleri

SF6 gazı, 1900'lü yıllarda Moissan ve Lebaun tarafından Paris'te ilk defa flor gazı içinde kükürdün yakılması ile elde edildi. Cooper SF6'yı izole edici gaz olarak araştırdı. 1938'de Alman Patent Grosse elektrik arkını söndürme amacıyla SF6 gazı ile ilgilendi. 1948'den itibaren flor gazı içinde 300°C'de akışkan kükürdün yakılmasıyla daha büyük miktarlarda imalat yapıldı.

SF6 gazı kimyasal ve elektriksel özelliklerinin yanında ark söndürmedeki farklı davranışı ile elektrik akımını kesen cihazlarda ve kapalı anahtarlama tesislerinde kullanılmasının yanında güç transformatörlerinde de kullanıldığı görülmüştür.

#### 4.1.1 SF6 Gazının kimyasal özelliği

SF6 gazı, alev almayan, renksiz, kokusuz, zehirli olmayan, havadan beş kat daha ağır ve kimyasal bakımdan son derece kararlı bir gazdır. SF6 gaz karışımı içerisinde %20 oksijen ve %80 saf SF6 var ise bu karışımın solunması olumsuz bir etki yaratmaz. Havadan beş kat ağır olduğundan dolayı atmosfere salındığında yere çökme eğiliminden dolayı çukur yerlere dolar.

SF6 gazı yaklaşık bir asal gaz gibi davranıp molekülünün yapısı sekiz yüzlü olarak kabul edilir. SF6 gazı 500°C ye kadar kimyasal olarak kararlıdır. SF6 'nın molekül ağırlığı 146 iken Aotun 32, Oksijenin 28'dir. Simetrik yapılu SF6 molekülünün merkezinde bir kükürt atomu vardır. Altı flor atomu ise kükürt atomu etrafındaki düzgün bir sekiz köşenin altı köşesinde yerleşmiştir. Kükürt atomunun valans elektronları ile altı flor atomu, dış yörüngelerindeki eksik elektronlarını tamamlarlar. Bağlarının hepsi doymuş olan bu yapı, kimyasal enerjinin (262 kcal/mol) belirlediği yüksek bir kararlılığa sahiptir.

#### 4.1.2 SF6 Gazının fiziksel özelliği

SF6 gazı ile ilgili yapılan araştırmalarda: havasızlığı önleyecek miktarda oksijen ortamda bulunduğu zaman hayvanlar ve insanlar üzerindeki test sonuçlarında gazın solunabildiği görülmüştür. SF6 moleküllerinin elektron tutma özellikleri çok iyidir. Bu ise gazın elektronegatif olmasından kaynaklıdır. Tutma özelliği sayesinde, delinmeye sebep olan elektron yığınlarından elektronlar çekilir ve yığılma azaltılır. Yığılma oluşumunu tetikleyen unsurlar şunlardır.

- Tahrik edilmiş atomlara sahip negatif iyon darbeleri.
- İyonlar sayesinde yayılan ışımaların absorpsiyonu
- Yüksek enerjili elektron, iyon veya molekül darbeleri
- Nötral atomlu darbeler

İyonizasyon olayları çok kompleks olduğu için, iyonizasyon katsayılarının tespiti küçük basınçta homojen alanda yapılmaktadır.

#### **SF6 gazının fiziksel özellikleri:**

Molekül Ağırlığı :146.06

Erime Noktası :-50,8°C

Yoğunluğu(sıvı): 50°C : 1,98g/ml

30°C : 1,329g/ml

Yoğunluk (gaz 1 atm/20°C) :6,164 g/ml

Kritik sıcaklık (°C) : 45,6°C

Kritik basınç (bar) : 36,557 atm

Kritik yoğunluk : 0,755 g/ml

Spesifik ısı (25°C de) : 7,0 cal mL-1 C

Genleşme Yüzeyi(- 50°Cde) : 11,63 dyn/cm

Isı İletkenliği (X 10,4): 3,3,6 cal Sec. Cm<sup>-2</sup>/°C

Viskosite (Gaz, 25°C10<sup>4</sup>) : 1-61 poise

Kaynama noktası: -63°C

Bağıl Yoğunluk (hava=1): 5.10

Buhar Basıncı (20°C): 10.62 bar

#### **4.2 Elektrik Sistemlerinde SF6 Gazı**

SF6 gazı iyi bir yalıtıcıdır ve bu özelliğini basınçla orantılı artırabilme özelliğindedir. Bu özelliğin sebebi ağır gaz moleküllerinin serbest elektronlarının elastik çarpışmada



frenlenmesidir. Gazda boşalma elektrik alanın hızlandırdığı serbest elektronlardan kaynaklanır.

Bunların yanında SF6 gazı şu özelliklerinden dolayı yaklaşık 40 yıldır elektrik şalt cihazlarında kullanılmaktadır.

- yüksek dielektrik dayanımı,
- yüksek kimyasal kararlılığı,
- ısı iletim yeteneği
- mükemmel ark söndürme performansı

Ayrıca, cihazların daha küçük boyutlarda ve dolayısı ile daha düşük maliyetlerle üretilmelerine olanak sağlamaktadır.

Günümüzde; SF6 ve vakum, elektrik şalt cihazlarında kullanılan iki modern kesme tekniğidir. SF6 gazı sahip olduğu teknik özellikler sayesinde 800kV'a kadar olan tüm orta ve yüksek gerilim sistemlerinde yalıtım ve kesme fonksiyonları için kullanılan tek tekniktir. Bu nedenle tüm elektrik şalt cihazı üreticileri tarafından tercih edilmekte ve kullanılmaktadır.

#### **4.2.1 SF6 Gazının ark söndürme yeteneği**

Normal atmosfer şartları altında, SF6 gazı havadan 2,5 kat daha fazla dielektrik dayanımına sahiptir. Şalt cihazlarında SF6 gazının basıncı normal atmosfer basıncından daha fazla olduğu için dielektrik dayanımı bu orandan çok daha fazla olmaktadır. Ark, elektromagnetik kuvvet akımının şiddetine, ortamın magnetik özelliğine ve geometrik yapıya bağlıdır. Isıl kuvvet ise arkın hacmine ve ısınan gazların yoğunluklarına bağlıdır. Molekül ayrışma sıcaklığında ortaya çıkan yüksek ısıl iletkenlik, bir soğutma düzeneği veya ark eksenindeki düzeneği dışarı atan bir ısı pompası gibi çalışır. Akım azaldıkça açığa çıkan enerjinde azalması ile arkın soğuması çok hızlı olur. SF6 gazı elektronegativitesi sayesinde mükemmel ark söndürme yeteneğine sahiptir. Gaz molekülleri serbest elektronları yakalar ve onları hızlı hareket edemeyen negatif elektronlar haline getirir. Daha detaylı incelersek; kesme işlemi sırasında oluşan ark, ortamı ısıttığından SF6 gazı ayrışır ve ortaya kükürt ve fluor atomları çıkar. Sıcaklık dahada artarsa ortamsa S+ iyonları oluşur. Açığa çıkan elektronlar flor atomları tarafından yakalanır ve Flor iyonları oluşur. İletkenliği artıran serbet elektronlar ise 4000°K den sonra belirgin olarak artmaya başlar. Akım doğal sıfırına doğru yaklaşırken, SF6, ark merkezindeki ısının hızla dışarı atılmasını sağlar. Bu sırada yüksek elektronegatif özellikteki fluor atomları, ortamdaki serbest elektronları yakalar ve ark akımı sıfıra yaklaşır. Ark

soğurken, ark göbeği tamamen kaybolmadan ark iletkenliği, serbest elektronların flor atomlarınca yakalanmalarından dolayı hemen hemen sıfır olmaktadır. Bu özellik ve bununla beraber yüksek iletkenlik basamağı SF6 gazını diğer yalıtkan maddelerden üstün kılmaktadır.

SF6 gazı kesme işlemi sonrasında ısınıp (2000°C) soğuduktan sonra dahi fluor ve kükürt iyonları SF6 gazına tekrar dönüşmek üzere birleşirler. Bu da SF6 gazının en önemli özelliklerinden biridir. Böylece, dielektrik ortam tamamen eski durumuna gelir.

SF6 gazı yüksek dielektrik dayanımı sayesinde kesme işlemi dışında ayırma işlemi için de kullanılmaktadır. Kesicilere ilave olarak SF6 gazı; ayırıcılarda, yük ayırıcılarında ve topraklama anahtarlarında kullanılmaktadır.

GIS (gaz izoleli sistem) ve RMU (ring main unit) gibi ekipmanlarda da izolasyon ortamı olarak SF6 gazı kullanılmakta olup, ekipmanın hava izoleli sistemlere göre çok daha ufak boyutlarda olmasını sağlamaktadır.

#### **4.3 SF6 Gazının Diğer Kullanım Alanları**

SF6 gazı elektrik şalt cihazları dışında da kullanım alanı bulmaktadır. Bunlar;

- maden kuyularında hava akışının yönünün saptanmasında izleme gazı olarak,
- ısıcam panellerinde iyi ses yalıtımı sağlamak ve ısınma giderlerini düşürmek amacı ile ara katman olarak,
- tıpta retina hastalıklarının tedavisinde cerrahi olarak,
- meteoroloji alanında
- metalurji uygulamalarında
- tenis toplarında, kullanılır.

#### **4.4 SF6 Gazının İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri**

SF6 gazı, sızdırmaz kutup üniteler içerisinde bulunduğu normal olarak insanlar ile teması sözkonusu değildir. SF6 gazlı ekipmanların bulunduğu tesislerde , tesisin havalandırması olmasa bile, olası kaza ve arızalarda SF6 gazı içeren cihazlar hasar görse dahi , SF6 gazı bozunma ürünlerinin konsantrasyonu IDLH (Acil Yaşam ve Sağlık Tehlikesi - bkz. IEC 1634) limitlerinden 20 - 30 kat daha az kalacağından insanlar için tehlike yaratmaz. Ayrıca SF6 gazlı cihazlar, çok az miktarda oluşan bu bozunma ürünleri için molekül süzgeçleri ile

donatılmıştır ve bu süzgeçler sayesinde tüm bozunma ürünleri emilir.

#### 4.5 SF6 Gazının Çevresel Etkileri

SF6 gazının çevreye olan etkisi üzerine çeşitli görüşler vardır. Birtakım üreticilere göre SF6 gazı doğayla dost bir kimyasaldır. Ancak bilim adamlarının yaptığı araştırmalar farklı sonuçlar vermektedir. SF6 gazının çevresel etkisi temel olarak iki ana başlık altında incelenir. Bunlar, ozon tabakasının incelmeye ve küresel ısınmadır. Aşağıda bu konular hakkındaki görüşler belirtilmiştir.

- **Ozon tabakasının incelmeye (ozon tabakasında oluşan delik):** Bazı gazlar ozon tabakasının seyrelmesine yol açar. Seyrelmeye yol açan tüm gazlar klor içerirler. SF6 gazı klor içermediğinden ozon tabakasına zararı söz konusu değildir.
- **Küresel Isınma (sera etkisi-greenhouse effect):** Sera etkisine yol açan gazlar ise dünyadan geri yansıyan infrared ışınımını emen ve bu ışınımın atmosferde sıkışmasına sebep olan gazlardır. Bu sıkışma atmosferin ısınmasına yol açar. Bu gazların başında CO2 ve su buharı gelir. SF6 gazı 1995 yılında sera etkisine yol açan gazlar içerisinde anılmaya başlandı. Ancak SF6 gazının yol açtığı etki, toplam içerisinde %0,1 oranındadır ve dolayısı ile ihmal edilebilir sınırlardadır.

##### 4.5.1 SF6 Gazı bozunma ürünleri

- kesiciler içerisindeki molekül süzgeçleri tarafından emilir.
- doğada varolan nötral ürünlere kolayca dönüştürülebilir.

Yine bu bozunma ürünlerinin işlenmesi, aktarılması ve atılmasında uygulanan ve üreticiler tarafından büyük özenle takip edilen prosedürler, bu etkinin ihmal edilebilir seviyede kalmasını sağlamaktadır.

SF6 gazlı teknoloji, elektrik üretim ve dağıtımında, en güvenilir ve ekonomik çözümlerin sunumunda birinci sırada yer almaktadır. Üreticilerin günümüzde geliştirmiş olduğu teknolojiler sayesinde, SF6 gazlı ürünlerin montajı, devreye alınması ve bakımı sırasında SF6 gazı sızıntısı imkansızdır.

Bu görüşlerin yanısıra yapılan araştırmalar sonucu SF6 gazının çevresel etkisi tespit edilmiştir. Fakat SF6 gazı üreticileri kullandıkları yüksek teknoloji sonucu bu etkilerin ortaya çıkmayacağını savunmaktadır.

SF6 gazı günümüzde küresel ısınma tartışmaları dolayısıyla gündeme gelmiştir. Dünyada küresel ısınmaya karşı oluşturulan tedbirler sonucu dünya ülkelerinin büyük bir çoğununun onayladığı Kyoto Protokolü oluşturulmuştur. Ülkemizde bu protokolün imzalanması için kampanyalar vardır.

#### 4.5.2 Kyoto protokolü\*

[Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi](#) (BMİDÇS) içinde imzalanmıştır. Bu protokolü imzalayan ülkeler, [karbon dioksit](#) ve [sera etkisine](#) neden olan diğer beş gazın salınımını azaltmaya veya bunu yapamıyorsa salınım ticareti yoluyla haklarını arttırmaya söz vermişlerdir.

Kyoto Protokolündeki amaç, “atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, iklime tehlikeli etki yapmayacak seviyelerde dengede kalmasını sağlamak”tır. Atmosfere etki yapan bu altı sera gazı; karbon dioksit, metan, nitrous oksit, sülfür heksaflorid (SF6), HFC'ler ve PFC'lerdir. Amaç bu altı sera gazının 2008-2012 arası beş yıllık ortalama salınım değerini azaltmaktır.

