

**T.C.
ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DEĞİŞKEN ORTAM KOŞULLARININ SENKRON
GENERATÖRLERİN İZOLASYON PARAMETRELERİNE
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Emre DEMİREL

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi M. Cihat ÖZGENEL

**ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**ERZİNCAN
2019**

Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Dr. Öğr. Üyesi M. Cihat ÖZGENEL danışmanlığında, Emre DEMİREL tarafından hazırlanan bu çalışma 02/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi M. Cihat ÖZGENEL

İmza:



Üye : Doç Dr. Naim Süleyman TINGİ

İmza:



Üye : Dr. Öğr. Üyesi Yakup ŞAHİN

İmza:



Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 27 / 08 / 2019 tarih ve 34 / ... / ... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

“Değişken ortam koşullarının senkron generatörlerin izolasyon parametrelerine etkisini incelenmesi” isimli Yüksek Lisans tezini tarafımda intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim.

02/08/2019

(İmza)

Emre DEMİREL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEĞİŞKEN ORTAM KOŞULLARININ SENKRON GENERATÖRLERİN İZOLASYON PARAMETRELERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre DEMİREL

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi M. Cihat ÖZGENEL

Günümüzde özellikle hidroelektrik enerji üretimi alanında yoğunlukla kullanılmakta olan senkron generator stator sargı izolasyonlarının, hem çalışma ortamı koşullarındaki hem de saklanma koşullarındaki ortam nem miktarına bağlı olarak çeşitli deformasyonlar gösterdiği bilinmektedir. Bu sebepten ötürü yüksek yatırım maliyeti olan bu teçhizatların operasyonel emre amadelik oranlarının, teçhizatın bulunduğu işletme ve muhafaza edildiği ortam şartlarına göre düştüğü sonucuna varılmaktadır. Bu çalışmada sargıların izolasyon dirençlerinin ortamdaki bağıl nem miktarı ve maruziyet süresine bağlı olarak gösterdiği tepkilerin incelenerek sargının izolasyon direnci parametrelerindeki negatif yönlü değişimlerin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç için bir deney düzeneği geliştirilerek senkron generatörün sargısı yüksek değerlerdeki nemli ortama maruz bırakılmış ve sargıdaki izolasyon direnci değerleri ölçülmüştür. Farklı bağıl nem maruziyet sürelerinde uygulanan DA İzolasyon Direnci testlerinin sonuçları, ilgili standartlar dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sonuç olarak teçhizatın uygun ortam nemi şartlarında muhafaza edilememesinden kaynaklanan arızaların önlenmesi veya en aza indirilebilmesi için ortam bağıl nem miktarı ölçümlerinin ve önleyici bakım çalışmaları kapsamındaki DA izolasyon direnci testlerinin planlanması konusunda yapılması gereken çalışmalar ve önlemler sunulmuştur.

2019, 79 Sayfa

Anahtar Kelimeler: DC izolasyon direnci testi, izolasyon direnci, senkron generator, sargı izolasyonu

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION FOR VARIABLE AMBIENT CONDITIONS EFFECT ON THE INSULATION PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS

Emre DEMİREL

Erzincan Binali Yıldırım University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Assist. Prof. Dr. M. Cihat ÖZGENEL

Nowadays, it is known that synchronous generator stator winding insulations, which are used in the field of hydroelectric power production have various deformations depending on the amount of ambient humidity in both working environment conditions and storage conditions. For this reason, it can be concluded that the ratio of operational availability of these equipments with high investment cost is decreased according to the operation and storage environment of the equipment. In this study, it is aimed to analyze the negative effect of the insulation resistance parameters of the windings by examining the reactions of the insulation resistances of the windings depending on the high relative humidity and exposure time. For this purpose, an experimental set-up was developed and the winding of the synchronous generator was exposed to humidity and the insulation resistance values in the winding were measured. The results of the DC Insulation Resistance tests applied at different relative humidity exposure times were evaluated by taking into consideration the relevant standards. As a result, studies and measures to be taken in order to prevent or minimize the malfunctions resulting from the inability of the equipment to be maintained under appropriate ambient humidity conditions and the planning of DC insulation resistance tests within the scope of preventive maintenance studies are presented.

2019, 79 Pages

Keywords: DC insulation resistance test, insulation resistance, synchronous generator, winding insulation,

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum bu alıőmanın uygulama kısımları Erzincan ili İli ilesi Bağıştaş I Barajı ve Hidroelektrik Santrali tesislerinde hazırlanmıştır. Bu vesile ile İçtaş Yenilenebilir Enerji Üretim ve Ticaret Anonim Őirketine desteklerinden dolayı teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım sürecinde her türlü desteği benden esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi M. Cihat ÖZGENEL 'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım boyunca bana göstermiő oldukları destek ve sonsuz teőviklerinden dolayı çok değerli eőim Duygu KORKMAZ DEMİREL' e ve aileme teşekkür ederim.

Emre DEMİREL

Ağustos, 2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	5
2.1. Stator Yapısı.....	6
2.2. Rotor Yapısı	9
2.2.1. Uyartım sistemleri.....	12
2.2.1.1. Statik uyartım sistemleri	13
2.2.1.2. Dinamik uyartım sistemleri.....	16
2.3. Senkron Generatörlerde Hız	18
2.4. Senkron Generatörlerde İndüklenen Gerilim.....	19
2.5. Senkron Generatörlerde Eşdeğer Devresi ve Endüvi Reaksiyonu.....	21
2.6. Endüvi Reaksiyonunun Yükün Niteliğine göre Değişmesi	26
2.7. Senkron Generatörlerde İzolasyon.....	29
2.8. İzolasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Bileşenleri	33
2.8.1. Termal zorlanmalar	34
2.8.2. Elektriksel zorlanmalar	36
2.8.3. Ortam koşullarına bağlı zorlanmalar.....	37
2.8.4. Mekanik zorlanmalar	38
2.8.5. Stator sargılarında izolasyon sistemi özellikleri	39
2.8.6. Stator sargı izolasyon tiplerine göre kullanılan materyaller	41
2.9. DA İzolasyon Direnci Testi Teorisi (IR)	44

2.10. DA İzolasyon Direnci Testi İlkeleri.....	49
2.11. İzolasyon Test Cihazı.....	53
3. MATERYAL VE YÖNTEM	55
3.1. Deney Düzenğinde Kullanılan Ekipmanlar	56
3.1.1. DA izolasyon direnci ölçüm cihazı (megaohmmeter)	56
3.1.2. Nem algılama cihazı.....	56
3.1.3. Lazer termometre	57
3.1.4. Sıcaklık ve nem kontrol cihazı.....	58
3.1.5. Isıtıcı ünitesi	59
3.1.6. Buhar üretici (hava nemlendirici).....	60
3.1.7. Stator barası (sargı)	60
3.2. Deney Düzeninin Kurulması.....	62
3.3. Deney Süresince Uygulanacak Testlerin Planlanması.....	63
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	65
4.1. Devreye alma testi bulguları	65
4.2. İzolasyon direnci mertebesine dair test bulguları	67
4.3. Kaçak akım parametresine dair test bulguları.....	68
5. SONUÇ	71
6. ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR	76
EKLER.....	79
Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	79
ÖZGEÇMİŞ	80

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Generatörün Kesit Görüntüsü	5
Şekil 2.2. Bağıştaş I HES 44 MW senkron generatör stator sargıları	6
Şekil 2.3. Stator yapısı ve bölümlerini gösteren çizim.....	8
Şekil 2.4. 120° açıyla yerleştirilmiş üç sargıdan üç faz gerilimlerin üretimi.....	8
Şekil 2.5. Yuvarlak ve çıkık kutuplu rotor yapısı şekilleri	10
Şekil 2.6. Yuvarlak kutuplu rotor arkadan ve yandan görünüşü.....	10
Şekil 2.7. Çeşitli çıkık kutuplu rotor görünüşleri.....	11
Şekil 2.8. Bağıştaş I HES rotor laminasyon sacları dizilimi	12
Şekil 2.9. Statik uyarım Sistemi prensip şeması	13
Şekil 2.10. Farklı bir statik uyarım sistemi prensip şeması	14
Şekil 2.11. Keban HES 5 no.lu ünite statik uyarım prensip şeması.....	14
Şekil 2.12. Keban HES 5 No.lu ünite statik uyarım panoları	15
Şekil 2.13. Dinamik uyarım sistemi (fırçasız ikaz) şeması.....	16
Şekil 2.14. Fırçasız ve döner diyetli dinamik uyarım sistem rotor örnekleri.....	17
Şekil 2.15. Pilot uyarımcılı fırçasız bir uyarım sistemi	18
Şekil 2.16. Senkron generatör akı – uyarım akımı ilişkisi ve senkron generatör için mıknatıslanma eğrisi	20
Şekil 2.17. Endüvi reaksiyonu modelinin oluşumu.	22
Şekil 2.18. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi	23
Şekil 2.19. Üç fazlı bir senkron generatörün basit eşdeğer devresi.	24
Şekil 2.20. Senkron generatörde kutup alanı ve endüvi alanı dağılımı	25
Şekil 2.21. Omik yük durumunda endüvi reaksiyonu.	26
Şekil 2.22. Endüktif yük durumunda endüvi reaksiyonu.	27
Şekil 2.23. Kapasitif yük durumunda endüvi reaksiyonu.	28
Şekil 2.24. Omik - Endüktif yük durumunda endüvi reaksiyonu.	28
Şekil 2.25. Generatörün genel gösterimi uyarım ve alan sargılarının yerleşimi...29	
Şekil 2.26. Vibrasyon ölçümlerinin yatak noktalarında göre dağılımı.	32
Şekil 2.27. Bazı stator sarım modelleri.	39
Şekil 2.28. Rastgele sarımlı stator sargısı en kesit gösterimi.	40
Şekil 2.29. Stator sargılarının oluk yerleşimlerine göre gösterimi.....	40

Şekil 2.30. Stator izolasyonu bileşenleri kesit görüntüsü	41
Şekil 2.31. Akım bileşenleri gösterimi devre şeması.....	45
Şekil 2.32. Kapasitif şarj akımı grafiği	47
Şekil 2.33. Absorbsiyon akımı grafiği.	47
Şekil 2.34. İletim ve yüzey kaçak akımı grafiği.	48
Şekil 2.35. Akım bileşenleri ve toplam akım.....	48
Şekil 2.36. Örnek bir izolasyon test cihazı, generatör için izolasyon testi bağlantı şeması, Sargı için izolasyon testi genel bağlantı şeması.	50
Şekil 2.37. Örnek bir senkron generatör izolasyon direnci test föyü.....	52
Şekil 2.38. Faz – Faz arası DA izolasyon testi ölçüm şeması.....	53
Şekil 2.39. Faz – Toprak (Gövde) arası DA izolasyon testi ölçüm şeması.....	53
Şekil 2.40. İzolasyon test cihazı ve bağlantı parçaları	54
Şekil 3.1. DA İzolasyon direnci ölçüm cihazı (Megaohmmetre)	56
Şekil 3.2. Trotec marka nem algılama cihazı.....	57
Şekil 3.3. Fluke 566 IR lazer termometre	57
Şekil 3.4. Fluke 566 IR lazer termometre kalibrasyon etiketi.	58
Şekil 3.5. NST3W termostat, higrostat ve zamanlayıcı fonksiyonlu kontrol cihazı.	58
Şekil 3.6. Nem ve sıcaklık kontrol panosu.....	59
Şekil 3.7. Isıtıcı Ünitesi.....	60
Şekil 3.8. Buhar üretici olarak kullanılan hava nemlendirme cihazı.....	60
Şekil 3.9. Senkron generatör stator sargısı (deneye tabi tutulan ekipman).....	61
Şekil 3.10. Stator sarım şemasından bir kısım	61
Şekil 3.11. Deney düzeneği genel görünüm.	62
Şekil 4.1. Test düzeneğine dair genel bir görüntü.....	65
Şekil 4.2. Devreye alma çalışmaları esnasında yapılan ilk DA izolasyon direnci test föyü	66
Şekil 4.3. İzolasyon direnci mertebelerine dair test ölçümleri.....	67
Şekil 4.4. İzolasyon direnci ve nem maruziyet süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik	68
Şekil 4.5. Kaçak akım mertebelerine dair test ölçümleri	69
Şekil 4.6. Kaçak akım ve nem maruziyet süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (logaritmik ölçek kullanılmıştır).	70

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Frekans, Kutup sayısı ve Devir ilişkilerini gösteren tablo.....	19
Tablo 2.2. İzolasyon sınıflarına göre Sıcaklık Limitleri	30
Tablo 2.3. İzolasyon sınıflarına göre kullanılan izole malzemeler	43
Tablo 2.4. Test Gerilimi Seçim tablosu.	49
Tablo 3.1. Senkron generatör etiket değerleri	55
Tablo 3.2. DA izolasyon testi uygulaması iş takvimi.	63
Tablo 5.1. Ölçülen parametrelerde ki azalma oranları	72
Tablo 5.2. Minimum polarizasyon indeksi tablosu	72
Tablo 5.3. Üretici firmaların DAR ve PI değerlendirme tablosu.....	73

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

B	Manyetik alan şiddeti
E	İndüklenen gerilim
f	Frekans
f_e	Elektriksel frekans
I_F	Uyartım Akımı
R	İzolasyon direnci
K	Senkron makine sabiti
L_A	Öz indüktans
N_c	Devir sayısı
n_m	Mekanik devir sayısı (d/dak)
P	Kutup sayısı
R	Direnç
T	Zaman indisi
V_ϕ	Endüvi reaksiyonu gerilimi
X_S	Senkron Reaktans
π	Pi sayısı
φ	Manyetik akı
ω	Açısal hız
Φ_f	Rotor Manyetik Akısı
Ψ	Faz açısı
%	Yüzde işareti

Kısaltmalar

AA	Alternatif Akım
AC	Alternative current
AG	Alçak Gerilim
DA	Doğru Akım
DAR	Dielektrik Absorpsiyon Oranı
DC	Direct current
GΩ	Gigaohm
HES	Hidroelektrik Santral
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
kV	Kilovolt
μA	Mikroamper
mA	Miliamper
MAX	Maksimum
MΩ	Megaohm
nA	Nanoamper
OG	Orta Gerilim
PI	Polarizasyon İndeksi
RMS	Root Mean Square (etkin değer)
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TΩ	Teraohm
YG	Yüksek Gerilim

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, gelişen teknoloji ile günlük hayatın çok önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Bu ihtiyaç, artan nüfus ve sanayileşme gibi nedenlerinde etkisi ile sürekli artış eğilimi göstermektedir. Günümüzde ihtiyaç duyulan bu elektrik enerjisinin büyük bölümü, yüksek güçlü santrallerde üretilmektedir. Bununla birlikte ülkemiz enerji üretim sektöründe faaliyet gösteren 7842 adet enerji üretim tesisi içerisinde, akarsu ve barajlı hidroelektrik santrallerinin sayısı TEİAŞ Yük Tevzi Daire Başkanlığı'nın Nisan 2019 raporuna göre toplam 661 adettir. Söz konusu rapora göre 89.680,40 MW 'lık toplam kurulu güç içerisinde hidrolik santrallerin kurulu gücü ise 28.402,90 MW olarak yüzde 31,67'lik bir oranını oluşturmaktadır (Teiaş,2019). Bu sebepten ötürü yüksek güçlü hidrolik santrallerin enerji üretimi hususundaki süreklilik ve güvenilirlikleri de çok büyük önem arz etmektedir.

Ülkemiz elektrik üretim sektörü içerisinde çok önemli bir yeri olan hidroelektrik enerji üretim santrallerinde, işletme ve maliyet parametreleri açısından en kritik teçhizatlardan birisi senkron generatörlerdir. Bu husustan dolayı, senkron generatörlerin ve bu ekipmana ait yedek olarak bekletilen bileşenlerinin işletme, saklanma ve nakliye koşulları çok daha önemli bir hâl almaktadır. Yüksek gerilim altında çalışan bu makinaların en kritik sorunlarından birisi de sargıların sağlıklı bir şekilde izole edilmesi vesilesiyle yüksek gerilimin kontrollü ve konforlu şekilde iletilebilmesidir. Dolayısıyla izolasyonun kalitesi ve işletme, saklanma ve nakliye şartlarındaki zorlanmalara bağlı olarak değişimi, sürekli olarak kontrol edilmesi gereken bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır.

Uygun olmayan işletme ve saklanma koşullarından dolayı, ilk enerjilendirme esnasında zarar gören sargı izolasyonları, söz konusu işletmeler açısından hem çok büyük bir kâr kaybına hem de güvenlik sorunlarına yol açmaktadır. 2012 yılında Trabzon İlinin Hayrat İlçesinde bulunan bir hidroelektrik santrali tesisinde, devreye alma çalışmaları esnasında senkron generatorün stator sargılarının yüksek gerilim dayanım testleri yapılırken uygun olmayan ortam koşullarında bekletilmiş olması sebebiyle hasar gördüğüne dair olay kayıtları mevcuttur. Söz konusu hasardan kaynaklı olarak ilgili generatörde izolasyon tamirata yapılmıştır. İzolasyon ve sargı tamirata süreci, özellikle büyük güçlü senkron generatörlerde uzun süreli duruşlar gerektirmesi ve yüksek onarım

harcamalarına ihtiyaç duyması nedeniyle çok büyük ticari kâr kayıplarına neden olabilmektedir.

Yapılan bu tez çalışmasında söz konusu ekipmanların işletme şartları da dikkate alınarak maruz kalabileceği ortam neminin izolasyon üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda bağıl nem miktarı sabit tutularak maruziyet süresi boyunca izolasyon direnci testleri yapılmış ve sonuçlar mukayese edilmiştir. İşletme süresince uygulanabilecek rutin izolasyon testleri ile bu ve benzeri izolasyon deformasyonu kaynaklı arızaların asgariye indirilmesi ve teçhizatların uzun dönemli güvenilir işletme koşulları hakkında fikir vermesi amaçlanmıştır. Ayrıca ülkemizde süreç içerisinde yapılacak olan olası bir yüksek gerilim standardı çalışmasına, altyapı olması amaçlanmıştır. Önleyici bakım çalışmaları kapsamında değerlendirilebilecek olan bu test çalışması, izolasyonun işletme ve yedekte bekletilme süresince karşılaştığı zorlanmalar hakkında bilgi verebilecektir.

Literatürde benzeri çalışmalar genellikle yüksek gerilim sıvı izolasyon maddeleri, izolatörler ve OG (orta gerilim) kablolar kapsamında yapılmıştır. Benzeri bir çalışma 2018 yılında Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde “Güç Transformatörlerinde Meydana Gelen Arızaların Gelişmiş Test Yöntemleri ile Belirlenmesi” ismiyle yapılmıştır (Yıldız,2018). Bu çalışma kapsamında sıvı izolasyon ihtiva eden güç transformatörlerinin izolasyon direnci testlerine dair uygulamalar yapılmıştır.

Sıvı yalıtkanların elektriksel parametrelerinin incelendiği bir başka tez çalışması da 2014 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yapılmıştır. Bu çalışmada da nemlendirilmiş sıvı izolasyon yağının delinme gerilimindeki değişimler, incelenmiştir (Taslak, 2014).

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü bünyesinde 2007 yılında yapılan farklı bir çalışma da dielektrik malzemelerdeki sıcaklık ve frekans etkileri incelenmiş olup dielektrik kayıplara neden olan bu parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında dielektrik malzemelerde dielektrik kayıp olarak ortaya çıkan değişimlerin sebepleri ve tanımları yapılmıştır (Yücedağ, 2007).

Yüksek gerilimde iletim hatlarında kullanılan bir başka izolasyon ekipmanı olan izolatörler özelinde, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 2000 yılında doktora tezi olarak yapılan farklı bir çalışmada ise yüksek gerilimde kullanılan izolatörlerde kirlenme ve rutubet nedeniyle oluşan yüzeysel atlamalar incelenmiştir. Bu çalışma da güç sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan kirlenme atlaması olarak tabir edilen yüzey kirlilikleri ve rutubetine bağlı izolasyon delinmeleri ve atlamaları irdelenmiştir (Aydoğmuş, 2000).

Ayrıca ülkemizde enerji iletimi sektöründe tek yetkili kuruluş olan Türkiye Elektrik İletim A.Ş. 'ye ait teknik şartnameler ve saha kabul testlerinde ilgili uluslararası standartlar referans gösterilerek izolasyon direnci testleri uygulanması zorunlu kılınmıştır (Teiaş, 2010).

OG (orta gerilim) dağıtım sistemlerinde kullanılan kablolara dair dielektrik kayıpların ölçülmesi ve yapay sinir ağları ile incelenmesi amacıyla Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde 2014 yılında doktora tezi çalışması yapılmıştır. Bu çalışma ile 2/20kV nominal gerilimli bir OG kablosunun, değişken işletme koşullarındaki (gerilim, frekans, sıcaklık) dielektrik kayıp, paralel eşdeğer kapasite/bağlı dielektrik katsayısı, dielektrik kayıp faktörü ve dielektrik kayıp indisi parametreleri laboratuvarında deneysel olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları incelenerek, OG kablosunun dielektrik malzemesinin gerilim, frekans ve sıcaklık değişimlerine karşı gösterdiği davranışları analiz edilmiştir (Kumru, 2016).

Literatür taramasında bahsi geçen çalışmalardan farklı olarak senkron generatörlere ait "F" tipi katı izolasyonlar özelinde yapılan bu çalışmada izolasyonun nemli ortamdaki zamana bağlı davranışı, analiz edilerek söz konusu testlerin ve kontrollerin önemi vurgulanmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında 150 gün boyunca uygulanan yüksek bağıl nemin izolasyon direncine etkileri yüksek hassasiyetli 5kV megaohmmetre ile ölçülmüştür. İzolasyon direnci mertebelerindeki düşüşün haricinde uluslararası standartlarda geçen ismiyle Dielektrik Absorbsiyon oranı ve Polarizasyon İndeksi oranı da ayrıca dikkate alınmıştır.

Bu tez çalışması, toplam altı bölümden oluşmakta olup birinci bölümde tezin önemi, amacı ve literatürde yapılan benzeri çalışmaların özeti verilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde senkron generatörlerin çalışma prensibi, stator ve rotor yapısı, temel karakteristik parametreleri, izolasyon tasarımı ve DA izolasyon direnci testlerinden bahsedilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde materyal ve yöntem olarak uygulanan DA izolasyon testinde kullanılan materyaller ve bunların temel özelliklerinden kısaca bahsedilmiştir. Ayrıca deneysel ölçümlerin yapıldığı düzenekler tanıtılarak ölçüm metodu ve iş planı belirtilmiştir.

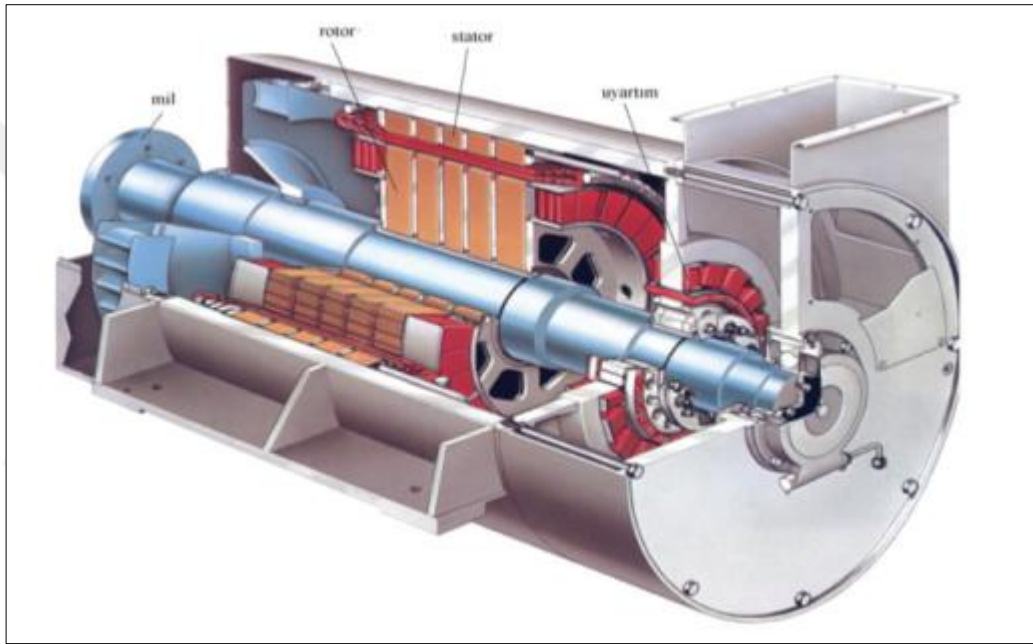
Tezin dördüncü bölümünde ilgili ekipmana dair ilk devreye alma testi sonuçları ve akabinde deneysel gözlemler sonucunda elde edilen izolasyon direnci değerleri ve kaçak akım değerlerinden bahsedilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde ise yapılan deneysel gözlemlere dayalı olarak sonuçlar detaylı olarak analiz edilmiş olup ilgili test sonuçlarından hareketle izolasyonun sağlığı hakkında çıkarımlarda bulunulmuştur.

Tezin altıncı ve son bölümü olan öneriler kısmında ise yapılan testler ve sonuç incelemeleri neticesinde gelinen durum hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. Bu itibarda ilgili ekipmanların saklanma koşulları ve DA izolasyon testlerinin rutin olarak uygulanması hususunda önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Senkron, kelime olarak eşit zamanlı veya eşzamanlı anlamına gelmektedir. Senkron makineler kategorisine, alternatörler (generatörler), senkron motorlar ve senkron konvertörler girer. Senkron motor ile generatör arasında yapı bakımından herhangi bir fark yoktur. Senkron Generatörler mekanik gücü Alternatif Akım'a (AA) çevirmek için kullanılan elektrik makinalarıdır ve bu özelliği sebebiyle Alternatör olarak da adlandırılırlar (Üstünel, 2012).



Şekil 2.1. Generatörün kesit görüntüsü (Üstünel, 2012)

Senkron generatörlerde rotor sargıları, doğru akım (DA) ile uyarılarak manyetik alan meydana getirilir. Akabinde generatörün rotoruna harici bir hareket kaynağı tarafından dönme hareketi uygulanır. Bu dönme hareketi sonrasında makinanın içerisinde dönen bir manyetik alan ve dolayısıyla stator sargılarında 3 (üç) fazlı bir gerilim indüklenmiş olur (Chapman, 2012).

Senkron generatörlerde sargı isimleri genel olarak “Alan Sargıları” ve “Endüvi Sargıları” şeklinde isimlendirilir. Genelde “Alan Sargıları” terimi ana manyetik alanın üretildiği sargılar için kullanılırken, “Endüvi Sargıları” terimi ana gerilimin indüklendiği sargı grubu için kullanılır. Senkron generatörlerde alan sargıları rotor bölümü üzerinde olduğundan bu sargılara diğer bir isimle “Rotor Sargıları”, endüvi

sargıları da stator bölümü üzerinde bulunduğundan bu sargılara da “*Stator Sargıları*” isimleri de verilebilmektedir (Chapman, 2012).

2.1.Stator Yapısı

Alternatif akımın alındığı endüvi sargılarının bulunduğu bölüme “Stator” adı verilir. Stator genellikle manyetik direncin düşük olması nedeniyle ferro-manyetik sac malzemeden imal edilir. Endüvi sargılarından akan akımların meydana getirdiği alternatif manyetik alanlardan dolayı, demir malzeme *Histerizis* ve *Fuko (Foucault)* kayıpları oluşur. Bu kayıpların azaltılabilmesi için stator sac levhaları, kalınlıkları 0,5-2,0 mm olan, bir tarafları yalıtılmış sac plakalardan imal edilir. Saclar silisyum katkı olarak imal edildiklerinden dolayı, manyetik doyuma ulaşmadan yüksek manyetik alan yoğunluklarına erişebilmesine olanak verirler. Dolayısıyla sacların içinden akan *Fuko (Foucault)* akımları azaltılarak bunların neden oldukları kayıplar da (*Fuko Kayıpları*) azaltılır. Senkron makinalarda nominal güç ile stator çapı doğru orantılı olarak değişir, çap büyüdükçe artan demir malzeme yoğunluğu aynı oranda *Fuko* ve *Histerizis* kayıplarının da artmasına sebebiyet verir. Bundan dolayıdır ki senkron makinelerdeki demir kayıpları, diğer makinalardaki kayıplara kıyasla çok daha büyük değerlere ulaşmaktadır (Tufan, 2013).



