

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SANTRALLERİNDE
YUVARLAK KUTUPLU SENKRON GENERATÖR VE
YARDIMCI EKİPMANLARININ BELİRLENMESİ**

UMUT ÖZDOĞAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNELERİ VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. ASIM KASAPOĞLU**

İSTANBUL, 2012

ÖNSÖZ

Son yıllarda dünyanın elektrik enerji ihtiyacı büyük bir hız ile artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için kurulan enerji santrallerinin sayısı günden güne çoğalmaktadır. Orta ve büyük kapasiteli bu santrallerin büyük bir kısmında senkron generatörler pay sahibidir. Yuvarlak kutuplu senkron generatörler ise bu payın büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Büyük güçlü yapıda olan bu makineler aynı zamanda şebekelerin önemli birer parçası olarak güç sistemlerindeki yerlerini almaktadırlar.

Bu çalışma kapsamında temel olarak yuvarlak kutuplu senkron generatörün çalışma prensibi, tahrik makineleri ve güç sistemleriyle olan ilişkisi incelenerek, fosil yakıtlı bir enerji santrali için kullanılacak olan yuvarlak kutuplu bir senkron generatörün ve yardımcı ekipmanlarının belirlenmesinde nasıl bir yol izlenmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Yüksek lisans ve tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren ve yardımlarını benden esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Asım Kasapoğluna teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca her an yanımda olan ve hiçbir zaman desteğini benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Ağustos, 2012

Umut ÖZDOĞAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vii
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı.....	1
1.3 Hipotez.....	1
BÖLÜM 2	
MANYETİK ALAN VE SENKRON GENERATÖR İLİŞKİSİ	3
2.1 Faraday Yasası.....	3
2.2 Ampere-Biot-Savart Yasası	4
2.3 Lenz Kanunu.....	4
2.4 Senkron Generatör Çalışma Prensibi	5
2.5 Endüvi Reaksiyonu	6
2.5.1 Omik Yüklü Durum	6
2.5.2 Endüktif Yüklü Durum	7
2.5.3 Kapasitif Yüklü Durum.....	8
BÖLÜM 3	
SENKRON GENERATÖRDE KARARLI HAL.....	10
3.1 Yuvarlak Kutuplu Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi.....	10
3.2 Stator Sargıları.....	12
3.3 Uyartım Sargıları	21
3.4 Senkron Reaktans.....	26

3.5	Kararlı Hal ve Dengeli Yükler İçin Denklemler	30
3.6	Fazör Diyagramlar	33

BÖLÜM 4

SENKRON GENERATÖR KARAKTERİSTİKLERİ		36
4.1	Boşta Çalışma Karakteristiği	36
4.2	Kısa Devre Karakteristiği	37
4.3	Kısa Devre Oranı	38
4.4	Sıfır Güç Faktörü Eğrisi	41
4.5	V-I Karakteristiği	42
4.6	V Eğrisi	44
4.7	Kapasite Eğrisi	45

BÖLÜM 5

SENKRON GENERATÖRDE İŞLETME KOŞULLARI		47
5.1	Senkron Generatör İşletme Modları	48
5.1.1	Devre Dışı Kalma	48
5.1.2	Düşük Hız	48
5.1.3	Hızlanma ve Yavaşlama	48
5.1.3.1	Ek kalkış motoru kullanılması	48
5.1.3.2	Generatörün motor olarak çalıştırılması	49
5.1.4	Açık Devre Çalışma	49
5.1.5	Senkronizasyon ve Yüklenme	49
5.2	Uyartım ve Gerilim Regülasyonu	50
5.2.1	Kalıcı Hal Durumunda Uyartım Sistemi Kontrolü	51
5.2.2	Geçici hal durumunda uyartım sistemi	52

BÖLÜM 6

GÜÇ SİSTEMLERİNDE SENKRON GENERATÖR KORUMASI		53
6.1	Senkronizasyon ve Senkron Kontrol Rölesi (15-25)	53
6.2	Kısa Devre Koruması (21-50-51-51V-87)	54
6.3	V/Hz Koruması (24)	55
6.4	Düşük ve Aşırı Gerilim Koruması (59-27)	55
6.5	Ters Güç Akışı (Motor çalışma) Koruması (32)	56
6.6	Alan Kaybı Koruması (40)	56
6.7	Dengesiz Stator Akımı Koruması (46)	56
6.8	Stator Ve Rotor Termal Koruması (49)	57
6.9	Gerilim Dengesi Koruması (60)	57
6.10	Kesici Hatası Koruması (62B)	58
6.11	Rotor-Toprak Arıza Koruması (64F)	58
6.12	Yüksek/Düşük Frekans Koruması (81)	58
6.13	Senkronizasyon Kaybı Koruması (78)	58
6.14	Senkron Generatörlerin Topraklanması	59

BÖLÜM 7

SENKRON GENERATÖRLERİN TAHRİK EDİLMESİNDE KULLANILAN MAKİNELER	61
7.1 Buhar Türbinleri	63
7.2 Gaz Türbinleri.....	65
7.2.1 Kompresör	65
7.2.2 Yanma Odası	66
7.2.3 Türbin	66

BÖLÜM 8

SENKRON GENERATÖRLERİN ŞEÇİLMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR ..	68
8.1 Generatör Gücü	68
8.2 Soğutma Tipi	74
8.3 Sıcaklık Limitleri.....	76
8.4 Generatörün Nominal Değerlerinin Çalışma Aralıkları	79
8.5 Koruma Sınıfı.....	80
8.6 Generatör Transformatörü İle Uyum	82
8.7 Generatör Kesicisi	82

BÖLÜM 9

SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	88

SİMGE LİSTESİ

B_{gFm}	Hava aralığı akı yoğunluğu
D_{is}	Stator iç çapı
E	Endüklenen gerilim
f	Frekans
I_f	Alan akımı
K_{C1}	Carter katsayısı
L	Endüktans
n_s	Senkron hız
N_s	Stator oluk sayısı
p	Çift kutup sayısı
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
R_a	Omik direnç
S	Görünür güç
T_a	Mekanik moment
T_e	Elektromanyetik moment
U	Generatör uç gerilimi
W_{os}	Stator oluk açıklığı
X_d	d eksenli senkron reaktansı
X_{l1}	Kaçak reaktans
X_q	q eksenli senkron reaktansı
	Manyetik akı
μ_0	Havanın manyetik geçirgenliği
	Verim
η	Hava aralığı manyetik akısı
δ	Güç açısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating Current
AVR	Automatic Voltage Regulator
DC	Direct Current
EMK	Elektromotor Kuvvet
GT	Gaz türbini
GV	Governor Valve
HRB	Heat Recovery Boiler
IP	Ingress Protection
IV	Intercept Valve
KDO	Kısa Devre Oranı
MSV	Main Stop Valve
MMK	Manyetomotor Kuvvet
ONAF	Oil Natural Air Forced
ONAN	Oil Natural Air Natural
PMG	Permenant Magnet Generator
SG	Senkron Generatör

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Değişken akı	3
Şekil 2. 2 Hareketli iletken	4
Şekil 2. 3 Kuvvet oluşumu	4
Şekil 2. 4 Ters yönde etkiyen kuvvet	4
Şekil 2. 5 Fırçasız uyarım düzeneği	5
Şekil 2. 6 Omik yüklü durumda endüvi reaksiyonu	7
Şekil 2. 7 Endüktif yüklü durumda endüvi reaksiyonu	8
Şekil 2. 8 Kapasitif yüklü durumda endüvi reaksiyonu	9
Şekil 3. 1 Senkron generatörün uyarma ve faz sargıları	10
Şekil 3. 2 Senkron generatörün eşdeğer devresi	11
Şekil 3. 3 Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresi	12
Şekil 3. 4 Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresinin senkron reaktans cinsinden çizilmesi	12
Şekil 3. 5 Stator çekirdeğinin tek bir parçası	13
Şekil 3. 6 Stator segmentleri	14
Şekil 3. 7 Stator oluşu	15
Şekil 3. 8 Manyetik kama	16
Şekil 3. 9 Dört kutuplu ve $q=2$ olan senkron generatörün A fazına ait sargısı	17
Şekil 3. 10 Çubuk sargı tipinde ve $q=2$ olan SG'nin A fazına ait sargısı	17
Şekil 3. 11 Stator sargı sonları için tipik destek sistemi	19
Şekil 3. 12 $2p=4$ ve $q=2$ için Stator MMK dağılımı	19
Şekil 3. 13 Uyarım sargılarının oluşturduğu MMF ve hava aralığı akı yoğunluğu	22
Şekil 3. 14 Üç fazlı simetrik, dengeli bir yük ve w_r frekansı için oluşan EMK ile akım fazörleri	24
Şekil 3. 15 Generatör ve motor çalışma bölgeleri	25
Şekil 3. 16 D eksenli endüvi reaksiyonu akı yolu	26
Şekil 3. 17 D eksenine ait hava boşluğu akı yoğunluğu ve MMK	27
Şekil 3. 18 Q eksenli endüvi reaksiyonu akı yolu	27
Şekil 3. 19 Q eksenine ait hava boşluğu akı yoğunluğu ve MMK	28
Şekil 3. 20 Senkron generatör fazör diyagramları	33
Şekil 3. 21 Nüve kayıpları hesaba katılmış senkron generatör fazör diyagramı	34
Şekil 4. 1 Deneysel düzenek ve açık devre karakteristiği	36
Şekil 4. 2 Deneysel düzenek ve kısa devre karakteristiği	37