\* [tr.wikipedia.org/wiki/Kyoto\_Protokolü]

## 5. GIS (GAZ İZOLELİ TESİSLER)

Sanayileşmenin hız kazanması ile beraber kırsal bölgelerden şehirlere doğru nüfus göçünün gerçekleşmesi, şehirlerde hem yer sıkıntısı hemde enerji dağıtımının yetersiz bir hal alıp tekrar gözden geçirilmesi gerektiğini göstermiştir. Yüksek gerilim kademelerinin önceleri enerji iletiminde kullanılırken artık yerleşim yerlerindeki dağıtım şebekelerini beslemeye başlamıştır.

Çok hızlı artış gösteren nüfus ve kontrolü güçleşen şehirleşme dağıtım sistemleri için gerekli arsa ihtiyacının karşılanmasında zorluklar yaşanmasına sebep olmuştur. Bu sıkıntıların aşılması için dağıtım sistemleri için araştırmalar çoğalmış ve daha az yer kaplayan sistemler üzerine yoğunlaşmıştır.

Normal şartlarda şalt tesisleri hava izoleli şalt tesisleri (AIS) olarak dizayn edilir ve kullanılırdı, bu tesislerde izolasyon maddesi olarak hava kullanıldığından arsa maliyeti göz ardı edildiğinde kurulum maliyeti ucuz olurdu. Hava çok iyi bir izolasyon maddesi olmadığı için bir birine ve toprağa karşı yalıtılması gereken parçalar arasına büyük mesafeler bırakmak gereklidir. Bu tasarımlar yapılırken hava şartları göz önüne alınmalı yağmur ve sis gibi atlamalara ve koronaya sebep olabilecek durumlarda düşünülmesi.

Yer sıkıntılarını göz önüne alındığında en ideal çözümümüz gaz izolasyonu kullanılarak şalt tesisi dizaynı olduğu görülmüştür. Bu sistemlerde gaz izoleli şalt tesisleri denilir (GIS). Bu tip istasyonlarda kesici, ayırıcı, bara, gerilim trafosu, akım trafosu içerisinde basınçlı gaz bulunan metal hücreler içerisine yerleştirilmiştir. Bu uygulama sayesinde izolasyon maddesinin kalitesinden dolayı daha kompakt bir yapı oluşur ve yer kazanımı sağlanır.

### 5.1 GIS'lerin Gelişimi

Güvenli ve ekonomik güç iletimi ve dağıtımı gelecekteki elektrik güç ikmali için anahtar fonksiyonlardır. 1 kV'den 800 kV'ye kadar olan yüksek gerilimli şalt cihazı ve ekipmanları elektrik enerji ikmallerinde güvenlik elemanlarıdır ve bu nedenler çok yüksek güvenilirliğe ve erişilebilirliğe sahiptirler. Gaz izoleli şalt cihazı minimum maliyetle ve yer kazandıran dizaynıyla yüksek enerji isteklerini karşılamak üzere endüstriyel bölgelerde kullanılır. Sadece SF6 izoleli şalt cihazı bu gereklilikleri yerine getirebilir.

1960	SF6 teknolojisinin gelişimi ve en köklü araştırmaların başlaması
1964	İlk SF6'lı tek basınçlı davre kesicisinin oluşturulması.
1968	Büyük üreticiler tarafından ilk GIS in oluşturulması
1974	İlk GIL in oluşturulması (420kV)
1976	İlk 550kV luk GIS in oluşturulması
1983	Dnyaynın en büyük GIS inin Brezilyada oluşturulması
1984	Zor bir network çalışması için 550kV luk GIS in oluşturulması. (alışma akımı 8000 A 100kA kısa devre kesme akımı, 17 tane devre kesici)
1986	İlk 800kV luk GIS'in oluşturulması
1996	En küçük 123kV luk GIS in başlangıcı
1997	Akıllı kontrol, görüntüleme ve tanı başlangıcı
2000	Yeni kompakt ve hibrit çzumların başlangıcı

şalt tesislerinde SF6 gazının kullanılması ile bütün gerilimli parçalar, SF6 ile doldurulmuş, topraklanmış metal gövdeler içinde bulunmaktadır. Gerilimli parçalar ile gövdenin birbirine karşı durumu izole edici parçalarla tespit edilmiştir. Bu parçalar dairesel veya konik biçimde olabilmektedir. Bu tür parçalar ile SF6 gazı içindeki homojen alan değişiminin az bozunması için Şekil verme işlemi önem kazanır.

SF6 gazının yüksek gerilimli şalt tesislerinde ark kesici ortam olarak kullanılması ilk olarak 1968 yılında olmuştur. SF6 lı kesici o zamana kadarki en büyük akım değeri olan 100kA yı kesmek için 550kV luk şalt tesisinde kullanılmıştır. Bu gelişimde cesaret alınmış ve gnmzde daha kompakt şalt tesisleri oluşturulmuştur. GIS teknolojisi modüler bir teknolojidir ve olabildiğince az SF6 gazı ile doldurulacak Şekilde dizayn edilmiştir. GIS teknolojisinin yer altı ve yer üstü uygulamaları mevcuttur. Çizelge 5.1'de GIS tesislerinin 40 yıllık gelişimini görebiliriz.

Sahip olduğu en önemli özellikleri,

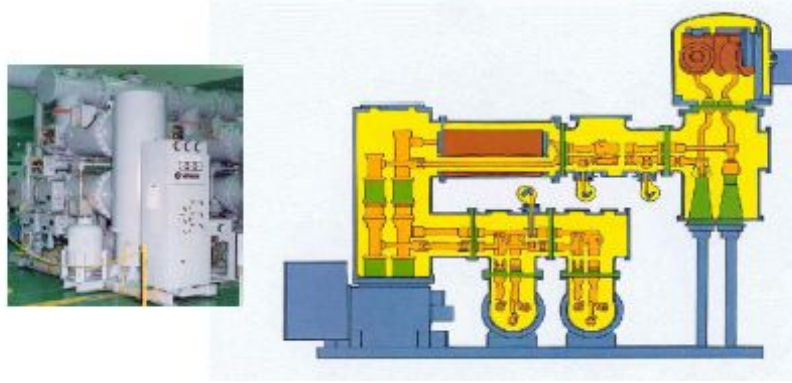
- Parçalarının önceden fabrikasyon olarak test edilir olması
- Çalışma mr 50 yılın üzerindedir.
- 25 yıldan önce çok büyük bir bakım gerektirmez
- Motorlu olarak kendini yağlayabilme özelliği

- Çok az temizlik ihtiyacı duyması
- Korozyona karşı dayanıklı
- Arıza oranı düşük
- Kötü hava şartlarına karşı dayanıklı
- Sismik dayanım
- AIS (hava izoleli şalt tesisleri) lerin %20 sinden daha az yer gereksinimi

## 5.2 GIS' lerin Yapısı

GIS tesisleri konvansiyonel tesislerde kullanılan elamanları içerir. Bunlar ayırıcılar, topraklama şalterleri, güç şalterleri, baralar, akım ve gerilim trafolarıdır. Şekil 5.1'de üç fazlı 72,5-170kV luk bir GIS in klasik kesit görünüşünü gösterilmektedir.

Boru şeklinde elemanlardan inşa edilen metalik kapsülleme, gerilim altındaki bütün parçaları çepre çevre sarar. Yüksek gerilim altındaki parçalar döküm reçine izallatörler tarafından taşınırlar. İzallatörler bölme izallatörleri olarakta tertiplenirler. Bunlar tesisi birbirine karşı ayrı gaz hacimlerine bölerler. Bakım ve kontrollerde bu özellik büyük kolaylıklar sağlar.

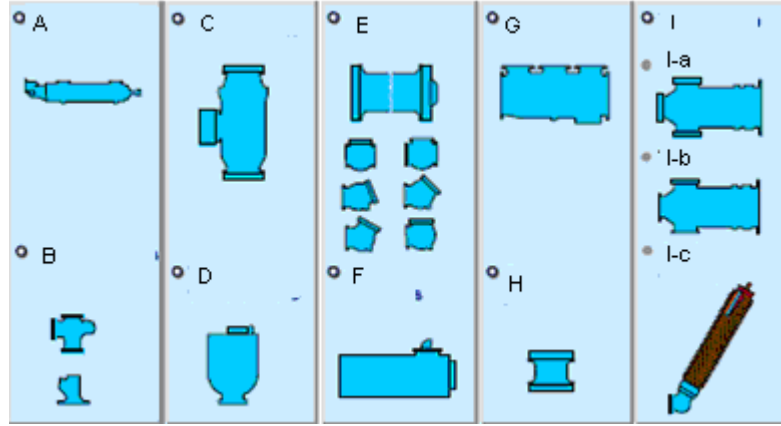


Şekil 5.1 Üç fazlı 72,5-170kV luk bir GIS in klasik kesit görünüşü (Bolin P., 2006)

## 5.3 GIS Tesislerinin Tasarımı

Metal korumalı SF6 izoleli şalt tesisi (GIS) 1968'de pazardaki ilk tanıtımından itibaren uzun bir servis deneyimi vardır. SF6 nın ayrıca ark kesme ortamı ve konvansiyonel hava izoleli şalt tesislerine göre daha ekonomik olması gibi avantajları vardır.

Gaz izoleli şalt tesislerinin avantajlarından birisi kompakt tasarımı ve modüler olmasıdır. Bu standardize edilmiş modüler yapısı sayesinde çeşitli müşteri spesifikasyonlarına kolay uyum sağlar ve tüm tesis konfigürasyonlarına uyumu kolaylaştırır. Şekil 5.2’de 245 kV luk bir GIG tesisinin modüler yapısı gösterilmektedir.



A-devre kesicisi, B- ayırıcı ve toprak anahtarı, C- akım transformatörü, D- gerilim transformatörü, E-uzatma modülü, F- paratoner, G- bus-bar, H- genişleme noktası, I- sonlandırma modülleri, I-a- kablolar, I-b- transformatör, I-c-dışortam buşingi

Şekil 5.2 245kV luk bir GIS in tipik modüler yapısı

### 5.3.1 GIS Tesislerinin tasarım özellikleri

SF6’nın güç enerji beslemeleri ile kullanımını çoğunlukla gaz izoleli şalt tesisi sağlar. Dağıtım gerilim seviyesine göre çoğunlukla üç fazlı şekli kullanılır. Yüksek gerilim seviyesinde ise tek fazlı kapsüllenmiş şekli kullanılır.

Son yıllarda SF6 izoleli şalt tesisleri malzeme ve maliyeti azaltarak aynı güvenlik seviyesinde yapılması amacıyla gelişmektedir. Bu gelişimin ana basamakları şunlardır:

- Devre kesici teknolojinin gelişimini, kesme yeteneğini artırmadan kesme ünitesi sayısını azaltarak sağlamıştır.
- Tesisin yüzeyini ve hacmini küçültebilmek için alüminyum döküm teknolojisinin gelişmesi
- Yüksek kalite standartlarında bilgisayarlı üretim teknolojilerinin ve test ekipmanlarının gelişimi
- Bir gaz kompartmanında ayırıcı ve topraklama anahtarı gibi birçok özelliği olan entegre komponent tasarımı



- Bakım faaliyetlerini ertelemek için akıllı izleme ve tespit parçalarının kullanımı

Sonuç olarak eski ekipmanlara göre daha üstün özellikleri olan kompakt şalt tesisi tasarımları gelişmiştir ve aşağıdaki özellikleri içerir:

- Hava izoleli şalt tesislerine göre %98 oranında ara boşlukların azalması
- SF6 hacminde %75 azalma
- Sızdırmaz ve test edilmiş olan 245kV'a kadar olan ünitelerin gelişimi
- Kompaktman ve yıl başına %0.5den daha az akıntı.

Gaz izoleli transformatörlerin konsarvatöre ihtiyaç duymamalarından dolayı transformatör odalarının boyutları azalmıştır. Bunun yanında yanmaz ve patlamaz olmasından ötürü yangın koruma sistemleride bu odalardan çıkartılmıştır. Böylelikle gaz izoleli transformatörler, gaz izoleli shunt reaktörler, GIS ve kontrol panelleri bir odada toplanır ve bu oda tamamen SF6 gazı ile izole edilmiş bir şalt tesisi halini alır. Aşağıdaki Şekil 5.3'te bu tesis görülebilir.



Şekil 5.3 Tamamen gaz izoleli bir tesis (Toshiba)

#### 5.4 GIS Tekniğinin Seçiminde Dikkat Edilen Kriterler

- GIS tesisleri kirlenmeye karşı duyarsızdır.
- Günümüzde çevre korunmasına ilişkin duyarlılıklar fazladır, bir kısım Gaz izoleli sistemlerin çevreye zararsız olduğunu vurgularken diğer bir kısım bunun tersini iddia eder.

- Ark oluşması ve herhangi bir cihazın patlaması esnasında herhangi bir yangın riski yoktur. GIS tesislerinde gaz izoleli transformatörler yerine yağlı transformatörlerde kullanılabildiği için bir bölmeyle ayrılırlar. Böylece yağlı güç transformatörleri mümkün olduğunca sistemden izole edilir.
- GIS tesisleri hava izoleli şalt tesislerine göre yaklaşık 10 kat daha küçüktür dolayısı ile GIS lerin binaların alt kısımlarına dahi kurulumu mümkündür. Arsa maliyeti düşünülmez ise GIS ler AIS lere göre daha pahalıdır ancak onda birlik bir alana ihtiyaç duyar.

### **5.5 GIS Tesislerinin Kurulumunun Tercih Edildiği Durumlar**

- Yerleşim alanları ve endüstriyel bölgelerde yer ve kirlenme sorunları olduğundan önemlidir
- Dağlık ve yüksek bölgelerde yer sorunu, yükseklik ve hava şartlarından ötürü
- Sahil bölgelerinde tuz ile ilgili çıkan sorunlardan kaynaklı GIS tercih edilir.
- Yeraltı şalt merkezlerinde
- Estetiğin önemli olduğu noktalarda
- Mobil şalt merkez uygulamalarında
- Stratejik olarak düşünülen merkezlerde kullanılır.