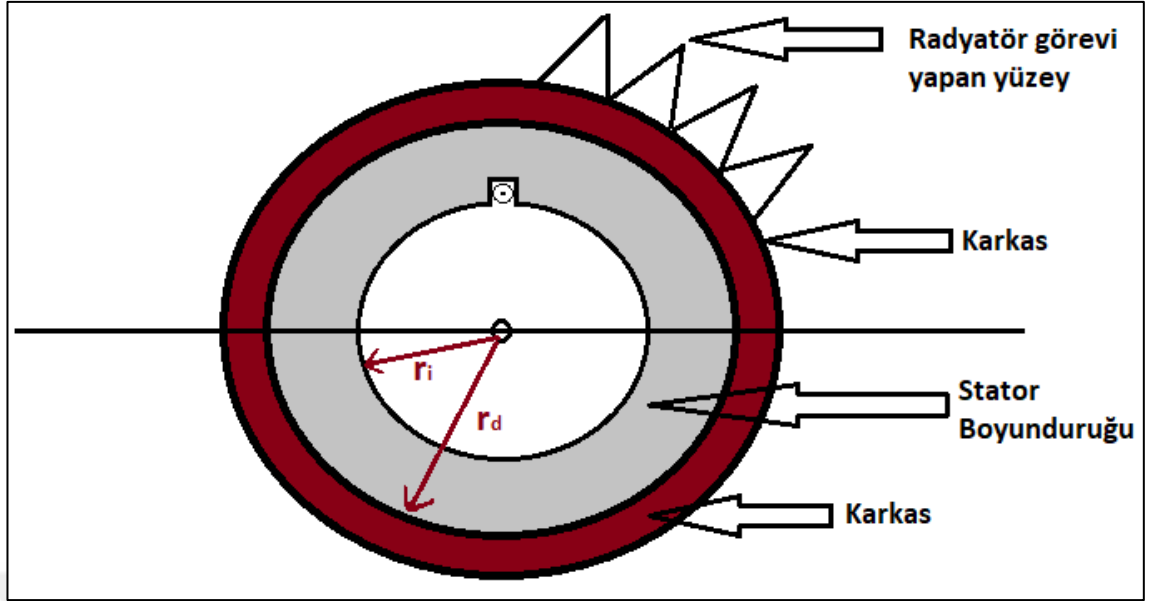
Şekil 2.2. Bağıştaş I HES 44 MW senkron generatör stator sargıları

Yapı olarak stator, sargıların konumlandırıldığı olukları içerdiğinden iki ayrı bölümde incelenir. Birinci bölüm, olukların yer almadığı ve dış yüzeye yakın olan “*stator boyunduruğu*” bölümüdür. Bu kısım manyetik akımın makine çevresinde akabilmesi için

manyetik direnci düşük olan bir yol oluşturur. Rotorda üretilmiş olan manyetik akı, dişlerin arasından stator boyunduruğuna ulaşır. Stator boyunduruğunun yüksekliği, manyetik doyuma ulaşmasına imkân vermemek üzere hesaplanır ve açılan oluk derinlikleri ile boyunduruğun yüksekliğinin toplamı stator bölümünün kalınlığını oluşturur. Yani bu kalınlık, stator iç çapı ile stator dış çapı arasındaki farka eşittir. İkinci bölüm ise hava aralığına ve rotora yakın olan, olukları ve dişleri ihtiva eden bölümdür. Dişler, rotor manyetik akısının stator bölümüne girdiği manyetik direnci düşük olan kısımlardır. Olukların manyetik dirençleri ise bakır iletkenler ve bu iletkenlerin izolasyon malzemelerinden dolayı çok büyük değerlere ulaşmaktadır. Bundan dolayıdır ki dişlerin manyetik doyumunu engellemek adına dişlerin genişliği büyük seçilmektedir. Dişlerin bu genişlik değeri, statorun çapını etkileyen bir faktör olması münasebetiyle optimum değerde seçilmesi gerekmektedir (Mergen ve Zorlu, 2010).

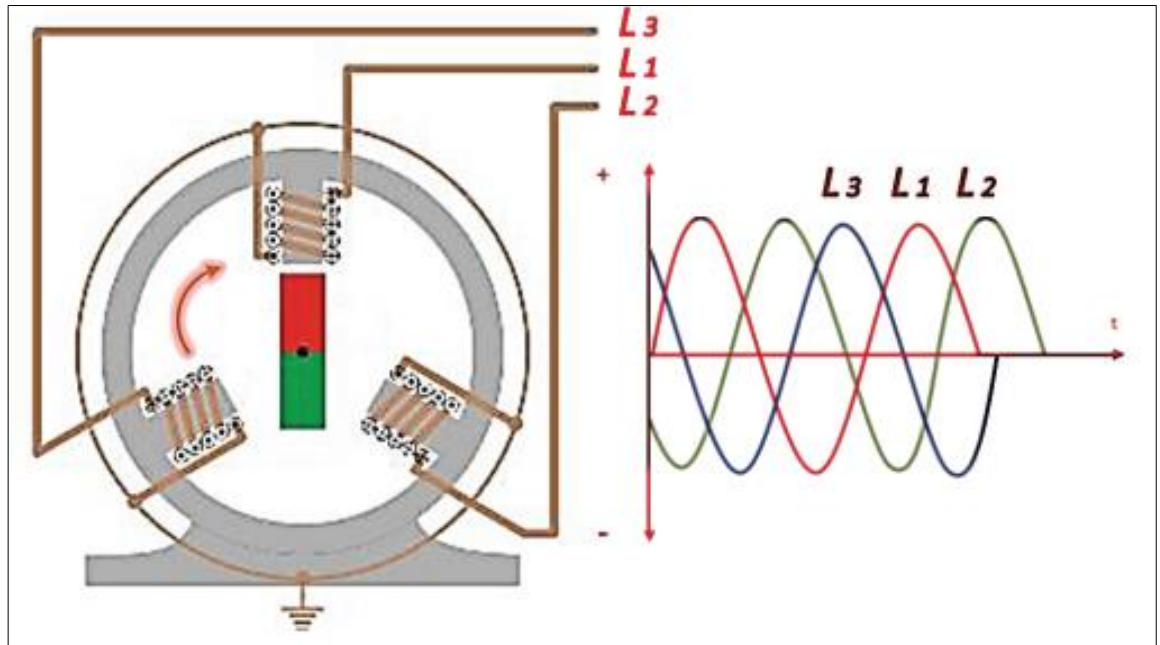
Dizayn edilen stator çapına göre kesilen saclar, daire yayı olarak kesilip dizildikten sonra ardışık olarak düzenlenip “*sac paketi*” oluşturulur. Hava ile soğutulan makinelerde bu sac paketlerinin önüne radyal yönde genişliği 15 mm’leri bulan hava kanalları konularak imal edilir. Sac paketinin dış tarafına bu paketi korumak amacıyla bir karkas yerleştirilir ve bu karkas soğutma yüzeyi olarak da işlev görür. Özellikle hidroelektrik enerji santrallerinde kullanılan büyük senkron generatörlerin soğutulması amacıyla karkas yapısının üzerine ayrıca radyatörler ilave edilerek sargı ve nüve kısmının harici olarak soğutulması amaçlanır. Senkron makinelerde genellikle çapların büyük oluşundan dolayı imal edilen karkas yapısı, çelik evsafı ve düz kalın sac plakalardan imal edilir (Mergen ve Zorlu, 2010).

Statorun rijitlik ve mukavemet hesaplamalarına göre optimum düzeyde seçilmesi gereken karkas yapısının gereğinden küçük seçilmesi, mukavemet açısından bir dezavantaj yaratacağı gibi gereğinden büyük seçilmesi de soğutma performansı açısından dezavantaj sağlamaktadır (Mergen ve Zorlu, 2010).



Şekil 2.3. Stator yapısı ve bölümlerini gösteren çizim

3 (Üç) fazlı bir stator sargısında indüklenen gerilim hesabı yapılırken her biri N_c sarımlı 3 bobin (sargı) Şekil 2.4 de gösterildiği gibi rotorun manyetik alanının etkisinde olacak şekilde konumlandırıldığı varsayılır. Bu sargıların her birinde indüklenen gerilimler genlik olarak eşit fakat 120° faz farklı olacaktır (Chapman, 2012).



Şekil 2.4. 120° açıyla yerleştirilmiş üç sargıdan üç faz gerilimlerin üretimi (Üstünel, 2012)

Üç bobinin her birinde indüklenen gerilimler aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılarak hesaplanır;

$$e_{aa'}(t) = Nc \varphi \omega \sin \omega t \text{ V} \quad (2.1)$$

$$e_{bb'}(t) = Nc \varphi \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ V} \quad (2.2)$$

$$e_{cc'}(t) = Nc \varphi \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ V} \quad (2.3)$$

Üç Fazlı bir stator da ki RMS gerilimi hesaplanırken, herhangi bir fazındaki tepe gerilimi; $E_{max} = Nc \varphi \omega$ 'dır. $\omega = 2\pi f$ olduğundan üç fazlı statorun herhangi bir fazının RMS gerilimi;

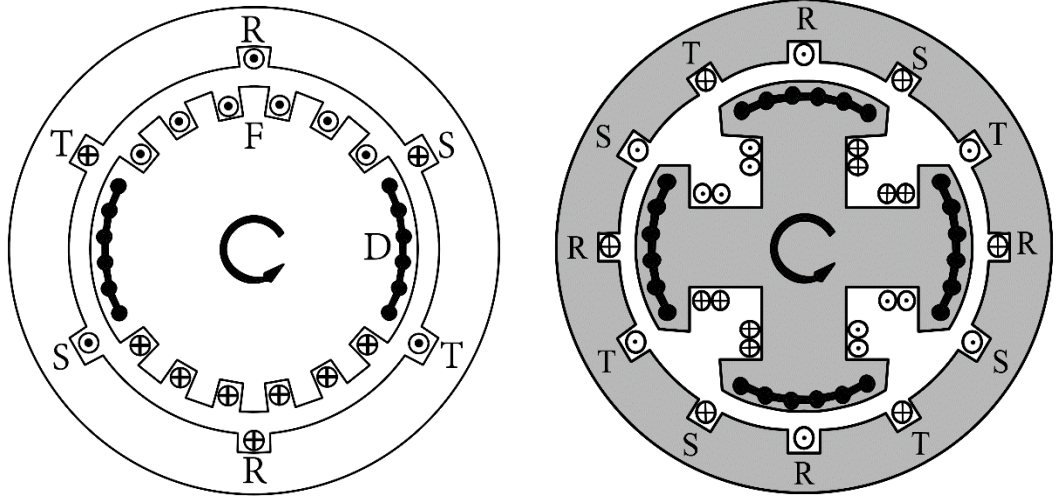
$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} Nc \varphi f \quad (2.4)$$

$$E = \sqrt{2} \pi Nc \varphi f \quad (2.5)$$

olur. Statorun terminallerinde ki RMS gerilim, stator Y (yıldız) bağlı ise terminal gerilimi E_A 'nın $\sqrt{3}$ katına, Δ bağlı ise terminal gerilimi E_A 'ya eşit olacaktır (Chapman, 2012).

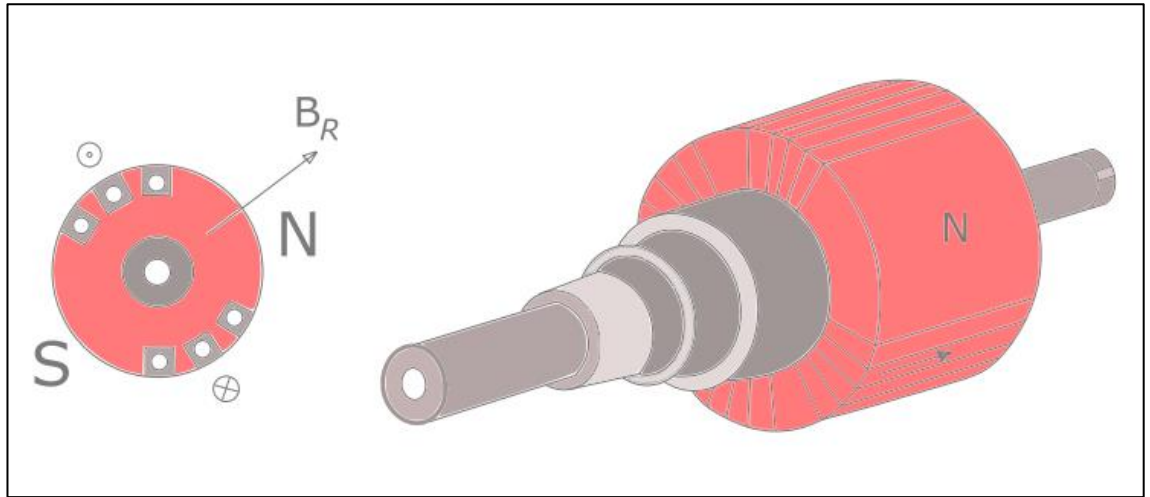
2.2.Rotor Yapısı

Senkron generatörün rotoru bir elektromıknatısa benzetilebilir ve rotoru oluşturan manyetik kutupların çıkık ya da yuvarlak olması haliyle iki farklı şekilde incelenmektedir. *Çıkık kutuplu rotor* yapısı, rotor yüzeyinden dışarı doğru çıkıntı oluşturmuş bir manyetik kutup dizinini ifade etmektedir. Diğer bir rotor çeşidi olarak tanımlanan *Yuvarlak kutuplu rotor* ise rotor yüzeyi ile aynı hizada üretilmiş olan manyetik kutup dizini olarak tanımlanmaktadır (Chapman, 2012).



Şekil 2.5. Yuvarlak (solda) ve çıkık kutuplu (sağda) rotor yapıları şekilleri

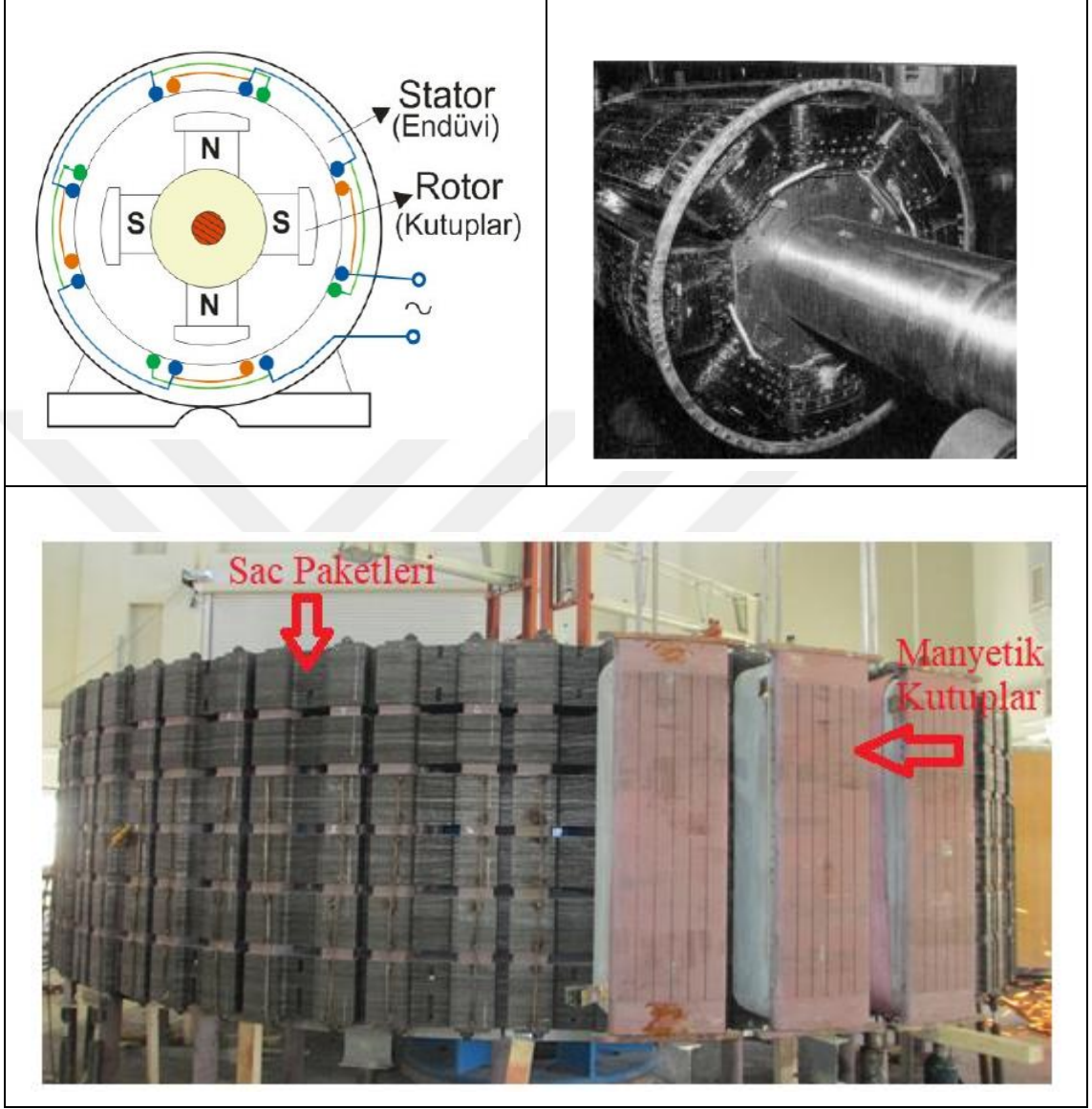
Yuvarlak (silindirik) kutuplu rotor yapılarında stator ve rotor arasındaki hava aralığı tüm döner alan boyunca aynıdır ve bu tür makineler Turbo Rotorlu Senkron Generatör de denilir. Çapları genellikle dar, boyları nispeten daha uzundur ve rotor yapılarından kaynaklı olarak rüzgâr kayıpları daha azdır Elektrikport (2019).



Şekil 2.6. Yuvarlak kutuplu rotor arkadan ve yandan görünüşü

Çıkık kutuplu rotorlarda manyetik kutupların çıkıklık yapısından kaynaklı olarak stator ve rotor arasındaki hava aralığı, makinenin içinde değişiklik göstermektedir. Yani stator iç çevresi, yüzey olarak düzgün olmasına rağmen rotor dış çevresi, düzgün bir yüzey oluşturmamaktadır. Genellikle çapı, geniş ve boyu yuvarlak rotorlu rotor yapısına

nispeten daha kısadır. Rotorun düzgün olmayan yüzeyinden kaynaklı olarak rüzgâr kayıpları fazladır ve bundan dolayı daha gürültülü çalışmaktadırlar Elektrikport (2019).



Şekil 2.7. Çeşitli çıkık kutuplu rotor görünüşleri

Çıkık kutuplu rotorlar, genellikle dört veya daha fazla sayıda kutuplu olarak tasarlanırken yuvarlak kutuplu rotorlar, iki veya dört kutuplu olarak imal edilirler Elektrikport (2019).

Çıkık kutuplu rotorlar, kayıp faktörlerinden dolayı genellikle tasarım olarak çevresel hızın daha yavaş olduğu uygulamalarda tercih edilir. Rotor merkezine yerleştirilmiş olan ve kama ile mile sabitlenmiş “ rotor göbeği”, aynı zamanda kutupların sabitlenmesini sağlayan dairesel kesitli bir yapı oluşturmaktadır. Büyük güçlü

generatörlerde kutuplar, stator sargılarının ürettiği manyetik alanlara çok yakın olduğundan dolayı Histerisiz ve Fuko kayıplarının oluşumundan izole kalamazlar ve büyük güçlü makinelerde oluşan demir kayıpları çok fazla boyutlara ulaşabilmektedir. Rotorun maruz kaldığı bu değişken manyetik alandan dolayı oluşan girdap akımı kayıplarını azaltmak amacıyla rotor, ince laminasyon saclarından imal edilir (Elektrikport (2019)).



Şekil 2.8. Bağıştaş I HES Rotor Laminasyon Sacları Dizilimi

2.2.1. Uyarım sistemleri

Senkron generatörlerde rotordaki uyarım sargısından bir doğru akım geçirildiğinden ve rotor sürekli olarak dönme hareketine sahip olduğundan, alan sargılarına süreklilik arz eden bir Doğru Akım (DA) aktarım yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu aktarım için iki tip uyarım sistemi kullanılmaktadır.

- a- Bilezik ve fırça sistemleri ile rotor manyetik kutup sargılarına harici bir DA kaynaktan uyarım sağlamak, diğer bir ismiyle Statik Uyarım Sistemi
- b- Senkron generatörün rotoru üzerine yerleştirilmiş özel bir DA kaynaktan uyarım sağlamak, diğer bir ismiyle Dinamik Uyarım Sistemi

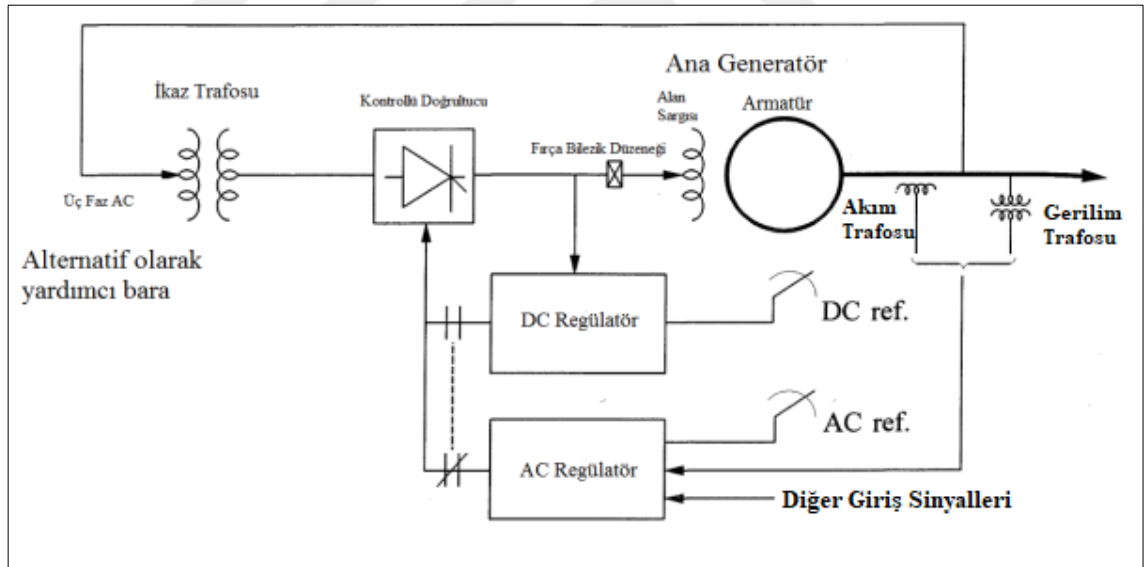
1960'lı yıllardan önce yarı-iletken teknolojisinin henüz gelişmemiş olmasından dolayı senkron generatörlerde dinamik ikaz sistemleri DA generatörlü uyarım tekniği kullanılırdı. Fakat gelişen yarı iletken teknoloji ile bu sistemler yerlerini yarı-iletken teknolojiyi donatılmış sistemlere bırakmıştır. En son gelinen aşamada ise statik uyarım sistemleri (ST) geliştirilmiş ve bu sistemler sayesinde hem güç sisteminin daha

stabil olması hem de daha hızlı cevaplar verebilmesi gibi avantajlar sağlanmıştır (Tufan, 2013).

2.2.1.1. Statik uyartım sistemleri

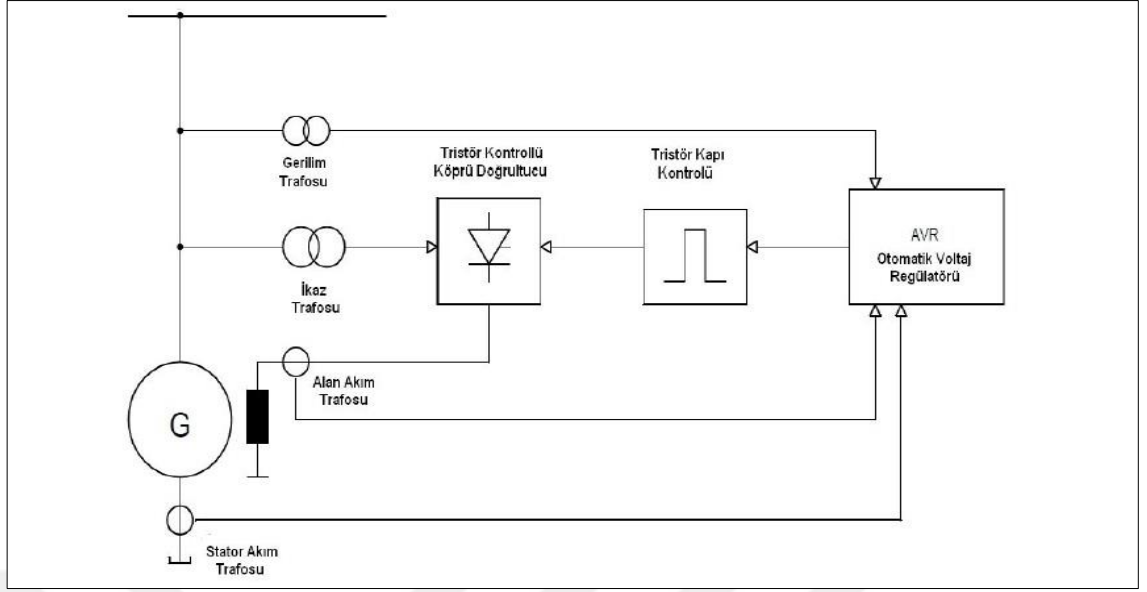
Statik uyartım Sistemlerinde, uyartım generatörlerinin yerine ana generatörlerin çıkış baralarına direkt bağlanan bir uyartım (ikaz) trafosu ve uyartım (ikaz) trafosunun çıkışındaki AA (Alternatif Akım)'ı DA (Doğru Akım) 'ya dönüştüren bir tristör konvertör grubu mevcuttur. Uyartım akımının büyüklüğü söz konusu yarı iletken teknolojisine sahip tristörlerin tetiklenmesi ile kontrol edilir. Son yıllarda kullanma ve uygulama sahası hızla gelişen tristörler vasıtasıyla generatör gerilimleri, çok hızlı olarak istenen değere ayarlanabilmektedir Elektrikport (2019).

Statik uyartımlı sistemler, 10.000 Ampere kadar uyartım akımı gerektiren büyük güçlü uygulamalarda tercih edilir (Omaç ve Tufan, 2012).



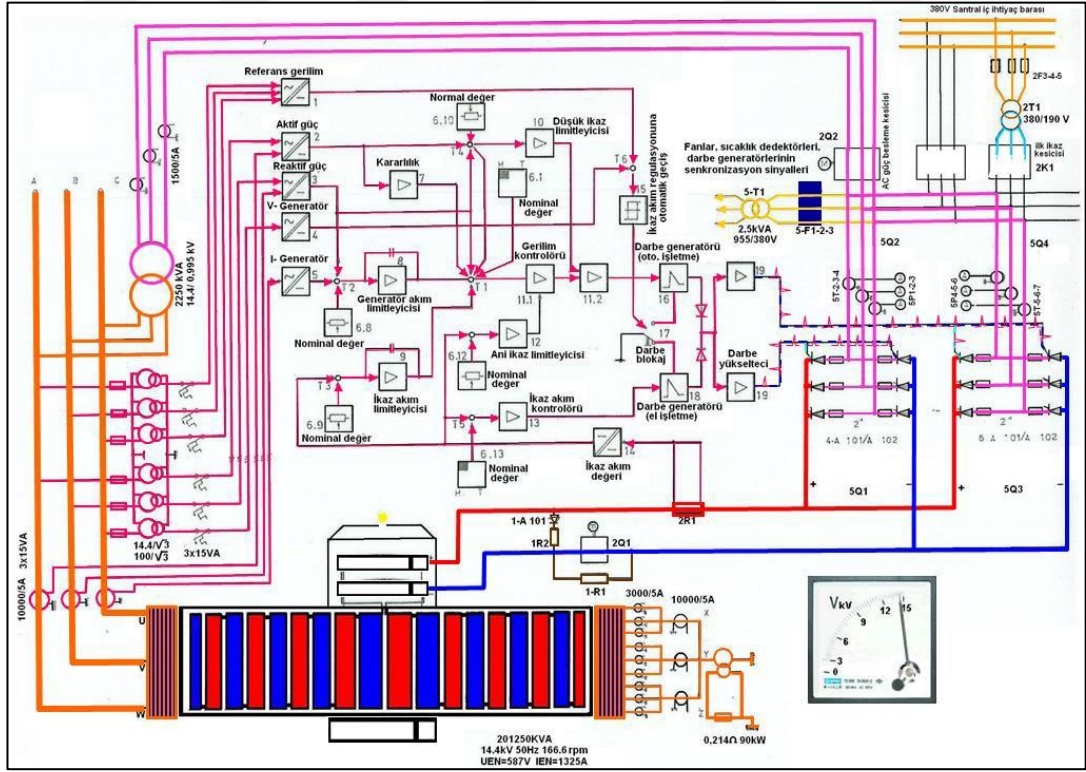
Şekil 2.9. Statik uyartım sistemi prensip şeması (Tufan, 2013)

Şekil 2.9.'da görüldüğü üzere senkron generatör, uyartım için gereken gücü, bir uyartım trafosu (ikaz trafosu) ve tristörlü AA/DA dönüştürücüsü üzerinden sağlamaktadır. Generatörün ürettiği gerilim, uyartım (ikaz) trafosundan belirli bir değere indirilip tristörlü AA/DA dönüştürücüden generatörün rotoruna DA olarak uygulanır. Bu esnada dönme hareketi yapan rotor manyetik kutuplarına gerilim verme işlemi fırça ve bilezikler vasıtasıyla yapılmaktadır Elektrikport (2019).