Şekil 4. 3	SG'nin basite indirgenmiş kararlı hal eşdeğer devresi	38
Şekil 4. 4	4 Açık devre ve kısa devre karakteristikleri	39
Şekil 4. 5	Deneyisel düzenek ve sıfır güç faktörü karakteristiği	41
Şekil 4. 6	Kaçak reaktansın sıfır güç faktörü eğrisinden bulunması.....	42
Şekil 4. 7	Deneyisel düzenek ve V-I karakteristiği	43
Şekil 4. 8	Senkron generatörün ayar karakteristikleri	44
Şekil 4. 9	Senkron generatörde uyarma akımının $\cos\phi$ ye bağlı olarak değişimi.....	44
Şekil 4. 10	Senkron genertöre ait V eğrisi	45
Şekil 4. 11	Senkron generatöre ait örnek kapasite eğrisi.....	46
Şekil 5. 1	Fırçasız uyarım düzeneğine sahip rotor	51
Şekil 6. 1	Yüksek empedans üzerinden topraklanmış bir SG'nin aşırı gerilim koruması ve onun ikincil koruması olan aşırı akım koruması (51GN)	55
Şekil 6. 2	Gerilim dengesi koruması.....	57
Şekil 6. 3	Senkron generatörün yıldız noktasının transformatör ve direnç yardımıyla topraklanması	60
Şekil 7. 1	Türbin ve generatör sistemi.....	62
Şekil 7. 2	Üç basınçlı buhar türbini	63
Şekil 7. 3	Tekrar ısıtılmalı ve 3 basınçlı tek mil üzerindeki buhar türbini	64
Şekil 7. 4	Gaz türbini	65
Şekil 7. 5	Gaz türbini ünitesi ve yardımcı ekipmanları	66
Şekil 7. 6	Tek mil üzerinde kombine çevrim enerji santrali	67
Şekil 8. 1	Gaz türbini'nin ortam sıcaklığına bağlı çıkış gücü ve verimi	69
Şekil 8. 2	Kompresör giriş havası soğutma sisteminin çıkış gücüne etkisi	70
Şekil 8. 3	Gaz türbini'nin bağıl neme bağlı çıkış gücü	71
Şekil 8. 4	Gaz türbini'nin bağıl neme bağlı verimi	72
Şekil 8. 5	Gaz türbini'nin işletmede kaldığı saat ile güç ve verim ilişkisi.....	73
Şekil 8. 6	Soğutma suyu sıcaklığı ile çıkış gücü ilişkisi	74
Şekil 8. 7	Gaz türbini generatörüne ait sulu soğutma çevrimi	76
Şekil 8. 8	Gaz türbini step-up transformatörü ve IPB bağlantısı	82
Şekil 8. 9	Generatörün kesici üzerinden şebekeye bağlantısı	84
Şekil 8. 10	Kısa devre anında generatör kaynaklı arıza akımı	84

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1. 1 Tahmini fosil yakıt rezervi	2
Çizelge 1. 2 Elektrik enerjisinin fiyatı	2
Çizelge 5. 1 Senkron generatör etiketinde belirtilen değerler	47
Çizelge 5. 2 Senkron generatörün devreye alma aşamaları	49
Çizelge 7. 1 Tahrik makinelerinin sınıflandırılması	62
Çizelge 8. 1 Gerilim seviyesine göre sıcaklık artış limitleri	77
Çizelge 8. 2 Soğutma tipine göre sıcaklık artış limitleri	78
Çizelge 8. 3 Senkron generatör için senkronizasyon limitleri	79
Çizelge 8. 4 Senkron generatör için katı parçacıklara karşı koruma sınıfı	80
Çizelge 8. 5 Senkron generatör için sıvı parçacıklara karşı koruma sınıfı	81

**ENERJİ SANTRALLERİNDE YUVARLAK KUTUPLU SENKRON GENERATÖR VE
YARDIMCI EKİPMANLARININ SEÇİMİ**

Umut ÖZDOĞAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU

Son yıllarda dünyanın enerji ihtiyacı büyük bir hız ile artmaktadır. Bu ihtiyacı karşılayabilmek için kurulan enerji santrallerinin sayısı günden güne çoğalmaktadır. Orta ve büyük kapasiteli bu santrallerin büyük bir kısmında senkron generatörler pay sahibidir. Yuvarlak kutuplu senkron generatörler ise bu payın büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Büyük güçlü yapıda olan bu makineler aynı zamanda şebekelerin önemli birer parçası olarak güç sistemlerindeki yerlerini almaktadırlar.

Bu çalışma kapsamında temel olarak yuvarlak kutuplu senkron generatörün çalışma prensibi, tahrik makineleri ve güç sistemleriyle olan ilişkisi incelenerek, fosil yakıtlı bir enerji santrali için kullanılacak olan yuvarlak kutuplu bir senkron generatörün seçiminde nasıl bir yol izlenmesi gerektiği ortaya konulmuştur.

Yuvarlak kutuplu senkron generatörün kararlı hal durumu incelenerek gerekli denklemler ortaya konulmuştur. Basit çevrim ve kombine çevrim bir enerji santralinde gaz ve buhar türbinlerine ait generatörlerin seçiminde dikkat edilecek hususlar incelenmiştir. Generatör ile şebeke arasındaki uyumu sağlayan yükseltici tip transformatör ve orta gerilim sistemlerinin dizaynında göz önünde bulundurulması gereken başlıca konular ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yuvarlak kutuplu senkron generatör, gaz türbini ve buhar türbini generatörü, generatör transformatörü, generatör kesicisi, enerji santrali

**CYLINDRICAL ROTOR SYNCHRONOUS GENERATOR AND AUXILIARY
EQUIPMENTS SELECTION FOR POWER PLANTS**

Umut ÖZDOĞAN

Department of Electrical Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU

In recent years, the world's energy needs is increasing rapidly. Numbers of established power plants are rising day by day to satisfy this energy needs. Most of these large and medium capacity power plants are equipped with synchronous generators. Most of synchronous generators are designed as a cylindrical rotor type for these power plants. These large powered machines are important part of power systems and networks.

This study aims to present basic operation principles of a cylindrical rotor synchronous generators, relation between prime movers and power systems, how to specify a synchronous generator for a fossil fuel power plant.

Non-silent pole synchronous generator's steady state conditions are considered and necessary equations are put forth. For simple and combined cycle power plants, gas and steam turbine generator selection is elaborated. For compliance between generator and power system , important items are mentioned for generator step-up transformer selection and medium voltage system design.

Key words: Cylindrical rotor synchronous generator, gas turbine and steam turbine generator, generator step-up transformer, generator circuit breaker, power plant

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde artan nüfus ve gelişen endüstri ile birlikte enerji ihtiyacı giderek artmaktadır. Enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve depolanması başlı başına birer araştırma konusudur. Enerji doğada elektriksel formda depolanmamaktadır. Fakat elektrik enerjisinin uzun mesafelere iletilmesi ve kontrolü diğer enerji çeşitlerine göre daha elverişli olduğundan üretim aşamasında başka bir enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek tüm bu işlemler rahatça yapılmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Enerji santrallerinin tipleri değiştikçe kullanılan generatörlerin yapısı da değişiklik göstermektedir. Son yıllara kadar fosil yakıtlı enerji santralleri ve nükleer kaynaklı santraller başlıca enerji kaynaklarıydı. Fakat günümüzde alternatif enerji kaynakları ile birlikte gelişen rüzgar ve jeotermal santraller güç sistemlerinde pay sahibi olmaya başlamaktadırlar. Rüzgar enerjisindeki gelişim güç elektroniğindeki gelişmelerle paralel ilerlemekte olup asenkron generatörün kullanım alanlarına bir örnektir. Jeotermal santrallerde ise senkron generatör kullanılmakta fakat, jeotermal enerjinin dünyanın her noktasından elde edilebilmesine karşın elektrik üretimine geçebilmek için yeterli sıcaklığın her noktadan elde edilememesinden [1], yaygınlaşması sondaj ve fizibilite çalışmalarıyla birlikte zaman almaktadır.

Nox salınımı dolayısıyla her ne kadar fosil yakıtlı enerji santrallerine alternatif aranmaya çalışılsa da ihtiyaç için yeterli gücün karşılanmasında fosil yakıtlı santraller önemli bir yüzdeyi oluşturmaktadır.

Çizelge 1. 1 Tahmini fosil yakıt rezervi

Yakıt	Tahmini Rezerv	Enerji yoğunluğu (Wh)
Kömür	7.6×10^{12} ton	937/ton
Petrol	2×10^{12} varil	168/varil
Doğal gaz	$10^{16} ft^3$	$0.036/ft^3$

Günümüze hızla özelleşen elektrik piyasası kendine özgü bir üretim-ihtiyaç ilişkisi kurarak alım-satım işlemlerini gerçekleştirmektedir.