## 6. SF6 GAZLI TRANSFORMATÖRLER

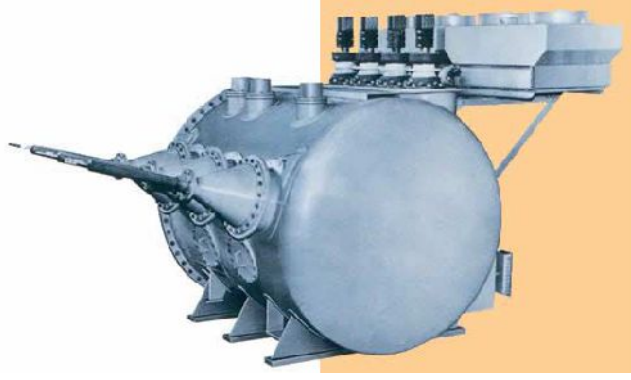
Gelişen endüstri, ticaret ve yaşam alanlarıyla beraber şehirlerde daha çok boş alana ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Aynı zamanda şehir yapılaşması, kamu yapılarının, trafiğin, yeraltı alışveriş merkezlerinin, binaların içinde bulunduğu bir alan olarak büyür ve kompleks bir hal alır. Hergün gelişen bu tesisler günlük hayatı kolaylaştıracağından ve endüstriyel ve ticari hayatın çoğalması ile beraber bu tesislere daha fazla ihtiyaç duyulacağından, sayıları artacak ve kaplayacağı alanlar genişleyecektir.

Diğer yandan, bu tesislerde büyük çaplı yangınlara sebep olan kazalar ve diğer sorunlar oluşabilmektedir, bu da toplumda daha iyi bir kaza ve yangın önleme sisteminin oluşturulması gerekliliğini zorunlu kılmaktadır. Gelişmekte olan inşaat sektörü insanlara daha fazla istihdam sağlamaktadır ve her geçen gün daha çok insan bu işletmelerde çalışmaktadır. Dolayısıyla gerekli iş güvenliğini sağlamak amacıyla yangın önleme sistemlerinin geliştirilmesi gereği ortaya çıkmaktadır.

Bu amacı başarmak için, çeşitli yangınlara sebep olabilecek modern yangın koruma sistemleri yapılandırılmalıdır. Aynı zamanda yangına sebebiyet veren nedenler ortadan kaldırılmalıdır. SF6 gaz izoleli transformatörleri şehir içi işletmelerinde güç iletim sistemlerinin alev almamasını garanti edecek şekilde dizayn edilmiştir. İzolasyon için yağ kullanılmadığından dolayı bu transformatörler yeni montaj işleri veya sistem operasyonu sırasında yapıları yağ kontaminasyonundan korur. Diğer bir deyişle, SF6 gaz izoleli transformatörler “alev almayan ekipman” olarak güç sistemlerinde yangın önleyici ve polüsyonun engellenmesini sağlamaktadır.

Artan nüfus ve gelişen sanayi sonucunda, Japon yerleşim merkezlerinde büyük bir elektrik ihtiyacı olduğundan Doğu Asya ülkelerinde gaz izoleli transformatörlerle ilgili hızlı gelişmeler olmuştur. Zamanla yer sorunu yaşanacağından dolayı sistemin küçültülerek ihtiyaçlara cevap verebilmesi için araştırmalar yapılmıştır. Gaz izoleli transformatörlere talep özellikle Japonya, Honk Kong ve Çin’de hızlı bir şekilde artmıştır. Bu bölgelerde 10 000’den fazla ünite ve 275kV-300MVA’e kadar gaz izoleli transformatör kurulmuştur. İlk gaz izoleli transformatör 1967 yılında Japonya’da kullanılmıştır. Şekil 6.1’de ilk gaz izoleli transformatör verilmiştir.\*

\* [Structural Features of Gas Insulated Transformers, K. Toda]



Şekil 6.1 Japonyada kullanılan ilk SF6 gaz izoleli transformatör, Toshiba

SF6 gaz izoleli transformatörlerin 1967 yılında Japonyadaki ilk uygulanmasından bu yana (dört ünite 66kV-3000kVA), üretici firmalar SF6 gazının alev almayan ve çevreyle dost özelliklerinden dolayı bu tür transformatörlerle ilgili geniş bir öngöründe bulunmuştur. O günden günümüze, sürekli araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde bulunan Toshiba edindiği tecrübeler ile yüksek kapasiteli gaz izoleli transformatörleri geliştirmiştir (Ör/ 77kV-20MVA'lık iki ünite). SF6 gaz izoleli transformatörler alev almama, izolasyon etkisi ve güvenliği ile karakterize olmuştur. Diğer yandan SF6 gaz izoleli kesiciler, geliştirilmiş SF6 gazlı uygulama teknikleriyle birleştirilmiştir. Bu transformatörlerin ve kesicilerin kombinasyonunu adapte etmiş olan tamamen gaz izoleli dağıtım merkezleri (GIS), bakım/tetkik, kaza önleme ve güvenliğin sağlanması için kolaylıklar sağlamıştır. Aynı zamanda, bu tip dağıtım merkezleri çevre kirliliğinin engellemesi, çevresel şartlara direnç veya uygulama alanlarının daraltılması için idealdir. Bu tip dağıtım merkezlerinin gelecekteki trendleri yönlendirmesi beklenmektedir.\*

Japon elektrik şirketlerinin yaptıkları çalışmalar sonucunda yeraltı veya dahili dağıtım merkezlerinde gas izoleli transformatörlerler (GIT) ile gaz izoleli şalt tesisinin birlikte uygulanmasının en iyi çözüm olacağı kanısına varmışlardır.

22/33kV ve 66/77 kV'ın yanısıra 275kV tipi GIT de yer altı veya dahili dağıtım merkezlerine uygulanabilir durumdadır. Japonya'da elektrik şirketlerine ait 100'den fazla ünite ve 6000MVA GIT ler çok iyi performansla çalışmaktadır. \*\*

\*[Toshiba corporation energy system group]

\*\* [Application of Gas Insulated Transformers to Underground Substation in Japan]

Şekil 6.2 SF6 Gazlı transformatörün yapısal şekli(Toda, 2002)

### 6.1 SF6 Gazlı Transformatörlerin En Temel Özellikleri

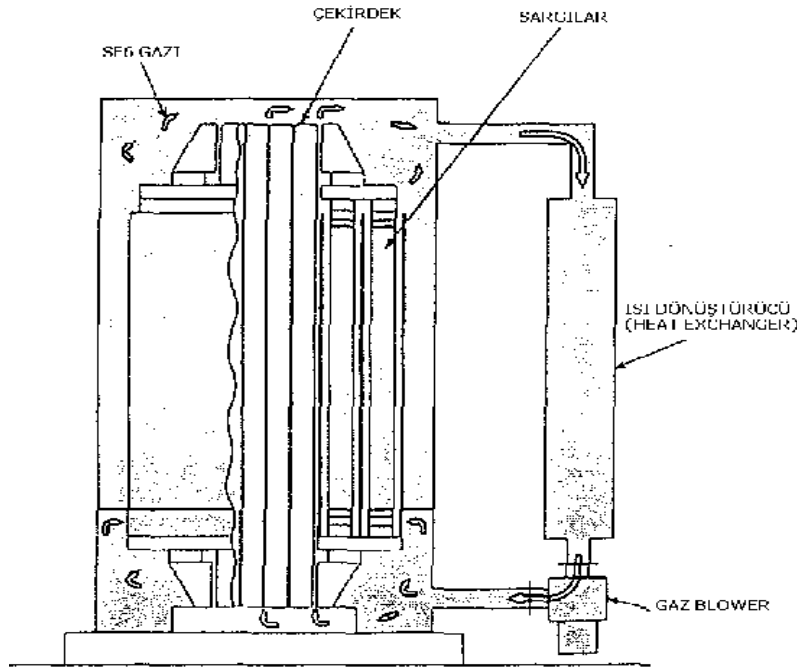
- **Alev almazlık:** gaz izoleli transformatörler SF6 gazını izolasyon ve soğutma ortamı olarak kullanır böylece yangın koruma ekipmanları transformatör odalarından taşınabilir.
- **Tank patlama özelliğinin olmaması:** içsel hatalardan kaynaklı basınç artışları gaz özelliğinden dolayı abzorbe edilebilir.
- **Kompakt yapı:** konservatör ve basınç önleme cihazlarının gerekli olmamasından dolayı transformatör odalarının yüksekliğinde ciddi bir azalma olur.
- **Kolay kurulum:** yağ veya diğer izolasyon görevi gören akışkanların uygulanması gerekmediği için kolay bir kurulumu olur.
- **Kolay bakım ve onarım:** periyodik araştırmalarda yalnızca SF6 gazının basıncı incelenebilir.

Bundan sonraki bölümlerimizde detaylı olarak SF6 gazlı transformatörlerin yağlı transformatörlerle karşılaştırılmasını inceleyeceğiz.

## 7. GAZ İZOLELİ TRANSFORMATÖRLERİN ÖZELLİKLERİNİN YAĞ İZOLELİ TRANSFORMATÖRLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

### 7.1 Yağlı Transformatörlerle Karşılaştırıldığında Gaz İzoleli Transformatörlerin Yapısal Özellikleri

Yağlı transformatörlerin tersine gaz izoleli transformatörlerde izolasyon ve soğutma için SF6 gazı kullanılır. Bu yüzden yapısal olarak yağlı transformatörlere benzerler. Şekil 7.1 gaz izoleli bir transformatörün yapısını gösterir.



Şekil 7.1 Gaz İzoleli Transformatörün Yapısı (Togawa vd., 1995)

Gaz izoleli transformatörlerin bir kaç türü vardır ancak günümüzde geniş olarak gaz soğutmalı ve gaz izoleli türleri kullanılmaktadır.

#### 7.1.1 İzolasyon ve soğutma ortamı

Gaz izoleli transformatörlerin çoğunda izolasyon ve soğutma operasyonu için SF6 gazı kullanılır çünkü mükemmel bir dielektriğe, termal kararlılığa, kimyasal kararlılığa ve alev almayan özelliğe sahiptir. GIS'de kullanılan izolasyon gazı ile aynıdır. SF6'nın dielektrik dayanımı aynı basınç şartları altında havanınkinden iki-üç kat daha büyüktür ve 2-3 atm'de izolasyon yağı ile karşılaştırılabilir. SF6 gazı renksiz, kokusuz ve zehirli değildir. Transformatörlerde metalik parçalar ve nem olduğu zaman 150°C'nin altında ayrışma olmaz.

Isıya dayanıklı olduğundan dolayı izolasyon yağına göre daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Soğutma kapasitesinin izolasyon yağıyla karşılaştırılabilir olabilmesi için gazın basıncının artırılarak güç altında sirküle edilmesi gereklidir.

### **7.1.2 Çekirdek**

Gaz izoleli transformatörün çekirdek yapısıyla yağlı transformatörlerin çekirdek yapısı aynıdır. Gaz izoleli transformatörlerdeki soğutma kanalları yağlı transformatörlerindeki oranla soğutma karakteristiklerinden kaynaklı daha çoktur.

### **7.1.3 Sargılar**

SF6 gazının darbe oranı (yıldırım darbe gerilimi ile AC gerilim arasındaki dielektrik oran) izolasyon yağından küçüktür. İzolasyon tasarımının yıldırım darbe dayanım gerilimine göre tasarlanmasına önem verilmiştir. 66kV ve üzerindeki gerilim sınıfları için, yıldırım dabe varlığında iyi bir potansiyel dağıtımı olan ara sargılar kullanılır.

### **7.1.4 Sargı iletken kaplamaları**

İletken olarak kullanılan bakır tellerde kaplama olarak, yağlı transformatörlerdeki izolasyon kağıdı yerine plastik film kullanılır. Bunun sebebi, yüksek hava sıkıştırılmalı film elemanları, gaz içerisinde yüksek izolasyon mukavemetine sahiptir. En çok kullanılan film türü polyethlene terephthalate (PET) dir. Bu film yüksek mekanik mukavemet yanında dielektrik ve ısı mukavemetine de sahiptir, aynı zamanda endüstriyel malzemelerde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunun yanısıra polyphenilene sulfide (PPS) gibi içerisinde yeni polimerik materyaller bulunduran ve aromatik polyamide fiber prosesi ile üretilen aramid kağıdı kullanılmaktadır.

PET filmi yağlı transformatörlerde kullanılan izolasyon kağıdından daha yüksek sıcaklıklarda kullanılabilir. Yağ emdirilmiş kağıtlarda izin verilen sıcaklık derecesi 105 °C olduğu halde, plastik filmlerde bu değer 120-180 °C dir ve gaz izoleli tranformatörlerin sargıları için izin verilen en yüksek sıcaklık sınırı yağlı transformatörlere göre daha yüksektir.

### **7.1.5 Konservator**

Yağlı transformatörlerde sıcaklık değişiklikleri ile beraber izolasyon yağının hacminde değişiklikler oluşur, bu değişiklikleri abzorbe edebilmek için konservatorlere ihtiyaç duyulur. Gaz izoleli transformatörler konservatore ihtiyaç duymaz çünkü SF6 gazı sıcaklık ile genleşir ve sıkışır fakat bu durum basınç değişiklikleri ile abzorbe edilir. Dolayısıyla SF6 gazlı

transformatörler tankında ek bir konservatöre gerek duyulmaz.