Şekil 2.10. Farklı bir statik uyarım sistemi prensip şeması (Omaç ve Tufan, 2012)

Statik uyarım sistemleri için en bariz ve büyük örneklerden birisi şüphesiz Keban Barajı ve HES tesislerinde bulunan 5 No.lu üniteye ait uyarım sistemidir. Şekil 2.11.'de uyarım sisteminin çalışma şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Keban HES 5 No.lu ünite statik uyarım prensip şeması Elektrikport (2019)

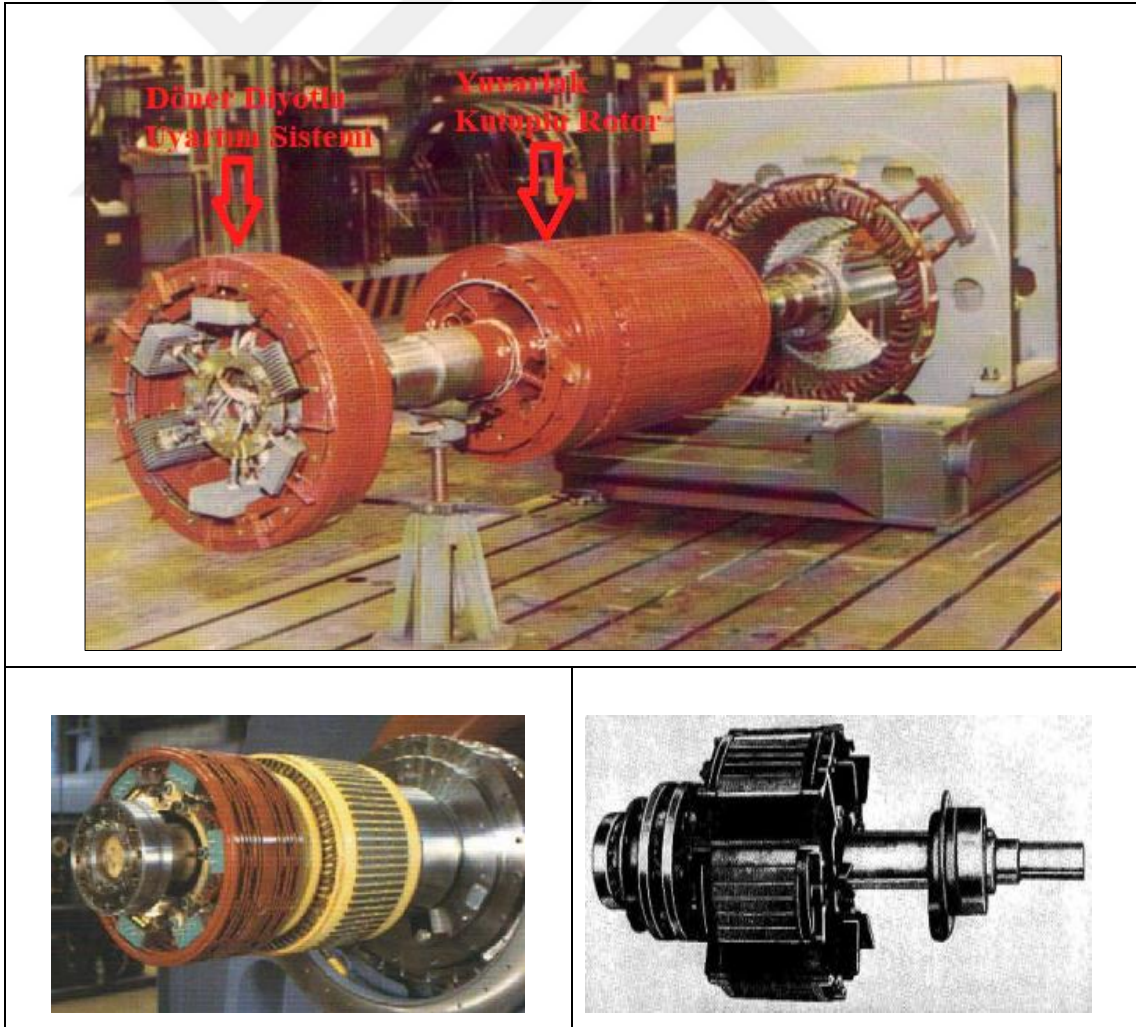
Söz konusu generatörün çıkışında; gücü 2.250 kVA, sekonder gerilimi 955 Volt olan uyartım trafosu bulunmaktadır. İlgili uyartım sistemi, aşağıda belirtilen sırada ve prensipte çalışmaktadır Elektrikport (2019).

- İlk uyartımın (ikazlanmanın) sağlanması için santral iç ihtiyacından beslenen, düşük güçlü bir trafo (380V/190V) vardır.
- Generatör, senkron hızına ulaştığında ilk uyartım şalteri kapanır ve generatör voltajı 2kV'a ulaşınca kadar kapalı kalır.
- Bu esnada uyartım trafosu enerjilenmiş olur. İlgili devre kesicileri açılıp kapatılarak uyartım trafosundan alınan güç, tristörler aracılığıyla doğru akıma çevrilir.
- Çevrilen 450V DA 1100 Amper uyartım kesici vasıtasıyla rotor kutuplarına giden bilezikleri besler.
- Rotor sargılarında bulunan uyartım/ikaz akımı, meydana getirdiği manyetik alan ile stator sargılarında bir EMK meydana getirerek alternatif akım elde edilir Elektrikport (2019).



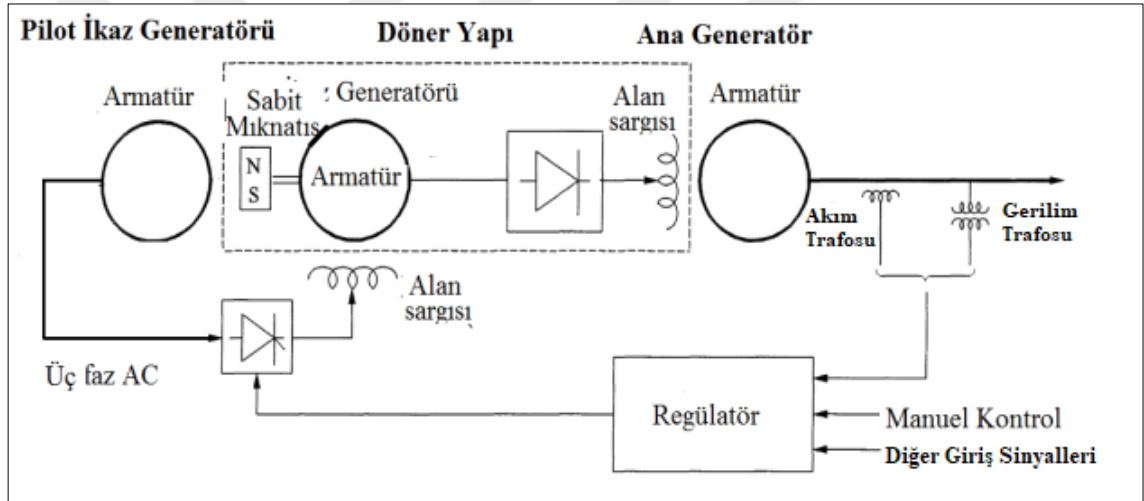
Şekil 2.12. Keban HES 5 No.lu ünite statik uyartım panoları Elektrikport (2019)

Dinamik uyarımlı sistemlerde, küçük hacim kaplayan doğrultucular kullanılarak generatörün ihtiyacı olan uyarım gücü elde edilir. Bu uyarım gücü rotor üzerine bağlanmış küçük güçlü başka bir senkron generatör ile elde edilmiştir. Küçük güçlü senkron generatörün endüvi sargısı rotora, uyarma sargısı stator bölümüne konumlandırılmıştır. Uyarım generatörünün senkron hızda dönen rotorunda endüvi sargısı üç fazlıdır ve dolayısıyla fazların çıkışlarından alternatif gerilim elde edilir. Elde edilen üç fazlı bu gerilim, yine üç fazlı doğrultucu devresini beslemektedir. Doğrultucu, ana makinenin rotoru ve uyarım generatörünün rotoru ile aynı devirde dönmektedir. Doğrultucuya iletilen Alternatif Akım, çıkışta Doğru Akım olarak alınır ve senkron generatörünün rotoru üzerindeki manyetik kutup sargılarına iletilir. Böylece fırça düzeneği kullanılmadan uyarım (ikaz) verilmiş olmaktadır. Bu özelliği sayesinde bu tip uyarım sistemlerine “ Fırçasız Uyarım Sistemi “ veya “ Döner Diyotlu Uyarım Sistemi” adları da verilmektedir (Mergen ve Zorlu, 2010).



Şekil 2.14. Fırçasız ve Döner Diyotlu Dinamik Uyarım Sistemli Rotor Örnekleri

Günümüzde kullanılan bazı senkron generatörler ise generatörün uyarılmasını herhangi bir harici güç kaynağından bağımsız yapmak adına, genellikle “*pilot uyarıcı*” adı verilen ilave bir sistem entegre edilerek imal edilir. Pilot uyarıcı, rotor bölümünde sürekli mıknatısları ve stator kısmı üzerinde üç fazlı sargı grubu ihtiva eden küçük bir AA (Alternatif Akım) generatörüdür. Sözü edilen bu generatör, uyarım için gerekli olan gücü üreterek senkron generatörün (ana makine) alan devresinin regülasyonunu sağlar. Özetle “pilot uyarıcının” sürekli mıknatısları, uyarıcının uyarma akımını ve uyarıcı devresi de ana makinenin uyarma akımını üretir. Pilot uyarıcı ile donatılmış senkron generatör uyarım sistemlerinde harici bir elektrik gücüne gerek kalmadan sürekli çalışma sağlanabilir. Bu sisteme dair akış şeması, Şekil 2.15’te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Pilot uyarıcılı fırçasız bir uyarım sistemi (Tufan, 2013).

Fırçasız uyarıcı sistemlerine sahip senkron generatörlerde genellikle, ihtiyaç halinde kullanılabilmesi için aynı zamanda fırça ve bilezik tertibatları da bulunabilir.

2.3.Senkron Generatörlerde Hız

Senkron generatörlerde hız kavramı “senkron” isminden de anlaşılacağı üzere bu tip generatörler için önemli bir kavram olarak gündeme gelmektedir. Örneğin hidroelektrik santrallerde kullanılan ve türbinlenen su vasıtasıyla dönme hareketi kazandırılan rotorun hızı ile stator sargılarında meydana gelen gerilimin frekansı arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır.

Elektriksel frekansın mekanik dönme hızı ile senkron ve bağımlı olmasından dolayı bu tip makinelere senkron adı verilmiştir. Bir senkron generatörün rotor tertibatı, doğru akım ile beslenen bir elektromıknatıstan ibarettir. Manyetik alanın dönüş hızı ile stator çıkış geriliminin elektriksel frekansı arasındaki ilişki, aşağıdaki bağıntı ile gösterilir (Chapman, 2012);

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.5)$$

f_e = Elektriksel Hız (Hertz)

n_m = Manyetik alanın mekanik hızı (dev/dak) , Senkron makinalar için Rotor hızı ile manyetik alan ve türbin devirler eşittir.

P = Kutup Sayısı

Rotor manyetik alan ile aynı hızda dönme hareketi yaptığından, yukarıdaki bağıntı rotor / türbin hızı ve elektriksel frekans arasındaki ilişkiyi de tanımlar. Elektriksel frekans, enterkonnekte sistemin temel bileşenlerinden birisidir ve 50 Hz veya 60 Hz olarak genellenmiştir. Buradan hareketle senkron generatörün istenen sistem frekansında gerilim ve güç üretebilmesi için manyetik kutuplarının sayısı ve devir/dakika cinsinden rotor/türbin hızı değişkenlerinin hesaplanması gerekmektedir. Örneğin; 8 kutuplu bir senkron generatörün 50 Hz bir frekansta güç elde edebilmek için 750 devir/ dakika hıza sahip olması gerekmektedir (Chapman, 2012). Aşağıdaki tablo, devir/dakika cinsinden hızın kutup sayısı ve elektriksel frekansa bağlı olarak değişimini özetlemektedir.

Tablo 2.1. Frekans, Kutup sayısı ve Devir ilişkilerini gösteren tablo.

f (Hz)	50	50	50	50	50	50	50	50	50
P Kutup	2	4	6	8	10	12	20	40	60
n_m(dev/dak)	3000	1500	1000	750	600	500	300	150	100

2.4. Senkron Generatörlerde İndüklenen Gerilim

Bölüm 2.1.'de statorun bir fazında indüklenen gerilimin genliği;

$$E_A = \sqrt{2}\pi N c \varphi f \quad (2.6)$$

olarak bulunmuştur. Bu gerilim generatörde ki akıya, frekansa veya dönme hızına ve makinenin yapısına bağlıdır. Bu ilişkilerden hareketle yukarıdaki denklem, basitleştirilmiş haliyle aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir:

$$E_A = K\phi\omega \quad (2.7)$$

Bu denklemdeki " K " makinenin yapısını gösteren sabit bir değerdir ve ω elektriksel radyan/saniye olarak alındığında

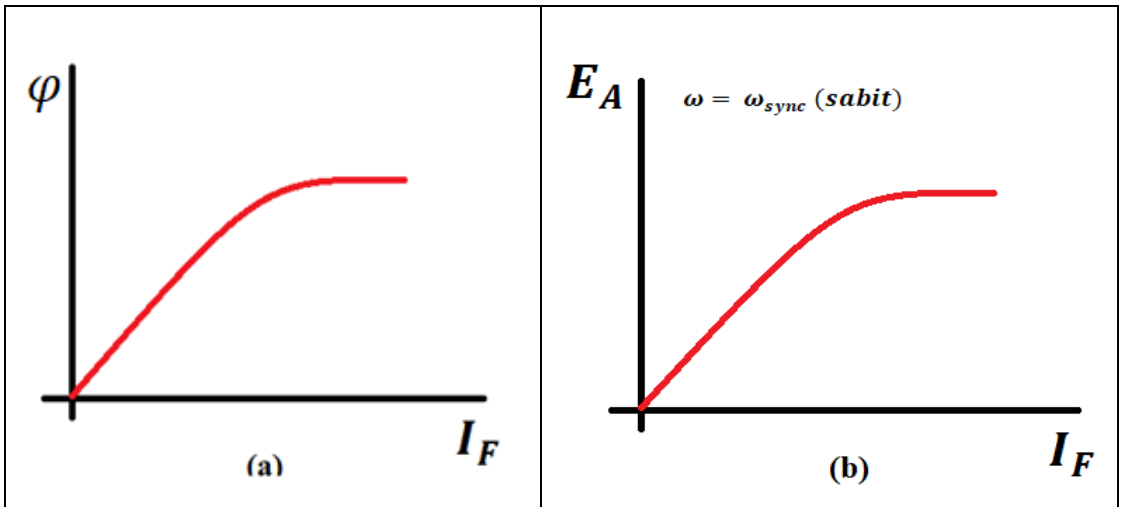
$$K = \frac{N_c}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

Eğer ω mekanik radyan/saniye olarak gösterilirse

$$K = \frac{N_c P}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

şeklinde elde edilir.

Stator sargılarında indüklenen gerilim E_A doğrudan akı ve hız ile orantılıdır. Akı ise rotor alan devresinden geçen uyarım akımına bağlıdır. Uyarım akımı I_F Şekil 2.16.a'daki gibi ϕ akısıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Senkron generatörlerde hız senkron, hız sabit olduğundan E_A Şekil 2.16.b'deki gibi direkt olarak uyarım akımına bağlıdır. Ayrıca bu değişime, makinenin boşa çalışma (açık devre) karakteristiği veya mıknatıslanma eğrisi de denilmektedir (Chapman, 2012).



Şekil 2.16. a) Senkron generatör Akı – Uyarım Akımı ilişkisi b) Senkron generatör için mıknatıslanma eğrisi

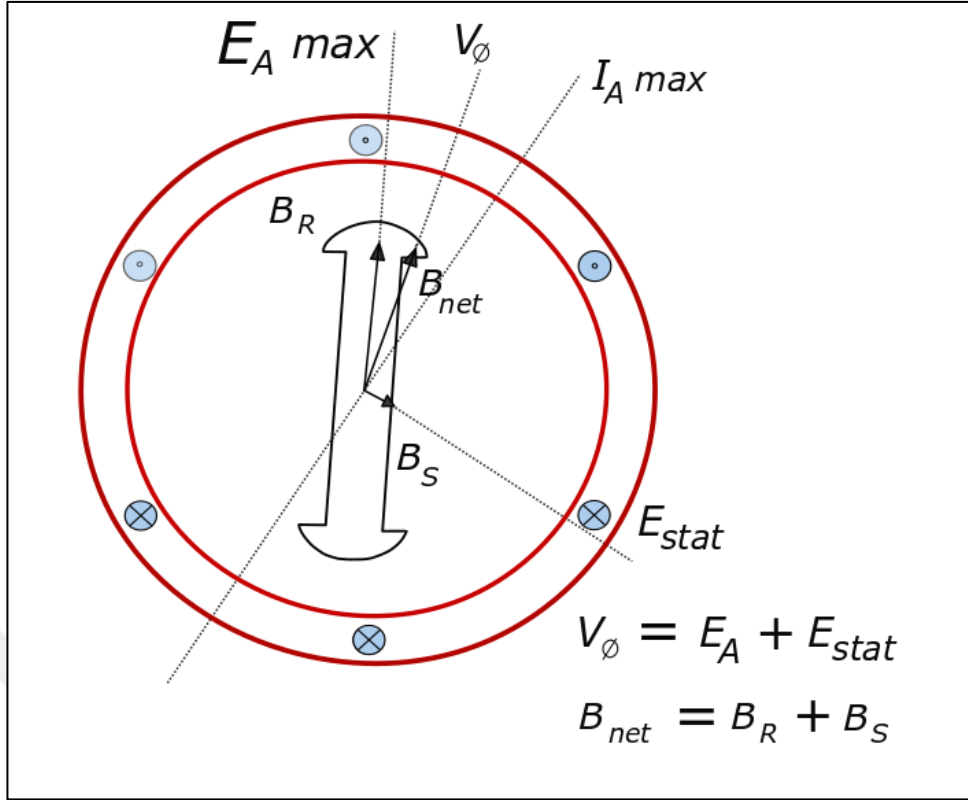
2.5. Senkron Generatörlerde Eşdeğer Devresi ve Endüvi Reaksiyonu

Bir senkron generatörün herhangi bir fazında indüklenen gerilim E_A olarak gösterilmektedir. Fakat E_A gerilimi genel olarak generatörün çıkış uçlarında görülen gerilim değildir. E_A gerilimi sadece fazdan endüvi akımı akmadığı şartlarda V_\emptyset ile aynı olacaktır. Bu durumu etkileyen ve buna sebep olan parametreler aşağıdaki gibidir:

- Statorun akan akımın etkisiyle manyetik alanda oluşan bozulma (endüvi reaksiyonu)
- Endüvi Sargılarının Öz İndüktansı
- Endüvi Sargılarının Öz Direnci
- Rotorun çıkık kutuplu olmasının etkisi

Rotorun çıkık kutuplu olmasının etkisi ihmal edilerek yapılan hesaplamalarda, söz konusu gerilime en büyük etkinin endüvi reaksiyonu olduğu bilinmektedir. Senkron generatörün rotoru döndürüldüğünde generatörün stator sargılarında bir E_A gerilimi meydana gelir. Bu generatörün stator sargılarına bir yük bağlanması halinde stator üzerinden bir akım akmaya başlayacaktır. Statorun üç fazından akmaya başlayan akımlar, makinenin içinde farklı bir manyetik alan üretmiş olur. Üretilen bu stator manyetik alanı, faz gerilimini etkileyecek ve rotor manyetik alanını bozacaktır. Bu duruma endüvi (stator) den akan akımların sebep olması münasebetiyle bu olaya *endüvi reaksiyonu* adı verilir (Chapman, 2012).

Generatörün geri güç faktörlü bir yüke bağlandığı kabulünden hareketle Rotor manyetik alanı B_R olmak üzere statorun akan akım kaynaklı oluşan manyetik alanı B_S , stator sargılarında bir gerilim üretir ve bu gerilime E_{stat} ismi verilir. Dolayısıyla stator sargılarının her birindeki toplam gerilim, bahsedilen E_A ve E_{stat} gerilimlerinin toplamıdır.



Şekil 2.17. Endüvi reaksiyonu modelinin oluşumu; B_S alanı B_R alanına eklenerek B_{net} 'i oluşturur ve E_{stat} gerilimi E_A ya eklenerek V_{ϕ} 'yi oluşturur.

Bu kısımda bahsedilen B_{net} stator ve rotor manyetik alanlarının toplamını simgelemektedir. E_A ile B_R 'nin E_{stat} ile B_S 'nin faz açıları aynı olduğundan, net manyetik alan B_{net} ve net gerilim V_{ϕ} aynı fazdadır. Gerilim ve akımlar Şekil 2.17. de gösterilmiştir.

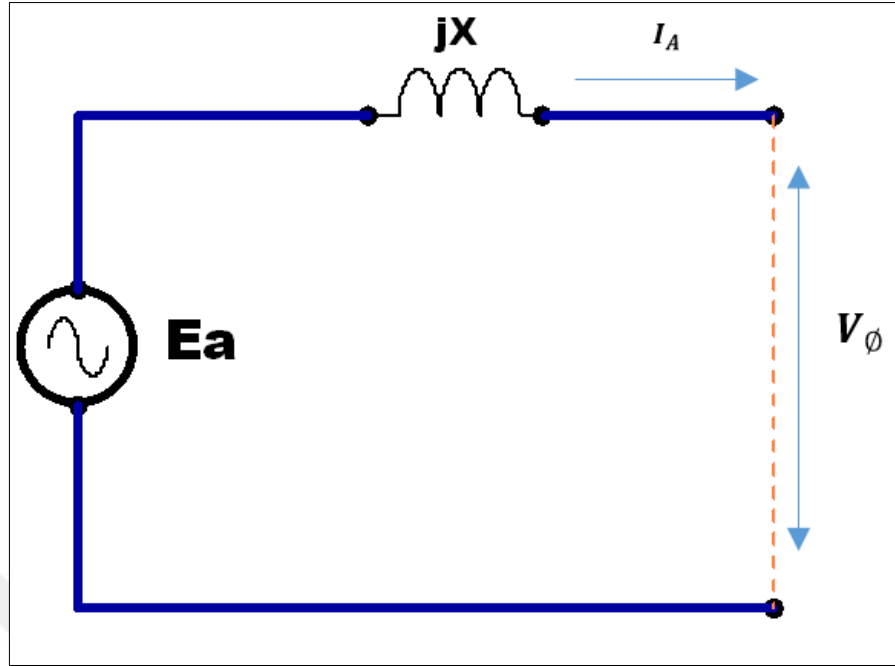
E_{stat} gerilimi I_A 'nın 90° gerisinde ve yine I_A ile doğru orantılıdır, X bir orantı sabiti olarak kabul edildiğinde endüvi reaksiyonu gerilimi:

$$E_{stat} = -jXI_A \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir ve böylece bir fazdaki gerilim, denklem 2.11 gibi olur:

$$V_{\phi} = E_A - jXI_A \quad (2.11)$$

Şekil 2.18. Endüvi reaksiyonu gerilimini tanımlayan denklemle aynı durumu izah etmektedir. Yani endüvi reaksiyonu gerilimi indüklenen stator gerilimle seri bağlı bir indüktans olarak gösterilebilir.



Şekil 2.18. Senkron generatörün basit eşdeğer devresi

Endüvi reaksiyonun etkilerinin yanında, stator sargılarına ait bir öz indüktans ve direnç değerlerine bağlı etkilerde mevcuttur. Stator direnci R_A , stator öz indüktansı L_A ve bu değerlere karşılık gelen reaktans değeri de X_A olarak alındığında;

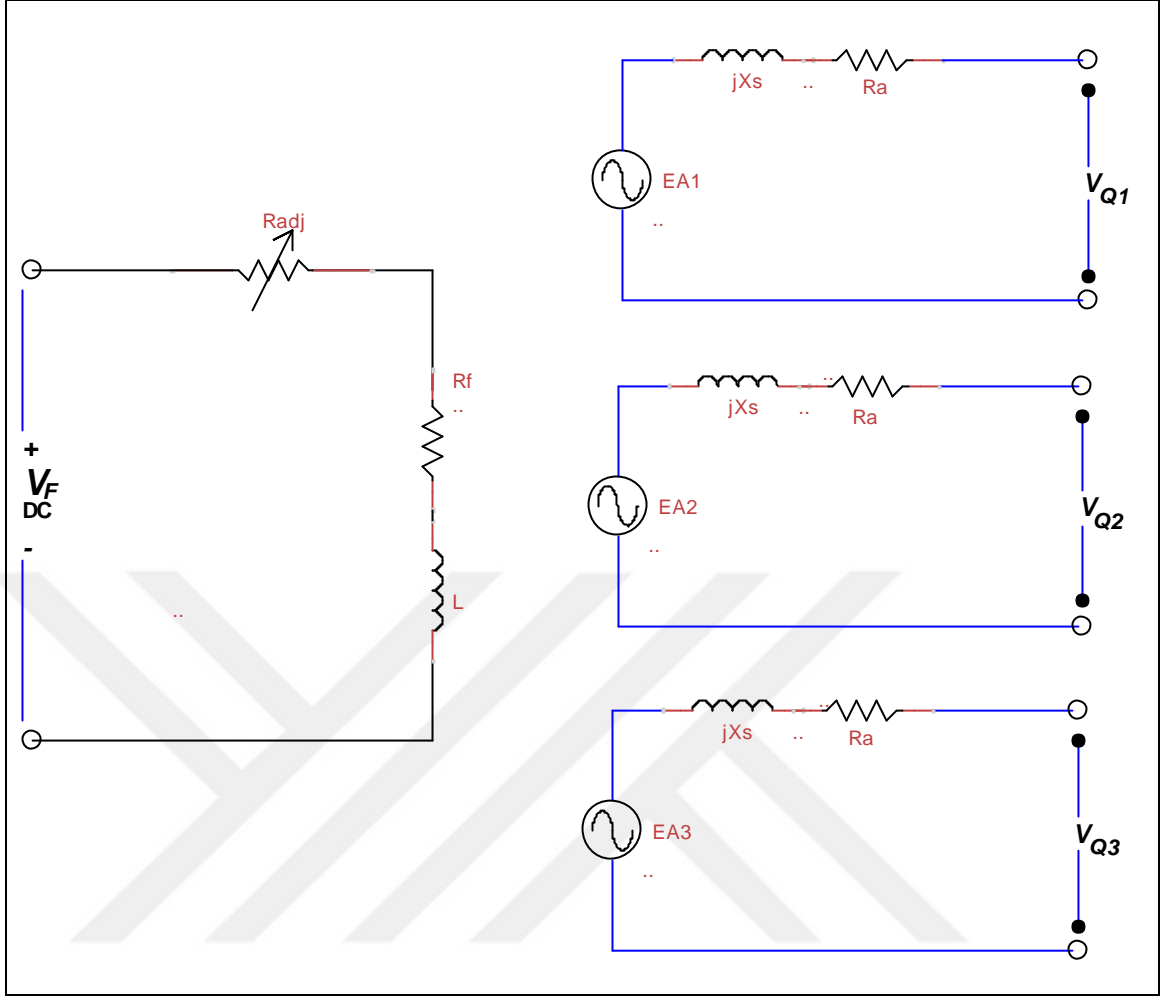
$$V_{\phi} = E_A - jX I_A - jX_A I_A - R_A I_A \quad (2.12)$$

olacaktır. Makinedeki öz indüktans ve endüvi reaksiyonu etkileri genelde tek bir etkiyle simgelenir ve makinenin *senkron reaktansı* adı verilir.

$X_S = X + X_A$ yukarıda ki denklemde yerine yazıldığında

$$V_{\phi} = E_A - jX_S I_A - R_A I_A \quad (2.13)$$

Üç fazlı stator sargısının eşdeğer devresi Şekil 2.20.'de gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, sargının indüktansı ile seri bağlı olarak gösterilen sargı direnci ve bir DA güç kaynağı ile uyarılan rotor alan devresi modellenmiştir. Rotor alan devresinden akacak uyarım akımının regülasyonunu sağlamak için R_F 'ye seri ve ayarlı bir direnç olan R_{adj} ilave edilmiştir. Ayrıca her faza ait stator sargısında indüklenen gerilime seri bağlı X_S reaktansı (Endüvi reaktansı ve bobinlerin öz reaktanslarının toplamı) ve seri bağlı R_A direnci bulunmaktadır. Bilindiği üzere üç fazlı sistemlerde gerilimler ve akımlar arasında 120° faz farkı vardır bunun dışında üç faz tamamen aynı parametrelere sahiptir (Chapman, 2012).

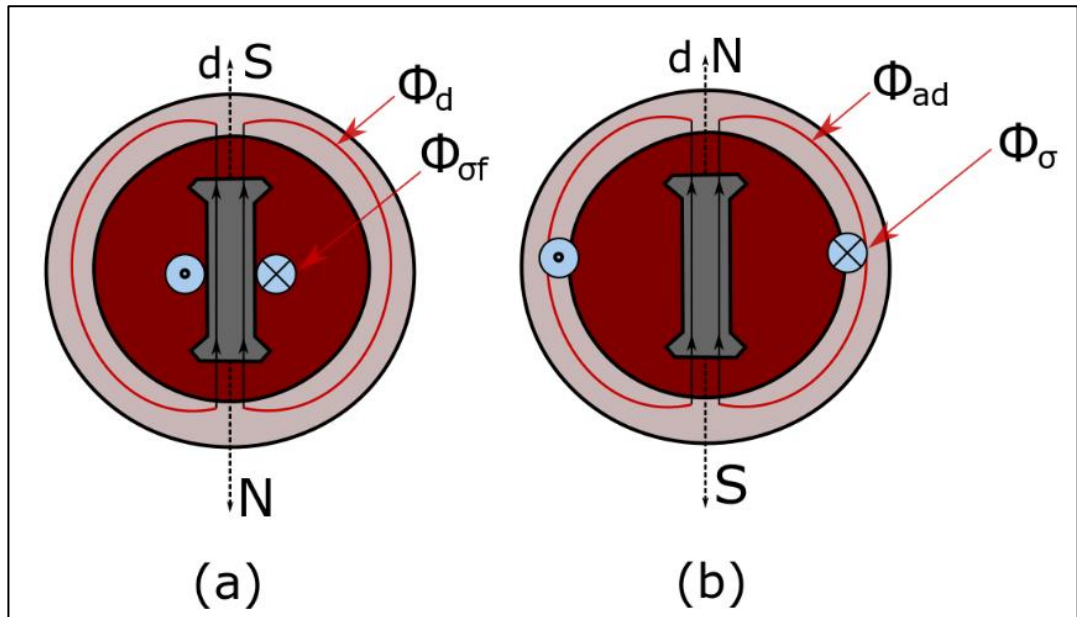


Şekil 2.19. Üç fazlı bir senkron generatörün basit eşdeğer devresi

Endüvi reaksiyonunu özetle aşağıdaki adımlarla açıklayabiliriz;

- Rotor alan devresinden, ikaz/uyartım sistemleri aracılığıyla kontrollü olarak bir I_F doğru akımı akıtılmaktadır.
- Bu ikaz/uyartım akımı doğru akım olmasından dolayı bu akımın rotor sargılarında meydana getirdiği manyetik akı da doğru akı olacak ve sabit değerli olacaktır (Φ_f).
- Söz konusu bu sabit manyetik akı, stator çekirdeği tarafından alınır (Φ_d) ve oldukça az bir kısmı da rotor ikaz/uyartım sargılarında kaybolur ($\Phi_{\sigma f}$).
- Rotor mili, türbin aksamı tarafından uygulanan dönme yönündeki hareket ile dönmeye başladığında stator sargılarında periyodik olarak değişen e_A, e_B, e_C elektro motor kuvvetleri meydana gelir.
- Stator sargılarına bağlanan uygun miktardaki yükler dolayısıyla stator sargılarından da i_A, i_B, i_C alternatif akımları akacaktır.