Çizelge 1. 2 Elektrik enerjisinin fiyatı

Enerji kaynağı	Cent/kWh
Gaz (yüksek verimli kombine çevrim santrallerde)	3.4-4.2
Kömür	5.2-6
Nükleer	7.4-6.7
Rüzgar	4.3-7.7

1.3 Hipotez

Fosil yakıtlı santraller güç sistemlerinde baz santral olarak çalışmaktadırlar ve şebekenin kararlılığını etkileyen santrallerin başında gelmektedirler. Bu santrallerde gerek yakıt vanası gerekse buhar vanası ile ayar yapılabilirdiğinden sabit devirli ve yüksek hızlı yuvarlak kutuplu senkron generatörler kullanılmaktadır.

Şebekenin gerilim ve frekans dengesi bu tipte santrallerde işletilen generatörlere bağlı olduğundan, generatör seçimi sadece mevcut santrali değil, tüm bir güç sisteminin yapısını etkileyen önemli bir unsurdur.

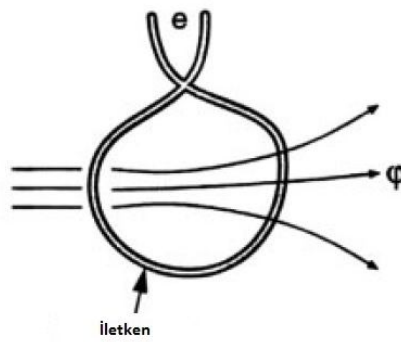
MANYETİK ALAN VE SENKRON GENERATÖR İLİŞKİSİ

Yuvarlak kutuplu senkron generatörlerin çalışma prensibi temel olarak diğer elektrik makinaları gibi elektromekanik enerji dönüşümüne dayanır. Enerji dönüşümü yasası, üç adet önemli yasanın sentezlenmesi sonucu ortaya çıkmış bir sonuçtur.

2.1 Faraday Yasası

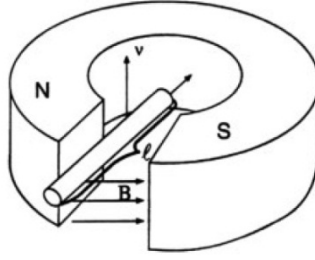
Sabit bir magnetik alan içerisinde bir iletken hareket ettirilirse, bu iletkenin uçlarında gerilim endüklenir.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$



Şekil 2. 1 Değişken akı

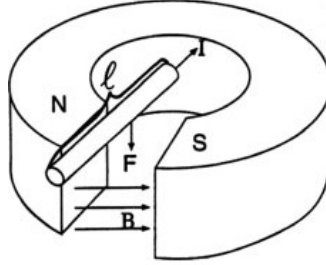
Değişken bir magnetik alan içerisinde kalan bir iletkenin uçlarında gerilim endüklenir.



Şekil 2. 2 Hareketli iletken

2.2 Ampere-Biot-Savart Yasası

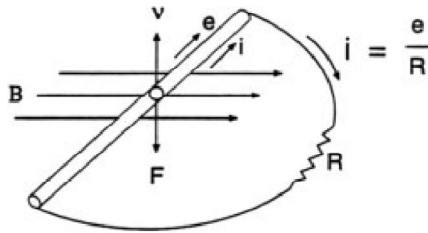
Faraday yasasının tam tersi şeklinde işlemektedir. İçinden akım geçen bir iletken manyetik bir alanın içerisine konulur ise üzerine kuvvet etkimektedir.



Şekil 2. 3 Kuvvet oluşumu

2.3 Lenz Kanunu

Manyetik alan içerisinde hareket eden bir iletkenin uçları birleştirildiğinde iletkenin içinden akan akımın oluşturduğu manyetik alan kuvveti iletkenin hareketine zıt yönde olmaktadır.

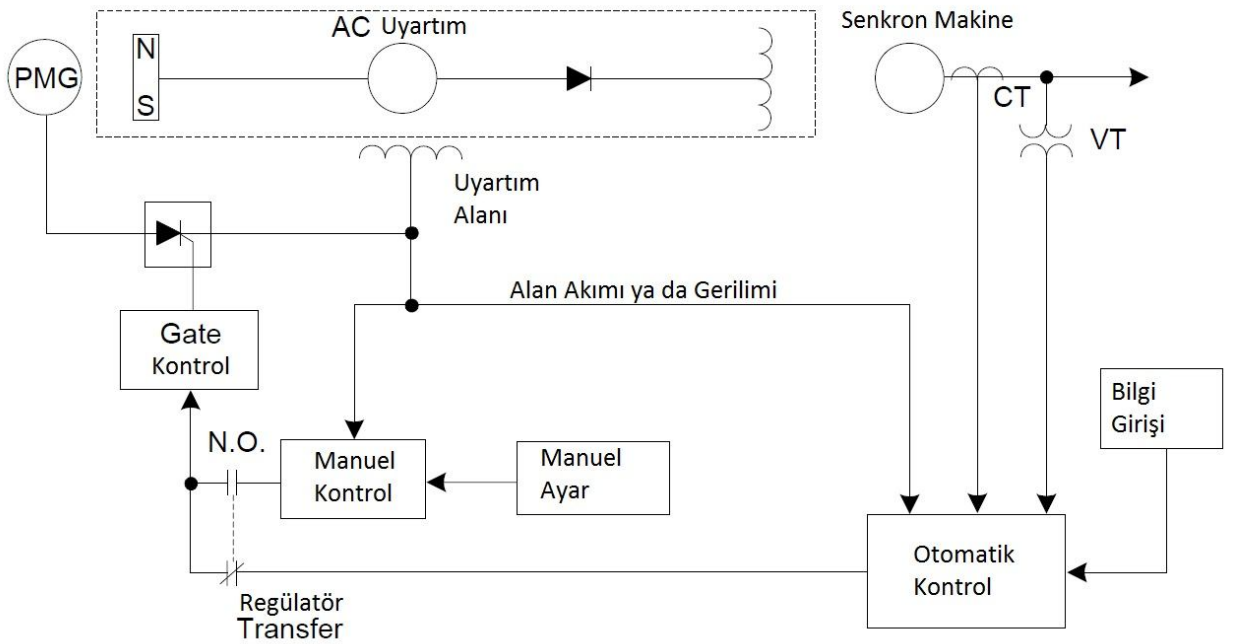


Şekil 2. 4 Ters yönde etkiyen kuvvet

2.4 Senkron Generatör Çalışma Prensibi

Senkron generatörler temel olarak rotor ve stator olarak adlandırılan 2 ana kısımdan oluşur. Stator gerilimin üretildiği, şebekeye güç sağlayan sargıların yer aldığı kısım, rotor ise uyarma alanının oluşmasını sağlayan sargıların yer aldığı kısımdır.

Senkron makinalar alan oluşturma şekline göre ikiye ayrılmaktadır. Bunlar, sabit alan ve döner dc manyetik alandır. Turbo generatörlerin çoğu döner dc manyetik alan tipinde uyarım devresine sahiptirler. Günümüzde santrallerde kullanılan büyük güçlü turbo generatörlerde çoğunlukla fırçasız uyarma düzenekleri kullanılmaktadır. Bunun sebebi, fırçalı düzeneklerdeki geçiş direncinden ötürü meydana gelen büyük gerilim düşümleri ve joule kayıplarının ortadan kaldırılmak istenmesidir. Ayrıca bakım ve işletme sorunları açısından fırçasız düzenekler fırçalı uyarma düzeneklerine göre daha kullanışlıdır.



Şekil 2. 5 Fırçasız uyarım düzeneği [2]

Üretilen akım ve gerilim bilgileri AVR'ye alınmaktadır. Sabit mıknatıslı generatör de yüksek frekanslı bir AC gerilim ile AVR'yi beslemektedir. Köprü doğrultucu ile aynı mile akupule altörnatörün uyarım devresine AVR, kontrollü bir DC gerilim sağlamaktadır.

Böylece AVR döner uyarım sisteminin içinde yer alan uyarma makinasının sabit kısmını DC gerilim ile beslemiş olur. Döner armatür sargılarındaki yüksek frekanslı AC gerilim de diodlar aracılığıyla doğrultularak ana uyarım devresine uygulanır.

Silindirik rotorlu turbo generatörler genellikle 2 veya 4 kutuplu olarak dizayn edilirler. Nadiren 6 kutuplu olarak tasarlanırlar. Çıkık kutuplu senkron generatörler 6 veya daha çok kutba sahiptirler.

Günümüzde kullanılan büyük güçlü senkron generatörler çoğunlukla 3 fazlı makinalardır ve enterkonnekte şebekeye güç sağlamak için kullanılırlar. Bu yüzden çıkış gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüs formuna uygun olması istenmektedir. Uygun dalga şekillerinin üretilmesi kontrol ünitelerinin yanı sıra makinanın nasıl bir konstrüksiyon yapısına sahip olması ile de doğrudan ilgilidir.

2.5 Endüvi Reaksiyonu

Senkron generatörlerin kutup tekerleği DC gerilim ile tahrik edilmektedir. Doğru akım bobinlerinin meydana getireceği manyetik alan, senkron generatörün senkron devir sayısı (n_s) ile tahrik edilmesi sonucunda endüvi çevresinde aynı senkron hız ile döner.