### 7.1.6 Tank gaz basıncı

Gaz basıncı ne kadar fazla olursa, o kadar iyi izolasyon ve soğutma karakteristiği elde edilir. Fakat bu durum birtakım zorlukları beraberinde getirir çünkü yüksek basınç demek yüksek basınca dirençli, mukavemeti sağlam bir tank ve soğutucu ihtiyacı demektir, bu da tankda fazla ağırlık ve şekilsel değişikliğe sebep olur. Genellikle gaz basıncı (20 °C de); düşük gaz basınçlı modeller için 0,12-0,14Mpa'dır ve yüksek gaz basınçlı modeller için 0,35-0,4Mpa'dır. Düşük gaz basınçlı modeller için yağlı transformatörlerdeki gibi kare tanklar kullanılır, yüksek basınçlı modeller için ise oval veya silindirik tanklar kullanılır. Her ülke için izin verilen basınç değerleri farklılık gösterir ve bu durum seçilecek tank için gözönünde bulundurulmalıdır.

### 7.1.7 Soğutma metotları ve soğutucular

SF6 gazının soğutma yeteneği izolasyon yağından düşüktür. SF6 gazlı transformatörler ile yağlı transformatörlerin soğutma özellikleri ile karşılaştırılabilir bir sonuç elde edilebilmesi için SF6 gazlı transformatörlerde büyük hacimde gaz dolaştırılmalıdır. Bu amaç için bir gaz devre ünitesi kullanılmalıdır ve bu üniteyede "gaz blower" denir. Dolaşım oranı kuvvetlendirilmiş-yağ-soğutma-tipli (forced-oil-cooled-type) yağlı transformatörler ile karşılaştırıldığında defalarca kat daha fazla olduğu görülür. Bunun yanı sıra gas blower, yağ pompasından daha büyüktür. Çünkü gaz blower kullanan kuvvetlendirilmiş-gaz-soğutma-tipli gaz izoleli transformatörler kendinden soğutmalı tiplerden ağırlıkça hafif ve sıkışık yapıdadır.

Birçok 1000kVA sınıfındaki yağlı transformatörlerin kendinden soğutmalı tipte olmasına rağmen gaz izoleli transformatörler kullanılır.

Diğer yandan, yedek ünite kullanmayan, küçük kendinden soğutmalı transformatörler için büyük bir talep vardır ve 30 MVA ya kadar olan modeller pratik hale getirilmiştir. Kendinden soğutmalı tipler kuvvetlendirilmiş gaz soğutmalı tiplerden daha hacimli ve ağır olmasına rağmen yedek ünitelerde kayıp olmaması ve daha az bakım istemesinden dolayı daha faydalıdır. Gürültülü çalışma istenmeyen yerlerde gürültüsüz gaz blowerli kendinden soğutmalı tipler daha avantajlıdır.

Gaz izoleli transformatörlerde farklı tipte birçok soğutucu vardır. Bunlar;

- gaz-hava radyatörleri,



- gaz-hava üniteli soğutucular
- gaz-su üniteli soğutuculardır.

## **7.2 Gaz İzoleli Transformator Uygulamalarının Avantajları**

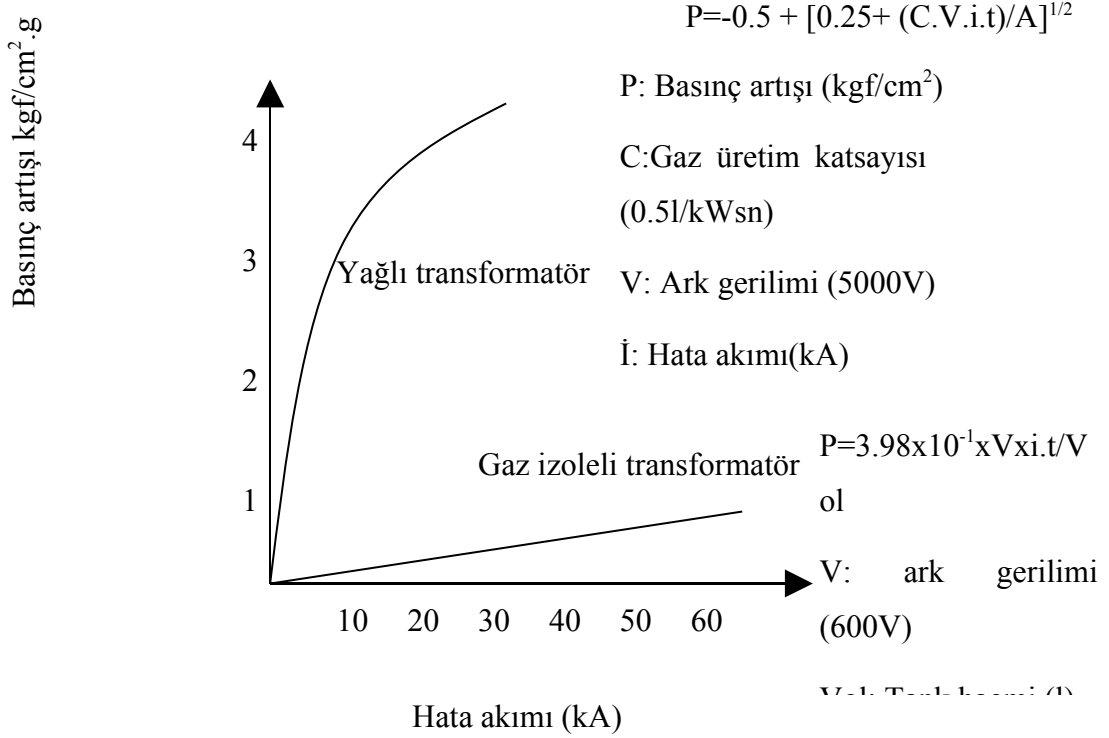
Gaz izoleli transformatorlerde izolasyon ve soğutma ortamı için asal SF6 gazı kullanılmasının şu avantajları vardır;

### **7.2.1 Alev almaz ve patlamaz**

Alev almayan SF6 gazı ile doldurulduğu için transformator alev almaz. Alev almamasından dolayı yangın söndürme işlemleri basitleştirilebilir ve yağlı transformatorlerin her ünitesi için gerekli olan ara duvar elimine edilebilir böylece dağıtım merkezinin zemin boşluğunun daha verimli kullanılmasına imkan verilir. Bunlar GIT'in en önemli özelliklerinden biridir. Bu özelliği sayesinde dağıtım merkezleri; ticari komplekslerin, ofislerin, alışveriş merkezlerinin, parkların ve yerleşim merkezlerinin altına inşaa edilebilir. Bu sistemlerde teorik olarak yangın ihtimali olmasa da bir yangın önleme sistemi kurulur ancak maliyetleri çok daha az olur.

Gaz izoleli transformatorlerin GIS ile kombine edilmesi toplam gaz izolasyonuna bağlı olarak bütün dağıtım merkezine alev almaz özellik kazandırır.

Eğer içeride bir ark kazası oluşursa, iç basınçtaki artış yağlı transformatorlere göre SF6 gazının sıkıştırılabilir özeliğe olmasından dolayı daha küçüktür. Şekil 7.2, 300MVA lı gaz izoleli bir transformatorde meydana gelen iç topraklama hatası sonucu hesaplanmış basınç artışını gösterir. 40kA lık hata akımı ile tank basıncı 80ms den sonra tank mukavemeti için düşük bir değer olan 0.2 Mpa ya yükselir. Bu yüzden gaz izoleli transformatorü herhangi bir basınç hafifletme cihazı ile kullanmaya gerek yoktur.



Şekil 7.2 Hata anındaki tank basınç artışı (Togawa vd., 1995)

### 7.2.2 Kolay bakım ve kontrol

Gaz izoleli transformatörler aynı şartlar altında yağ izoleli transformatörler ile karşılaştırıldığında ; SF6 gazının yıpranması daha yavaştır. SF6 gazı, yağ akıntısından dolayı oluşan kirlenme problemini oluşturmaz ve on-load tap changer (yükte kademe değiştirici) için hot-line yağ temizleyicisi gerektirmez.

Transformatörler yuvalarına sıkıca bağlı olduklarından, dış hava ile teması yoktur. Böylece nem ve toz birikmesi ile oluşacak bozulma ve kontaminasyon problemlerini ortadan kaldırılır. Komponentlerin inaktif kuru SF6 gazları ile çevrenmesi izolasyon malzemesinin zamanla bozulmasını minimize eder ve transformatörün çalışma süresini uzatır.

### 7.2.3 Kolay kurulum

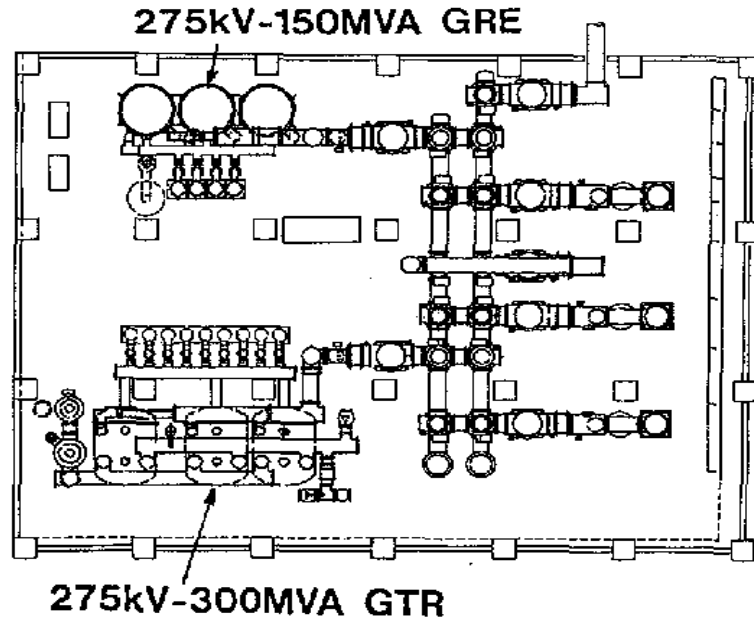
SF6 gazı hızlı bir şekilde silindirden transformatör tankına konulabilir. Kurulum sırasında çevre kirliliği yaratmaz. Kurulum az sayıda ekipman ile çabuk ve temiz yapılır.

Fabrikada seri üretilen transformatörler SF6 gazı ile dolu tanklarla nakil edilirler ve sahada vakum prosesine gerek duymazlar.

Yağ doldurulmadan önce izolasyon yağının sahada temizlenmesi gerekmektedir. Bu durumda, sahada yangın otoritelerinden onay alınmış lisanslı bir geçici depolama düzeni gereklidir. Yağlı transformatörlerin aksine, gaz izoleli ekipmanlarda temizleme prosesi gerekmez ve montaj süresi daha kısadır. Bu da aynı zamanda daha az montaj maliyeti de demektir.

#### 7.2.4 Kompakt ve hafif yapı

Yağlı transformatörlerle karşılaştırıldığında gaz izoleli transformatörlerde konservator ve basınç hafifletme cihazı bulunmaz. Bu ekipmanların kullanılmaması transformatörün boyca yüksekliğini düşürür. Yükte kademe değiştirici ve benzeri ekipmanların bakımı için boş bir alan gerekmektedir, yeraltı kurulumu gözönüne alınırsa dağıtım merkezinin dikey boyutları inşaat maliyetlerini düşürmeyi sağlayacak şekilde küçültülebilir. Şekil 7.3 yeraltı dağıtım merkezleri için 300MVA, 275kV gaz izoleli transformatörlerin yerleşim planını gösterir. Gaz izoleli transformatörlerin izolasyon ve soğutma karakteristiğindeki farklılıktan dolayı, kurulum zemin boşluğu yağlı transformatörlerinkinden fazladır, fakat alan olarak bölme duvarı yoktur, böylece alan daha verimli kullanılabilir. Kısaca, gaz izoleli transformatörlerdeki alan yağlı transformatörlere oranla daha küçüktür.



Şekil 7.3 Yer altı dağıtım merkezi (GIS) (Togawa vd., 1995)

Ayrıca SF6 gazının spesifik ağırlığı izolasyon yağından daha azdır böylece gaz izoleli transformatör yağlı transformatörden daha hafiftir.

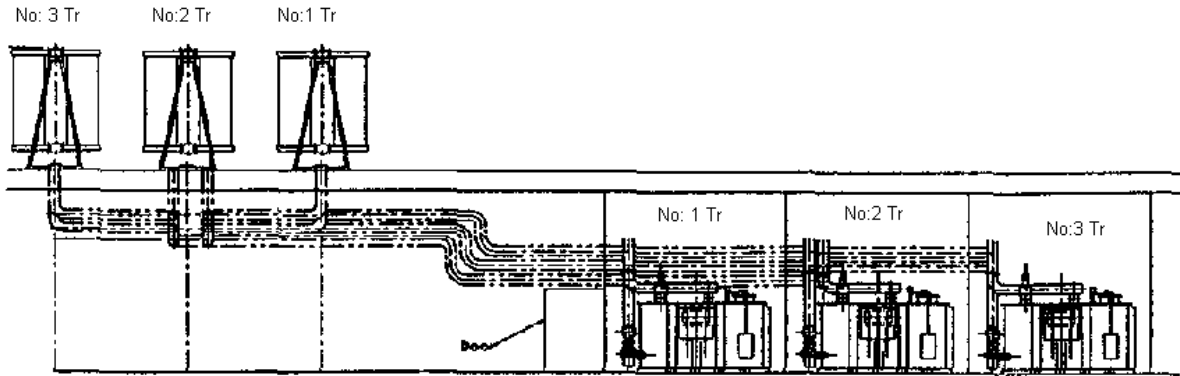
Yağlı transformatörlerden farklı olarak, gaz izoleli transformatöre bağımsız bir elaman

hücresi bağlamaya gerek yoktur. Bunlar Şekil 7.3'te gösterildiği gibi GIS ile beraber kurulabilirler çünkü gaz izoleli transformatörler alev almaz ve patlamaz bir yapıya sahiptir. Sonuç olarak ekipman odasında basit bir alan yaratılmış olur ve kompakt bir yapı elde edilir.