- f- Rotor da ki ikaz akımı gibi statordan akan bu akımlarda stator sargılarında Φ_A, Φ_B, Φ_C manyetik akılarını meydana getirecektir. Bu akının büyük kısmı rotor çekirdeği tarafından alınır (Φ_a) ve küçük bir kısmı da sargılarında kaçak olarak kaybolacaktır (Φ_σ).
- g- Birbirlerinden $2\pi/3$ (120°) radyan açısı olarak kaydırılmış stator sargıları A, B ve C üzerinde oluşan akı, akımlar da $2\pi/3 \cdot t_1$ kadar farklı olacaktır.
- h- Rotor tarafından alınan Φ_A, Φ_B, Φ_C manyetik akıları toplam değeri sabit olan " $\Phi_a = 1,5 \cdot \Phi_m \cdot \sin \omega t$ " akısını meydana getirir. Burada Φ_m sinüzoidal yasa ile değişen akının en büyük değeridir.
- i- Bu toplam akı Φ_a rotor ile aynı hızda ve aynı yönde dönmeye devam edecektir.
- j- Özetle kararlı şekilde çalışmaya devam eden bir senkron generatörde I_F ikaz akımının oluşturduğu Φ_d akısı ve stator sargılarından geçen akımların meydana getirdiği Φ_a akısı olmak üzere iki adet sabit ve senkron hızda dönen temel manyetik akı bulunmaktadır.
- k- Bu akılardan Φ_a akısı endüvi reaksiyonunu meydana getirir ve bu iki akının (Φ_a ve Φ_d) birbirlerine ters etki etmelerinden dolayı oluşan elektromanyetik moment, rotorun dönme yönüne ters diğer değişle frenleyici etki etmektedir.
- l- Türbinin dönme yönündeki momentinin, yukarıda bahsedilen frenleyici momente eşit olduğu senkron generatör, senkron hız ile dönme hareketine devam edecektir (Tufan, 2013).



Şekil 2.20. Senkron generatörde a-) kutup alanı, b-) endüvi alanı dağılımı (Tufan, 2013)

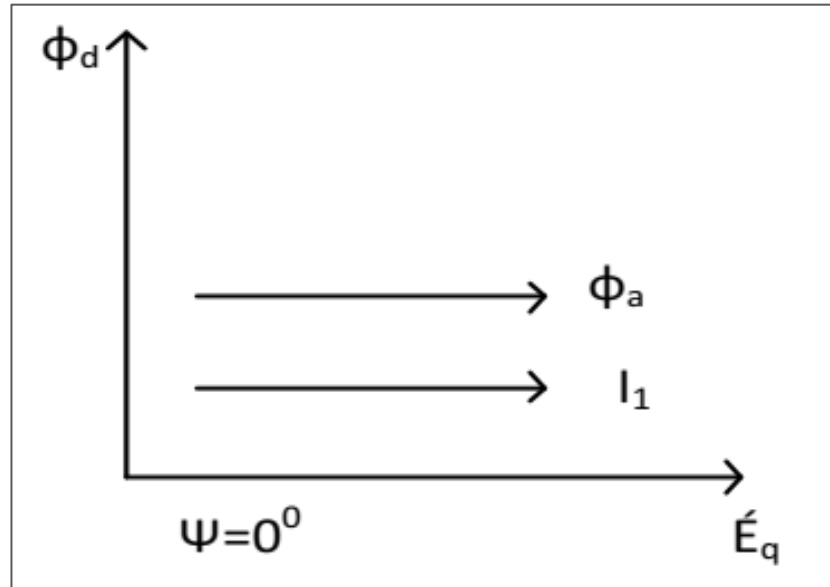
2.6. Endüvi Reaksiyonunun Yükün Niteliğine göre Değişmesi

Senkron generatör yük altında çalışmaya başladığında, F_f alan sargısının oluşturduğu magnetomotor kuvveti ve F_a stator (endüvi) sargısı magnetomotor kuvveti, birbirine etki etmektedir. Stator magnetomotor kuvveti, rotor magnetomotor kuvveti ile aynı yönde veya ters yönde etki edebilecektir. Endüvi reaksiyonu, senkron generatörün yükünün büyüklüğüne ve yükün karakteristiğine bağlı olarak değişken bir etkiye sahiptir (Tufan, 2013).

Senkron generatörler omik, endüktif veya kapasitif gibi değişik yüklerde çalışmaktadır. Generatörlerde oluşan emk ve akım vektörleri arasındaki faz açısı, farklı konumlarda olabilirler. İkaz sargısının oluşturduğu Φ_f manyetik akısının statordan geçen bölümü Φ_d rotor d ekseni yönündedir. Φ_d akısının stator sargılarında oluşturduğu E_q emk'sı ise 90° geride dolayısıyla q ekseni yönündedir. Stator sargılarından geçen I_1 akımı vektörü ise yükün karakterine bağlı olarak E_q vektörüne göre farklı konumlarda olabilir (Tufan, 2013).

a- Omik Yük durumunda

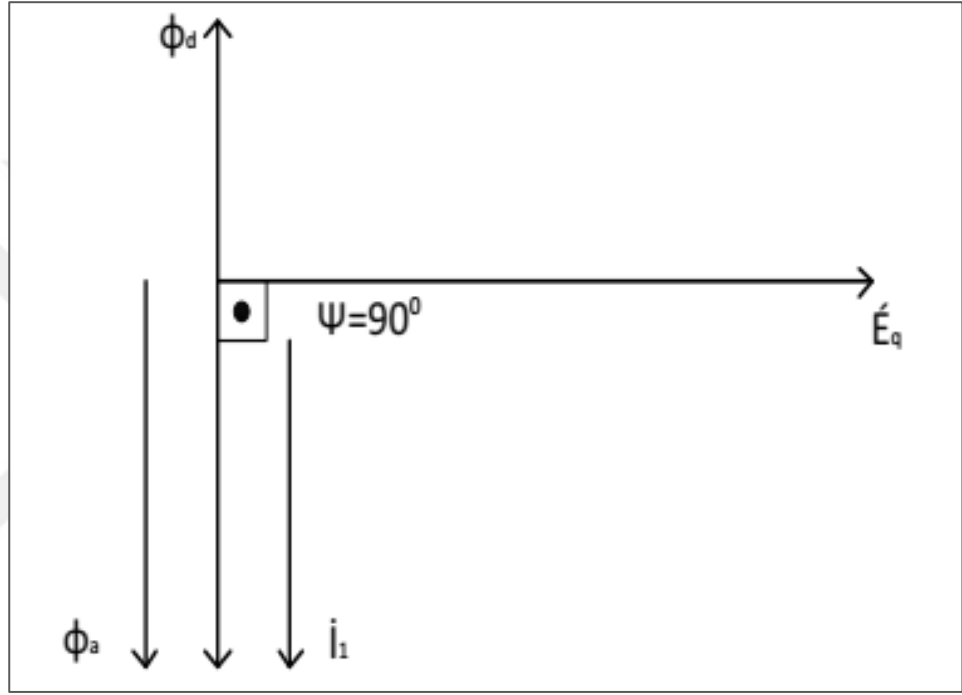
E_q ve I_1 vektörleri arasındaki faz açısı, sıfırdır ($\psi=0$); dolayısıyla fazör diyagramı Şekil 2.21.'de görüldüğü gibi aynı yönlü olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.21. Omik yük durumunda endüvi reaksiyonu (Tufan, 2013).

b- Endüktif Yük durumunda

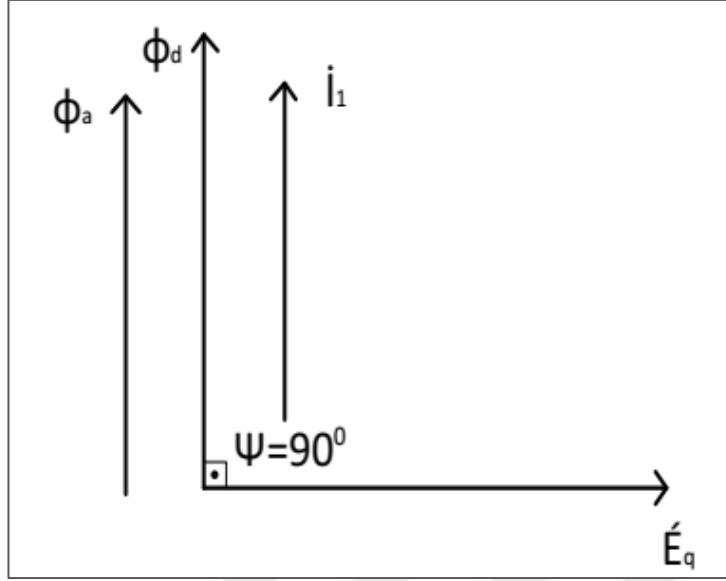
\dot{I}_1 akım vektörü E_q vektöründen 90° geridedir ($\psi=90^\circ$). Dolayısıyla rotor, 90° ileri (sol) döndükten sonra \dot{I}_1 akımı maksimum değerine ulaşmaktadır. Endüktif yük durumunda stator manyetik akısı, rotor manyetik akısına ters yönde etki edecektir; dolayısıyla stator manyetik akısı, Şekil 2.22.'te görüldüğü gibi boyuna eksen yönünde rotora mıknatıslayıcı etki yapmaktadır.



Şekil 2.22. Endüktif yük durumunda endüvi reaksiyonu (Tufan, 2013).

c- Kapasitif Yük durumunda

\dot{I}_1 akımı vektörü, E_q vektöründen 90° ileridedir ($\psi= - 90^\circ$). Kapasitif yük durumunda stator manyetik akısı ile rotor manyetik akısı, aynı yönde olacaktır; dolayısıyla stator manyetik akısı, Şekil 2.23.'te görüldüğü gibi boyuna eksen yönünde rotora mıknatıslayıcı etki yapmaktadır.



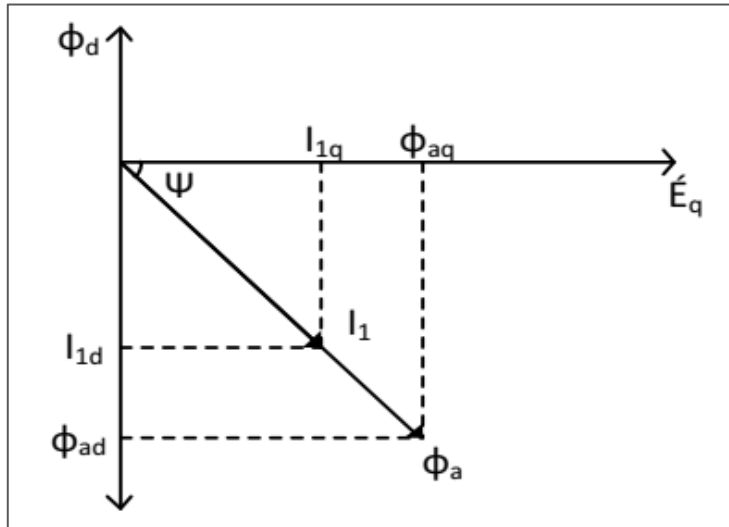
Şekil 2.23. Kapasitif yük durumunda endüvi reaksiyonu (Tufan, 2013).

d- Karmaşık Yük durumu (Omik-Endüktif)

Stator manyetik akısı, iki bileşene ayrılabilir:

- $\Phi_{aq} = \Phi_a \cos \psi$ – enine bileşen
- $\Phi_{ad} = \Phi_a \sin \psi$ – boyuna bileşen

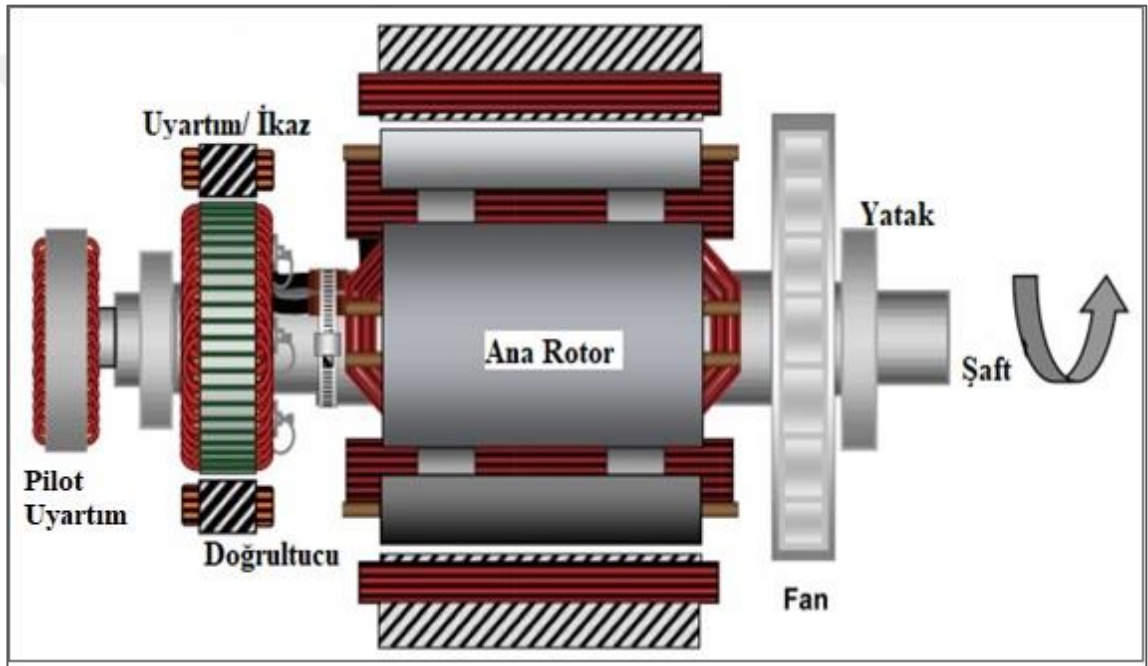
Omik-endüktif yükte endüvi reaksiyonunun boyuna bileşeni Şekil 2.24.'te görüldüğü gibi mıknatıslayıcı etki yapmakta, enine bileşeni ise rotor manyetik akısının simetrikliğini bozmaktadır.



Şekil 2.24. Omik - Endüktif yük durumunda endüvi reaksiyonu (Tufan, 2013).

2.7.Senkron Generatörlerde İzolasyon

İzolasyon, bir elektrik güç sisteminin enerjili ve enerjisiz parçaları arasındaki ayrışmadır. Söz konusu bu izolasyon; katı, sıvı, gaz, vakum veya katı karışım ve sıvı karışım şeklinde olabilir. İdeal yalıtkan malzeme, anma gerilim değeri altında üstünden hiç akım geçirmeyen yalıtkan madde olarak açıklansa da doğadaki tüm yalıtkan maddelerin çok sınırlı miktarlarda dahi olsa bir miktar iletkenliği söz konusudur. Bu iletkenlik dolayısıyla enerji altındaki sistemler de sargıyı çevreleyen izolasyon üzerinden de çok sınırlı bir akım akması muhtemeldir (Ndzeru, 2008).



Şekil 2.25. Generatörün genel gösterimi uyarım ve alan sargılarının yerleşimi Cpover (2019)

Akım taşıyan stator sargılarında, sargı dirençlerine bağlı olarak sıcaklık artacaktır. Bu sıcaklık artışı generatörün gücü, faz akımları, ileri-geri güç faktörlü çalışma şartlarına bağlı olarak farklı izolasyon sınıfı tasarımlarına sebebiyet vermektedir. Generatörün soğutma sisteminin tasarlanması aşamasında da bu parametreler dikkate alınmaktadır. İzolasyon sınıfları sıcaklık artışlarına göre tasarlanmış olup generatörün sürekli çalışma ve hazırda bekleme görevlerine göre de değişiklik göstermektedir Cpover (2019).

Tablo 2.2. İzolasyon sınıflarına göre Sıcaklık Limitleri

Sınıf	Kabul edilebilir max. nominal yükteki durum sıcaklığı	Kabul edilebilir max. aşırı sıcaklık ortalaması	
		Nominal Yük	Kısa devre
E	120 C°	75 C°	135 C°
B	130 C°	80 C°	145 C°
F	155 C°	100 C°	170 C°
H	180 C°	135 C°	200 C°

Generatorün izolasyon sınıfı, kullanılan izolasyon sisteminin özelliklerini yitirmeden sürekli olarak çalışabileceği en yüksek sıcaklık değerini belirtir. Yaygın olarak kullanılan izolasyon sınıfları yukarıdaki tabloda belirtildiği gibidir. Aksi belirtilmedikçe generatorün etiketinde veya katalogunda belirtilen güç değerleri; maksimum 40 °C ortam sıcaklığı, deniz seviyesi, nominal gerilim ve frekans için geçerlidir.

Generator sargısının sıcaklık değeri, normal şartlar altında çalışırken kullanılan izolasyon sınıfı sıcaklık değerinin maksimum limitini geçmemelidir. Örneğin; F sınıfı izolasyona sahip bir elektrik motorunun sargı sıcaklığı 155 °C'nin altında olmalıdır. Birçok generatör ve motor üreticisi, F sınıfı izolasyon malzemesi kullanırken sıcaklık artışını B sınıfı limitleri içinde tutar. Başka bir deyişle motora 25 °C'lik bir emniyet marjı sağlanmış olur. Böylece motorun daha yüksek ortam sıcaklıklarında ve daha yüksek irtifada, daha düşük ya da daha yüksek gerilimde çalışmasına imkan tanınmış olur. Bu durum, motorun normal çalışma koşulları altında yaklaşık %12 daha fazla yüklenmesine de olanak tanır. Motor sıcaklık artışının kullanılan izolasyon malzemesi limitleri altında olması, motor sargısının ömrünün uzamasını da sağlar Elkmotor (2019).

Katı izolasyon maddelerinin dielektrik dayanımı; ortam sıcaklığı, nem, test süresi, kirlilik veya yapısal kusurlardan etkilenir. İzolasyon, çalışma ömrü boyunca çeşitli elektriksel ve mekanik zorlanmalara maruz kalır ve bu parametrelerin yanı sıra diğer çevresel faktörlerin de etkisiyle zamanla bozulma eğilimine girerek yalıtım özelliğini kaybetmeye başlar (Ndzeru, 2008).

İzolasyon tasarımı yapılırken söz konusu ortam şartları, gerilim seviyesi ve mekanik zorlanmalara maruziyet ihtimalleri dikkate alınarak dizayn edilir. Normal şartlar altında izolasyon maddesi çalışma ömrü boyunca anma gerilimlerine dayanacak şekilde tasarlanmıştır. Fakat elektriksel ve mekaniksel zorlanmalar izolasyonun yaşlanma sürecini ciddi bir şekilde kısaltabilecek bir etkiye neden olabilir. Bu etkilerin tahminlenebilmesi ve işletmesel olarak gerekli bakım, onarım ve iyileştirme müdahalelerinin zamanında yapılabilmesi adına; DA İzolasyon Direnci ölçümü (DC Insulation Resistance Measurement) , Dielektrik Emme Oranı (Dielektrik Absorption Ratio) , Polarizasyon İndeksi ölçümü (Polarization Index) , Adım Gerilim Testi (Step Voltage Test) uygulamalarını düzenli olarak icra etmek önem arz etmektedir. Bahsi geçen testlerin sonuçlarına göre izolasyonun kondisyonu açısından önemli çıkarımlar yapılabilmekte ve bu çıkarımlara göre iyileştirme, onarım gibi aksiyonlar alınabilmektedir (Ndzeru, 2008).

İzolasyon direncinin DA testleri ve test ekipmanları ile elektriksel olarak simülasyonunun yapılabilmesi, izolasyonun olası deformasyonları ve yaşlanmışlığı hakkında önemli bir teşhis konulmasına imkan vermektedir. Önerilen DA testleri başlıca aşağıdaki gibidir:

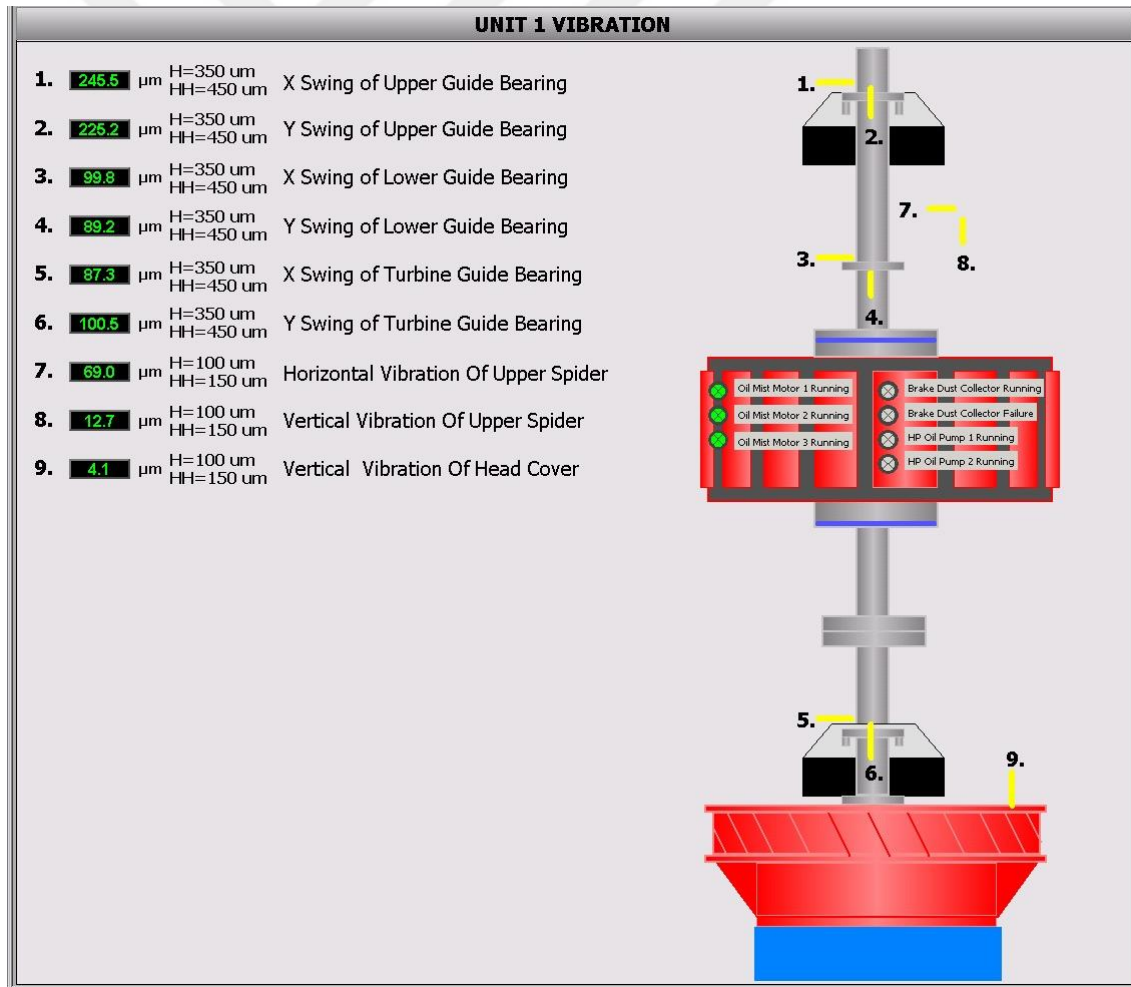
- Kısmi Kontrol (Spot Check – IR)
- Dielektrik Emme Oranı (Dielectric Absorption Ratio)
- Polarizasyon Endeksi (Polarization Index – PI)
- Adım Gerilim Testi (Step Voltage Test)

Bu testler, yüksek gerilim altında çalışan stator ve rotor sargılarının izolasyon kondisyonlarını tayin etmesi ve olası iş güvenliği ve maddi kayıplara sebebiyet verebilecek kazaların önüne geçilmesi amacıyla önem ihtiva etmektedir. Montaj, devreye alma, bakım, onarım, rehabilitasyon gibi çalışmaların akabinde yapılan bu testler ekipmanın sağlıklı ve güvenilir şekilde devreye alınabileceği yönündeki onay mekanizmasını yürütür. Bu testlerin sonuçlarından hareketle söz konusu enerji altında çalışacak ekipman için“ Enerjilendirilmesi Sakıncalıdır “ ya da “ Enerjilendirilmesi Güvenlidir “ şeklinde kesin sonuçlara varılabilmektedir (Ndzeru, 2008).

Elektriksel ve mekanik darbelere, senkron makinelerin izole edilmiş rotor ve stator sargılarında ve çekirdek yapısında bozulmalara olanak sağlar. İzolasyon üzerinden rotor

ve/veya stator gövdesine ya da şasesine akan kaçak akımın artması I^2R 'nin artmasına sebebiyet verecek ve bu artış, ısı yayılımı olarak ortaya çıkacaktır. Artan rotor kaçak akımı nedeniyle dengesizleşen alan akımı, dengesiz bir vibrasyona sebebiyet vererek yatak bölümlerindeki ısınmayı artıracaktır. Bu vibrasyon kaynaklı yatak sıcaklıklarının maksimum noktasına gelmesi ile ünite servis harici olabilecektir (Ndzeru, 2008).

Günümüzde kullanılan senkron generatörlerin yatak noktalarındaki vibrasyonlar anlık olarak takip edilmektedir. Şekil 2.26.'de Bağıştaş I Barajı ve HES izleme sistemindeki vibrasyon ölçüm noktaları ve anlık ölçümler, gösterilmiştir. Bu vibrasyonların limitlerin dışında olması, ünitenin servis harici olmasına sebebiyet verecektir. Genellikle mekanik problemler, yatak problemleri, vibrasyon artışına sebebiyet verse de elektriksel darbeler ve elektriksel arızaların da vibrasyonu artırıcı yönde davranış göstermesi muhtemeldir.



Şekil 2.26. Vibrasyon ölçümlerinin yatak noktalarında göre dağılımı

2.8. İzolasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Bileşenleri

Genellikle motor ve generatör üreticileri yeniden sarıma gerek kalmadan doğru işletme koşullarında 20 ila 30 yıllık bir sargı ve izolasyon ömrü tahmin ederler. İzolasyon sistemlerinin tasarımı onlarca yıldır deneme ve yanılma metotları ile günümüzdeki en uzun işletme ömürlerini sağlayacak haline getirilmiştir. Eski sarım teknikleri ve izolasyon sistemlerindeki operasyonel hatalar giderilerek yeni düzeltici önlemler alınmıştır. Genel olarak vakitsiz ve erken oluşan elektriksel izolasyon arızalarını önlemek için bakır iletkenin kesitinin artırılarak çalışma sıcaklığının düşürülmesi ve izolasyon duvarının daha kalınlaştırılması gibi önlemler alınmıştır. Sonuç olarak belirtilen ortalama sargı ve izolasyon sisteminin ömrünün çok daha iyi bir performans gösterdiği sistem tasarımları geliştirilmiştir. Nitekim 1900'lerin ilk yarısında yapılan birçok rotor ve stator sargısı, bugün kullanılan geleneksel tasarım yöntemlerinin bir sonucu olarak hâlâ faaliyet göstermektedir.

Geçtiğimiz birkaç on yıl içerisinde, tasarımdaki aşırı güvenlik parametrelerinin rotor ve stator maliyetini büyük ölçüde artırabildiğinin farkına varıldı. Örneğin; *Draper*, büyük bir sincap kafesli motor statorundaki izolasyonun kalınlığında %20'lik bir azalmanın, aynı çıkış gücü için stator yuvasının genişliğinin ve derinliğinin azaltılmasına izin vereceğini belirtmiştir. Bu durumda generatörün hızına bağlı olarak stator için gereken çeliğin ağırlığı %13 ile %33 arasında, bakırın ağırlığı %5 ile %64 arasında ve yalıtımın kütlesi de %12 ile %57 arasında azaltılabilmektedir. Sonuç olarak bir motorun veya generatörün maliyeti, çeliğin, bakırın ve yalıtımın kütlesine çok bağlı olduğundan, izolasyon sistemi kalınlığının azaltılmasıyla önemli ölçüde düşürülebilmektedir.

Bilinen eski tasarımları ortadan kaldırarak üretim maliyetlerinin azaltılabileceğinin ortaya çıkması, motor ve generatörler için çok rekabetçi bir küresel pazar ile birlikte, rotor ve generatör sargılarında yalıtım sistemlerinin tasarımında daha fazla bilimsel yöneme başvurulması gerekliliğini gün yüzüne çıkarmıştır. Günümüzde üreticiler, izolasyon sistemi tasarımlarında hızlandırılmış yaşlanma testi parametrelerini kullanmaktadırlar. Temel olarak hızlandırılmış yaşlanma testi, yalıtım sisteminin bir modelini yaptıktan sonra, modeli normal zorlanmalardan (sıcaklık, voltaj, mekanik kuvvet, vb.) daha yüksek bir değere tabi tutarak ilgili sistemin yaşlanma ve bozulma hızını artırmaktır. İlgili modele ait test normal servis süresine göre çok daha kısa sürede başarısız olur. Genellikle uygulanan zorlanma, ne kadar yüksek olursa sistemin servis

delaminasyona (katmanlara ayrılma) neden olabilmektedir. Delaminasyon, bağlanma mukavemetinin kaybolması ve emprenye edilmiş bileşik kaybına bağlı olarak izolasyon duvarındaki bant tabakalarının ayrılmasıdır.