Dışarıdan tahrik suretil ile döndürülen bu döner alan stator sargılarında gerilim endükleyecektir. Bu gerilimin frekansına f diyecek olursak devir sayısı ile olan ilişkisi (2.2) eşitliğinde açıklanmıştır.

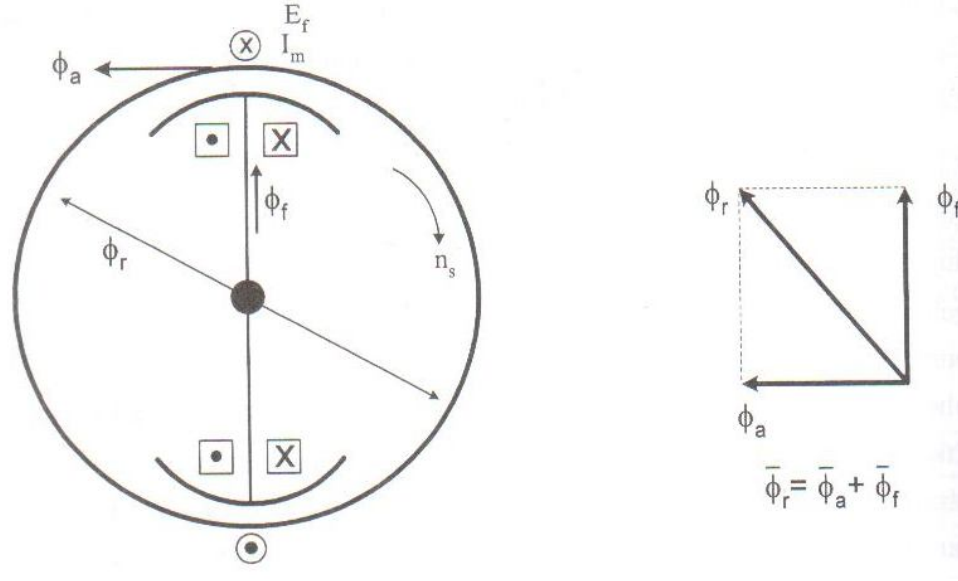
$$f = \frac{p \cdot n_s}{60} \quad (2.2)$$

Senkron generatör, senkron hızın üstünde ve altında çalışmamaktadır. Bu bakımdan, ani yüklenmelerde senkron hızdan ayrılamayacağından, şebekeye büyük akım darbeleri yapar.

Kutup tekerleği alanı ile endüvi alanı birbiri üzerine etki yapmaktadır. Endüvi alanının kutup tekerleği alanına etkisine endüvi reaksiyonu denir. Omik, endüktif ve kapasitif yüklü durumlarda farklı sonuçlar vermektedir.

2.5.1. Omik Yüklü Durum

Omik yüklü durumda makinede endüklenen EMK ile yük akımı arasındaki faz farkı sıfırdır.



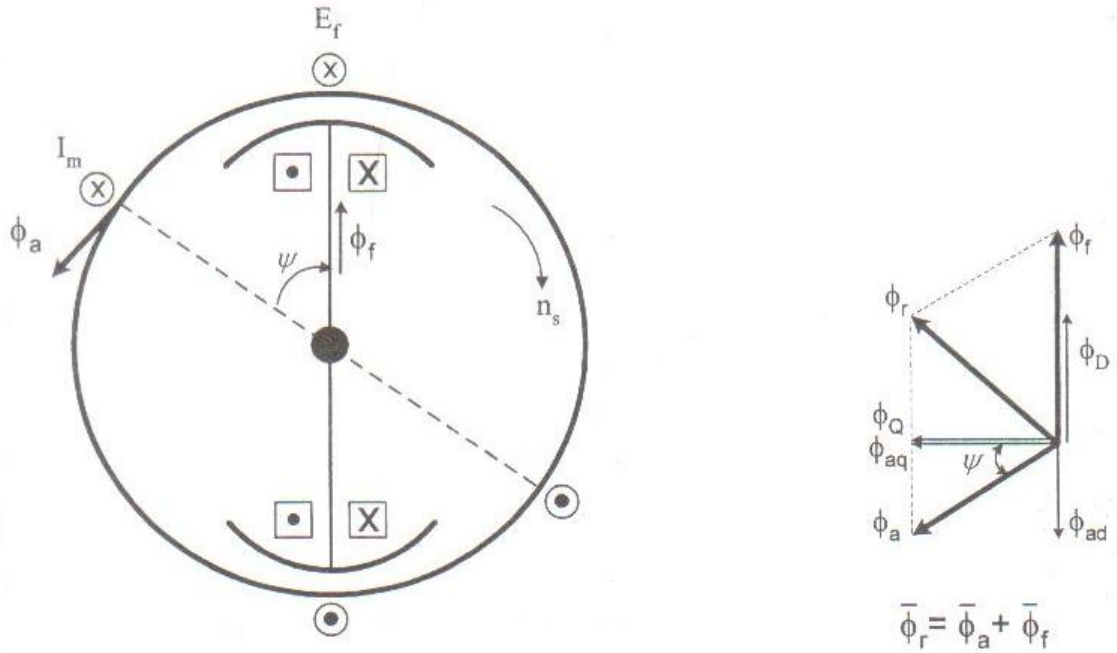
Şekil 2. 6 Omik yüklü durumda endüvi reaksiyonu [3]

Bileşke akının genliği kutup akısının genliğünden büyük olmasına rağmen, endüklenmesi beklenen gerilimin genliği beklenenden küçük kalmaktadır. Bunun nedeni, bileşke akının kutup ekseninden, endüvi akısı tarafından sol tarafa ötelenmesidir. Bu durumda bileşke akı kutup ekseninde bulunan bobin düzleminden sıfır açı ile geçeceği yerde, sıfırdan farklı bir açı ile geçer. Dolayısıyla kendinden beklenen gerilim artışını gerçekleştirememektedir.

Bu nedenle; saf omik yükle yüklenmiş senkron generatörler yük uçlarına aktarılan gerilimin genliğinde, boşta çalışmada elde edilen gerilime göre, değeri çok büyük olmayan fakat ihmal edilemeyecek oranda, bir miktar gerilim düşümü gözlenmektedir.

2.5.2. Endüktif Yüklü Durum

Makinenin generatör olarak endüktif çalışması durumunda I , E_m ye nazaran θ açısı kadar geridedir. Kutbun altındaki bobinde endüklenen EMK maksimum değerini ve bu bobine nazaran θ açısı kadar dönüş yönüne nazaran geride olan bobindeki akım maksimum değerini almaktadır.



Şekil 2. 7 Endüktif yüklü durumda endüvi reaksiyonu

Bu nedenle endüktif yükle yüklenmiş generatörde boşta endüklenen gerilim, sargıda oluşan küçük gerilim düşümüne ek olarak şiddetli bir şekilde azalır.

$$\phi_r < \phi_f \quad (2.3)$$

$$\phi_D = \phi_f - \phi_{ad} \quad (2.4)$$

$$\phi_Q = \phi_{aq} \quad (2.5)$$

$$\phi_{ad} = \phi_a \sin \psi \quad (2.6)$$

$$\phi_{aq} = \phi_a \cos \psi \quad (2.7)$$

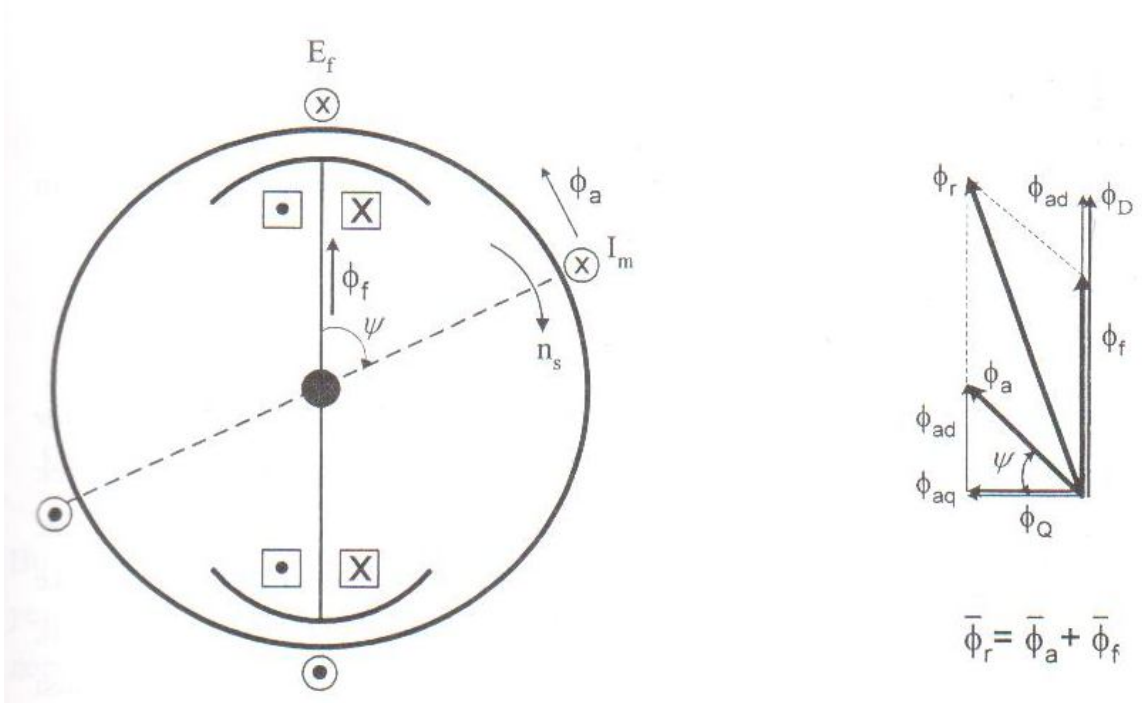
$$\overline{\phi_r} = \overline{\phi_a} - \overline{\phi_f} \quad (2.8)$$

Çıkış gerilimindeki düşüş omik çalışmadakine göre daha fazla olmaktadır.