Gaz izoleli transformatör için “konservator” gerekli olmadığından dolayı, tavan yüksekliği 300kV sınıfı ekipman olması durumunda 2-2,5 metre düşürülebilir. Ek olarak, GIS'in yüksekliğinin gaz izoleli transformatöre eşdeğer olması durumunda ekipmanın üstündeki boşluktan faydalanılabilir. Her iki sonuç da inşaat maliyetini düşürür. Fizibilite çalışmaları gösteriyor ki, gas izoleli transformatörlerin kullanılması ile dağıtım merkezi hacmi %30, montaj maliyetleri de %15 azalır.

### 7.2.5 Yerleşim planında büyük rahatlık

Gaz izole teknolojisini dağıtım merkezi yerleşim planı için müthiş bir esnekliğe sahiptir. Önceki kısımda bahsedildiği gibi, ekipmanlar arasına bölme koymak gerekmez. Ek olarak, gas izoleli ekipmanın doğası gereği, ısı dönüştürücü ve kablo bağlantı kutusu komponentleri gerekli görünen bir yerde konumlandırılabilir.



Şekil 7.4 Gaz izoleli transformatörün ve radyatörün yerleşim planı örneği

SF6 gazının yoğunluğu izolasyon yağının 1/60 civarında olmasından ve de viskozitesinde daha düşük olmasından kaynaklı, soğutma borularında dahada az bir basınç kaybı oluşur. Bu durumda, soğutucunun transformatör gövdesinden uzağa montajını mümkün kılar. Özellikle, bu durum komponent ünitelerinin dikey ayrılıklarına izin verir; eğer kurulumda bir sınırlandırma var ise transformatörün yer altında, radyatörün yer üstünde kurulumu avantaj sağlar. Şekil 7.4'te 25MVA lık gaz izoleli transformatörün ve radyatörün yerleşim planı vardır. Radyatör transformatör gövdesinden 9 metre yüksekte, yatayda ise 50 metre uzaktadır.

### **7.2.6 Düşük gürültü**

SF6 gazının yoğunluğunun ve içerisindeki ses hızının izolasyon yağına göre düşük olmasından dolayı, çekirdekte oluşan gürültünün tanka ulaşımı daha düşüktür. Bu özelliğinden dolayı gaz izoleli transformatörler yağ izoleli transformatörlerden daha sesiz olur. Gaz beslemeli tiplerle, gaz blower önemli oranda gürültü üretir, buda bütün sistemdeki gürültünün dahada artmasına sebep olur. Düşük gürültü özellikli gaz beslemeli tiplerde, alçaltılmış rpm de çalıştırılan düşük gürültülü gaz blowerlwr kullanılır.

### **7.2.7 Temizlik**

Akıntı yapacak herhangi bir izolasyon yağı olmadığı için gaz izoleli transformatörler temizdir ve çevresel kirlilik yaratmaz.

## **7.3 İzolasyon ve Termal Tasarım Yönünden Karşılaştırılması**

Gaz izoleli transformatör tasarım teknikleri SF6 gazının soğutma ve izolasyon karakteristiklerini dengelemek içindir. Bütün bunlar gaz izoleli transformatörleri yağlı transformatörler ile eşitlemek ve performanslarını yağlı transfarmatörler seviyesine çekmek için yapılır.

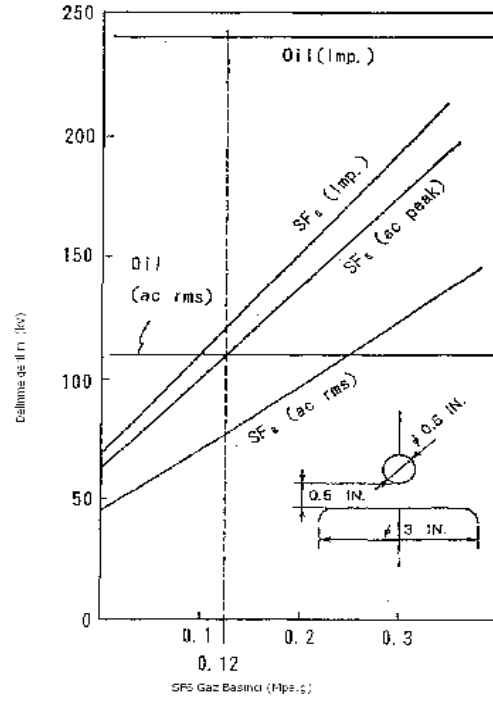
### **7.3.1 Gaz izoleli transformatörlerin izolasyon karakteristiklerinin karşılaştırılması**

#### **7.3.1.1 SF6 Gazının dielektrik mukavemeti**

Şekil 7.5' te SF6 gazının izolasyon karakteristiklerinin izolasyon yağı ile karşılaştırılması gösteriliyor. Burada gösteriliği gibi, düzenli (quasi-uniform) elektrik alandaki çıplak elektrotlar arasında, SF6 gazının dielektrik mukavemeti gaz basınç oranına göre artar ve gaz basıncı 0.3 Mpa seviyesine gelince izolasyon yağıyla karşılaştırılabilir seviyeye gelir. Böylece düşük gaz basınçlı gaz izoleli transformatörlerin yağlı transformatörlere oranla izolasyon ortamının dielektrik mukavemeti düşüktür.

#### **7.3.1.2 Darbe oranı**

Şekil 7.5'te gösterildiği gibi gaz izolasyonu ile darbe dielektrik delinme geriliminin AC delinme gerilimine oranı (darbe oranı) yağlı izolasyondan küçüktür. Diğer bir deyişle, gaz izoleli transformatörlerin iç izolasyonu özellikle darbelere karşı olan izolasyon ile tayin edilir ve AC test gerilimlerine karşı tasarımlarında yağlı transformatörlerden daha fazla tolerans sağlanır.



Şekil 7.5 SF6 gazının izolasyon karakteristiğinin izolasyon yağı ile karşılaştırılması (Togawa vd., 1995)

### 7.3.1.3 Gaz/katı bileşim izolasyonu

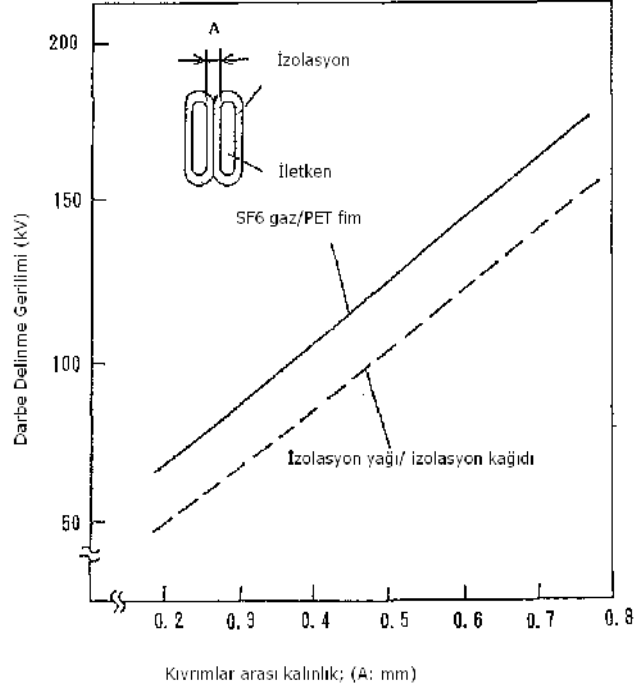
İzolasyon tasarımında ve transformatörde birçok katı izolasyon kullanılır, izolasyon SF6 gazı ve katı bileşiminden oluşan izolasyonlarla değerlendirilir. SF6'nın dielektrik sabitinin katı izolasyonun dielektrik sabitine oranı izolasyon yağı ve yağlı katı izolasyonlar arasındakinden küçüktür. Bu gaz üzerinde izolasyon yağından daha geniş bir zorlama yapar.

Özetlersek, yağ izolasyonuna oranla gaz izolasyonu zorlamalara ve transformatörlerde çok sayıda bulunabilen küçük eğrilikler ve yarıklar içeren elektrodlar gibi dielektrik delinmelere yol açabilen geniş zorlamalı alanlara bağlıdır.

## 7.3.2 İzolasyon tasarımı

### 7.3.2.1 Sargı iletkenlerine film kaplama

Böyle negatif şartlar altında alınan en etkin ölçüm sargı iletkenlerinin film kullanılarak kaplanmasıdır. Şekil 7.6' da izolasyon yağında yağlı kağıt ve SF6 da PET film kaplama dielektrik mukavemeti karşılaştırılmıştır. Çünkü PET filmin delinme mukavemeti izolasyon kağıdından daha yüksektir, SF6 daki film izolasyonun toplam dielektrik mukavemeti yüksektir.



Şekil 7.6 Yağlı kağıt ve PET filmin dielektrik karşılaştırılması (Inoue vd., 1991)

### 7.3.2.2 Lokal zorlama reduksiyonu

Sıradaki ölçümler wedge-like gaps (yarık boşluklar) ve küçük kıvrımlara sahip elektrodlar için alınmıştır.

- Katı izolasyon yapılar için SF6 gaz zorlanması düşük dielektrik sabitli metaryaller kullanılarak azaltılır.
- 66kV sınıfı veya üzerindekielerde son elektrik alanlar sargı sonlarına elektrostatik ekranlama eklenerek gevşetilir.
- Yüksek gerilim elektrik alan yakınına kurulan metal yapılar için, elektrik alan eğrilik (curvature) artırarak veya ekranlama eklenerek gevşetilir.

Karmaşık şekilli sarımlar çevresinde lokal zorlamayı hesaplamak için üç boyutlu elektrik alan hesaplama programı geliştirilip uygulanmaktadır.

## 7.4 Soğutma Tasarımı Yönünden Karşılaştırılması

### 7.4.1 Gaz soğutmasının karakteristiği

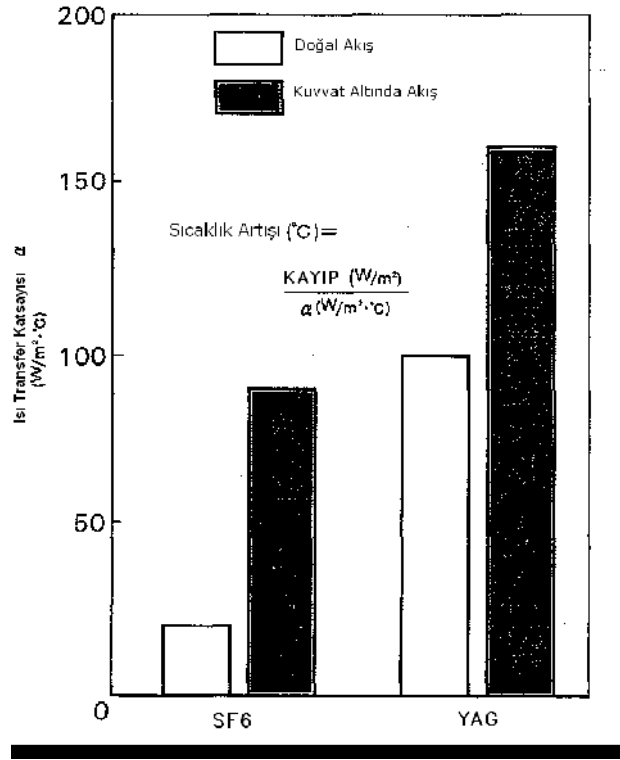
Çizelge 6.1 SF6 gazı ile izolasyon yağının soğutma karakteristiğinin karşılaştırılmasını gösteriyor. İyi bir soğutma karakteristiği için, yüksek değerde bir yoğunluk, ısıtma kapasitesi ve spesifik ısı göze alınır fakat SF6 nın bu çeşit değerleri izolasyon yağlarından küçüktür.

Çizelge 7.1 SF6 gazının ve izolasyon yağının soğutma karakteristiği

	SF6 Gazı		İzolasyon Yağı
	0 Mpa.g	0.12 Mpa.g	
<b>Yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>)</b>	6.20	13,5	890
<b>Spesifik Isı (J/kg/K)</b>	660	660	1900
<b>Isı kapasite oranı (%)</b>	0,24	0,53	100

Aynı sirkülasyon oranlı sarımlar ve SF6 arasındaki sıcaklık farklılığı ve de transformatörlerdeki gaz sıcaklık artışı izolasyon yağına göre fazladır. Şekil 7.7 de SF6 gazı ve izolasyon yağının ısı transfer oranı gösterilmekte. Doğal ısı yayımlı SF6 gazının ısı transfer oranı izolasyon yağının 1/5 i gibidir. Eğer SF6 gazının sirkülasyonu bir kuvvet altında gerçekleştirilirse, doğal ısı yayılımında her ikisinin de ısı transfer oranı karşılaştırılabilir olur. Eğer transformatörlerdeki soğutma ortamının sıcaklık artışı hesaba katılırsa, ısı transfer oranı soğutma ortamının sıcaklık artışından tayin edilen bir faktör olur. Bunun aksine, soğutma ortamının tabanındaki ve tavanındaki sıcaklık farklılığı, Çizelge 7.1' deki spesifik ısı x spesifik ağırlıktan tayin edilir ve SF6 gazının bu değeri izolasyon yağınınkinden küçüktür. Eğer sirkülasyon oranı küçük ise tabandaki ve tavandaki sıcaklık farklılığı fazladır, buda maksimum gaz sıcaklık artışının çoğalmasına sebep olur.





Şekil 7.7 SF6 Gazı ve Yağın ısı transfer katsayısı

Bu türleri, yağlı transformatörler ile karşılaştırılabilir kılmak için gaz akış oranının artışı sargılarda, çekirdekte ve soğutma kısmında gaz sirkülasyon oranının artırılması ile sağlanmalı ve gaz sıcaklık artışında azaltılması için ısı transfer oranının artırılması gereklidir.