İlk olarak *Dakin* tarafından ileri sürülen yalıtımın ömrü (L, saat cinsinden), aşağıdaki denklemdeki gibi A ve B'nin sabit olduğu varsayılan sıcaklık ile ilişkilidir:

$$L = Ae^{B/T} \quad (2.14)$$

Bu denklem özetle, sıcaklığın her 10 °C yükselmesi sargının ömrünün %50 azalacağı yönündeki bir eğriyi tahmin eder. Özetle, sıcaklık ne kadar yüksek olursa izolasyonun ve sargının beklenen servis ömrü kısılacaktır. *Dakin denklemi*, bir sarımın termal ömrünü tahmin etmek için kullanılan ve aynı zamanda izolasyonun termal sınıflarını tanımlamak için kullanılan tüm hızlandırılmış yaşlandırma testlerinin temelidir (örn. A, B, H, F sınıf) (Stone vd., 2014).

Termal zorlanmanın bir çeşidi de termomekanik zorlanmadır ve genellikle büyük ölçekli generatörler için söz konusudur. Generatörün beslediği yükün değişmesi ile sargı sıcaklıkları da değişmektedir. Bu değişim esnasında sargı sıcaklığı, ortam sıcaklığından çalışma sıcaklığına hızla geçerse bakır iletkenler de ekstenel olarak genişleme olacaktır. Bunun aksine, modern izolasyonlar bakırdan daha düşük bir termal genişleme katsayısına sahiptir ve geçici durumda, bir yük artışından hemen sonra çok daha serindirler. Bakır iletken ile izolasyon duvarı arasındaki kesme gerilimi, iletken bakırın izolasyon duvarından daha hızlı genişmesinden kaynaklanmaktadır. Söz konusu bu termal döngülere bağlı olarak (ani yük değişimleri vs.) stator sargılarında, yalıtım ile bakır arasındaki bağ kopabilmektedir. Fakat sıcaklığın bir fonksiyonu olarak arızaya sebebiyet verebilecek olası termal döngü sayısı ile bir ilişki geliştirilmemiştir.

Bazı durumlarda, yüksek sıcaklıklarda çalışan sargılar operasyonel olarak faydalı olabilmektedir. Yüksek sıcaklıklar, nemin sargılara yerleşmesini önleyerek nem kaynaklı elektriksel arızaların azalmasına imkan sağlayabilmektedir. Buna ek olarak izolasyon duvarının hatalı/kötü imalat ya da termal bozulmadan dolayı delamine (katmanlara ayrılmış) olmuş operasyon şartlarında, yüksek sıcaklıktaki çalışma yalıtımın şişmesine neden olacaktır; yalıtımdaki herhangi bir hava boşluğunun boyutunu azaltarak kısmi boşaltma aktivitesini azaltmış olacaktır (Stone vd., 2014).

2.8.2. Elektriksel zorlanmalar

Güç frekansına bağlı elektriksel zorlanmalar yaklaşık 1000 V'den daha düşük gerilim değerindeki stator sargılarında izolasyonun yaşlanması üzerinde çok az etkiye sahiptir. Bu gibi düşük gerilim stator ve rotor sargılarındaki izolasyonun kalınlığı, öncelikli olarak mekanik hususlar ve risklerle belirlenir. Yani izolasyon, gerilim altındaki sargının olası mekanik zorlanmalara dayanacak kadar kalın seçilmelidir.

Etkin değeri 1000 V'un üzerinde olan stator sargılarında, yalıtımın kalınlığı esas olarak elektriksel zorlanma faktörü ile belirlenir; yani nominal güç frekansı gerilimi, yalıtım kalınlığına bölünür. Güç frekansı gerilimi, kısmi boşalmaların (PD) mevcut olması durumunda, yalıtımın yaşlanmasına katkıda bulunabilir. Kısmi deşarjlar, izolasyon içerisindeki hava boşlukları veya izolasyon yüzeyinde meydana gelen küçük elektrik kıvılcımlarıdır. Elektronlar ve iyonlar içeren bu kıvılcımlar katı izolasyonu bombalayarak zarar verecektir. İnce bir zar halinde bulunan polyesterler, asfaltlar ve epoksiler gibi organik maddeler, karbon-hidrojen bağı gibi bazı kimyasal bağların kırılması (kesilmesi) nedeniyle bu bombardıman altında bozulur. Belirli bir süre bu bombardımana maruz kalan izolasyon üzerinde oluşacak bir delik, elektriksel bir arızaya neden olur.

İzolasyon üzerindeki kısmi deşarjların (PD) meydana gelmesi durumunda, zorlanma seviyesi (kV/mm cinsinden E), yalıtım ömrü üzerindeki etkisi (saat cinsinden L), c 'nin sabit olduğu ve n 'nin güç kanunu sabiti olarak isimlendirildiği ters güç modeliyle temsil edilir. Bu model, *Eyring* tarafından yapılan çalışmaya dayanmaktadır (Stone vd., 2014).

$$L = cE^{-n} \quad (2.15)$$

Güç yasası sabiti genellikle generatör izolasyon sistemleri için 9'dan 12'ye kadar bir sabit olabilmektedir. Bu denklemden hareketle n 'nin 10 olduğu varsayımı yapıldığında, elektriksel zorlanmanın iki kat artış göstereceği, izolasyon ömrünün yaklaşık 1000 kat azalacağı yönünde bir tahmin yapılabilmektedir. Nitekim elektriksel zorlanmanın kısmi deşarj (PD) meydana geldiğinde izolasyonun ömrü üzerinde çok güçlü bir etkiye sahip olduğu açıktır (Stone vd., 2014).

2.8.3. Ortam koşullarına bağlı zorlanmalar

Ortam koşullarına bağlı zorlanmalar, motor veya generatörü çevreleyen ortamdan gelen ve arızaya neden olabilen bir dizi faktör anlamına gelmektedir. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir;

- Sargıların üzerindeki yoğunlaşmış nem
- Yatak bölümlerinden sızan yağ ve yağ buharı
- Yüksek rutubet seviyesi
- Agresif kimyasallar
- Soğutma havası veya hidrojeni içindeki aşındırıcı parçacıklar
- Makinedeki fren pabucunun aşırı aşınması veya karbon fırça aşınması (ikaz sisteminde kullanılan fırça-bilezik sistemi)
- Kir ve döküntüler, gelen böcekler, sinek vb. ilişkili endüstriyel işlemlerin yan ürünleri olan kül, kömür tozu ve tozları (çimento, kâğıt hamuru, kimyasal kalıntıları, vb.)
- Radyasyon

Yukarıda belirtilen her bir faktör rotor ve stator yalıtımını farklı şekillerde etkileyebilir. Bazı durumlarda ise bu etki faktörleri kendi içlerinde yaşlanmaya neden olmaz ancak başka bir zorlanma kaynağıyla birleştirildiğinde yaşlanmaya yol açabilir. Örneğin; kısmen iletken kir ve karbon fırça parçacıkları ile birleştirilmiş nem ve / veya yağ, izolasyon yüzeyine yerleştiğinde kısmi yüzey akımlarına ve dolayısıyla elektriksel zorlanmalara neden olabilecektir. Ayrıca yağ, nem ve kir kombinasyonları, rotor ve stator havalandırma boşluklarında ve uç sarımdaki sargılar arasında toplanabilir. Bu kombinasyonların havalandırma ve soğutma sisteminin akış dinamiğini değiştirmesinden dolayı da termal bozulma riskini artırabilecektir. Yağ, aynı zamanda rotor ve stator sargılarındaki bobinler ve yarıklar arasındaki nispi hareketi kolaylaştırarak yalıtım aşınmasına yol açan bir yağlayıcı olabilir.

Bu ortam faktörleriyle diğer zorlanmaların da olduğu bir faktör seviyesini doğrudan bozulma oranına bağlamak mümkün değildir. Söz konusu bu faktörler, çalışma ortamının koşullarına ve işletme standartlarına bağlı olarak değişkenlik göstereceği için genellikle hızlandırılmış yaşlanma testinde mevcut değildir.

2.8.4. Mekanik zorlanmalar

Üç ana mekanik zorlanma kaynağı vardır. Bunlardan ilki; rotor üzerindeki yalıtım sistemi yüksek santrifüj kuvvetine (merkez kaç kuvveti) maruz kalmaktadır. Bu kuvvet, izolasyon materyalini ezme ya da bozma eğilimi gösteren titreşimsiz bir kuvvettir. İzolasyonun büyük bir kısmı, bu tür kuvvetlere dayanacak şekilde dizayn edilmiştir. Fakat katı malzemeler, mekanik gerilmelerin etkisi altında sürekli olarak hareket etmeye veya sürekli olarak deforme olmaya meyillidirler. Malzemenin akma dayanımının altında olan yüksek zorlanma seviyelerine uzun süreli maruz kalmasının bir sonucu olarak ortaya çıkabilir. Buna soğuk akış (cold-flow) da denilmektedir. Bu etki, zamanla bir arızaya sebebiyet verebilecektir.

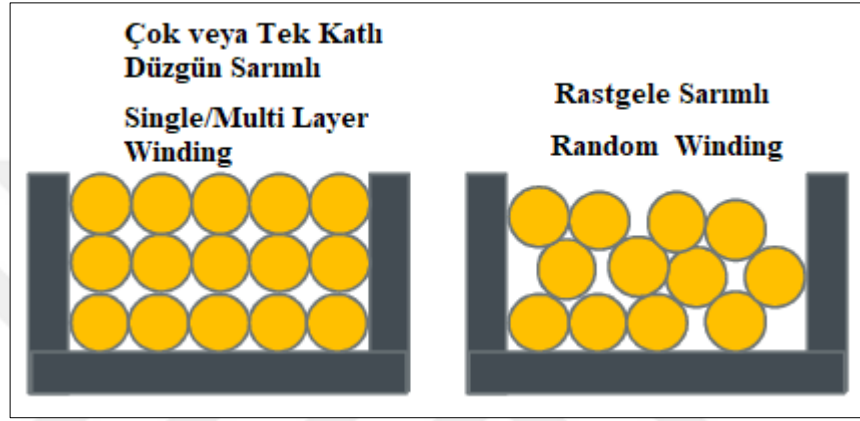
Mekanik zorlanma kaynaklarından ikincisi ise yük akımının neden olduğu, güç frekansının iki katı bir frekansla salınan manyetik bir kuvvetin oluşturduğu mekanik bir zorlanmadır. Bobinlerin statordeki yuvalarından gevşemesi ile söz konusu bu mekanik kuvvet bobinlerin titreşmesine neden olacaktır. Bu titreşim dolayısıyla bobinlerin üzerindeki yalıtım materyali aşınmaya başlayacaktır. Benzer bir mekanik kuvvet, sargı başlarında da meydana gelmektedir.

Termal ve elektriksel zorlanmalardan farklı olarak titreşim genliği ve izolasyonun ömrü arasındaki ilişkiyi tanımlayan, yoğun kabul görmüş modeller yoktur. Modeller, meydana gelebilecek aşınma miktarını tanımlamakla birlikte pratikte kullanılabilir halde değildirler ve hiçbiri titreşim altında standart hızlandırılmış yaşlandırma testlerinin temeli haline gelmemiştir.

Üçüncü ve son olarak geçici hallerin meydana getirdiği, motorların çalıştırılması veya senkron makinelerin faz dışı (faz uyuşmazlığı halinde) senkronizasyonu durumlarında oluşan mekanik zorlanmalardan bahsedilebilir. Her iki geçidi durum da statordaki normal çalışma akımından beş kat daha fazla veya daha büyük olabilecek bir geçici durum akımına neden olur. Bu durumda manyetik olarak indüklenen mekanik kuvvetin normal çalışma şartlarındaki kuvvetten 25 veya daha fazla katı olması sonucunu doğurmaktadır.

2.8.5. Stator sargılarında izolasyon sistemi özellikleri

Stator sargıları iletken sarım teknikleri ve yerleşim şekillerine göre farklı başlıklarda incelenmektedir. Çok damarlı iletken yapısına sahip sargı gruplarında damar yapısının geometrik yerleşimine bağlı olarak genellikle “*rastgele sarımlı*” (random stator winding) ve “*şekillendirilmiş sarımlı*” (form-wound winding) stator sargı sistemleri mevcuttur.

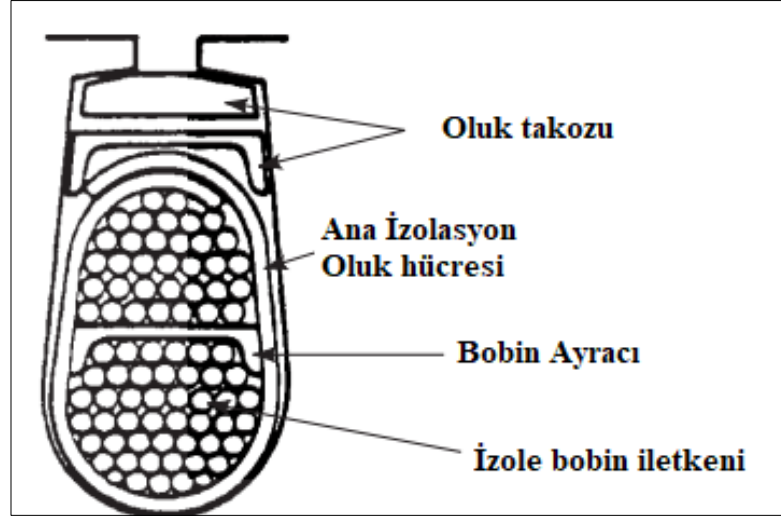


Şekil 2.27. Bazı stator sarım modelleri

Stator sargılarında kullanılan izolasyon sistemleri, elektriksel kısa devrelerin oluşmasını önlemek, iletken I^2R (bakır kayıpları) kayıplarından kaynaklanan ısıyı bir soğutucu yüzey vesilesiyle en aza indirmek ve iletkenlerin manyetik kuvvetlere rağmen titreşmesini engellemek amacıyla farklı bileşen ve özelliklerden oluşmaktadır (Stone vd., 2014).

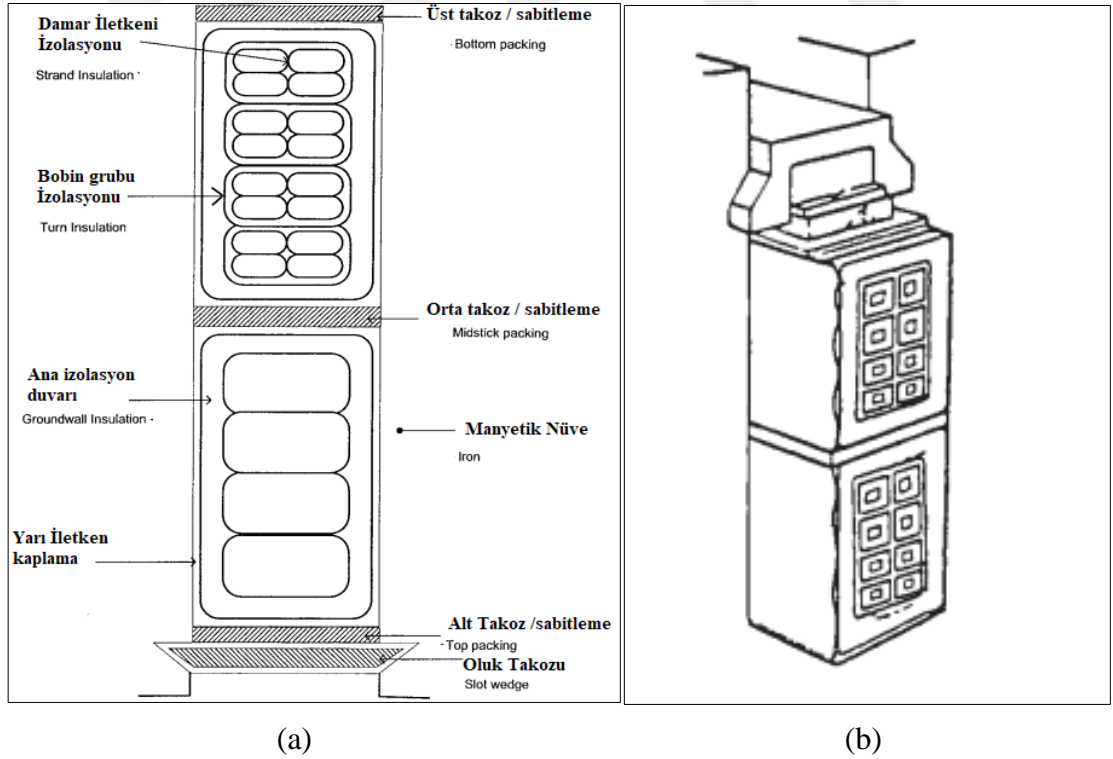
Özellikle yüksek güçlü döner elektrik makinelerinde yüksek verimlilik için statorun izolasyon sistemi yüksek elektriksel, termal, mekanik ve çevresel etkilere dayanmak zorundadır. İzolasyon sistemi, gerilim altında ki sargı bobinleri ve topraklanmış lamine çekirdek (manyetik nüve) arasında kalıcı potansiyel ayrımı sağlamalıdır. Sargı bobinleri manyetik nüvenin yarıklarına (oluklar) yerleştirilmiş münferit iletken gruplarından oluşmaktadır (Schmerling vd., 2012).

Rastgele sarımlı stator sargılarına dair izolasyon ve sargı yerleşimi gösteren kesit yüzeyi şekil 2.28 de verilmiştir.



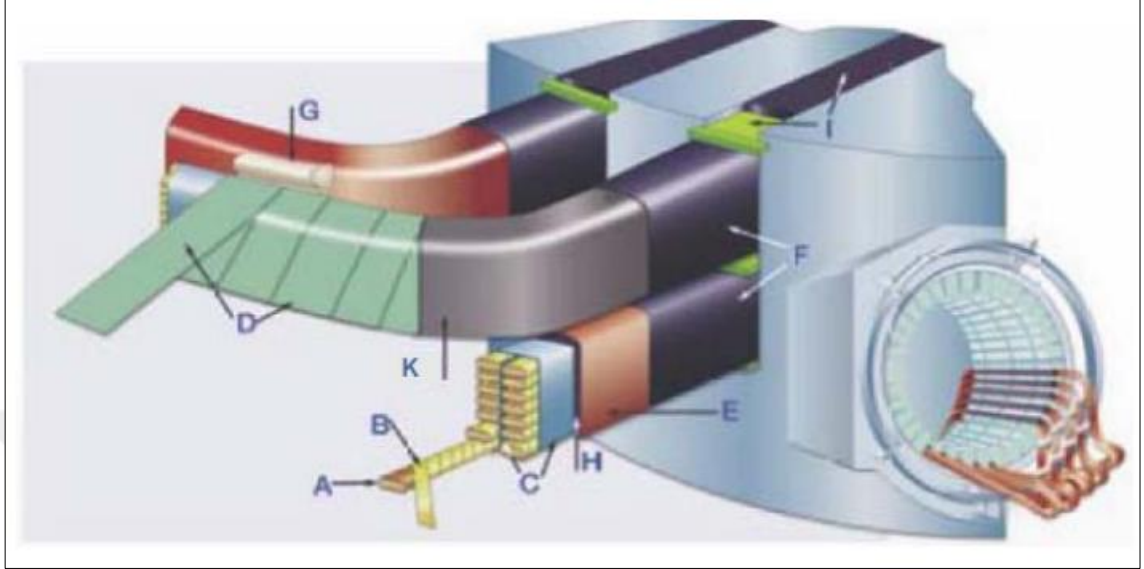
Şekil 2.28. Rastgele sarımlı stator sargısı en kesit gösterimi (Stone vd., 2014)

Başka bir sarım modeli de düzgün geometrik dizilime sahip ve tek veya çok katmanlı olabilen teknik terminolojide “form-wound winding” ismiyle bilinen sarım modelidir. Şekil 2.29 da çok katmanlı (multilayer) ve Roebel bar tipi bobin sarımları ve bu sarım tiplerine göre izolasyon katmanlarının dizilimi gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Stator sargılarının oluk yerleşimlerine göre a) Düzgün sarımlı çok katmanlı sarım, b) Direkt soğutmalı Roebel barları (Stone vd., 2014)

Ayrıca Şekil 2.30 da örnek bir sargı grubunun oluk içerisinde ki yerleşimi ve katmanlar halinde izolasyon bileşenleri gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Stator izolasyonu bileşenleri kesit görüntüsü A) İletken, B) Damar iletkeni izolasyonu, C) Roebel transpozisyonu, D) Mika bant, E) Kaplama bandı, F) Dış korona koruması, G) Kırırım/dönüş destekleri, H) Ana izolasyon, I) Oluk mühürü/ kapama şeridi, K) Korona koruma kaplaması (Schmerling vd., 2012).

Yukarıda bahsedilen bileşenlerden ana izolasyon duvarı, bakır iletkenleri topraklanmış stator çekirdeğinden ayıran bileşendir. Ana izolasyon duvarında oluşabilecek olası bir arıza, genellikle motoru veya generatörü servis harici duruma getirerek bir toprak arıza rölesini tetikler. Bu nedenle söz konusu izolasyon duvarı bileşeni, bir motorun veya generatörün düzgün çalışması için çok önemlidir. Dolayısıyla ilgili ekipmanın uzun servis ömrü için, izolasyon duvarının maruz kalabileceği tüm elektriksel, ısı ve mekanik baskıları karşılayabilecek özellikte olması gerekir (Stone vd., 2014).

2.8.6. Stator sargı izolasyon tiplerine göre kullanılan materyaller

İzolasyon sınıflarına göre B, F ve H sınıfı izolasyon sınıflarının hepsi aşağıdaki bileşenleri ihtiva eder:

- Ana dielektrik (izole) malzeme.
- Taşıyıcı malzeme
- Emprenye malzemesi

Bütün sistemin elektriki mukavemetini ana dielektrik malzeme oluşturur. Tabii olarak bulunabilen mineral mika çok yüksek dielektrik özellikleri ve ısı direncinden dolayı hâlâ elde edilebilen en iyi izole malzemelerden biridir. Sargı üzerinde kolayca kullanılmasını sağlayabilmek için taşıyıcı bir malzeme ile bağlanmaktadır. Mika plakeleri veya lamelleri taşıyıcı malzeme üzerine yapıştırıcılarla tutturulmaktadır. Emprenye işleminin gayesi taşıyıcı malzemedeki bütün delik ve oyukları doldurmak ve taşıyıcıya katı ve sıkı olması gereken ideal formunu vermektir. Bahsedilen bu bileşenlerden başka her izolasyon sistemi ara boşlukları doldurmak, mesnet vazifesi görmek, oyukları tıkmak ve izole etmek için değişik elemanlar bulundurulabilirler Largiader (2019).

B sınıfı izolasyon mika ve uygun tarzdaki tabii yapıda ve çok sayıda organik madde ihtiva eder. Emprenye için kullanılan vernik %50 tiner ihtiva eder. Bu tiner kurutma safhası esnasında buharlaşır ve uçar. Bünyesinde bulunan çok küçük deliklerden rutubet nüfuz eder ve higroskopik (nem çekebilen) malzemeye dönüşebilir Largiader (2019).

F sınıfı izolasyon sadece mika, cam elyafı ve ısıya dayanıklı epoksi polyester reçinesinden oluşmaktadır. Epoksi reçinesinin içeriğinde tineri yoktur, ve sıvı halden katı hale yüksek sıcaklıkta önemli bir hacim ve ağırlık kaybetmeksizin geçebilme özelliğine sahiptir. Fevkalâde mekanik özellikte iyi bir izolasyon sınıfıdır. Bu tip izolasyon sisteminin rutubete karşı geniş bir mukavemeti söz konusudur Largiader (2019).

H sınıfı izolasyonda mika ve cam elyafı yine esas elemanlardır. Burada kullanılan emprenye verniği tinerli ve silikon reçineli verniktir. Bir miktar daha fazla elastikiyet ve plastikliği vardır. Montaj esnasında sargıların bazı kısımları için (rotor bobinleri) bir miktar avantajları olsa da bütün sargılarda kullanımı pek önerilmemektedir. Elde edilen termik iletkenlik epoksi reçinesi ile yapılan F sınıfı izolasyondaki kadar iyi değildir. Fakat sargılarda gözenek bulunmaması ve daha sıkı bir izolasyon elde edilmesi açısından avantaj sağlayabilmektedir Largiader (2019).

B, F ve H sınıfları için izolasyon sistemlerinde müşterek olarak kullanılmış bazı izole malzemeler Tablo 2.3 de verilmiştir.

Tablo 2.3. İzolasyon sınıflarına göre kullanılan izole malzemeler Largiader (2019).

	<i>İletken ve Esas İzolasyon</i>	<i>Diğer İzolasyon</i>	<i>Emprenye Verniği</i>
B	Mika - ipek şerit	Pamuk, keten, ipek,	Tadil edilmiş fenolik vernik (tinerli)
	Mika folyo (kâğıtlı)	Mikanit, odun,	
	Mika - cam elyafı bez	emprenye edilmiş odun,	Polyester reçine (tinersiz)
	Cam elyaf	Bakalit Macun (amyant + yağlı siyah vernik)	
	Mikanit		
F	Mika - cam elyafı bez (PUR)	Cam - elyaf - epoksi plâka	Tadil edilmiş epoksi polyester reçine (tinersiz)
	Mika - cam elyafı bez şerit (EP)*	Mika - cam elyafı bez (iki tarafta) (EP)	Saf epoksi (tinersiz)
	Mika - cam elyafı bez şerit (EP)*	Mikanit (EP)	
	Mika- cam elyafı bez (PUR)	Cam elyafı şerit	
	Mika-cam elyafı bez (iki tarafta) (PUR)	Macun (Amyant + silikonlu alkit reçinesi)	
	Cam elyafı şerit	Epoksi reçinesi (soğukta katılaşılan)	
H	Mika - cam elyafı bez şerit (SI)	Cam elyafı silikon plâka'	Silikon vernik (tinerli)
	Mika - cam elyafı bez band halinde (SI)**	Mika cam elyafı dokuma (iki tarafta) (SI)	
	Mika - cam elyafı şerit (SI Elastomer) **	Cam elyafı şerit	
	Mika - cam elyaf (iki yanda)	Macun (amyant + silikon vernik)	
	(SI)		

Not: Kolonlardaki kısaltılmış gösterimler VSM77400 standartlarına göre gösterilmiş, bağlama elemanlarıdır: EP = Epoksi, PUR = Poliüretan, SI = Silikon

* Pişirilmemiş silikon reçine ile ilkel emprenyeye tabi tutulmuş

** Silikon reçine ile ilkel emprenyeye tabi tutulmuş.

*** Silikon elastomer ile ilkel emprenyeye tabi tutulmuş, sonra vulkanize edilmiş.

2.9. DA İzolasyon Direnci Testi Teorisi (IR)

İzolasyon direnci (IR) testi, stator veya rotor izolasyonlarının direncini ölçmektedir. İdeal olarak, bu direncin sonsuz olması beklenmektedir çünkü yalıtımın amacı iletken olan bakır ile manyetik nüve arasındaki izolasyonu sağlamaktır. Öyle ki pratikteki uygulamalarda, IR sonsuz yüksek değildir. Genellikle izolasyon direncinin düşük olması, yalıtım ile ilgili bir problem olduğunun işaretini vermektedir (Stone vd., 2014).

Polarizasyon İndeksi (PI) testi, IR testinin bir varyasyondur. Polarizasyon indeksi (PI) , birinci dakikanın sonunda (R1) ölçülen izolasyon direnci (IR) ile 10 dakika boyunca (R10) uygulandıktan sonra ölçülen IR' nin oranıdır.

$$PI = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (2.16)$$

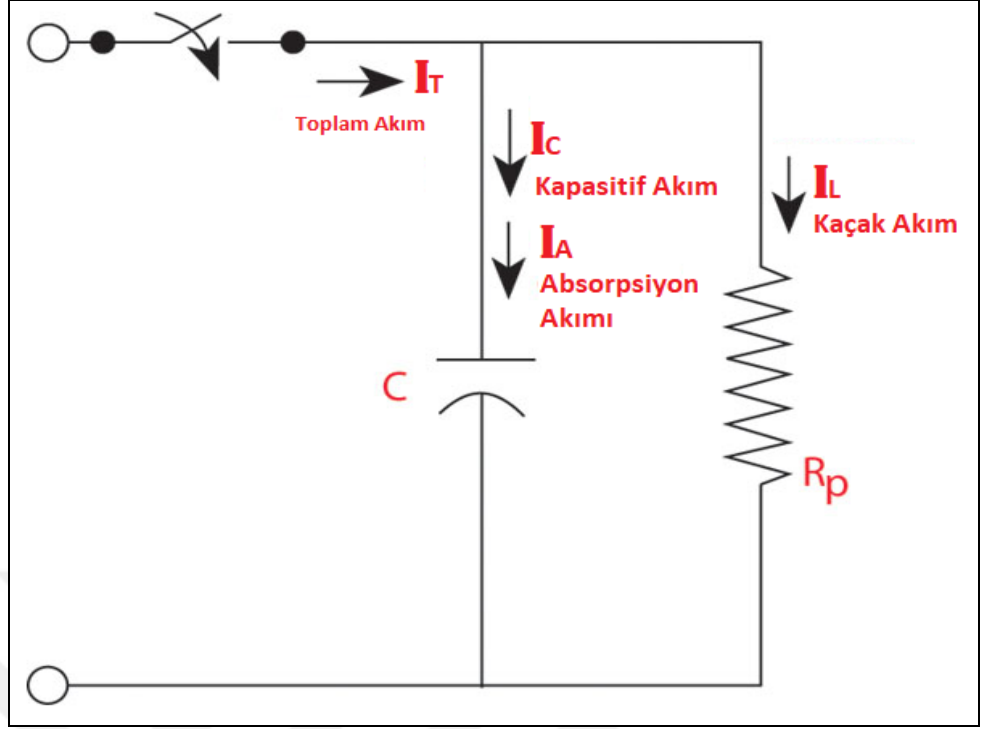
Genel olarak izolasyon direncinin IR_{60sn}/IR_{15sn} veya IR_{600sn}/IR_{60sn} oranı polarizasyon indeksi olarak adlandırılır ve izolasyonun esnekliği dahil birçok parametrenin değerlendirilmesinde kullanılır. Uygulamada IR_{60sn}/IR_{15sn} testi Dielektrik Absorpsiyon Oranı (DAR) olarak IR_{600sn}/IR_{60sn} oranı ise Polariazsyon İndeksi olarak da ayrılmaktadır (Ndzeru, 2008) .