2.5.3. Kapasitif Yüklü Durum

Kutbun altından geçen bobinlerde endüklenen EMK maksimum olduğu anda akımın maksimumu değeri $\frac{\pi}{2}$ açısı kadar bu noktadan uzakta bulunmaktadır. Kapasitif yük hali

olduğundan, akım gerilime nazaran θ açısı kadar ileride olacaktır. Yani, kutup tekerleğinin hareket yönünde θ açısı kadar ileride bobin akımı maksimum değerine ulaşmış olacaktır.



Şekil 2. 8 Kapasitif yüklü durumda endüvi reaksiyonu

Omik yükte endüvi reaksiyonunun etkisi hissedilir derecede büyük olmamaktadır, toplam alan kaymaktadır ve doymadan ötürü bir miktar zayıflama görülmektedir. Kapasitif yükte esas alan desteklenmekte ve endüktif yükte uyarma alanı zayıflatılmaktadır.

Şebeke ile paralel çalışan bir senkron generatör, şebekenin gerilimini değiştirme gücüne sahip değildir. Bu yüzden uyarma alanı değiştirilerek şebekeye paralel çalışan bir generatörün kapasitif veya endüktif çalışması sağlanabilmektedir.

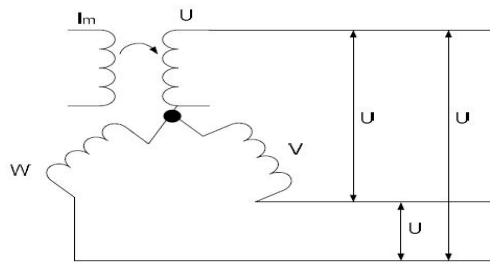
SENKRON GENERATÖRDE KARARLI HAL

3.1 Yuvarlak Kutuplu Senkron Generatörün Eşdeğer Devresi

Senkron generatörler genellikle 3 fazlı olarak imal edilmektedirler. Doğru akım ile beslenen kutup tekerleğinin meydana getirdiği manyetik alanın endüvi çevresini taraması sonucunda sargılarda EMK'ler endüklenmektedir.

Senkron makinalarda sargılar yıldız olarak bağlanır. Senkron makinanın fazlarının yüklenmesi sonucunda bu sargılardan geçen yük akımları, sargılarda omik ve endüktif dirençlerden ötürü gerilim düşümleri meydana getirmektedir.

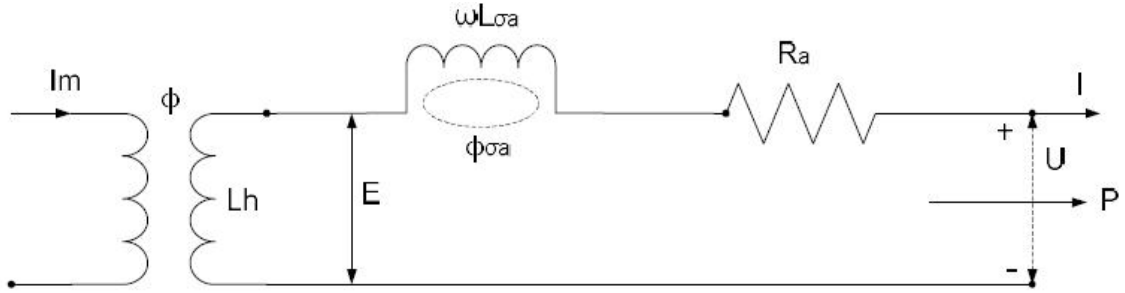
Üç fazlı bir senkron generatör için gerilim ifadeleri yazılıp fazör diyagramları çizilirken genellikle eşdeğer devreler bir faz için çizilmektedir. Diğer fazlar için de aynı eşdeğer devre geçerli olup, yalnızca fazör diyagramları belirli bir faz farkı kadar kaydırılarak ortaya konulmaktadır.



Şekil 3. 1 Senkron generatörün uyarma ve faz sargıları

Her bir faz sargısının omik direnci R_a ve öz endüktansı L' 'dir. L öz endüktansı iki bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan biri kuvvet çizgilerini uyarma sargısından geçiren

L_H kısmı ve diğeri de uyarma bobininden geçmeyen kuvvet çizgilerini meydana getiren $L_{\sigma a}$ kısmıdır.



Şekil 3. 2 Senkron generatörün eşdeğer devresi

$$E = U + U_{Ra} + U_{\sigma a} \quad (3.1)$$

E , faz sargılarında endüklenen bileşke EMK fazörü, U_{Ra} , R_a omik direnci üzerinde meydana gelen gerilim düşümü fazörü ve $U_{\sigma a}$ da dağılma reaktansı $X_{\sigma a} = \omega L_a$ üzerinde meydana gelen gerilim düşümü fazörüdür.

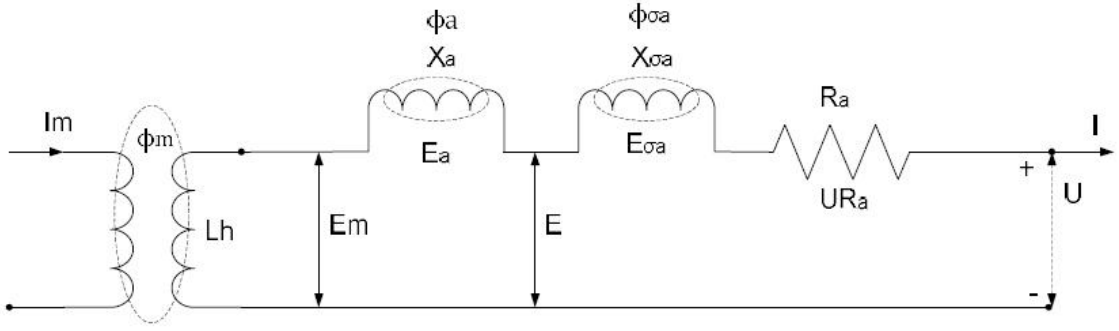
E EMK'sı makinedeki toplam manyetik akı Φ tarafından endüklenmektedir. Φ toplam manyetik akısı Φ_a ve Φ_m bileşenlerinden oluşmaktadır. Φ_m kutuplarda meydana gelen manyetik uyarma akısı ve Φ_a da endüvi reaksiyon akısıdır. Esas alan üzerine bu endüvi akısı etki yaparak, endüvi reaksiyonunu meydana getirmektedir [4].

Φ akısının endüklediği E elektromotor kuvvetinin de E_m ve E_a bileşenleri olup, ikisi arasında ki bağıntıyı ifade etmek üzere,

$$E = E_m + E_a \quad (3.2)$$

(3.1) eşitliğini yeniden yazılırsa,

$$E = E_m + E_a = U + U_{Ra} + U_{\sigma a} \quad (3.3)$$

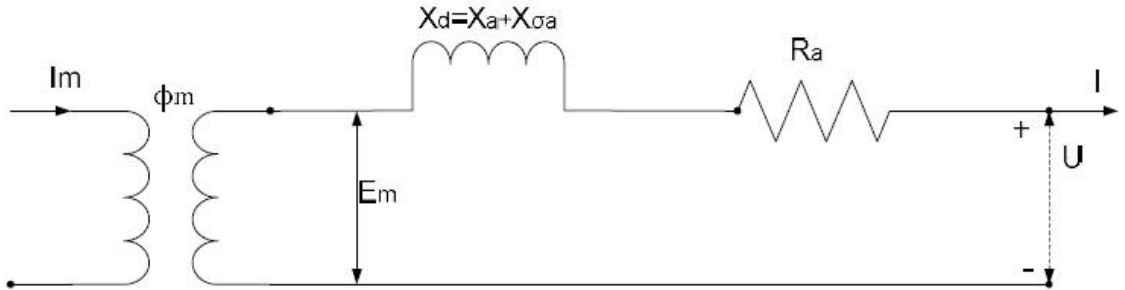


Şekil 3. 3 Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresi [4]

Şekil 3. 3’de X_a endüvi reaksiyonunu göstermektedir. Bu, yüklü halde ve demirdeki μ doymasına ait öz endüktansı da kapsamaktadır. Senkron makinalarda özellikle büyük güçlerde R_a direnci, $X_{\sigma a}$ ve X_a reaktansları yanında hesaba katılamayacak kadar küçük olmaktadır.