#### 7.4.2 Gaz izoleli transformatörler için soğutma tasarımı

Gaz sirkülasyon oranını arttırmak için efektif ölçütlerden biri gaz blower kullanarak sirkülasyonu kuvvetlendirmektir. Gaz blower başına sirkülasyon oranı 20-40 m<sup>3</sup>/min dir ve genelde her transformatör için bir veya daha fazla gaz blower kullanılır. Bu tür transformatörler ile, kendinden soğumalı yağlı transformatörlerin sirkülasyon oranı 100 kat olur, Çizelge 7.1 de gösterilen karakteristiğin deavantaj olma durumu böylece giderilir. 300MVA sınıfı büyük kapasiteli gaz izoleli transformatörlerin kurulması ile SF6 gazının soğutma karakteristiği gazın çalışma basıncı artırılarak dahada geliştirilmiştir.

Kendinden soğutmalı tiplerde gaz blower yoktur, büyük bir gaz sirkülasyon oranı elde etmek için sargılardaki ve çekirdeklerdeki soğutma kanal sayısını arttırmak gereklidir veya basınç kayıplarını minimize etmek gerekir bunun için ise soğutma kanal boyutlarını arttırmak gerekir. Fakat taban ve tavan sıcaklık farklılıkları arasında bir sınır olmalıdır ve bu sebeple kendinden soğutmalı tipler 30-40MVA civarında sınırlandırılır.

Yukarıda anlatıldığı gibi gaz izoleli transformatörlerde soğutma için önemli tasarım noktalarından biri yeterli gaz sirkülasyon oranının nasıl sağlanması gerektiğidir. Kuvvetlendirilmiş sirkülasyonlu tiplerle, transformatörü gaz blowerin kapasitesi ile belirlenmiş sirkülasyon oranı ile etkin olarak soğutmak gerekir, diğer bir deyişle içsel sıcaklık dağılımını minimize etmektir. Optimal yapıların araştırılmasında, çalışmalar model testleri ve oranlı (rational) yapılarda yürütülen analitik hesaplamaları kullanır.

Sonlu (finite element) elemanlar metodu ile sınırlarda sıcaklık dağılım hesapları bölgesinde, yüksek hesaplı analitik metodlar geliştirilmiştir ve uygulanmaktadır.

## 7.5 İşletme ve Bakım Yönünden Karşılaştırılması

### 7.5.1 Gaz izoleli transformatörlerin aşırı yükte çalışması

SF6 gazının ısı kapasitesinin yağlı transformatörlerdeki izolasyon yağından küçük olmasından dolayı, gaz izoleli transformatörlerin zaman sabitesi genellikle yağlı transformatörlerden küçüktür.

Zaman sabiti ( $\tau$ )

$$\tau = C \cdot \theta_0 / W \quad (7.1)$$

burada

$$C = K_1 \cdot G_A + K_2 \cdot G_T + K_3 \cdot G_C \quad (7.2)$$

$K_1$ ,  $K_2$  ve  $K_3$  sabitlerdir,

$G_A$ : çekirdeğin ve sarımın kütlesi (kg),

$G_T$ : tankın kütlesi (kg),

$G_C$ : soğutma ortamının kütlesi (izolasyon yağının veya SF6 nın) (kg),

$\theta_0$ : oranlı (rated) yükün altında maksimum soğutma ortamı sıcaklığı(K) artışı ve

$W$ : rated yük altında toplam kayıp (kW).

Yukarıdaki denkleme göre gaz izoleli ve yağ izoleli transformatörler arasındaki fark

$$K_3 \cdot G_C \quad (6.3)$$

değeridir. Çünkü SF6 nın spesifik ağırlığı ve spesifik ısısı bu izolasyon yağlarından küçüktür,  $K_3 \cdot G_C$  değeri 1/200 oranında Çizelge 7.1 de verildiği gibi küçüktür. Çünkü gaz izoleli

transformatörler  $\theta_0$  ve  $W$  için yağ izoleli transformatörlerle karşılaştırılabilir, sonuç olarak gaz izoleli transformatörlerin zaman sabitesi aynı orandaki yağ izoleli transformatörlerden küçüktür. Gaz beslemeli tipler için, yaklaşık 1.0h, ve kendinden soğutmalı tipler için yaklaşık 1.5h dır. Küçük zaman sabitesinden dolayı, gaz izoleli transformatörlerin aşırı yük kapasitesi yağlı transformatörlerden küçüktür. Aşırı yük çalışması ile gaz izoleli transformatör oranı tayin edildiği zaman burada bahsedilen karakteristikler düşünülmelidir.

## **7.5.2 Gaz izoleli transformatörlerin işletmedeki acil durum yönünden karşılaştırılması**

### **7.5.2.1 Soğutma durması (cooler stop)**

Bazı sorunlardan veya güç hatalarından kaynaklanan sebeplerden dolayı ısı dönüştürücülerin (exchanger) veya gaz blowerlerin fanları durur ise, çalıştırılabilir kapasitesi durmuş soğutucu sayısından tayin edilebilir. Çizelge 7.2, 30 MVA gaz zorlamalı ve hava soğutmalı üniteli soğutucuları kullanan hava zorlamalı transformatörlerde soğutmanın durması durumunda (cooling stop) mümkün olan çalışma süresini göstermektedir. Eğer soğutucuların radyatörü yoksa, soğutucular durduğunda soğutma kapasitesi neredeyse sıfır olur. Bu durumlarda çalışmanın durdurulması önerilir. Aynı durum yağlı transformatörler için de geçerlidir.

Eğer transformatör birbirinden bağımsız iki veya daha fazla soğutucu sahip ise, transformatör düşük kapasite ile çalıştırılabilir. Örnek olarak, eğer iki soğutuculu transformatörün bir soğutucusunun durması halinde, yaklaşık olarak %70 lik bir yük ile işleme devam edebilir.

Eğer gaz zorlamalı ve radyatör kombineli gaz blowerli doğal hava soğutmalı modellerde gaz blower durmuş ise, soğutma doğal konveksiyon ile sağlanabilir ancak işletimde bir devamlılık isteniyorsa buda yük değerinin nominal oranlar altına çekilmesi ile mümkün olur. Kendinden soğutmalı tiplerde musade edilen kapasite seviye gaz beslemeli tiplerin %50 si civarındadır.

### **7.5.3 Gaz basınç düşümü**

Düşük gaz basınçlı tiplerde, hesaplanmış basınç yaklaşık olarak atmosfer basıncının iki katıdır. Gaz basıncı atmosfer basıncına düşse bile, normal çalışma gerilimindeki çalışma izolasyon durumuna bağlı olarak mümkündür.

Çizelge 7.2 Acil durumlarda tolare edilebilir yük oranı ve süresi (Toshiba)

	Soğutma Operasyonu				Musade Edilir Yük Oranı ve Çalışma Süresi
	Soğutucu No:1		Soğutucu No: 2		
	Fan	Gas Blower	Fan	Gas Blower	
Durum 1 Fanın Durması	x	o	o	o	%70 (devamlı)
	o	o	x	o	
	x	o	x	o	Durum 3 ün aynısı
Durum 2 Gaz Blowerin Durması	o	x	o	o	%70 (devamlı)
	o	o	o	x	
	o	x	o	x	Durum 3 ün aynısı
Durum 3 Soğutucun tamamen durması	x	x	x	x	*Kısa-zamanlı müsade edilir çalışma süresi Yük Oranı 2) Müsade edilir çalışma süresi 1.0pu .....10min 0.7pu ..... 40min 0.5pu ..... 100min *soğutucuların durması ile, devamlı bir çalışmaya izin verilmez (sadece harekete geçirmeyi içerir)
Durum 4 Soğutucunu Yarım Kapasite Çalışması	o	o	x	x	%70 (devamlı)
	x	x	o	o	

Notlar:

1. soğutucu çalışması o:çalışıyor x:duruyor
2. yük oranının soğutucunun durmasından önce ve sonra aynı olması
3. gaz izoleli transformatörlerde, fan veya gaz blower durmuş ise soğutucu üniteninde duracağı değerlendirilir.

#### 7.5.4 Gaz izoleli transformatörlerin bakım yönünden karşılaştırılması

##### 7.5.4.1 Koruyucular

Çizelge 7.3'te gaz izoleli transformatörlerin koruyucu cihazlarını yağlı transformatörlerinki ile karşılaştırmalı göstermiştir. Gennelikle aynı cihazlar her iki transformatör içinde kullanılır. Anı gaz basınç rölesi sadece gaz izoleli transformatörler içindir. Gaz izoleli

transformatörlerde, önceden anlatıldığı gibi, içsel hatalardan kaynaklı basınç artışı yağlı transformatörlerin yaklaşık 1/100 katıdır. Ani gaz basınç rölesi küçük basınç artışlarını rahatlıkla görür. Aynı zamanda, gaz blowerlerin çalışmaya başlamasında veya deprem durumunda yalnız çalışmaması için dizayn edilmiştir.

Çizelge 7.3 Gaz İzoleli Transformatörlerin Korunması (Togawa vd., 1995)

Madde	Koruyucu cihaz	
	Gaz izoleli transformatör	Yağ izoleli transformatör
Sıcaklık	Termometre (temasla)	Termometre (temasla)
Basınç artışı	Bileşik sayaç/Ani gaz basınç rölesi	Buchholtz role / Ani yağ basınç rölesi
Akıntı	Sıcaklık ayar basınç switçi	Yağ seviye sayacı
Gaz	—	Buchholtz role / gaz yakalama rölesi
Deşarj	—	Basınç azaltma rölesi

SF6 Gazlı Transformatörlerin aksesuarları ve koruma cihazları ile ilgili açıklamalar resimli olarak verilmiştir. SF6 Gazlı transformatörler üretilirken kalite kontrol sistemleri düşünülür.

- a. SF6 Gaz sıcaklık göstergesi: transformatör tankına dokunma yöntemi ile ölçüm yapar. Gaz sıcaklığı transformatör tankı içine veya dışına yerleştirilen koruma silindirindeki termometre probu ile ölçülür. Maksimum sıcaklık oluştuğunda alarm verir.



## Şekil 7.8 Gaz sıcaklık göstergesi

- b. SF6 Gaz basınç sayacı: Bu sayaç transformatör tankında bulunan basıncı ölçer. Bileşik bir sayaç tipi olup hem pozitif basıncı, hemde negatif basıncı ölçme yeteneğine sahiptir. Çalışma esnasında yüksek sınırdaki basınç seviyelerinde alarm verir.



Şekil 7.9 Gaz basınç sayacı

- c. Sıcaklık ayar basınç seviyesi: SF6 gazı ile doldurulmuş transformatör tankında sızıntı tespit edilmiştir. Transformatör tankındaki basınç, tankın içindeki veya dışındaki koruyucu silindire yerleştirilmiş basınç odacığındaki basınç ile karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, transformatördeki sıcaklıktan bağımsız olarak SF6 gaz sızıntısı tespit edilmiştir ve alarm işlemiştir.



Şekil 7.9 Sıcaklık ayar basınç siviçi

#### 7.5.4.2 Gaz analizi vasıtası ile dışsal tanı

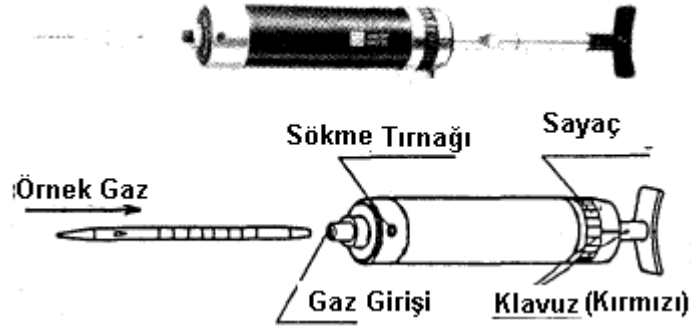
Yağlı transformatörlerde, lokal ısınmalar ve kısmi deşarlar gibi içsel problemlerin bulunması için titizlikle yapılan analizler, yağ içerisindeki gaz çözümlerinden elde edilir. Sahalarda kullanılan büyük oranda yağlı transformatörlerde meydana gelen içsel problemlerin vede bu hataların kayıt altına alınabilmesi bunun yanında analitik teknolojinin sağladığı avantajlar sayesinde bu analizleri gerçeklemek mümkündür.

Gaz izoleli transformatörlerde, gaz içerisinde ayrışık maddelerin analizi ile teorikte benzer bir tanıya izin verilir ve bu konudaki çalışmalar takip edilmektedir fakat birçok zorlukta içermektedir. Bunun sebebi SF6 gazının izolasyon yağının ayrışmaya yatkın olması gibi olmaması ve termal bir stabilitesinin olmasıdır ve bunun yanında sahada da elde edilmiş az bir hata kaydı vardır.

Gaz izoleli transformatörlerin gaz analizi ile elde edilmiş dışsal tanımlar ile ilgili çalışmalar için aşağıdaki yaklaşımlar vardır.

#### 7.5.4.3 Gaz analiz metodları

En genel SF6 gaz analizi ile ilgili en genel metod doğruluğunda temin edildiği gaz kromatografisidir. Yakalama tüpleri kullanılması ile bu model hem basitleştirilmiş hemde pratik bir hal almıştır. Şekil 7.10 yakalama tüpünü ve yakalama tüpünden gazı emen emme pompasını gösteriyor. Temelde her gaz çeşidi için bir yakalama tüpü kullanılır. Birden fazla çeşit ayrışık gazlar birkaç yakalama tüpü kullanılarak yakalanabilir.