IEEE 43-2000 standardı, döner elektrik makinelerine uygulanan IR ve PI testlerinin teorisi hakkında kapsamlı bir açıklama yapmaktadır. IR ve PI testleri için eşdeğer bir IEC prosedürü yoktur. Bu testlerde özetle bakır sargı ile stator veya rotor manyetik nüvesi arasına (genellikle gövde aracılığıyla) nispeten yüksek bir DA gerilimi uygulanarak ilgili devreden akan akımın ölçülmesi hedeflenmektedir. Herhangi bir “ t “ zamanında izolasyon direnci, basitçe aşağıdaki şekilde hesaplanır (Stone vd., 2014):

$$R_t = \frac{V}{I_t} \quad (2.17)$$

“ V ”, test cihazından uygulanan DA gerilimidir ve “ I_t ” ise “ t ” süre sonra ölçülen toplam akımdır. Akım, genellikle sabit olmadığı için akım ölçüm zamanına dair bir referans süre gerekmektedir.

İlgili sargıya DA gerilimi uygulandığında akması muhtemel olan en az dört akım bileşeni vardır. Bu bileşenler:



Şekil 2.31. Akım bileşenleri gösterimi devre şeması

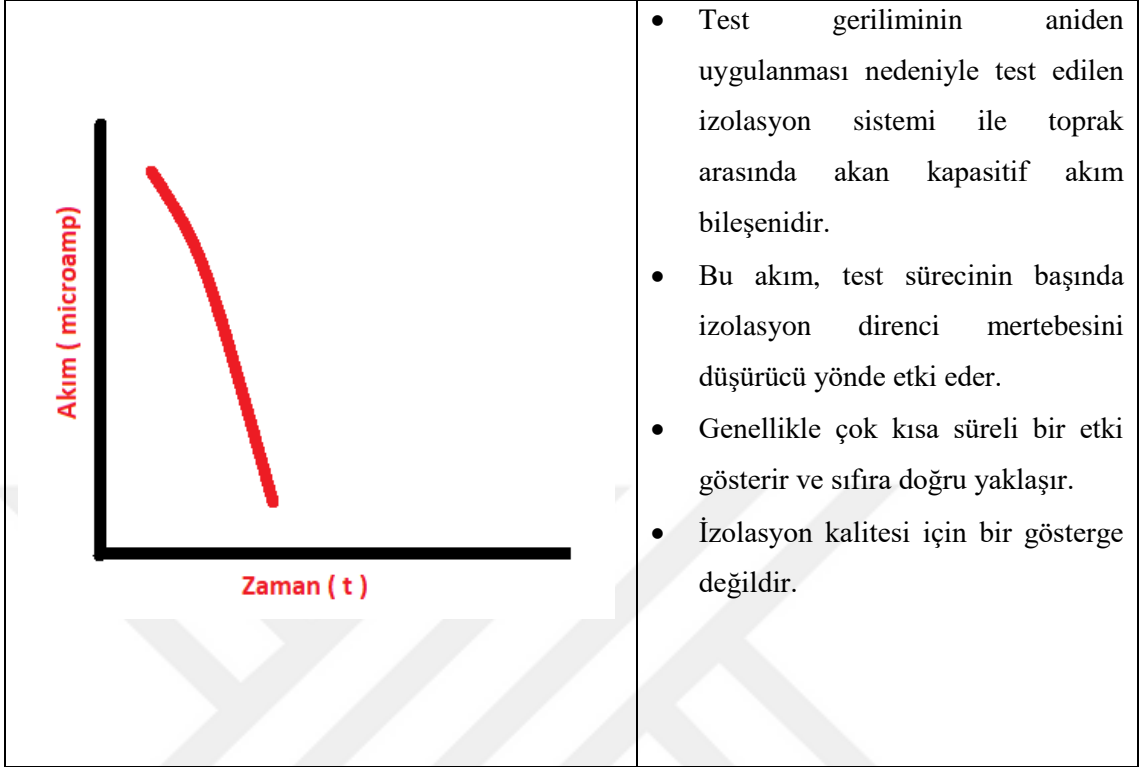
1. **Kapasitif Akım**, Bir kapasitöre herhangi bir anda DA gerilimi uygulandığında, ilk olarak yüksek bir şarj akımı akar ve bu da exponansiyel olarak zayıflar. Bu zayıflama eğrisi kapasitörün büyüklüğü ve genellikle birkaç yüz kilohm olan gerilim kaynağının iç direncine bağlı olarak değişebilecektir. Genellikle bu kapasitif akım, 10 sn'den daha kısa bir süre içerisinde "0" a yaklaşacaktır.
2. **İletim Akımı**, bakır ve çekirdek (gövde) arasında, izolasyon kütlesi boyunca hareket eden elektronlar veya iyonlara bağlıdır. Bu elektron ve iyon hareketi izolasyon duvarından akan galvanik bir akıma neden olmaktadır. Eski tip termoplastik yalıtım sistemlerinde izolasyon çeperlerinin nemi emmesi veya modern yalıtım sistemlerinde izolasyonun günlerce veya haftalarca su veya neme maruz kalması, böyle bir iletim akımının sebebi olabilir. Bu akım; ayrıca izolasyon duvarında oluşabilecek çatlaklar, kesikler veya pim delikleri gibi özel sebeplerden dolayı da akabilir. Ayrıca izolasyon yüzeyinde ve içeriğinde oluşabilecek kirlenmeler de bu akıma bir yol oluşturabilir. Bu akım, zamana göre sabittir ve ideal olarak sıfır olmalıdır. Modern epoksi-mika gibi izolasyon sistemlerinde bu akımı oluşturan bileşenler yüzeye nüfuz edemediği için genellikle sıfırdır (deformasyon olmadığı sürece). Özellikle modern

izolasyon sistemlerinde bu akımın kayda değer büyüklüklere ulaşması, sargı yalıtımı ile ilgili önemli bir sorunun habercisi olacaktır.

3. **Yüzey Kaçak Akımı**, yalıtım yüzeyinin üzerinden akan sabit bir doğru akımdır. Genellikle sargı yüzeylerinde oluşabilecek kirlilikten (toz, kir, uçucu kül, kimyasal maddeler vb. ile karışmış yağ veya nem) kaynaklanmaktadır. İdeal olarak bu kaçak akımın sıfır olması beklenmektedir ve buna bağlı olarak bu akımın büyüklüğü, kirlilik kaynaklı bir izolasyon problemini işaret etmektedir.
4. **Absorbsiyon Akımı**, kavramlaştırılması ve tanımlanması zor olan bir akımdır. Uygulanan DA gerilimin oluşturduğu elektrik alanı etkisinde, belirli tipteki polar moleküllerin elektron düzeninin yeniden düzenlenmesi veya yeniden yönlendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Pratikte kullanılan birçok yalıtım malzemesi, dâhili bir elektrik alanına sahip (molekül içindeki elektronların dağılımı nedeniyle) polar moleküller içerir. Örneğin; su molekülleri çok kutupludur ve elektrik alanı etkisinde iken H₂O molekülleri, manyetik alan boyunca hizalanır. Bu su molekülleri, hizalanmak için gerek duyduğu enerjiyi, uygulanan DA geriliminden alır. Moleküllerin hizalanması tamamlandığında ilgili akım da sıfırlanacaktır. Söz konusu bu akıma da Absorbsiyon (kutuplanma) akımı ismi verilmektedir. Yapılan saha çalışmaları ve akademik çalışmalara göre bu tür polar malzemelere (asfalt, mika, polyester ve epoksi vb.) bir DA elektrik alan uygulandıktan sonra absorbsiyon akımının nispeten yüksek olduğunu ve yaklaşık 10 dakika sonra sıfıra indiği tespit edilmiştir. Pratik olarak, absorbsiyon akımı uzun zaman sabitine sahip bir RC devresi gibi davranır (Stone vd., 2014).

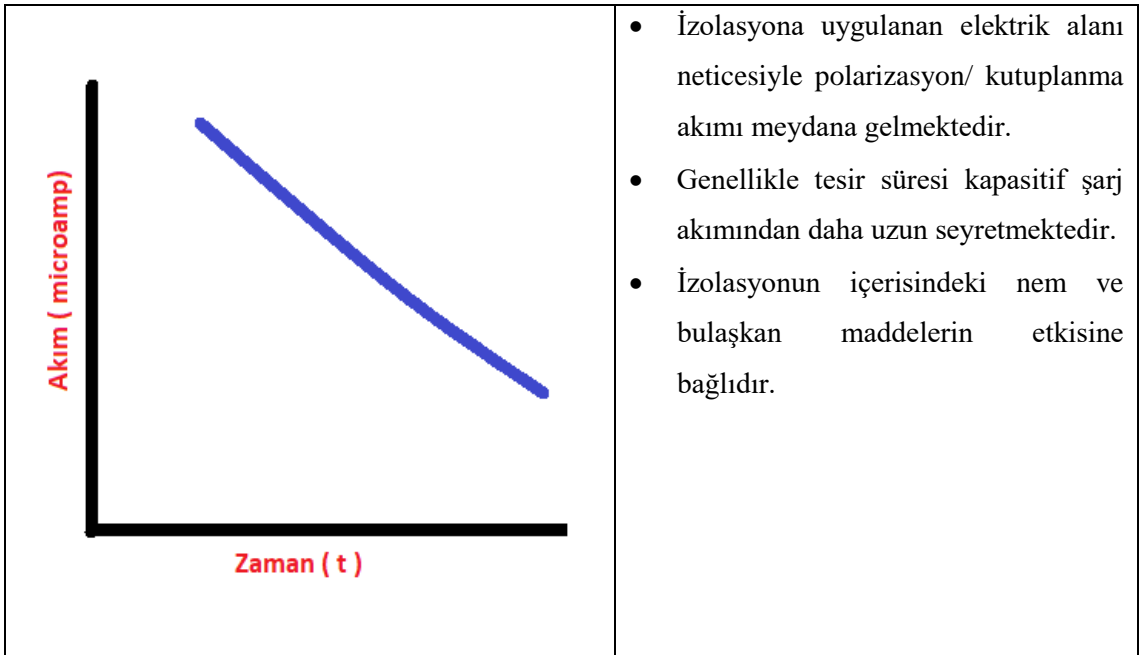
Bahsi geçen akım bileşenlerinin geçici ve kalıcı durum hallerini gösteren grafikler aşağıdaki gibidir:

Kapasitif Şarj Akımı;



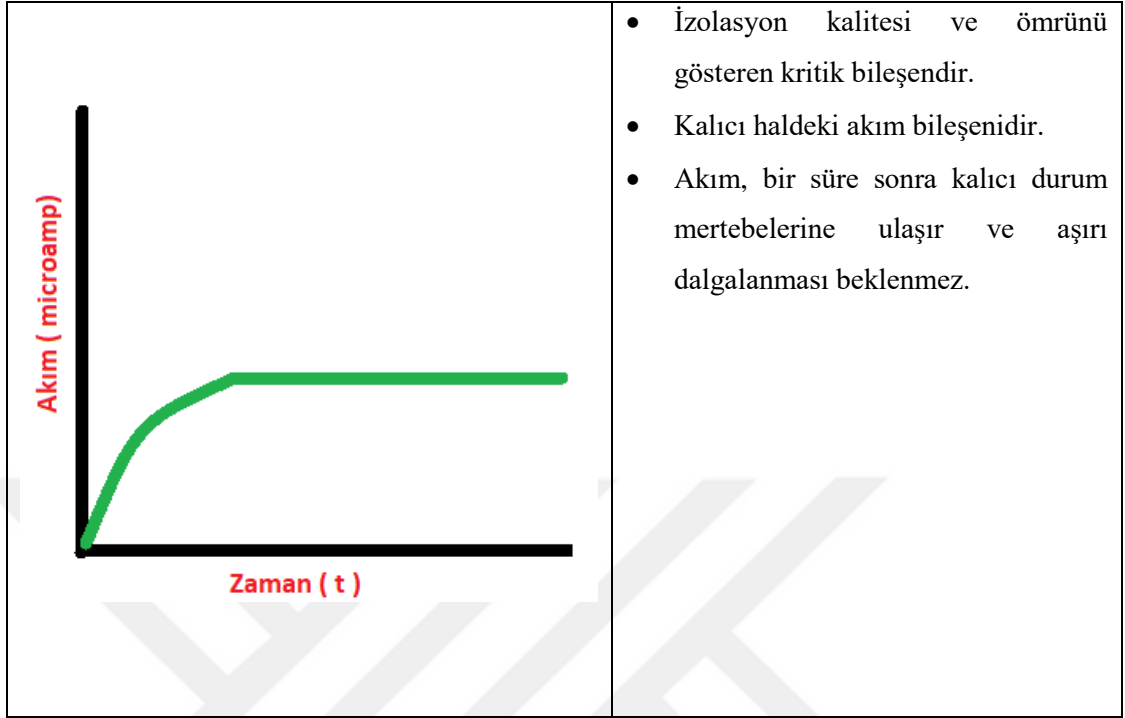
Şekil 2.32. Kapasitif şarj akımı grafiği

Absorbsiyon Akımı;



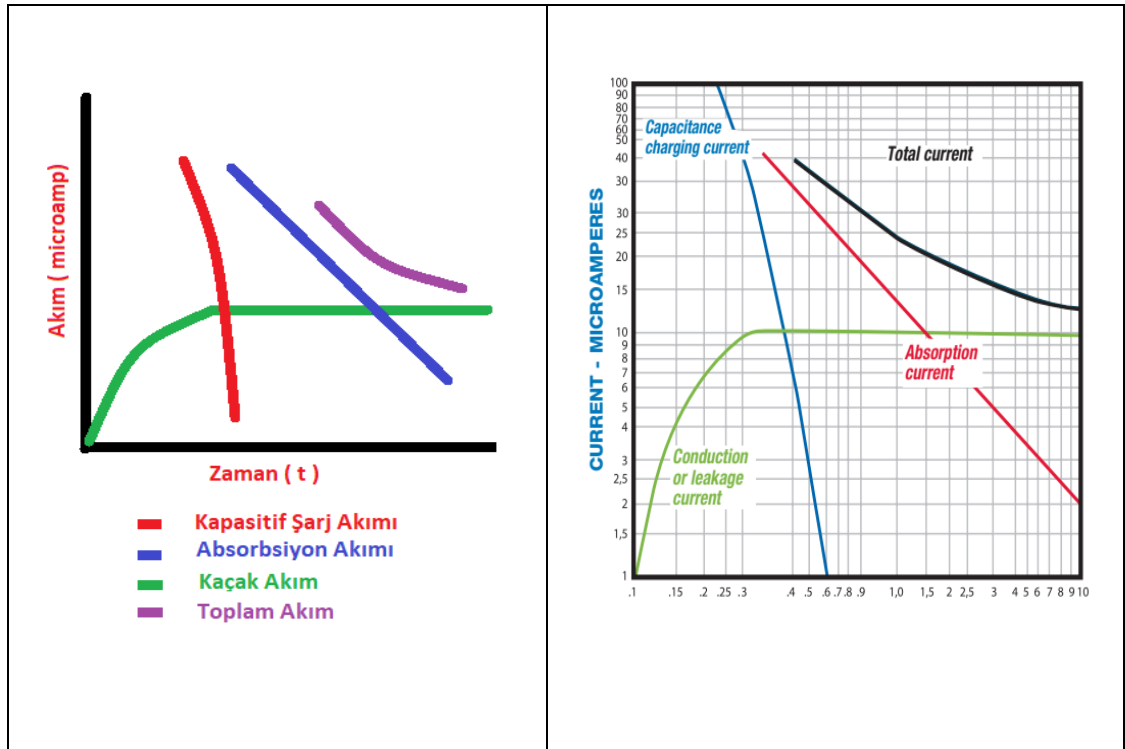
Şekil 2.33. Absorbsiyon akımı grafiği

İletim ve Kaçak Akım;



Şekil 2.34. İletim ve yüzey kaçak akımı grafiği

Toplam Akım;



Şekil 2.35. Akım Bileşenleri ve Toplam Akım

2.10. DA İzolasyon Direnci Testi İlkeleri

Absorpsiyon akımı, diğer bir adıyla polarizasyon akımı, moleküler polarizasyon ve elektron sürtünmelerinden kaynaklanan, başlangıçta yüksek ve zamanla sifıra yaklaşan, izolasyon sisteminde kullanılan birleştirme türüne göre değişen akımdır. İletim akımı, zamanla değeri değişmeyen, izolasyon gövdesinin topraklanmış yüzeyinden, yüksek gerilim iletkenine geçen akımlardır. Kapasite akımı ise üssel olarak azalan ve ölçüm cihazının iç direnci ile sargının geometrik yapısına bağlı olan akım bileşenidir. Kaçak akımlar ise zamanla sabit ve genellikle sargı sonlarında izolasyon malzemesinin yüzeyinden geçen akımlardır. Kaçak akımların genliği, sıcaklık, nem ve izolasyon malzemesine göre değişiklik gösterir (Yıldız,2018).

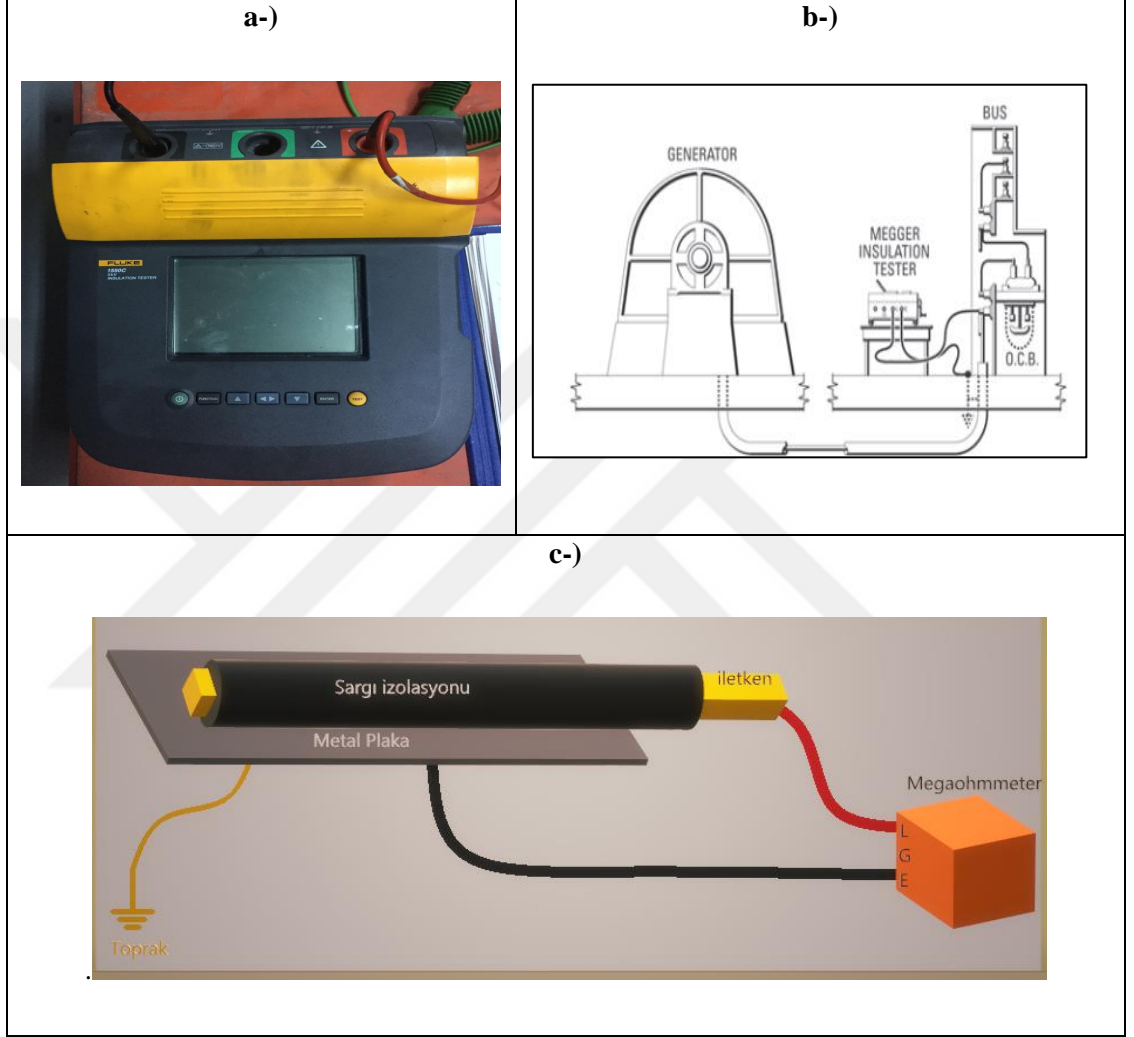
İzolasyon testi uygulanacak olan teçhizatın etiket değerlerine göre uygulanacak test gerilimi tayin edilmelidir. Bu test geriliminin yanlış seçilmesi, ilgili test ekipmanının izolasyon materyaline tamir edilmesi güç zararlar verilmesine neden olabilir. Bu gerilim seviyesi seçimi yapılırken aşağıdaki liste referans alınmalıdır.

Tablo 2.4. Test Gerilimi Seçim tablosu Techni Tool (2019).

Test Edilecek Teçhizatın AA Anma Gerilimi	Önerilen DA Test Gerilim Aralığı (V)
100 V ‘a kadar	100 V – 250 V
440 V – 550 V aralığında ise	500 V – 1000 V
2400 V ‘ a kadar	1000 V – 2000 V
4160 V veya daha yüksek	1000 V – 5000 V

Tablodan hareketle uygulanacak olan gerilim değeri seçildikten sonra ilgili ekipmanın toprak bağlantı noktalarının kontrolleri yapılarak ilgili topraklamaların işletme topraklaması ile irtibatlandırılmış olduğundan emin olunmalıdır. Test esnasında ilgili toprak noktasına enerji altındaki başka bir teçhizatın bağlı olmaması tercih edilir. Ayrıca anma geriliminin üzerinde uygulanacak test gerilimlerinde test yapılacak olan generatörün üzerinde bulunması muhtemel olan sensör, termistör vs. gibi zayıf akım teçhizatlarının da ayrıca topraklanması tavsiye edilir.

Ölçüm yapılmadan önce generatörün U, V, W terminalleri tespit edilerek ilgili terminallerin bağlantı yüzeylerindeki olası toz, yağ vb. kirlenmelerin temizlenmesi gerekmektedir. Bunun yanı sıra uçları açıkta olan ilgili terminallerin enerjilendirilmesi durumunda yakınındaki olası atlama noktaları için de ayrıca önlem alınmalıdır.



Şekil 2.36. a-) Örnek bir izolasyon test cihazı (Fluke 1550C) b-) Generator için izolasyon testi bağlantı şeması c-) Sargı için izolasyon testi genel bağlantı şeması

Generatör sargılarının izolasyon kondisyonlarının tayin edilmesi için uygulanan testler esnasında bazı ilkesel unsurlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Aksi halde uygulanan test gerilimi izolasyona hasar vererek çok büyük maddi iş güvenliği hasarlarına sebebiyet verebilir. Test sürecinde aşağıdaki konulara önem gösterilmesi gerekmektedir (Ndzeru, 2008):

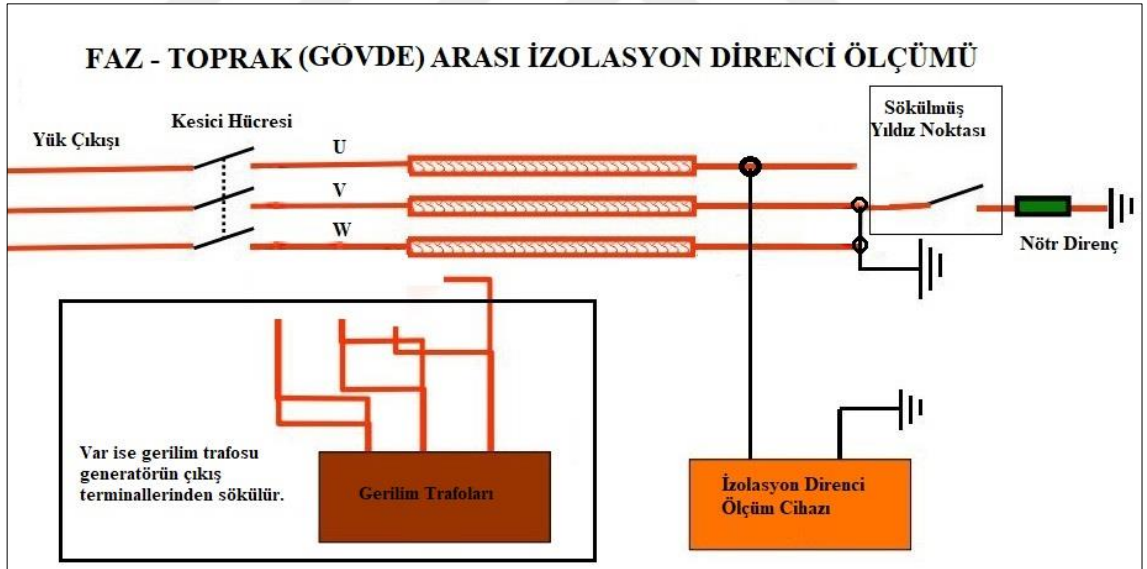
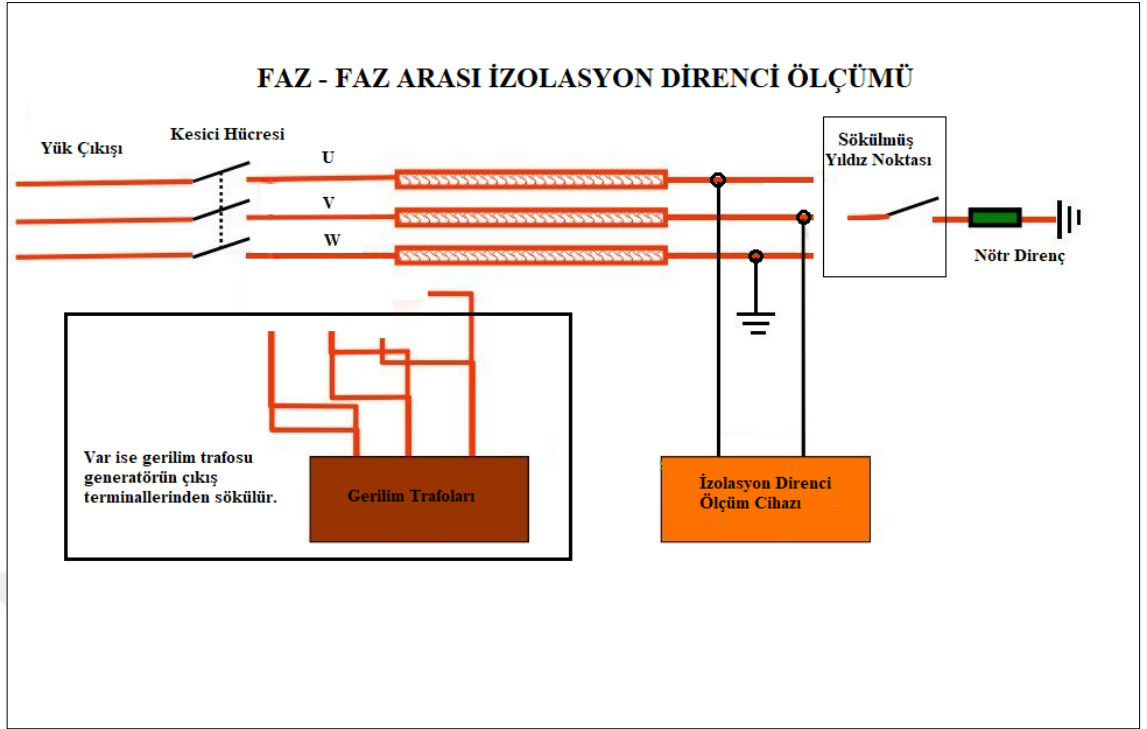
- Ani gerilim indüklenmesi ve deşarjı durumunda çok büyük genlikli dV/dt oluşturabilir ve bu durum anormal büyüklükte bir zorlanma meydana getirebilir. Test gerilimi kademeli olarak ve yavaşça artırılmalıdır.
- Generatör sargıları, iki veya daha fazla yüksek gerilimli test işlemine tabi tutulduysa izolasyonun içerisinde bulunan küçük hava boşluklarında yüklenme oluşabilir. Bu yüklü haldeki hava boşlukları izolasyonu zorlayıcı yönde bir etki gösterecektir. Söz konusu bu etki, hemen tesir etmese de ilk enerjilendirme anında veya uzun dönemde izolasyonun yaşlanmasına neden olacaktır. Bunu önlemek için test gerilimine tabi tutulan süre kadar (5 katına kadar da uygulanabilir.) topraklama yapıldıktan sonra servise alınmalıdır.
- Test gerilimi uygulanan başlıklar kesinlikle kontrol edilmeli ve bağlantılarda herhangi bir temassızlık olmadığına emin olunmalıdır.
- İzolasyon test cihazının doğruluğu kontrol edilerek “Sıfır” ve “Sonsuz” direnç değerlerini gösterdiğine emin olunmalıdır.(Sonsuz > 1Tohm alınabilir.)
- Test esnasında “Guard” terminali ve test başlıkları, kesinlikle temas edilmemelidir. Ayrıca kablo ve başlıklar, hiçbir suretle ezilmiş veya hasar görmüş olmamalıdır.
- Test uçları, birbirlerine veya enerjilendirilmesi istenen terminaller dışında başka bir yere temas etmemelidir.
- Korona deşarjını engellemek için enerjilendirilen açık iletken kısımların keskin noktaları, izole edilmelidir ya da atlama yapamayacak mesafede olduğuna emin olunmalıdır.
- Terminaller arası istenmeyen gerilimler oluşmasına engel olmak için Megaohmmetre'nin ölçüm uçlarına bağlanan erkek soket bağlantılarının yerine tam olarak geçtiğine emin olunmalıdır.
- Daha hassas ölçüm yapılması gereken durumlarda “Guard” terminali de bağlanmalıdır.
- Test sırasında tüm sıralamalara ve talimatlara uyulmalıdır.
- Test edilen ekipmanın topraklanması için onaylı ve güvenilir bir epoksi stanka /çubuk kullanılabilir.
- Test tamamlandıktan sonra tüm okumalar belirli bir sıcaklık değerine ($^{\circ}\text{C}$) icra edilmelidir.