Yuvarlak rotorlu turbo generatörlerde $X_{\sigma a}$ ve X_a toplanarak $X = X_d$ ile gösterilmektedir. Buna senkron reaktans adı verilir.

Şekil 3. 3’deki eşdeğer devre yukarıdaki bilgiler ışığında tekrar çizilecek olursa,



Şekil 3. 4 Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresinin senkron reaktans cinsinden çizilmesi

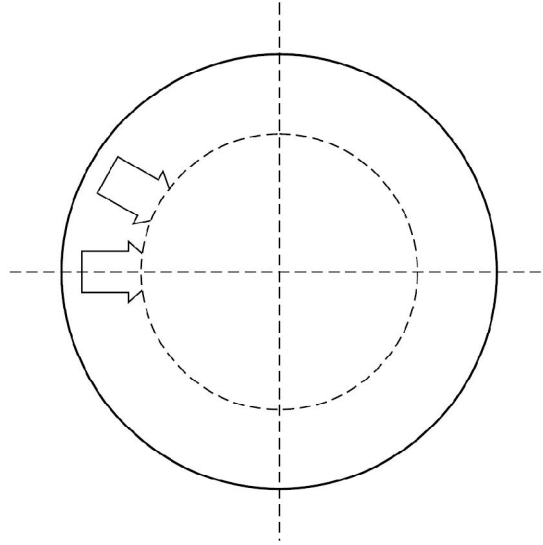
3.2 Stator Sargıları

Eşdeğer devreye ulaşmak ve fazör diyagramları çizmek için kararlı hal denklemlerini ortaya koyarak daha detaylı bir incelemeler yapılmaktadır.

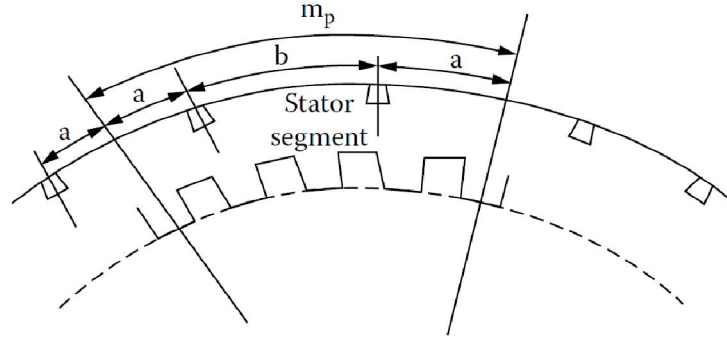
Büyük güçlü SG dendiğinde genellikle 1MW ve üzerindeki güçlerden bahsedilmektedir. Bu büyük ünitelerin rotor magnetik alanı elektromanyetik uyartım ile üretilir. Birkaç MW'a kadar sabit mıknatıslı rotora sahip SG'ler de mevcuttur.

1500 MVA'ya kadar olan üniteler daha çok termik santrallerde, 700 MW'a kadar olan üniteler daha çok hidroelektrik santrallerinde çıkık kutuplu olarak kullanılmaktadırlar [5].

Senkron generatörün temel kısımları; stator, rotor, ana gövde (soğutma sistemi dahil) ve uyartım sistemidir. Stator çekirdeği demir ve silisyum alaşımından oluşan silisyum çeliği diye adlandırılan bir maleme kullanılarak yapılmaktadır. Genellikle kalınlığı 0.5 mm olan tabakalar kullanılır. Sargıların yerleştirileceği yarıklar dengeli bir şekilde stator çevresinde açılır. Ufak güçlü SG'lerde bu katmanlar 1 m çapında yekpare olarak üretilmektedir. Büyük güçlü SG 'lerin çapları 18 m ye kadar çıktığından, stator kısımları dilimler halinde üretilmektedir.



Şekil 3. 5 Stator çekirdeğinin tek bir parçası



Şekil 3. 6 Stator segmentleri

Stator radyal olarak 2 ve ya daha çok parçaya ayrılabilir. Böylece büyük makinelerde nakliye sorunu ortadan kalkar. Bu tip makinelerde, sargılar oluklara parça parça yerleştirilip , bağlantısı santral sahasında yapılmaktadır.

Toplam stator oluk sayısına N_s , stator dilim sayısına m_s ve her dilimdeki oluk sayısına m_p dersek, bu ifadeler arasındaki bağıntı,

$$N_s = m_s + m_p \quad (3.4)$$

Her dilim ana gövdeye özel tipte kamalar yardımıyla tutturularak, bu bağlantı tüm çevre boyunca dengeli bir şekilde dağıtılmaktadır.

İki kama arası uzaklık b kabul edildiğinde,

$$b = \frac{m_p}{2} = 2a \quad (3.5)$$

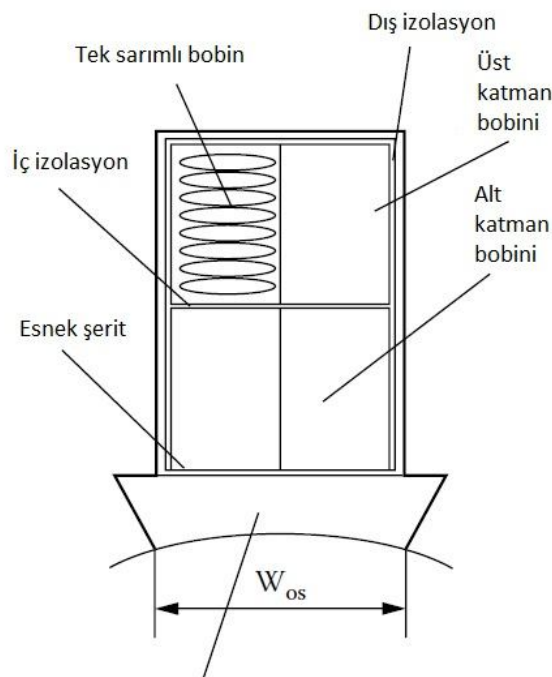
Sargıların vibrasyondan olumsuz yönde etkilenmelerini önlemek için her segment, stator oluklarının ortasında başlayıp bitirilmektedir.

Stator S kadar parçaya ayrılacak olursa, 2 farklı segment tipi ortaya çıkmaktadır. Birinin m_p kadar oluk sayısı, diğerinin n_p kadar oluk sayısı olacaktır.

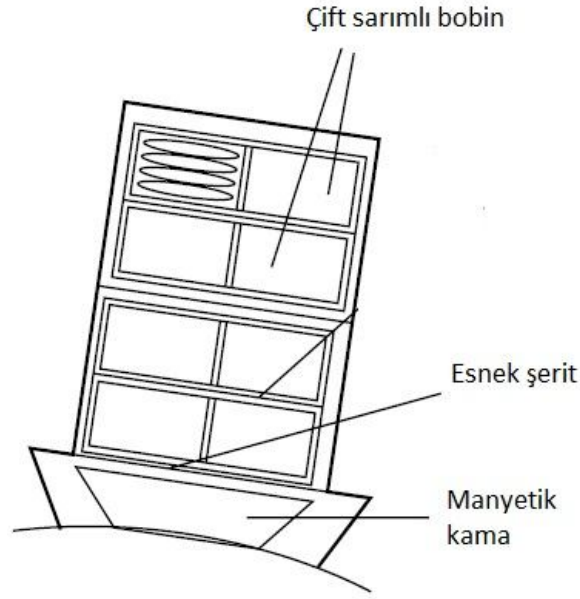
$$\frac{N_s}{S} = Km_p + n_p; n_p < m_p; m_p = 6 - 13 \quad (3.6)$$

Eğer $n_p = 0$ ise (3.6) eşitliğinde birinci durum elde edilir. Stator parçaları her zaman tam sayı olamayacağı için farklı oluk tiplerine sahip iki ayrı tip segment kullanılmaktadır.

Orta ve büyük güçlü SG'lerde oluklar açık ve dikdörtgen biçimindedir. Çift katmanlı sargılar genellikle dikdörtgen biçimindeki magnetik özellikli sargılardan oluşurlar. Bu sargılar açık olukların içerisinde, izolasyon malzemesinden ve ya magnetik geçirgenliği havadan az olan kamalar tarafından desteklenmektedirler.