Şekil 7.10 Ayrışık gaz yakalama tüpü

#### 7.5.4.4 İçsel problem örnekleri ve ayrışık gazlarla bağlantıları

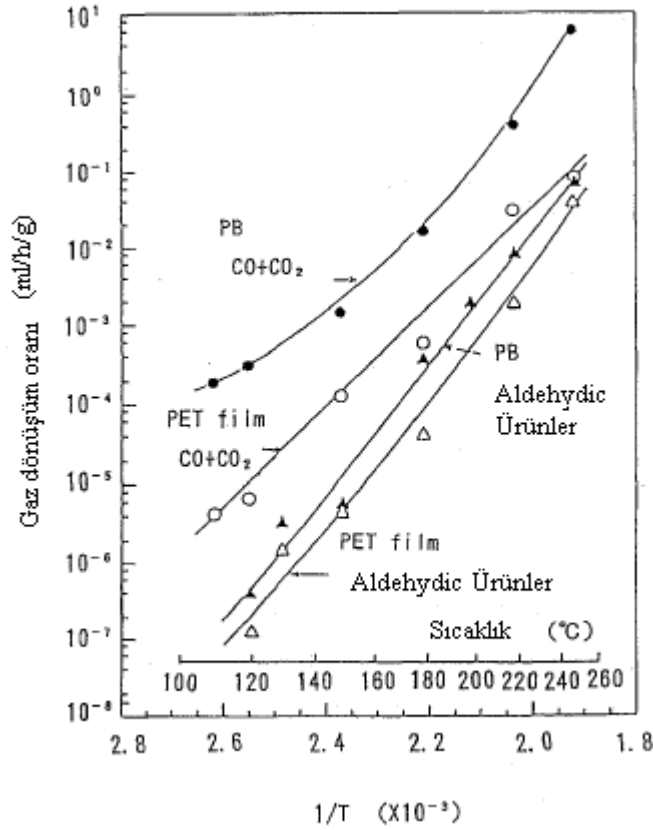
#### 7.5.4.5 İzolasyonun aşırı ısınmasından kaynaklı ayrışmış gazlar

Sargı iletkenleri ve bağlantı uçları SF6 gazından daha düşük sıcaklıklarda ve düşük seviyeli kısmi deşarjlarda ayrışabilen izolasyonla kaplıdır. Sargıların etrafında oluşan problemler, izolasyon ayrışmasından oluşan CO<sub>2</sub>, CO ve aldehid ürünlerinin seviyelerinin analizinin tayini ile tespit edilir. Şekil 7.11 da sıcaklıkla bağlantılı olarak izolasyondan ayrılan gaz ürünlerinin araştırma sonuçları verilmiştir. Ayrışmış gazlar olağan çalışma esnasında da küçük hacimlerde üretilir. Periyodik gaz analizleri ile normal eğilimler kayıtlıdır ise, içsel problem tanıları elde edilir.

#### 7.5.4.6 Metal aşırı ısınmalarından kaynaklı ayrışmış gazlar

Eğer SF6 gazı yalnız başına ise 500°C nin altında termal ayrışması olmaz. Eğer metal veya nem içeriyorsa, bu tür maddelerden kaynaklı katalitik etkiden dolayı bu sıcaklık değeri düşer. Silisyum çelik plakalar ve çelik parçalar kullanılır ve böylece transformatörlerde nem oluşur. Eğer herhangi aşırı ısınmış bir kısım olursa, ayrışmış gazlar görülebilir. Silisyum çelik plakalarda 150-200°C de SO<sub>2</sub> üretilir. Diğer çelik kısımlar ve alüminyum gibi metallerde, SO<sub>2</sub> gine 200°C de üretilir. Eğer bu tür metaller 400°C nin üzerinde ısıtılır ise SOF<sub>2</sub> üretilir.





Şekil 7.11 İzolasyon maddelerinden üretilen gaz miktarı

Transformatörlerde kullanılan birçok metalik parçalar boyanmıştır ve aşırı ısınma, aşırı ısınmış metal parçaların üzerindeki boya kaplamalarından oluşan ayrışık gazlarının analizi ile hesaplanır. Böylece araştırmalar transformatörlerdeki tüm materyaller ile termal ayrışma sonucunda oluşan ayrışık gazlardan oluşur.

#### 7.5.4.7 Deşarjlara bağlı ayrışık gazlar

Transformatörlerde oluşan yüksek enerji seviyesindeki deşajlar SF<sub>6</sub> gazının ayrışmasına sebep olur ve SF<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> ve SOF<sub>2</sub> oluşturur. SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> sadece deşajlarla oluşurken SOF<sub>2</sub> aynı zamanda yüksek ısınma sonucu da oluşur. Böylece gaz izoleli transformatörlerdeki SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> yağlı transformatörlerdeki C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>'ye benzer ve eğer SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> görülürse transformatörde ciddi bir deşarj meydana geldiği düşünülür.

Yukarıda tanımlandığı gibi gaz izoleli transformatörlerdeki SF<sub>6</sub> analiz edilerek içsel problemler saptanabilir fakat içsel problemlerin gaz analizi ile saptanabileceğine dair bir rapor yoktur. Bu yüzden sahadan veri toplanması gereklidir.

## 7.6 Yükte Kademe Değitirici (On-load tap changer) (LTC)

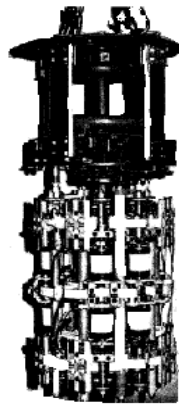
LTC ortamın izolasyon yağından SF6 gazına çevirilmesinden etkilenir. Özellikle yağ sadece bir soğutma/izolasyon ortamı olarak hizmet etmeyip aynı zamanda akım kesme anındaki arkı engeller ve hareketli parçalar için yağlama yapar.

Konvensiyonel kademe değiştiricilerin SF6 gazında çalışabilmesi için modifiye edilmiştir. Bu modifikasyonlar aşağıdakileri içerir;

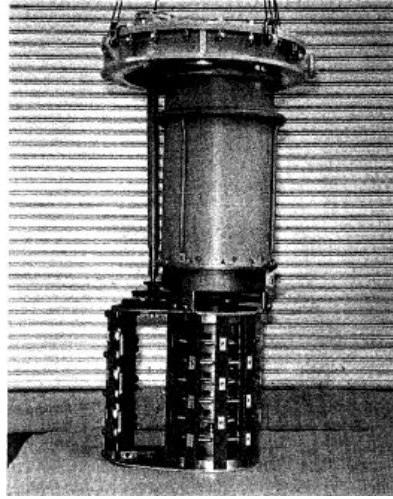
- SF6 gazının sık akım anahtalamalarından sonra oluşan arklardan kaynaklı ayrışmasını önlemek için dönüştürücü anahtarların ark kontakları için vakum anahtar kullanılır.
- Sık çalışmadan kaynaklı (yağlı transformatörlerin kaygan yapılarıyla oluşan) aşınmaları önlemek için kademe selektörüne hareketli bir kontak sağlaması için rulmanlı tipte kontaklar kullanılır.

Şekil 7.12 de ark kontakları için vakum anahtarları kullanan dönüştürücü anahtar (diverting switch) örneğini gösterir.

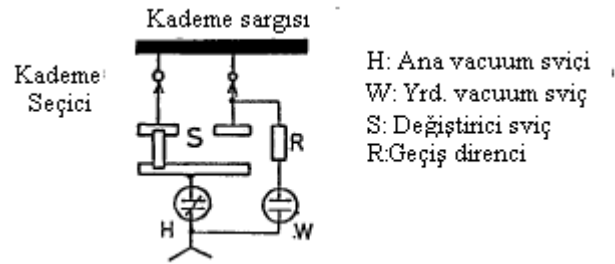
Gaz izoleli transformatörler için birçok tipte LTC vardır. Maksimum step gerilimi 2500 V'dur ve maksimum anma akımı ise 870 A'dir. Şekil 7.13 yüklü kademe değiştiricinin dış görünümünü gösterir ve anma akımı 300 A ve step gerilimi 1200 V'dur. Bu LTC nin bir bağlantı direnci ve her faz için iki vakum anahtarı vardır. Şekil 7.14 bağlantı diyagramı ve Şekil 7.15 çalışmasını açıklayan bir diyagramdır. Bu kademe değiştiriciler çok çeşitli gaz izoleli transformatörler için uygulanabilir.



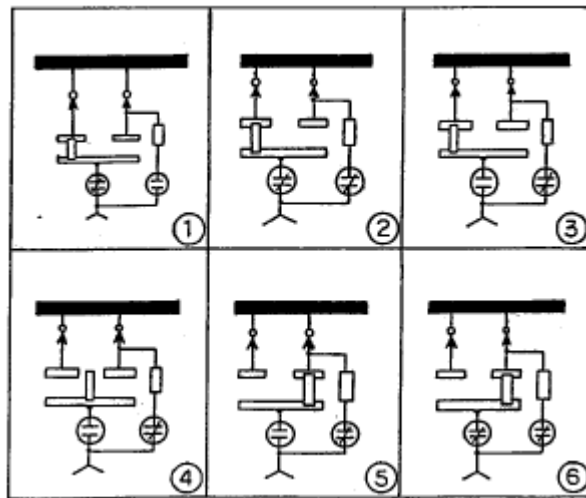
Şekil 7.12 Dönüştürücü anahtar (diverting switch)



Şekil 7.13 Yükte kademe değiştiricinin (LTC) dış görünüşü



Şekil 7.14 Dönüştürücü anahtarın (diverting switch) bağlantı diyagramı



Şekil 7.15 Dönüştürücü anahtarın çalışmasını açıklayıcı diyagramı

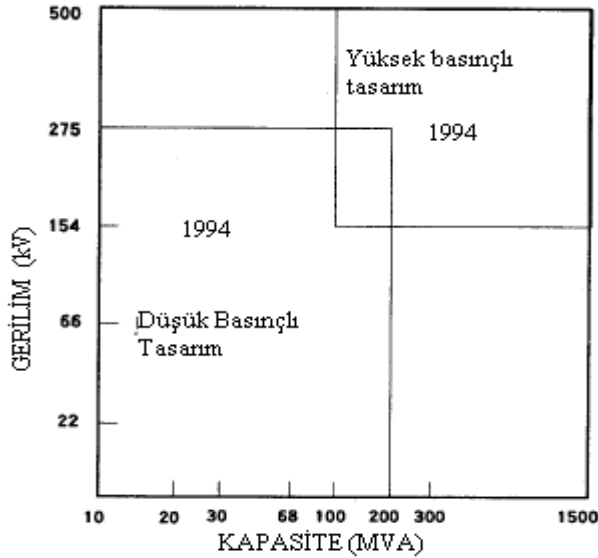
## 7.7 Gaz İzoleli Transformatörlerin Uygulama Alanlarının Karşılaştırılması

### 7.7.1 Gaz izoleli transformatörlerin uygulama alanları

Şekil 7.16 yüksek ve düşük gaz basınçlı gaz izoleli transformatörlerin uygulama alanlarını göstermektedir.

### 7.7.2 Gaz izoleli transformatörlerin uygulaması

Gaz izoleli transformatörlerin uygulaması şöyledir: örneğin bir yerleşim alanına yakın bir dağıtım merkezine kurulan 30 MVA'lık bir gaz izoleli transformatör vardır tehlikenin önlenmesi kadar gürültüyü de gözönüne alarak gaz izoleli bir transformatör seçilmiştir. Bu 50 dB gürültü seviyesinde düşük gürültülü bir transformatördür. Yedek gerektirmeyen kendinden soğutmalı bir tiptir. Bu kategoride dünyanın en geniş kapasiteli gazlı transformatörüdür.



Şekil 7.16 Gaz izoleli transformatörlerin gerilim ve kapasite durumu

Güç üretimi için su sağlayan bir nehrin boşaltma girişinin hemen üstüne 28 MVA'lık gaz izoleli bir transformatör kurulur. Önceden yağlı transformatörler kullanılmıştır. Yağ sızıntılarıyla oluşan nehir kirliliğini önlemek için yağlı transformatör kullanılan bu yerler gaz izoleli transformatörlerle değiştirilmiştir.

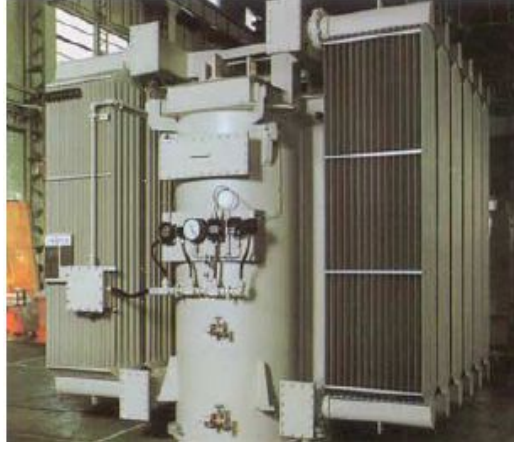
Jeotermal bir güç istasyonuna 154 kV, 68 MVA'lık gaz izoleli transformatörleri kurulur. Eğer tesis tepelik bir arazide ise bol miktarda yağ içeren yağlı transformatör kullanma isteksizliği doğar ve gaz izoleli transformatörler tercih edilir.. Tohoku Electric Power Co. Aynı zamanda jeotermal güç istasyonları için 30 MVA'lık gaz izoleli transformatörler kullanmıştır.

Şekil 7.17 de bir şehirde yeraltı dağıtım merkezinde kurulan 275kV, 300MVA yüksek voltajlı geniş kapasiteli gaz izoleli transformatörleri gösterir. Bunlar izolasyon ve soğutma için yüksek basınçlı SF6 gazı kullanan yağ zorlamalı ve gaz zorlamalı soğutma tipidir. Taşımacılıktaki sınırlamalardan dolayı tank her faz için bir parçaya bölünmüştür. Yükte kademe değiştirici (LTC) taşıma için tanktan ayrılmıştır ve sahada monte edilir. Bu üniteyi kuran güç şirketi yeni kurulan yeraltı dağıtım merkezlerinde gaz izoleli transformatörler kullanmayı planlıyor.

Yukarıdaki tipik örneklerden farklı olarak gaz izoleli transformatörlerin faydalarından yararlanabilecek hastaneler, bina altları, havaalanları ve pompa istasyonları gibi birçok uygulama vardır.