- Sıcaklığın çok düşük olmadığı durumlarda (çiylenme ve yoğunlaşma görünmüyorsa) nem genelde izolasyon direncine çok büyük etki etmemektedir.
- Yıldız bağlı senkron generatörlerde uygulanacak DA testi öncesi yıldız noktası bağlantıları sökülerek sırasıyla U, V, W terminalleri ile toprak arasına test gerilimi uygulanır. Test gerilimi uygulanmayan diğer terminaller topraklanmalıdır.
- Fazlar arası verilen test gerilimlerinde (U-V, V-W, U-W) gerilim uygulanmayan terminal topraklanmalıdır.
- Yapılan tüm ölçümleri teyit etmek amacıyla en son ölçüm olarak tüm terminaller şöntlenerek tüm sargı grubunun toprağa karşı izolasyon direnci ölçümü yapılmalıdır (U+V+W – Toprak).

Seri No:	İmalatçı:	Tip:	Gerilim:	Güç:											
Devir sayısı:	İzolasyon sınıfı:F	Ortam sıcaklığı:	Sargı Sıcaklığı:	%Nem:											
1- STATOR SARGILARI İZOLASYON DİRENCİ TESTLERİ															
Sıcaklık °C															
Test gerilimi															
Ölçülen/Ölçüm süresi	15 sn	30 sn	45 sn	60 sn	DAR	2 dk	3 dk	4 dk	5 dk	6 dk	7 dk	8 dk	9 dk	10 dk	PI
U/Toprak (GΩ)															
V/Toprak (GΩ)															
W/Toprak (GΩ)															
U-V (GΩ)															
V-W (GΩ)															
W-U (GΩ)															
U+V+W/Toprak (GΩ)															

Şekil 2.37. Örnek bir senkron generatör izolasyon direnci test föyü

Örnek olarak yukarıda verilen test föyünde ki sıralama ve ölçüm metodolojisi kullanılabilir. Ayrıca faz – faz arası ölçümler ve faz – toprak arası ölçümler için aşağıda ki şekiller referans alınabilir.



2.11. İzolasyon Test Cihazı

Uzmanlar izolasyon testinin AA ve DA olarak uygulanması arasındaki farklılıkları tam olarak kabul etmemiş olsa da genel olarak bakım ve devreye alma çalışmalarında DA izolasyon test cihazlarının kullanıldığı ve DA'ın genel olarak daha tahribatsız ve tehlikesiz bir test sürecine imkan verdiği söylenebilir. DA izolasyon test cihazları;

stabil, regüleli ve AA'nın sinüs eğrileri ve ani gerilim yükselmelerinden arındırılmış bir test gerilimi uygulanmasına imkan tanır (Ndzeru, 2008).

İzolasyon test cihazı, ohm veya megaohm'lar mertebesinde doğrudan yalıtım direnci okumayı sağlayan küçük, genellikle taşınabilir bir cihazdır. Sağlıklı bir yalıtım için direnç genellikle megaohm mertebelerinde ölçülecektir. Söz konusu bu test cihazı, esas olarak tümleşik bir doğru akım jeneratörü ile yüksek aralıklı bir direnç ölçerden (ohmmetre) ibarettir. Bu cihazlar, test geriliminden bağımsız olarak ölçümü daha hassas yapabilmesi amacıyla özel olarak ayrı akım ve gerilim bobinleri ile imal edilmektedir.



Şekil 2.40. İzolasyon test cihazı ve bağlantı parçaları (Chauvin-Arnoux internet sitesinden alınmıştır.)

İzolasyon direnci (IR) ve polarizasyon indeksi (PI) , yüksek gerilimli bir DA kaynağı ve buna bağlı hassas bir ampermetre ile ölçülmektedir. Kullanılan ampermetre nanoamper mertebesinde daha küçük akımları dahi ölçebilecek hassasiyete sahiptir. Genel olarak pratikte kullanılan birkaç özel amaçlı “megaohmmetre” vardır. Günümüzdeki modern test cihazları, 10 kV DA'ya kadar olan test gerilimleri uygulayabilmektedir ve buna bağlı olarak 100 GΩ' dan daha yüksek dirençleri ölçme yeteneğine sahiptirler.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Erzincan ili, İliç ilçesinde 2015 yılında işletmeye alınan kurulu gücü 140,62 MW olan Bağıştaş I Barajı ve Hidroelektrik Santrali'nde bulunan senkron generatörlerde örnek izolasyon testi uygulamaları yapılmıştır. Söz konusu senkron generatörlere ait etiket bilgileri aşağıdaki gibidir:

Tablo 3.1. Senkron generatör etiket değerleri

Özellikler	Can Suyu Ünitesi	Büyük Üniteler (3 Adet)
Anma Gerilimi =	6,3 kV	13,8 kV
Anma Gücü =	7.121kVA	51.283 kVA
İzolasyon Sınıfı =	F	F
Anma Akımı =	652,6 A	2.145,5 A
Üretici =	DEC	DEC
Üretim Yılı =	2012	2012
Güç Faktörü =	0,9 (Geri)	0,9 (Geri)
Uyartım Gerilimi =	110 V DA	240 V DA
Uyartım Akımı =	460 A	910 A

İzolasyon testi için Tablo 3.1.'de özellikleri verilen senkron generatöre ait stator yedek barası numune olarak kullanılmıştır.

İzolasyon Test Cihazı vesilesiyle, söz konusu baranın iletken olan kısmı ile izolasyon / toprak arasına sabit gerilim uygulanmaktadır. Sabit gerilim altındaki teçhizatın iletken kısmı ile izolasyon/toprak arasında akan toplam akım ve uygulanan sabit gerilim değerleri kullanılarak ($U = I \times R$) bağıntısı ile izolasyon direnci değeri hesaplanmıştır.

3.1.Deney Düzeneginde Kullanılan Ekipmanlar

3.1.1. DA izolasyon direnci ölçüm cihazı (megaohmmeter)

Sabit DA gerilim uygulanması ve ilgili izolasyon direnci ölçümleri için geliştirilmiş FLUKE marka, 1550C model 5 kV DA izolasyon direnci ölçüm cihazı kullanılmıştır. Son kalibrasyon tarihi, 09.08.2018 olarak günceldir.



Şekil 3.1. DA İzolasyon direnci ölçüm cihazı (Megaohmmetre)

3.1.2. Nem algılama cihazı

Ortamdaki nem miktarının ölçümü için TROTEC Marka BL30 serisi Digital Nem ve Sıcaklık Algılama Cihazı, deney setimiz içerisinde kullanılmıştır. İlgili ölçüm cihazına dair son kalibrasyon tarihi, 06.2016 tarihi olarak günceldir.



Şekil 3.2. Trotec marka nem algılama cihazı

3.1.3. Lazer termometre

Deney düzeneğimiz içerisindeki lokal sıcaklık ölçümlerinde FLUKE marka 566 IR model Lazer Termometre kullanılmıştır. İlgili ölçüm cihazına dair son kalibrasyon tarihi, 07.2017 olarak günceldir.



Şekil 3.3. Fluke 566 IR lazer termometre



Şekil 3.4. Fluke 566 IR lazer termometre kalibrasyon etiketi

3.1.4. Sıcaklık ve nem kontrol cihazı

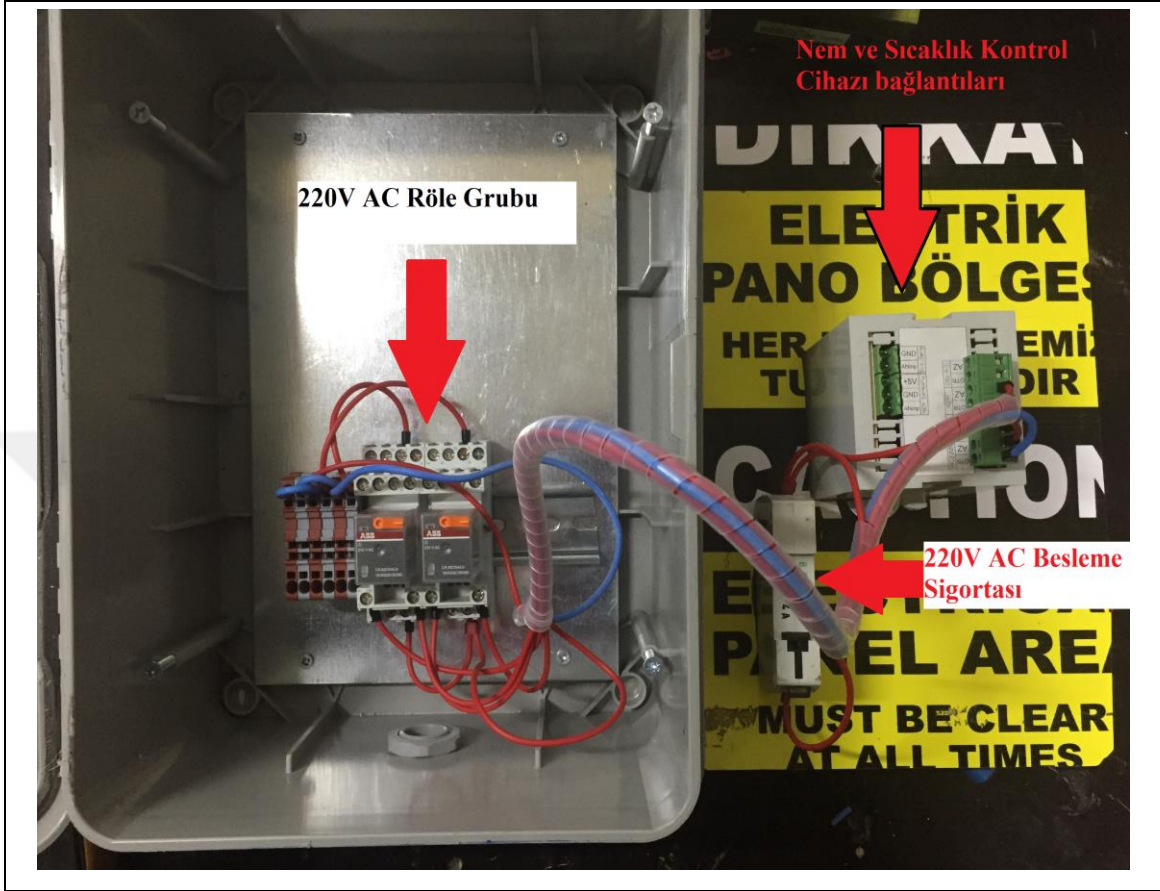
İzolasyon testine tabi tutulacak sargı için nem ve sıcaklık kontrol ünitesi temin edilmiştir. Söz konusu kontrol cihazı buhar üretici, fan ve ısıtıcı ekipmanlarını deney hücresi içerisindeki olması istenen değerlerde sabit tutmak üzere devreye alma ve çıkarma işlevini yerine getirmektedir. Nem ve sıcaklık sınır değerlerine göre kontrol cihazı ilgili kaynağın (nem veya sıcaklık) kontağını çektirerek devreye girmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.5. NST3W termostat, higrostat ve zamanlayıcı fonksiyonlu kontrol cihazı

Sıcaklık ve nem kontrolünü yapabilmek için ayrıca 220V AA rölelerden oluşan bir kumanda devresi tasarlanarak aşağıdaki fotoğrafta görüldüğü gibi montajı yapılmıştır.

Nem ve sıcaklık kontrol cihazı ilgili ABB marka 220V AA röleleri, enerjilendirmek suretiyle kontrolü sağlamaktadır.

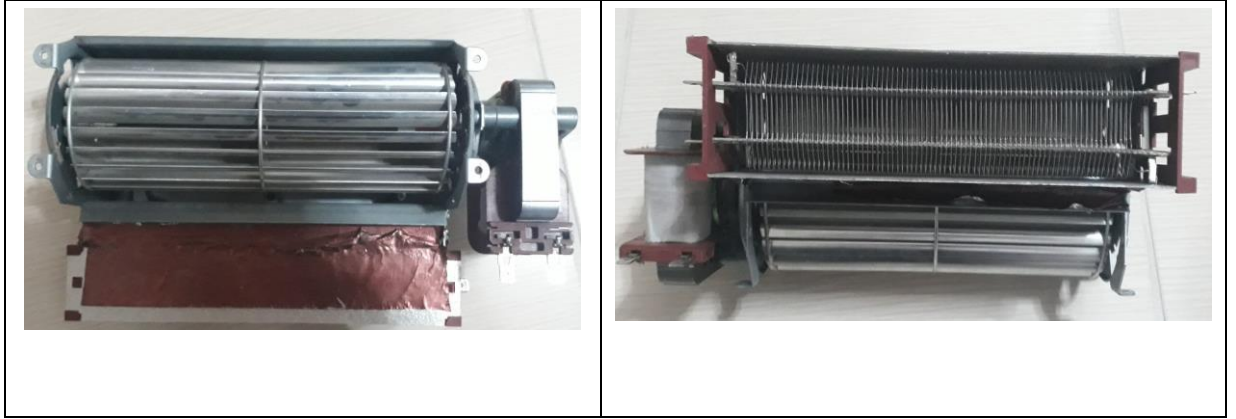


Şekil 3.6. Nem ve sıcaklık kontrol panosu

Nem ve sıcaklık kontrolünü sağlamak için ilgili kontrol cihazına adapte edilmiş 1 adet nem sensörü ve 1 adet sıcaklık sensörü kullanılmıştır. İlgili sensörler, deney hücresinin tam orta eksenine yerleştirilmiş olup buna ilave olarak lokal sıcaklık ve nem ölçümü doğrulamalarını yapabilmek adına bölüm 3.1.2 ve 3.1.3’de bahsedilen nem algılama cihazı ve lazer termometre de kullanılmıştır.

3.1.5. Isıtıcı ünitesi

Deney hücresi içerisindeki sıcaklığı sabit tutmak ve dengeli hava akımı sağlayarak hücre içerisinde eşit sıcaklık dağılımını sağlamak amacıyla 220V AA(2000 W) fanlı ısıtıcı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Isıtıcı ünitesi

3.1.6. Buhar üretici (hava nemlendirici)

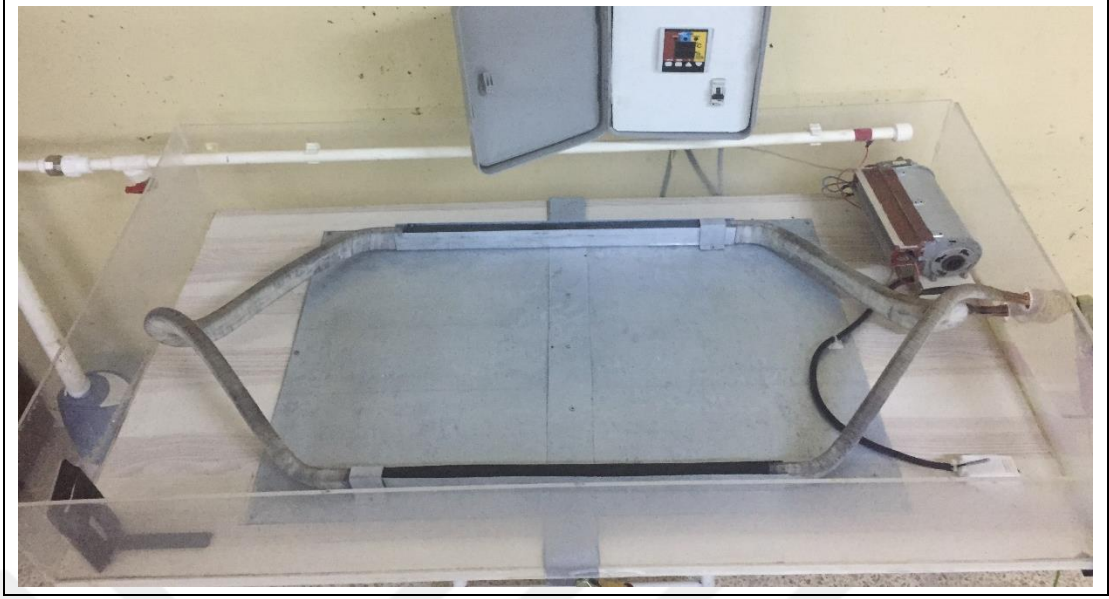
Deney düzeneği içerisindeki kapalı hazne içerisindeki nem miktarını artırmak için WOLLEX marka GL-2201 model, hava nemlendirici cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Buhar üretici olarak kullanılan hava nemlendirme cihazı

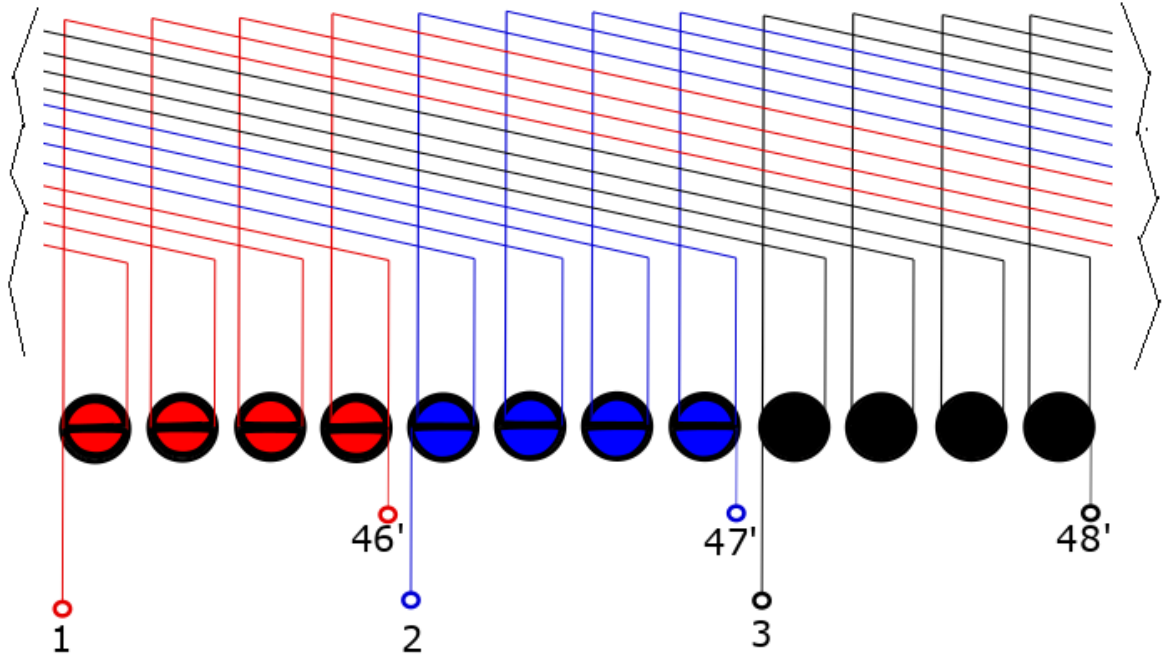
3.1.7. Stator barası (sargı)

Bağıştaş I Hidroelektrik Santralinde kurulu olan 7.12 MVA kurulu gücündeki senkron generatöre ait nominal gerilim değeri 6,3 kV olan stator sargısı deney numunesi olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Senkron generatör stator sargısı (deneye tabi tutulan ekipman)

Toplamda stator sargıları için 192 adet oyuk ihtiva eden ve 16 çift manyetik kutup bulunduran senkron generatöre ait stator sargı grubunun sarım şemasının bir kısmı Şekil 3.10 da gösterildiği gibidir;



Şekil 3.10. Stator sarım şemasından bir kısım

3.2. Deney Düzeneginin Kurulması

Deneye tabi tutulacak sargı kapalı ve şeffaf bir hazne içerisine yerleştirilerek sabit ortam koşullarının sağlanması amaçlanmıştır. İlgili sargıya gerilim uygulamak için iletken kısımlar kapalı haznedan dışarıda kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Sargı iletken bir levha üzerine yerleştirilerek olası kaçak akımların bu plaka üzerinden toprağa akmasını sağlayacak bir toprak bağlantısı ile ilişkilendirilmiştir.

Hazne içerisinde düzenli ve dengeli bir nem dağılımı sağlamak adına eşit aralıklarla açılmış buhar çıkış deliklerinden oluşan PVC bir boru kullanılmıştır. Ayrıca hazne içerisindeki nemli havanın dengeli dağılması için bir fan vesilesiyle sirkülasyonu sağlanmıştır. Nemlendirme için kullanılan su, içme ve kullanma suyundan tedarik edilmiş olup normal işletme şartlarında oluşabilecek nemli havanın simülasyonu hedeflenmiştir. Hazne içerisinde 2 farklı noktadan sıcaklık ve nem ölçümleri gerçekleştirilmiş olup bu değerlerin ortalamaları dikkate alınarak testler, gerçekleştirilmiştir.

Hazne içerisindeki olası yoğunlaşma kaynaklı su birikintilerinin tahliyesi için uygun drenaj noktaları bırakılmış olup bu bölgelerdeki aşırı nemlenme ihtimalleri en aza indirgenmiştir. Deney düzeneği içerisindeki havalandırma kanalları ve fan vesilesiyle bölgesel nem farklılıklarının önüne geçilmiştir.



Şekil 3.11. Deney düzeneği genel görünüm

Deney düzeneğinin dış kaplaması hem şeffaflık hem de yalıtkanlık sağlaması amacıyla pleksiglass (akrilik) malzemeden imal edilmiştir. Deney esnasında uygulanacak olan yüksek gerilimde herhangi bir güvenlik riski oluşturmaması adına iletken kısımlar ile arasında yeterli atlama mesafeleri bırakılmıştır. Ayrıca deney esnasında gerekli tüm iş güvenlik tedbirleri alınarak yüksek gerilimden etkilenebilecek tüm çevresel faktörler için önlemler alınmıştır.

3.3. Deney Süresince Uygulanacak Testlerin Planlanması

İlgili sargıya ait fabrika testlerinin ve ilk ölçüm sonuçlarının incelenmesinin ardından uygulanacak test gerilimi seçilecektir. Akabinde test süreçleri, izleme ve takip periyotları, test gerilimleri, nem ve sıcaklık aralıklarının da belirlendiği aşağıdaki iş planı hazırlanmıştır.

Tablo 3.2. DA izolasyon testi uygulaması iş takvimi

No	Açıklama	Detay	Tarih
1	Fabrika testleri ve devreye alma test sonuçlarının incelenmesi. (Ortam Nemi % 62)	Ön inceleme yapılarak sargıya dair izolasyon direnci verileri analiz edilecektir.	15 Ara 2018
2	Normal işletme şartlarındaki nem ve sıcaklık değerlerine göre ilk ölçüm alınacaktır. (Ortalama % 45 ortam neminde 3 yıl boyunca saklanmış yedek stator barası)	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	21 Ara 2018
3	% 70 stabil nem koşullarında 20 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	10 Oca 2019
4	% 70 stabil nem koşullarında 40 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	30 Oca 2019
5	% 70 stabil nem koşullarında 50 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	9 Şub 2019
6	%70 stabil nem koşullarında 60 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	19 Şub 2019
7	%70 stabil nem koşullarında 70 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	1 Mar 2019
8	%70 stabil nem koşullarında 80 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi 10 dk boyunca tatbik edilecektir.	11 Mar 2019

Tablo 3.2 Devamı. DA izolasyon testi uygulaması iş takvimi devamı

9	%70 stabil nem koşullarında 90 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	21 Mar 2019
10	%70 stabil nem koşullarında 100 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	31 Mar 2019
11	%70 stabil nem koşullarında 110 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	10 Nis 2019
12	%70 stabil nem koşullarında 120 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	20 Nis 2019
13	%70 stabil nem koşullarında 130 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	30 Nis 2019
14	%70 stabil nem koşullarında 140 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	10 May 2019
15	%70 stabil nem koşullarında 150 gün bekletilen numunenin izolasyon testine tabi tutulması	5 kV DA Test gerilimi boyunca tatbik edilecektir.	10 dk	20 May 2019
16	Sonuçların analizi ve yorumlanması	İlgili sonuçlar bir veri tablosunda işlenerek, izolasyon direncinin zaman ve nem yoğunluğuna bağlı olarak analizinin yapılması		22 May 2019

4. ARAŞTIRMA BULGULARI


Bölüm 3.3.'de belirlenen iş takvimine uygun şekilde 21.12.2018 tarihinde alınan ilk ölçüm değerleri ve devam eden 150 günlük test süreci içerisinde ortalama % 70 ortam nemine maruz bırakılmış sargı ve izolasyon grubuna dair, toplamda 14 adet düzenli okuma yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlerden hareketle sonuçlar, izolasyon direnci mertebesi (kaçak akım mertebesi) ve DAR/PI oranları olmak üzere iki farklı parametre üzerinden değerlendirilmeye alınmıştır.



Şekil 4.1. Test düzeneğine dair genel bir görüntü

4.1. Devreye alma testi bulguları

İlgili stator sargısına dair fabrika test belgelerinde, imalat tarihi 2012 yılı olarak belirtilmiştir. Bu ekipmanın ilk enerjilendirme tarihi ise test kayıtlarında 12.01.2015 olarak görülmektedir. Test anında ortam nemi, %62 olarak ölçülmüştür.

 DUGAN ENERJİ <small>TEST VE SAĞAMA BİRLİĞİ</small>		GEN #4 STATOR REPLACED BARS TESTS							
Manufacturer :	DONGFANG CO. LTD.	Type :	SF 5409 - 16 / 3250	Serial Number :	--				
Voltage - Current :	6300 V / 852,5 A	Rated Power :	7121 KVA	Type of Insulation :	F / F				
Ambient Temp. :	9 °C	Winding Temp. :	9 °C	Humidity % :	72				
Exc. Voltage - Current :	110 V / 460 A	Produced Date :	2012	Stator Winding :	Y				
2. REPLACED STATOR BARS TEST									
2. A. STATOR BARS DC INSULATION RESISTANCE TEST (BEFORE AC WITHSTAND TEST)									
Test No.	Measurement Number	TEST VOLTAGE (V)	15. sec. (Gohm)	30. sec. (Gohm)	45. sec. (Gohm)	60. sec. (Gohm)	Correction Fac.	60. sec 100°C (Mohm)	DAR (RQR15)
1	*BAR - 1	2500	254.0	328.0	495.0	599.0	0.01325	7937	2.30
2	*BAR - 2	2500	303.0	401.0	579.0	784.0	0.01325	10388	2.59
3	*BAR - 3	2500	320.0	396.0	594.0	755.0	0.01325	10017	2.38
4	*BAR - 4	2500	349.0	462.0	701.0	881.0	0.01325	11673	2.52
5	BAR - 5	2500	214.0	275.0	407.0	511.0	0.01388	7093	2.39
6	BAR - 6	2500	229.0	281.0	451.0	578.0	0.01388	8023	2.52
7	BAR - 7	2500	263.0	379.0	512.0	653.0	0.01388	9064	2.31
8	BAR - 8	2500	363.0	468.0	696.0	908.0	0.01388	12603	2.59
9	BAR - 9	2500	315.0	410.0	575.0	701.0	0.01388	9730	2.23
10	BAR - 10	2500	399.0	495.0	770.0	973.0	0.01388	13505	2.44
11	BAR - 11	2500	373.0	453.0	710.0	904.0	0.01388	12548	2.42
12	BAR - 12	2500	335.0	421.0	560.0	631.0	0.01388	11834	2.48
13	BAR - 13	2500	345.0	423.0	656.0	874.0	0.01388	12131	2.53
*DAR = Dielectric Absorption Ratio *NOTE : Test date : 12.01.2015 , TEMP : 8°C , WINDING TEMP. : 7°C AND % Nem : 62 .									
Tested by		Checked by		Customer or Representative					
Signature		Signature		Signature		Signature		Signature	
Seydi CEYLAN		Nesimi DUGAN		ZHA ZHONGYONG		Ahmet Fahir AKSOY		EMRE DEMIREL	
Date : 13/01/2015									

Şekil 4.2. Devreye alma çalışmaları esnasında yapılan ilk DA izolasyon direnci test föyü

Şekil 4.2.'de görülen "BAR-1" etiketli stator barasında, ilk enerjilendirme testlerinde 2500V DA test gerilimi 1 dk. boyunca tatbik edilerek teste tabi tutulmuştur. PI (Polarizasyon indeksi) testi, devreye alma çalışmaları esnasında uygulanmamıştır.