Şekil 3. 7 Stator oluğu



Şekil 3. 8 Manyetik kama

D_{is} 'yi stator iç çapı kabul edildiğinde, kutup taksimatı [6] için yazılacak olan bağıntı,

$$\tau = \pi D_{is} / 2p_1 \quad (3.7)$$

Faz sargıları stator çevresi boyunca simetrik olarak $2/3 \tau$ oranında faz farkıyla kaydırılarak yerleştirilirler. Ortalama faz başına, kutupların herbirine düşen oluk sayısı q ile ifade edilirse,

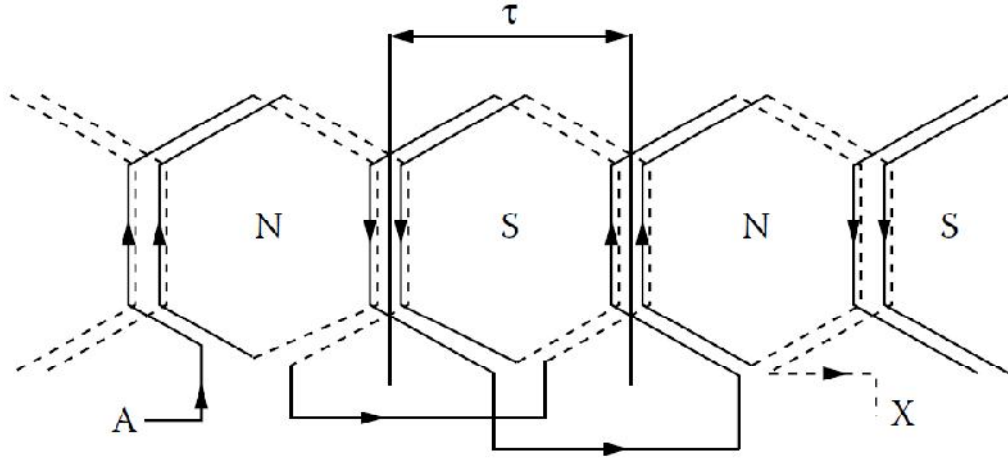
$$q = \frac{N_s}{2p_1 \cdot 3} \quad (3.8)$$

q düşük kutup sayıları için ($2p_1 < 8 - 10$) tam sayı olabilir ya da kesirli biçimde de yazılabilmektedir.

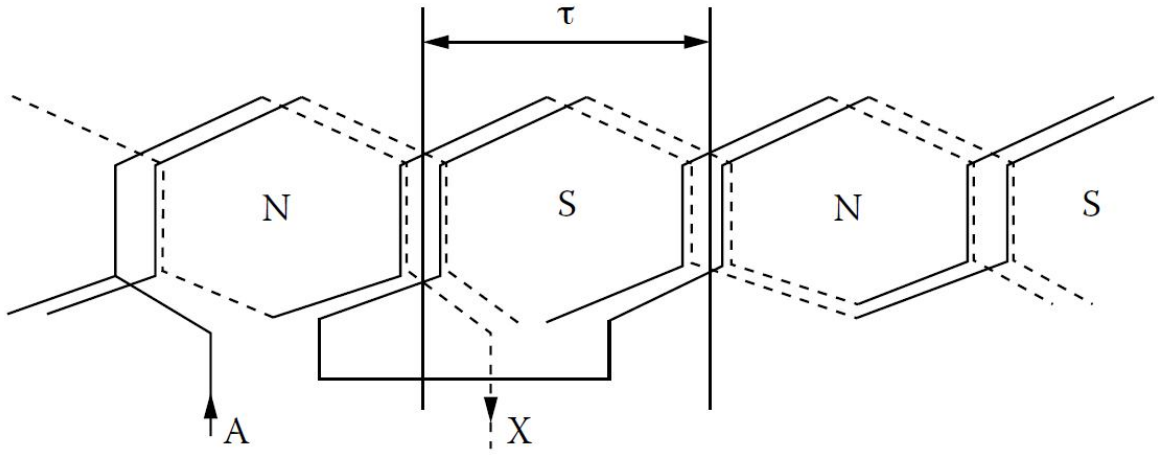
$$q = a + b/c \quad (3.9)$$

Ondalık q sargıları genellikle yüksek kutup sayısına sahip makinelerde kullanılmaktadırlar. Düşük q sayısına sahip SG'ler ($q \leq 3$) üretilen EMK'de çok büyük harmonikler içermektedirler.

Şekil 3.9 ve 3.10'da A fazına ait sarım şekilleri verilmektedir.



Şekil 3. 9 Dört kutuplu ve q=2 olan senkron generatörün A fazına ait sargısı



Şekil 3. 10 Çubuk sargı tipinde ve q=2 olan SG'nin A fazına ait sargısı

İki şekilde de sargılar seridir. Anma gerilimi 24 kV'den düşük olan büyük güçlü makineler için paralel akım yolları dizayn etmek daha makul olmaktadır. Seri akım yolu kullanılan sargılarda faz başına düşen güç için aşağıdaki bağıntı kullanılabilir,

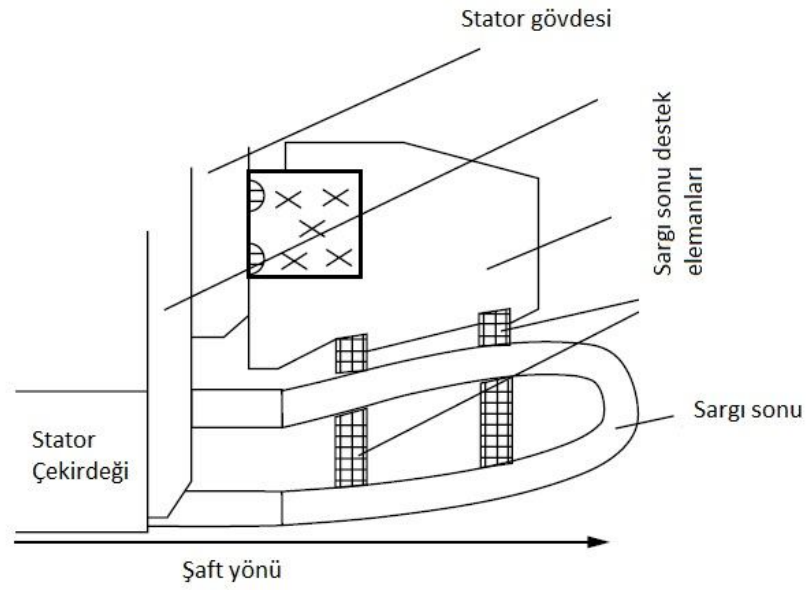
$$N_s = 3 \frac{W_{Ph} \cdot a}{n_c} \quad (3.10)$$

Seri akım yolu için $a = 1$ ve W_{Ph} seri bobinler için tur sayısını belirlemektedir. Bobinler çok sarımlı ve ya çubuk tipte sargılardan oluşabilmektedir. İki sargı tipi için verilen özellikler aşağıdaki gibidir.

- Çok sarımlı bobinler ($n_c > 1$) N_s rakamını belirlerken daha çok esneklik sağlamaktadır.

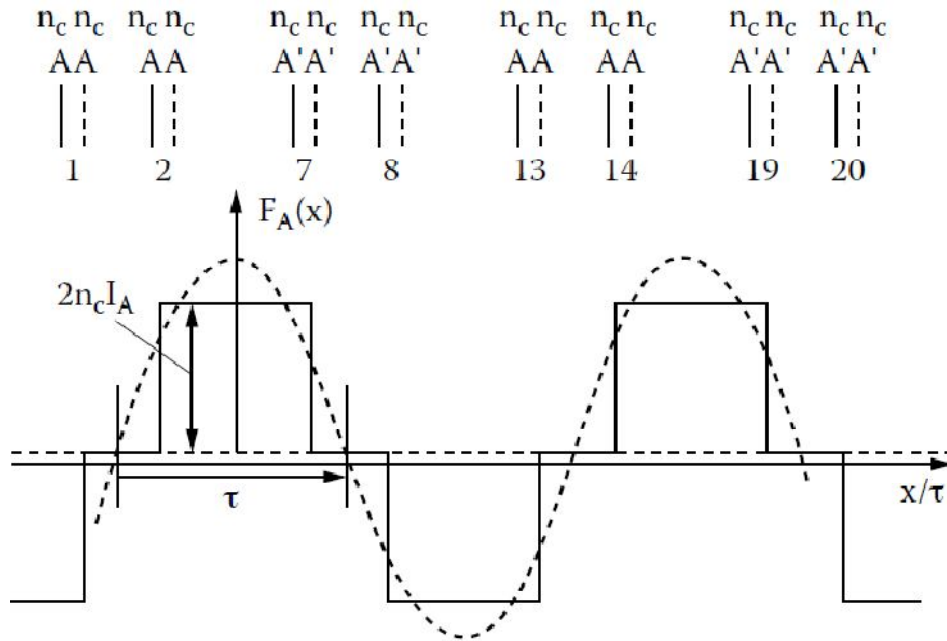
- Zamanla elde edilen tecrübelerle göre , çok sarımlı bobinler levha uzunluklarını 0,3 m’de ve kutup taksimatını $\tau < 0,8-1$ ‘de sınırlamaktadır.
- Çok sarımlı bobinlerin oluklara yerleştirilebilmesi için eğilme ve bükülme esnekliğine sahip olması gerekmektedir.
- Çubuk sargılar yüksek akımlar için kullanılmaktadır (1500 A ve üzeri).
- İletim hatları boyunca oluşan anahtarlama ve yıldırım düşmesi gibi ani meydana gelen durumlar, büyük gerilim yükselmeleri oluşturur ve SG’lerde bunlardan fazlasıyla etkilenmektedirler. Eğer sargılar çok sarımlı tipte yapıldıysa bu tip makinelerde gerilim yükselmelerine karşı ek bir izolasyon yapılması gerekmektedir.
- Kısa devre anında paralel akım yolu $a \geq 2$ olan çok sarımlı bobinlerde, sarımlar arasında ek olarak sirkülasyon akımları oluşur. Bu da ilgili koruma rölesinin sistemi dengesiz yükten açtırmasına sebep olabilmektedir. Çubuk tipte bobinlerde dengesiz yük durumu daha nadir görülmektedir.
- Çubuk tipte bobinler diğer bobinlere göre biraz daha maliyetlidirler. Ama avantajlarından dolayı günümüzde çoğunlukla bu tip bobinler tercih edilmektedir.