Şekil 7.17 Yer altı merkezindeki 275kV, 300MVA gaz izoleli transformatör (Toshiba)



Şekil 7.18 Doğal soğutmalı tipte SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba)



Şekil 7.19 Gaz zorlamalı, doğal hava soğutmalı SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba)



Şekil 7.20 Gaz zorlamalı, hava zorlamalı soğutma tipli SF6 gaz izoleli transformatör (Toshiba)

Çizelge 7.4 Gaz izoleli transformatörlerin yağlı transformatörlerle karşılaştırılması

Madde		Gaz izoleli transformatörler	Yağ beslemeli transformatörler
Güvenlik	Yanma özelliği	SF6 gazı alev almaz	Mineral yağ alev alır
	Patlama özelliği	SF6 gazı patlamaz	Patlama ve yanma olasılığı var
	Temizlenebilirliği	SF6 gaz sızıntısı çevreyi kirletmez.	Yağ sızıntısını önlemek gerekir
Performans	Izolasyon performansı	IEC 76 (1976) veya ANSI C57 (1980)	IEC 76 (1976) veya ANSI C57 (1980)
	Izolasyonun sıcaklık sınıfı (ısı yükseklik limiti)	E sınıfı (Sarım:75°C)	A sınıfı (Sarım:65°C)
Yapı	Izolasyon konfigürasyonu	SF6 gazı, Filim, ve diğerleri	Mineral yağ, kraft kağıt, ve diğerleri
	Demir çekirdek/sarım	Çekirdek tipi/eşmerkezli plan	Çekirdek tipi/eşmerkezli plan
	Tank	Çelik hava sızdırmaz tank	Çelik hava sızdırmaz tank
Koruma elemanı	Isı derecesi	Kadranlı termometre (değmeli)	Kadranlı termometre (değmeli)
	Basınç	Bileşik sayaç, isi basınç ayar sviçi (ani gaz basınç rölesi)	Buchholtz röle, ani yağ basınç rölesi
	Gaz	-	Buchholtz röle, gaz yakalama rölesi
	Gaz boşalması	-	Basınç aleti
Bakım/ kontrol		Gaz ısısı	Yağ ısısı
		Gaz basıncı	Yağ seviyesi
		Gaz kömürü (zorlanmış-gaz-dağıtma tipli durumda)	Yağ pomoası
Havalandırma		açık havaya havalandırma	yangın engelleme damperi ile dışarı havalandırma

## SONUÇLAR

Dünyada nüfus artışı ve şehirleşmenin gelişmesi ile beraber daha dar alanlarda daha verimli ve güvenilir tesislerin inşası gereği doğmuştur. Tesisler diye adlandırdığımız yapılar ile trafo ve trafo merkezleri anlaşılmalıdır. Ülkemizde çok sık kullanılan hava izoleli tesislerin yanısıra son zamanlarda gaz izoleli tesislere de yoğun bir yönelim olmuş ve ülkemizin çeşitli bölgelerinde ve ağırlıklı olarak büyük şehirlerde GIS tesisleri inşaa edilmiştir. Bir sistemin tam anlamıyla gaz izoleli merkez olabilmesi için güç transformatörlerinde gaz izoleli olması gerekmektedir. Ülkemizde henüz gaz izoleli transformatör üretimi başlamamış olup konu ile ilgili ar-ge çalışmaları yapılmaktadır. Ülkemizde güç transformatörleri olarak sıklıkla yağlı transformatörler kullanılmaktadır. Ülkemizde GIS tesislerinde güç transformatörü olarak yağ izoleli trafolar kullanılmaktadır.

Yazının girişinde de bahsettiğimiz gibi gelişen teknoloji ve endüstri enerjiye olan gereksinimi arttırmıştır. Bu gelişim bilim adamlarını elektrik enerjisinin en önemli ekipmanlarından biri olan transformatörler üzerinde araştırma yapmaya yöneltmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde iyi bir soğutucu ve izolasyon maddesi olan yağın kullanıldığı yağ izoleli transformatörlerin, pek fazla bakım gerektirmeyen kuru tip transformatörlerin ve yangın riski minimum olan ve daha kompakt yapıya sahip gaz izoleli transformatörlerin gelişimi sağlanmıştır. Günümüzde süper iletkenli transformatörler ile ilgili çalışmalar da hız almıştır. Süper iletken transformatörler neredeyse kayıpsız olarak yüksek akım taşıma kapasitesine ve süper iletkenlikten normal iletkenliğe geçişte ani yükselen direnç özelliğine sahiptir. Süper iletken transformatörlerin demir çekirdek tasarımı diğer türlerden farklı değildir ve ortam sıcaklığında çalışır. Bu transformatörleri ayrı ve ayrıcalıklı kılan özellikleri ise boşta çalışma kayıplarının diğer transformatörler ile aynı iken yükte çalışma kayıplarının %80 azalmış olmasıdır. Bu transformatörlerin soğutucusuyla beraber yere basma yüzeyi diğer transformatörlerle aynı olabilir ancak ağırlık olarak diğerlerinin %60-%80'i kadardır. Soğutucu olarak yağsız sıvı azot kullanılmaktadır ve soğutucu devre dışı kaldığında diğer türlerden daha uzun çalışabilir.

SF6 gazlı transformatörleri incelediğimiz zaman, yağlı transformatörlerle karşılaştırma yapılabilecek ve başarılı olduğu taraflar gözleyebileceğiz. SF6 gazlı transformatöre bir oda inşa edildiğinde boyutları daha küçük tutulabilir çünkü SF6 gazı alev almaz. Dolayısıyla modern yangın koruma sistemlerinin yapılandırılmasına gerek kalmaz. Bu özellik sayesinde yangınların sebep olduğu kazalardan korunulur.

Transformatörlerde içsel hatalar transformatör tankında büyük basınç artışlarına sebep olur.



Bu durum yağlı transformatörler için bir risk kaynağıdır. Ancak SF6 gazlı transformatörlerde, SF6 gazının özelliğinden kaynaklı transformatör tankında içsel hatalardan kaynaklı tehlikeli basınç artışları oluşmaz ve tank patlama riskine rastlanmaz.

SF6 gazlı transformatörlerde yağlı transformatörlerde olduğu gibi konservatöre ve basınç önleme cihazlarına gerek yoktur. Bu durum sayesinde SF6 gazlı transformatör daha kompakt ve kurulacağı odaların yükseklikleri daha küçük seçilebilir.

SF6 gazının, yağ izolasyonuna göre yıpranması daha yavaştır, bu nedenle daha az bakım gerektirir. Çevreye etkilerini incelediğimiz zaman; yağlı transformatörlerden bir akıntı olduğunu görürüz. Yağ akıntısının şehir kanalizasyon şebekesine karışmasına bile izin verilmez. Su kaynaklarının yakın olduğu bölgelerde bu sızıntılardan kaynaklı SF6 gazlı transformatörler tercih edilir. SF6 gazının sera etkisi yaptığına ilişkin görüşler vardır ve Kyoto protokolü dahilinde zararlı gazlar arasında gösterilmektedir, ancak ortamda belli bir oranda oksijen var ise insan sağlığına etkisi olumsuz olmayan, solunabilir bir gazdır.

Kurulum aşamaları incelendiğinde SF6 gazlı transformatörlerin daha kolay kurulduğu görülebilir çünkü gaz dolumu sahada gerekli şartlar oluşturularak yapılırken, gaz dolumu direkt fabrikada yapılır.

Gürültü seviyesi incelendiğinde; SF6 gazı ses geçirgenliğinde yağdan daha başarısızdır böylece daha az gürültü oluşmasını sağlar.

Eşit şartlar altında yağ ve SF6 gazının izolasyon maddesi ve bir soğutma maddesi olarak karşılaştırılması pek olağan değildir; yağ her zaman daha başarılıdır. Bu iki maddenin mukayese edilir olabilmesi için yardımcı unsurlara gerek duyulur. Örneğin dielektrik dayanımları incelendiğinde görülmüştür ki SF6 gazının basıncının artırılması gereklidir. SF6 gazı basınç olarak belli bir seviyedeki ortamlarda izolasyon maddesi olarak kullanılabilir.

SF6 gazlı transformatörlerin izolasyon tasarımları yapılırken iletkenler üzerine konulan katı izolasyonlarda değiştirilir. Yağlı transformatörlerde iletkenler çevresine yağlı kağıtlar sarılırken, gazlı transformatörlerde dielektrik dayanımı daha fazla olan PET filmler sarılır.

Soğutma özelliklerini incelediğimizde SF6 gazının başarılı bir soğutucu olmadığını görüyoruz. Ancak transformatör tasarımında yapılan değişiklikler ile gazın sistemde çok daha fazla sürküle edilmesi sağlanır. Bu özelliğinden dolayı büyük güçlerdeki SF6 gazlı transformatörlerde blowerler kullanılır.

Sistemin bir takım hatalara karşı korunması gerekir. Her iki transformatör türünü

incelediğimizde aynı ekipmanların yanı sıra farklı ekipmanlara rastlarız. Örneğin: termometre her iki transformatördede ortam sıcaklığını ölçmek için kullanılır. Gazlı transformatörlerde ani basınç farklılıklarını ölçmek için bileşik sayaç kullanılırken, yağlı transformatörlerde buchholtz rölesi kullanılır. Aynı şekilde yağlı transformatörlerde yağ seviye sayacı varken, gazlı transformatörlerde sıcaklık ayar basınç siviçi mevcuttur.

Transformatörlerde hataların oluşma sebeplerini anlamak için bazı yöntemler vardır. Bu yöntemler sayesinde çoğunlukla daha büyük hataların yaşanmasının önüne geçilir. Bu yöntemler genellikle izolasyon maddesi içerisinde içsel hatalardan kaynaklı oluşan gazların incelenmesidir. Yağlı ve gazlı transformatörlerde bu yöntemler kullanılmaktadır. Ancak yapılan araştırmalarda bu yöntemin yağlı transformatörlerde daha başarılı olduğu görülmüştür.

Yapılan tez çalışmasında her iki transformatöründe birbirlerine karşı güçlü ve zayıf yanları incelenmiştir. Hangi tip transformatörün daha iyi olduğunun kararı transformatörün kurulacağı tesisin fiziksel şartları göz önüne alınarak verilir.

**KAYNAKLAR**

- Aktaş, A.Ö. (2000), Gaz İzoleli Trafo Merkezleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- ASTM Standart (2002), Standart Test Method for Dielectric Breakdown Voltage of Insulating Liquids Using Disk Electrodes, ASTM Standart D877
- Aydın, M. (1999), Gaz İzoleli Tesisler, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü
- Boduroğlu, T. (1994), Elektrik Makinaları Dersleri, Beta Basım Yayın, İstanbul
- Bolin, P. ve Koch, H. (2006), “Gas Insulated Substation GIS”, IEEE, 1-4244-0493-2/06: 1-3
- Chan, L. (2002), “20 Years Operating Experience of Gas Insulated Transformers”, IEEE, 0-7803-7525-4: 522-524
- Chan, L. ve Sum, C.L. (1991), “Operating Experience of SF6 Gas-Filled Power Transformers”, IEE International Conference on Advanced in Power System Control Operation and Management, November 1991, Hong Kong
- Christophorou, L.G., Olthoff, J.K. ve Van Brunt, R.J., (1997), “Sulfur Hexafluoride and The Electric Power Industry”, IEEE, 0883-7554/97: 120
- Coltman, J.W. (1988), “The Transformer”, Scientific American, 258:1
- Ebb, G.M. ve Spence, G.S. (2002), “Gas Insulated Transformers for Haymarket Substation”, IEEE, 0-7803-7525-4/02: 511-516
- Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği (2000), Resmi Gazete, Sayı:22280
- Güzelbeyoğlu, N. (1998), Elektrik Makinaları I-II, İTÜ, İstanbul
- IEEE Standart C57 (2002), IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Oil in Equipment, IEEE Standartı 13-15
- Inoue, T., Inui, A., Teranishi, T., Murase, N., Ohshima, I. ve Toda, K. (1991), “Dielectric Characteristics of Static Shield for Coil End of Gas-Insulated Transformers”, Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 8-12 July 1991, Tokyo
- Keleş, K., Aras F., Şahin, Y.G. ve Çilliyüz Y. (2005), “İşletmedeki Güç Transformatör Yağlarının Elektrik Dayanımının Belirlenmesi”, MBGAK 2005, 17-19 Kasım 2005, İstanbul
- Mardıkyan, K. (1992), Orta Gerilim Şalt Cihazları, İ.T.Ü., İstanbul
- Özgönel, O. (2006), “Transformatörlerde İç Arıza Akımlarının Benzeşimi”, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 107-114
- Qui, Y. ve Kuffel, E. (1999), “Comparison of SF6/N2 and SF6/CO2 Gas Mixtures as Alternatives to SF6 Gas”, IEEE, 1070-9878/99: 892-895
- Sezer, M. (1998), “Her Yönüyle Yalıtım Yağları”, Teaç Eğitim Dairesi Başkanlığı, 113-115
- Toda, K. (2002), “Structural Features of Gas Insulated Transformers”, IEEE, 0-7803-7525-4/02: 508-510
- Togawa, Y., Ikeda, M., Toda, K. ve Esumi, K. (1995), “Progress of Gas-Insulated

Transformers”, IEEE,0-7803-2981-3/95: 540-547

Trabulus, S. (1990), GIS SF6 İzoleli Şalt Tesisleri, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü

Tsakao, S., Oue, Y. ve Hasegawa, Y. (2002), “Application of Gas Insulated Transformers to Underground Substations in Japan”, IEEE, 0-7803-7525-4/02: 517-521

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi	01.03.1979	
Doğum yeri	Tunceli	
Lise	1993-1997	Pertevniyal Lisesi
Lisans	1997-2002	İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2002-2008	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Pr.
Çalıştığı kurumlar		
	2005-2006	Tekno İnşaat Makinaları A.Ş.
	2006-2007	Enka A.Ş.
	2007-	Fiba Perakende Grubu