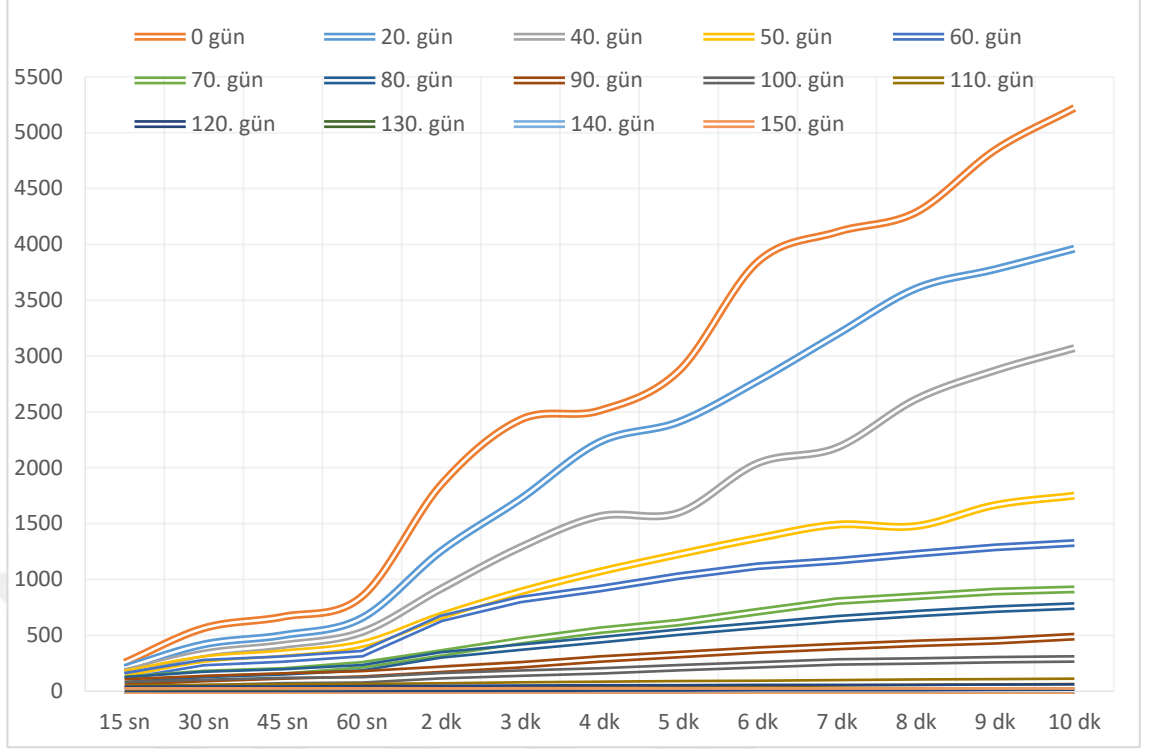
4.2. İzolasyon direnci mertebesine dair test bulguları

Sargıya uygulanan gerilim, 5259 V DA olmak üzere tüm test uygulamalarında sabittir. Bu gerilim değeri üzerinden Megaohmmetre ile yapılan testlerin 15. sn, 30. sn, 45. sn, 60. sn, 2. dk, 3. dk, 4. dk, 5. dk, 6. dk, 7. dk, 8. dk, 9. dk ve 10. dk aralıklarında düzenli olarak okuma yapılmıştır. Her bir ölçüm sonucunda 13 adet, izolasyon direnci değeri ve DAR/PI oran hesaplamaları not edilmiştir.

TARİH	NEM MARUZİYET SÜRESİ (GÜN)	BİRİM	15 sn	30 sn	45 sn	60 sn	DAR	2 dk	3 dk	4 dk	5 dk	6 dk	7 dk	8 dk	9 dk	10 dk	PI
21.12.2018	0	GΩ	255	564	666	849	3,33	1850	2430	2511	2866	3844	4111	4287	4845	5221	6,15
10.01.2019	20	GΩ	208	419	501	656	3,15	1255	1720	2230	2410	2778	3194	3605	3777	3961	6,04
30.01.2019	40	GΩ	170	337	413	529	3,11	918	1288	1566	1597	2041	2180	2614	2871	3071	5,81
9.02.2019	50	GΩ	159	287	340	422	2,65	675	891	1070	1225	1370	1491	1478	1666	1750	4,15
19.02.2019	60	GΩ	138	255	286	335	2,43	651	819	919	1030	1118	1167	1231	1288	1326	3,96
1.03.2019	70	GΩ	105	159	182	235	2,24	343	450	546	614	711	806	848	891	911	3,88
11.03.2019	80	GΩ	101	150	172	211	2,09	323	393	460	528	589	648	693	733	762	3,61
21.03.2019	90	GΩ	82,8	111	135	154	1,86	195	235	287	327	368	400	428	451	488	3,17
31.03.2019	100	GΩ	58,2	78,0	95,8	101	1,74	138	161	182	210	235	261	271	280	288	2,85
10.04.2019	110	GΩ	27,4	33,4	38,1	40,2	1,47	47,8	55,9	61,5	65,8	70,1	75,6	79,8	83,0	87,8	2,18
20.04.2019	120	GΩ	15,7	17,2	19,1	20,0	1,27	22,4	25,1	28,8	30,4	31,5	32,7	32,4	35,6	37,1	1,86
30.04.2019	130	GΩ	5,8	6,3	6,2	6,0	1,03	5,9	6,2	6,3	6,0	5,8	6,2	6,4	6,8	6,4	1,07
10.05.2019	140	GΩ	0,644	0,645	0,627	0,631	0,98	0,634	0,644	0,641	0,654	0,646	0,642	0,634	0,617	0,601	0,95
20.05.2019	150	GΩ	0,345	0,358	0,349	0,335	0,97	0,337	0,341	0,345	0,337	0,330	0,328	0,322	0,320	0,314	0,94

Şekil 4.3. İzolasyon direnci mertebelerine dair test ölçümleri

İzolasyon direnci değerleri, nem maruziyet süresine bağlı olarak sürekli bir azalma eğilimindedir. İlk ölçüm sonuçlarında 5221 GΩ (gigaohm) maksimum izolasyon direnci görülürken aynı değer 60. gün 1326 GΩ (gigaohm), 90. gün 488 GΩ (gigaohm), 120. gün 37,1 GΩ (gigaohm) ve 150. gün 358 MΩ (megaohm) seviyelerine düşmüştür. Aşağıdaki grafik üzerinden bu eğilim, daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4. İzolasyon direnci ve nem maruziyet süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik

4.3. Kaçak akım parametresine dair test bulguları

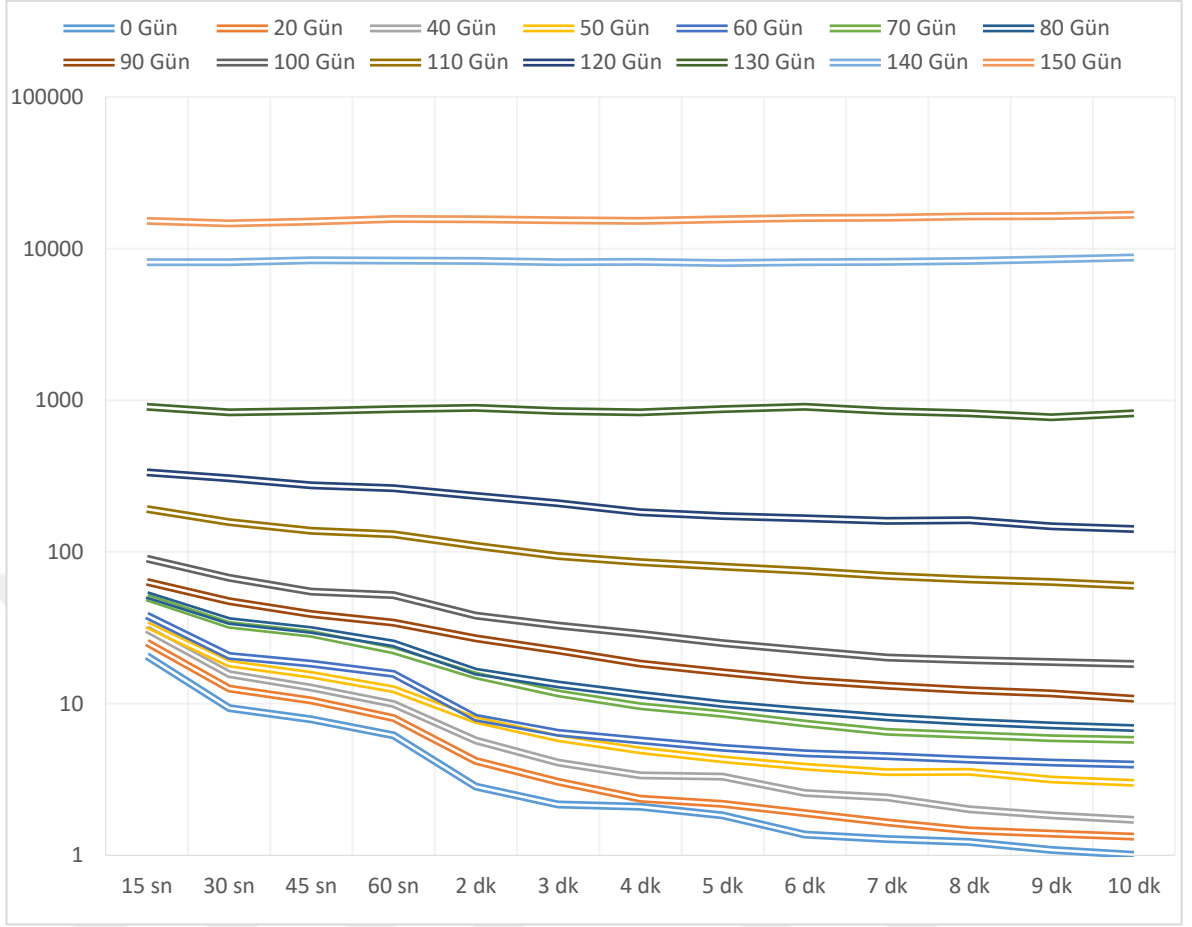
Bölüm 4.2.'de okumaları yapılmış izolasyon direnci değerleri ($G\Omega$) ile uygulanan test gerilimi 5259V (DA) bilinenlerinden yola çıkarak ohm kanunu formülü ile hesaplanan kaçak akım değerlerine ulaşılmıştır. Söz konusu kaçak akım birimleri nanoamper (nA) mertebesinde mikroamper (μA) mertebesine kadar yükselmiştir.

Kaçak Akım değerlerinin 140 (yüz kırk) günden sonra mikroamper (μA) mertebelerine ulaşması ve akım değerlerinin test süreci boyunca artma eğiliminde olması, dikkat çekmektedir.

TARİH	NEM MAR. SÜRESİ (GÜN)	BİRİM	15 sn	30 sn	45 sn	60 sn	2 dk	3 dk	4 dk	5 dk	6 dk	7 dk	8 dk	9 dk	10 dk
21.12.2018	0	nA	20,62	9,32	7,90	6,19	2,84	2,16	2,09	1,83	1,37	1,28	1,23	1,09	1,01
10.01.2019	20	nA	25,28	12,55	10,50	8,02	4,19	3,06	2,36	2,18	1,89	1,65	1,46	1,39	1,33
30.01.2019	40	nA	30,94	15,61	12,73	9,94	5,73	4,08	3,36	3,29	2,58	2,41	2,01	1,83	1,71
9.02.2019	50	nA	33,08	18,32	15,47	12,46	7,79	5,90	4,91	4,29	3,84	3,53	3,56	3,16	3,01
19.02.2019	60	nA	38,11	20,62	18,39	15,70	8,08	6,42	5,72	5,11	4,70	4,51	4,27	4,08	3,97
1.03.2019	70	nA	50,09	33,08	28,90	22,38	15,33	11,69	9,63	8,57	7,40	6,52	6,20	5,90	5,77
11.03.2019	80	nA	52,07	35,06	30,58	24,92	16,28	13,38	11,43	9,96	8,93	8,12	7,59	7,17	6,90
21.03.2019	90	nA	63,51	47,38	38,96	34,15	26,97	22,38	18,32	16,08	14,29	13,15	12,29	11,66	10,78
31.03.2019	100	nA	90,36	67,42	54,90	52,07	38,11	32,66	28,90	25,04	22,38	20,15	19,41	18,78	18,26
10.04.2019	110	nA	191,93	157,46	138,03	130,82	110,02	94,08	85,51	79,92	75,02	69,56	65,90	63,36	59,90
20.04.2019	120	nA	334,97	305,76	275,34	262,95	234,78	209,52	182,60	172,99	166,95	160,83	162,31	147,72	141,75
30.04.2019	130	nA	906,72	834,76	848,23	876,50	891,36	848,23	834,76	876,50	906,72	848,23	821,72	773,38	821,72
10.05.2019	140	nA	8166,15	8153,49	8387,56	8334,39	8294,95	8166,15	8204,37	8041,28	8140,87	8191,59	8294,95	8523,50	8750,42
20.05.2019	150	nA	15243,48	14689,94	15068,77	15698,51	15605,34	15422,29	15243,48	15605,34	15936,36	16033,54	16332,30	16434,38	16748,41

Şekil 4.5. Kaçak akım mertebelerine dair test ölçümleri

İzolasyon üzerinden toprağa akan kaçak akım değerleri nem maruziyet süresine bağlı olarak sürekli bir artma eğilimindedir. Aşağıdaki grafik üzerinden bu eğilim, daha net anlaşılmaktadır.



Şekil 4.6. Kaçak akım ve nem maruziyet süreleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (logaritmik ölçek kullanılmıştır).

5. SONUÇ

Senkron generatör stator sargısı üzerinde yapılan bu çalışma kapsamında, ortamdaki nem miktarının sargı izolasyonunu geçici veya kalıcı olarak deforme ettiği sonucuna varılmıştır. Yapılan 150 günlük gözlem süresince toplamda 14 adet düzenli okuma yapılmıştır. Bu okumaların hepsi sıcaklık, nem aralığı ve test gerilimi sabit tutularak uygulanmıştır.

2015 yılında ilgili stator sargısında ilk devreye alma çalışmaları kapsamında yapılan aynı muhteviyatlı “DA İzolasyon Direnci Testi” sonuçlarında izolasyon direnci $G\Omega$ (gigaohm) mertebesinde çıkmıştır. Aynı test sonuçlarında DAR oranı (Dielektrik Absorpsiyon Oranı) 2,36 olarak hesaplanmıştır (IR_{60sn}/IR_{15sn}). Söz konusu test esnasında alınan nem ölçümlerinde ortam nemi, %62 olarak not edilmiştir.

Devam eden süreç içerisinde söz konusu stator sargısı, işletmenin kritik yedek malzemesi niteliğinde olmasından dolayı ortalama %45 ortam neminde bulunan saklanma koşulunda yaklaşık 4(dört) yıl yedek olarak depolanmıştır. Bu süre sonunda yapılan ilk ölçümlerde sargının izolasyon direnci mertebelerinde anlamlı bir değişiklik olmadığı fakat standardın işaret ettiği DAR oranlarında anlamlı bir artış olduğu gözlenmiştir.

Deney çalışmaları süresince alınan ölçüm sonuçlarında ilk 60 günün sonunda izolasyon direncinde ilk ölçüm sonuçlarına kıyasla %45,88 ‘lik bir düşüş ve bunun yanı sıra DAR oranında %27’lik bir azalma eğilimi tespit edilmiştir. Devam eden 90 (doksan) günlük periyodun sonunda alınan ölçümlerde yine ilk ölçümlere kıyasla izolasyon direnci değerlerinde %67,53; DAR oranlarında ise %44,14 azalma tespit edilmiştir. 150 (yüz elli) günlük periyodun sonunda ise izolasyon direnci değerlerindeki düşüş %99,86; DAR oranlarındaki azalma da %70,87 mertebelerine kadar çıkmıştır.

Bu sonuçların yanı sıra uzun zamanlı test metodu olarak kullanılan PI (polarizasyon indeksi) oranı parametresindeki değişimler ise (IR_{600sn}/ IR_{60sn}) 60 (altmış) günün sonunda %35,63; 90 (doksan) günün sonunda %48,47 ve 150 (yüz elli) günün sonunda %84,71 oranında azalma şeklinde gerçekleşmiştir.

Tablo 5.1. Ölçülen parametrelerde ki azalma oranları

%70 NEM MARUZİYET SÜRESİ	AZALMA ORANLARI		
	İZOLASYON DİRENCİ	DAR	PI
60 Gün	45,88%	27,09%	35,63%
90 Gün	67,53%	44,14%	48,47%
150 Gün	99,86%	70,87%	84,71%

Bu sonuçlardan hareketle, ortamdaki bağıl nem miktarı ve bu nemli ortamda saklanma süresine bağlı olarak izolasyon ihtiva eden sargı grubunun yalıtkanlık parametrelerinde çok büyük oranlarda azalma eğilimi olduğu anlaşılmıştır. 150(yüz elli) günün sonunda izolasyon direncinin %99,86 oranında azalması ve DAR değerinin 1,00'dan küçük (DAR< 1,00) olması, söz konusu ekipmanın enerjilendirilmesi hususunda teknik ve güvenlik konularında önemli sorunların olduğunu işaret etmektedir.

Bütün teçhizatlar için IEC 60085-1 standardında belirtilen izolasyon sınıflarına göre olması gereken minimum polarizasyon endeksi Tablo 5.2'de verilmiştir (IEEE-43 2006).

Tablo 5.2. Minimum polarizasyon endeksi tablosu (Yıldız,2018)

İzolasyon Sınıfı	Minimum Polarizasyon Endeksi (PI)
A	1.5
B	2
F	2
H	2

Bazı izolasyon test cihazı üretici firmaları, bu değerlendirme tablosunu daha detaylı kategorize ederek, kendi sınıflandırmalarını oluşturmuştur. Tablo 5.3'de bu sınıflandırmalar verilmiştir (Chauvin-Arnoux 2010, Megger 2006).

Tablo 5.3. Üretici firmaların DAR ve PI değerlendirme tablosu (Yıldız,2018)

İzolasyon Durumu	Polarizasyon Endeksi (PI)
Problem	$PI < 2$
İyi	$2 < PI < 4$
Mükemmel	$PI > 4$
İzolasyon Durumu	Dielektrik Absorbsiyon Oranı (DAR)
Şüpheli	$DAR < 1.25$
Problem yok	$1.25 < DAR < 1.60$
Mükemmel	$DAR > 1.60$

DAR değerinin 1,00'dan küçük ($DAR < 1,00$) olması, gerilim altındaki bu iletken ve yalıtkan grubu üzerinden toprağa akan kaçak akım miktarının uygulanan gerilimin süresi ile birlikte arttığı anlamına gelmektedir. Aynı şekilde artan bu kaçak akım artış eğiliminin geçici olmadığı ve sürekli bir hal aldığı tespiti de PI (polarizasyon indeksi, 10 dk.) ölçümlerinde teyit edilmektedir. Bahsedilen bu kaçak akım miktarı uygulanan gerilimin genliğine de bağlı olmak şartıyla, yalıtkan malzeme üzerinde ısınma ve kimyasal/fiziksel deformasyon gibi sonuçlara ortam hazırlamaktadır. Bu deformasyonlar, kısa vadede izolasyonun delinmesi ve ilgili sargı grubunun enerjilendirilememesi anlamına gelmektedir. Tablo 5.3 ve Tablo 5.2 'den hareketle DAR değerinin 1,25 den küçük olması ve PI değerinin 2 den küçük olması ekipmanın izolasyonunda ki bir problemi işaret etmektedir.

Söz konusu yüksek gerilim ekipmanlarının içinde bulunduğu işletme şartları ve yedek malzeme olarak bekletilen parçalarının saklanma koşulları, sistemin güvenliği ve uzun vadeli çalışma şartları açısından çok büyük öneme haizdir. Yapılan çalışma ile yatırım maliyetleri ve ticari kâr/zarar ölçeklerinin çok yüksek olduğu bu ekipmanların, teknik açıdan doğru işletilmesi, ortam şartları yönünden doğru koşullarda saklanması ve önleyici bakım çalışmaları kapsamında doğru testlere tabi tutularak güvenli ve uzun ömürlü operasyonlarına katkı sağlanması hedeflenmiştir.

6. ÖNERİLER

Senkron generatörler özelinde yapılan bu çalışma, uygulanan test gerilimleri değiştirilerek tüm AG (alçak gerilim) / YG (yüksek gerilim) sargı grupları, kablolar, trafolar vb. enerji altında çalışan teçhizat ve kısımlarına uygulanabilir.

Yapılan bu çalışma ile uzun süre yüksek rutubetli ortam koşullarında bekletilen YG (yüksek gerilim) ekipmanlarının, maruz kaldığı ortam neminden dolayı yalıtkanlık parametrelerinin deformasyona uğrayabileceğini ortaya konulmuştur. Bu sonuçtan hareketle; özellikle YG (yüksek gerilim) sistemleri içerisinde bulunan benzeri ekipmanların yıllık bazda DA izolasyon direnci testine tabi tutulması ve sonuçlarının analiz edilerek, saklanma koşullarında alınması gereken önlemlerin belirlenmesi önerilmektedir.

Ayrıca işletmede olan YG sistemlerinin izolasyon ihtiva eden kısımlarına da yılda en az 1 defa periyodik olarak, uzun dönemli duruşlar sonrasında ilk enerjilendirme (devreye alma) süreçlerinde ise her defa olmak üzere DA izolasyon testlerinin uygulanması önerilmektedir. Bu sayede sargıların izolasyon kondisyonu ve işletme ortam şartları hakkında bilgi sahibi olunabilir. Bu sonuçlardan hareketle önleyici bakım kapsamında arıza oluşmadan önce gerekli iyileştirme çalışmaları yapılarak, ilgili ekipmanın güvenilir ve sürdürülebilir işletme şartlarının sağlanması amaçlanmaktadır.

Söz konusu ekipmanların nakliyesi esnasında maruz kalabileceği çevresel (nem, kirlilik, kimyasal bulaşkan vs.) etkilerden dolayı nakliye öncesi ve sonrasında yapılacak izolasyon testleri ile ekipmanın izolasyonunda ki değişimlerin izlenmesi önerilmektedir.

Yapılan test sonuçlarına göre izolasyon dirençleri ve DAR, PI oranlarında ki bariz olumsuz sonuçlar ilgili ekipmanın devreye alınmasının sakıncalı olduğu anlamına gelmektedir. Bu durumda nem ve rutubet etkisini ortadan kaldırmak için sargı nominal sıcaklıklarını geçmeyecek şekilde kurutma işlemine tabi tutulması önerilmektedir. Kurutma işlemi sonrası yapılacak izolasyon direnci testleri ile izolasyon direncinde ki olumlu artışlar teyit edilmelidir.

Kurutma işlemi, harici bir ısı kaynağından ortam sıcaklığını artırmak şeklinde olabileceği gibi, ilgili sargı grubu üzerinden (sargı nominal akımları dikkate alınarak) bir DA akım kaynağı vesilesiyle akıtılacak kontrollü bir akım devresi ile de yapılabilir. Akım

kaynağı ile kurutma işlemi esnasında sargı üzerinden akabilecek aşırı akım ve oluşabilecek kısa devre arızaları için yeterli elektriksel koruma önlemlerinin alınması gerekmektedir. Bu yöntemler ile izolasyon sisteminin içerisine nüfuz etmiş olan nemin güvenli bir şekilde bertaraf edilmesi amaçlanmaktadır. Bahsedilen tüm kurutma işlemlerinde aşırı ve hızlı sıcaklık artışlarının, izolasyon sisteminin içeriğinde bulunan emprenye edilmiş vernik gibi kimyasallarda bozulmalara sebebiyet verebileceği unutulmamalıdır. Bu yüzden sargı izolasyon sınıfına göre (imalatçı sıcaklık limitleri) maksimum sıcaklık değerlerinin kesinlikle aşılmaması ve ani sıcaklık artışlarına karşılık sürekli kontrollerin yapılması önem arz etmektedir.



KAYNAKLAR

- Aydoğmuş, Z. (2000) “Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Kirlenme Atlamasının Dinamik Ark Modeli”, Doktora Tezi, *Firat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 1-17.
- Central Power System and Services. “Alternator Winding Temperature Rise in Generator Systems”, <https://cpower.com/PDF/InfoSheets/34.pdf>, Son erişim tarihi: 28.05.2019
- Chauvin Arnoux. “Insulation Resistance Testing Guide”, <https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/D00VEC36.PDF>, Son erişim tarihi: 11.06.2019
- Chapman, S. J. (2012) “Synchronous Generator”, Electric Machinery Fundamentals, *McGrawHill*, New York, 1-29.
- Elektrikport.”Generatör İkaz Sistemleri”, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/generator-ikaz-sistemleri/18894#ad-image-0>, Son erişim tarihi: 28.05.2019
- Elektrikport.”Senkron Generatörler”, <https://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/senkron-generatorler/11559#ad-image-0>, Son erişim tarihi: 28.05.2019
- ELK Motor. “Elektrik Motoru Koruma Sınıfları”,<http://www.elkmotor.com.tr/elkmotor-motor-koruma-siniflari.aspx>, Son erişim tarihi: 28.05.2019
- Kumru, C. F. (2016) “Yüksek Gerilim Kablolarında Dielektrik Kayıp Parametrelerinin Farklı İşletme Koşullarında Deneysel Ve Yapay Sinir Ağları İle İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-9.
- Largiader, H. “Ger Motorları İçin Modern izolasyon Sistemleri”, http://www.emo.org.tr/ekler/8c2ac6f92a1c369_ek.pdf, Son erişim tarihi: 04.08.2019
- Megger, “The Complete Guide to Electrical Insulation Testing”, <https://www.instrumart.com/assets/Megger-insulationtester.pdf>, Son erişim tarihi: 11.06.2019
- Mergen, A. F. ve Zorlu, S.(2010) Elektrik Makineleri III Senkron Makineler, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 1-120.
- Ndzeru, M. (2008) “Insulation Evaluation Synchronous Machines”, Yüksek Lisans Tezi, *Vaal University of Technology*, Vanderbijlpark, 1-22.

- Omaç, Z. ve Tufan, F. (2012) “Bir Senkron Generatörün İkaz Sistemi ve Gerilim Regülasyonu”, *ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 821-824.
Son erişim tarihi: 11.06.2019
- Schmerling, R., Jenau, F., Staubach, C. and Pohlmann, F. (2012) “Investigations of modified nonlinear electrical materials for end corona protection in large rotating machines”, *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, London, 1-2.
- Stone, G. C., Boulter, E. A., Culbert, I. and Dhirani, H. (2014) *Electrical Insulation For Rotating Machines Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair, IEEE Press Series on Power Engineering A John Wiley & Sons Inc. Publication*, United States of America, 12-62.
- Sunay, A. (2006) “Senkron Generatörlerin Uyarım Sistemlerinin Yarı İletkenli Devrelerle Denetimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 15-48.
- Taslak, E. (2014) “Yüksek Gerilimde Kullanılan Sıvı Yalıtkanlara Ait Elektriksel Parametrelerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-28.
- Techni Tool. “The Complete Guide To Electrical Insulation Testing”, http://www.techni-tool.com/site/ARTICLE_LIBRARY/Megger%20-%20The%20Complete%20Guide%20to%20Electrical%20Insulation%20Testing.pdf, Son erişim tarihi: 02.07.2019
- TEİAŞ. “420 kV Metal Oksitli Parafudr Tip Teknik Şartnamesi”, https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2017-06/420kv_metal_oksitli_porselen_ya_da_silikon_mahfazal%C4%B1_parafudr_tip_teknik_%C5%9Fartnamesi_son.pdf, Son erişim tarihi: 11.06.2019
- TEİAŞ. “Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Kurulu Güç Raporu Nisan 2019”, https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2019-05/kurulu_guc_nisan_2019.pdf
Son erişim tarihi: 11.06.2019
- Tufan, F. (2013) “Senkron Generatör Statik İkaz Sistemlerinin Modellenmesi ve Şebeke Kararlılığına Etkilerinin”, Yüksek Lisans Tezi, *Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Tunceli, 15-48.
- Üstünel, M. (2012) “Çok Fazlı Sistemler”, Elektroteknik Ders Notu, *MEB Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara, 148.
- Üstünel, M. (2012) “Senkron Generatörler”, Elektrik Makinaları ve Laboratuvarı, *MEB Hayat Boyu Öğrenme Genel Müdürlüğü Yayınları*, Ankara, 190-209.
- Yıldız, M. (2018) “Güç Transformatörlerinde Meydana Gelen Arızların Gelişmiş Test Yöntemleri ile Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 1-41.

Yücedağ, İ. (2007) “Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MıS) Yapılarda Elektrik Ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık Ve Frekansa Bağlı İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Denizli, 29-52.



EKLER

Ek-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Özgenel, M. C. ve Demirel, E. (2019) “Senkron Generatörler de Ortam Neminin Sargı İzolasyon Direnci Parametrelerine Etkisinin İncelenmesi”, *Theoretical and Experimental Studies in Nuclear Applications and Technology*, Amasya,



ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzincan ilinde doğdu. İlköğrenimini Erzincan Cumhuriyet İlköğretim Okulunda, lise öğrenimini Erzincan Fen Lisesi'nde tamamlamıştır. 2006 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümüne başlamıştır. Aynı zamanda 2007 yılında ikinci üniversite kapsamında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme lisans programına da başlamıştır. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. 2014 yılında Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi İşletme Lisans bölümünden mezun olmuştur. 2011 yılından itibaren hidroelektrik enerji üretimi alanında faaliyet gösteren İçtaş Yenilenebilir Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş. firmasında, İşletme Mühendisi, Devreye Alma ve Kontrol Mühendisi, Devreye Alma Koordinatörü ve İşletme Müdürlüğü görevlerini üstlenmiştir.

2016 yılından itibaren, Erzincan ili İliç ilçesinde kurulu olan 140,62 MWe kurulu gücündeki Bağıştaş I Barajı ve Hidroelektrik Santrali'nin İşletme Müdürlüğü görevini yürütmektedir.