Stator sargı sonları mutlaka mekanik olarak desteklenmektedir. Çünkü geçici durumlarda büyük elektrodinamik kuvvetler ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3. 11 Stator sargı sonları için tipik destek sistemi

Tek fazlı, 4 kutuplu ve bobinleri her oluğa %100 olarak eşit dağıtılmış bir SG'nin MMK dağılımı şekil 3.12'deki gibi olmaktadır. Eğer $q=2$ olsaydı MMK dağılımı yarı periyotta diktörtgen şeklini alacaktı. $q > 2$ olsaydı MMK'da daha fazla basamak görülecekti.



Şekil 3. 12 $2p=4$ ve $q=2$ için Stator MMK dağılımı

Faz başına MMK'nin temel bileşeninin kararlı hal için ifadesi şu şekildedir,

$$F_{1A}(x, t) = F_{1m} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos \omega_1 t \quad (3.11)$$

$$F_{1m} = 2\sqrt{2} \frac{W_1 K_{W1} I}{\pi p_1} \quad (3.12)$$

$$K_{W1} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6q}\right)} \cdot \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.13)$$

$$\frac{y}{\tau} = \frac{\text{bobin taksimatı}}{\text{kutup taksimatı}}; \frac{y}{\tau} > 2/3 \quad (3.14)$$

Yukarıda ifade edilen denklemler tam sayı olan q sayıları için geçerlidir.

Ayrıca yukarıdaki denklemler çeşitli harmonik dereceleri açısından yazılmak istenirse,

$$F_{vA}(x, t) = F_{vm} \cdot \cos v \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos (\omega_1 t) \quad (3.15)$$

$$F_{vm} = 2\sqrt{2} \frac{W_1 K_{Wv} I}{\pi p_1 v} \quad (3.16)$$

$$K_{Wv} = \frac{\sin v\left(\frac{\pi}{6}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{v\pi}{6q}\right)} \cdot \sin\left(\frac{y}{\tau} \cdot \frac{v\pi}{2}\right) \quad (3.17)$$

Aynı ifadeleri B ve C fazı için ifade etmek istendiğinde yine benzer ifadeleri kullanılmakta fakat aralarındaki faz farkı ($2\pi/3$) hesaba katılmaktadır. 3 fazın ürettiği toplam MMK,

$$F_v(x, t) = \frac{3W_1 I \sqrt{2} K_{Wv}}{\pi p_1 v} \left[K_{BI} \cos\left(\frac{v\pi}{\tau} - \omega_1 t - (v-1)\frac{2\pi}{3}\right) - K_{BII} \cos\left(\frac{v\pi}{\tau} + \omega_1 t - (v+1)\frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.18)$$

$$K_{BI} = \frac{\sin(v-1)\pi}{3 \cdot \sin(v-1)\pi/3} \quad (3.19)$$

$$K_{BII} = \frac{\sin(v+1)\pi}{3 \cdot \sin(v+1)\pi/3} \quad (3.20)$$

(3.18) eşitliğinde 1. Harmonik göz önüne alınmaktadır. Tam simetriden dolayı, q tam sayısı için sadece tek harmonikler oluşmaktadır. V=1 için, $K_{BII} = 1K_{BI} = 0'$ dir. Böylece MMK'nın temel bileşeninin çevresel hızı şu şekilde ifade edilebilir,

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\tau\omega_1}{\pi} = 2\tau f_1 \quad (3.21)$$

Genel olarak çevresel hız 110m/sn olarak kullanılmaktadır. Oluklardaki alan sargıları kamalar tarafından merkez kaç kuvvetine göre desteklenmektedir.

Yuvarlak rotorlu SG'lerde rotor az da olsa magnetik düzensizlik göstermektedir. Bunun sebebi d ve q eskenleri boyunca hava aralığında oluşan magnetik relüktansdır.

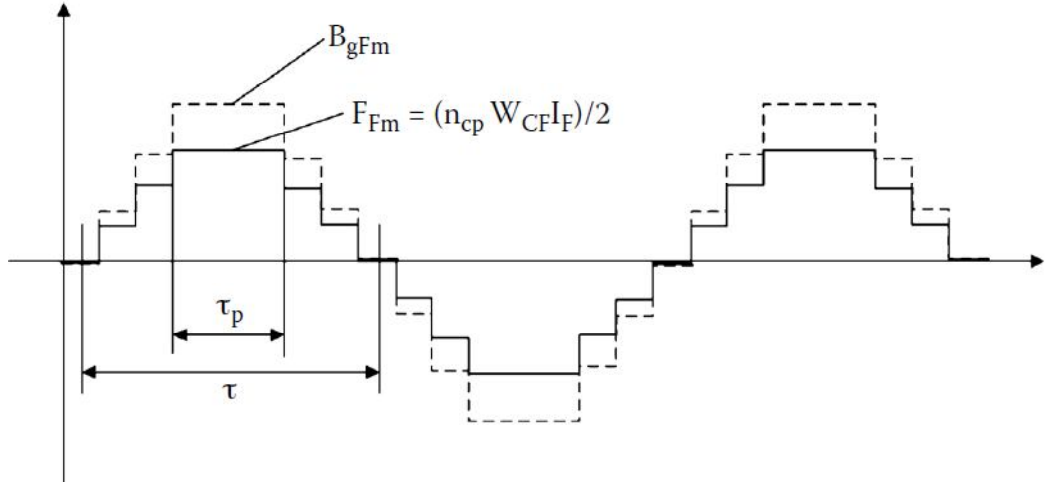
3.3 Uyartım Sargıları

Hava aralığı alanı, rotorda yer alan uyartım sargılarındaki DC akım tarafından üretilmektedir. Hesaplamalarda hava aralığının rotordaki kutuplar boyunca sabit olduğu kabul edilir ve statordaki oluklar da Carter Katsayısı ile hesaba katılmaktadır. Hava aralığı akısı hesaplanırken, stator oluk boşlukları da göz önünde bulundurulmaktadır. Carter katsayısı bu eksikliği gidermek için kullanılan bir katsayıdır [5].

$$K_{C1} = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma_1 g} > 1 \quad (3.22)$$

$$\gamma_1 = \frac{4}{\pi} \left[\frac{\frac{W_{os}}{g}}{\tan\left(\frac{W_{os}}{g}\right)} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{W_{os}}{g}\right)^2} \right] \quad (3.23)$$

Yuvarlak kutuplu rotorda MMK ve hava aralığı akı yoğunluğu 3.13'deki gibidir.



Şekil 3. 13 Uyarım sargılarının oluşturduğu MMF ve hava aralığı akı yoğunluğu

Hava aralığı akı yoğunluğu şu şekilde ifade edilir,

$$B_{gFm} = \frac{\mu_0 \frac{n_p}{2} W_{CF} I_f}{K_C g (1 + K_{S0})}, |x| < \frac{\tau_p}{2} \text{ için} \quad (3.24)$$

(3.24) eşitliğinde manyetik doyma da (K_{S0}) hesaba katılmaktadır, stator ve rotor için demirin magnetik relüktans yolu hesap edilmektedir.

$$B_{gFv} = K_{Fv} \cdot B_{gFM} \cdot \cos \frac{v\pi}{\tau} x \quad (3.25)$$

$$K_{Fv} \approx \frac{8}{v^2 \pi^2} \frac{\cos v \frac{\tau_p \pi}{\tau 2}}{\left(1 - v \frac{\tau_p}{\tau}\right)} \quad (3.26)$$

Akı yoğunluğu harmonikleri sabit hava aralığı (silindirik rotor) kullanıldığı takdirde daha düşük olmaktadır.

Yüksüz durumdaki akı yoğunluğu bağıntısı ortaya konulacak olursa,

$$B_{gF1}(x_r) = B_{gFM1} \cos \frac{\pi}{\tau} x_r \quad (3.27)$$

Sabit rotor hızı için (x_r), rotor koordinatının x_s stator koordinatı ile olan ilişkisi (3.28) ifadesinde verilmiştir,

$$\frac{\pi}{\tau} x_r = \frac{\pi}{\tau} x_s - \omega_r t - \theta_0 \quad (3.28)$$

Rotor w_r açısal hızı ile döndüğü kabul edilirse, ilk konum açısı $\theta_0=0$ alındığında(3.27) ifadesi (3.29)'daki gibi ortaya konulmaktadır,

$$B_{gF1}(x_s, t) = B_{gFm1} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x_s - \omega_r t\right) \quad (3.29)$$

Uyartım sargılarının oluşturduğu akı yoğunluğu rotor hızında dönmektedir. Bu hız statora indirgendiğinde,

$$u_s = \frac{dx_s}{dt} = \frac{\tau \omega_r}{\pi} \quad (3.30)$$

Endüklenen EMK,

$$E_{A1}(t) = \frac{d}{dt} W_1 K_{W1} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} l_{stack} B_{gF1}(x_s, t) dx_s \quad (3.31)$$

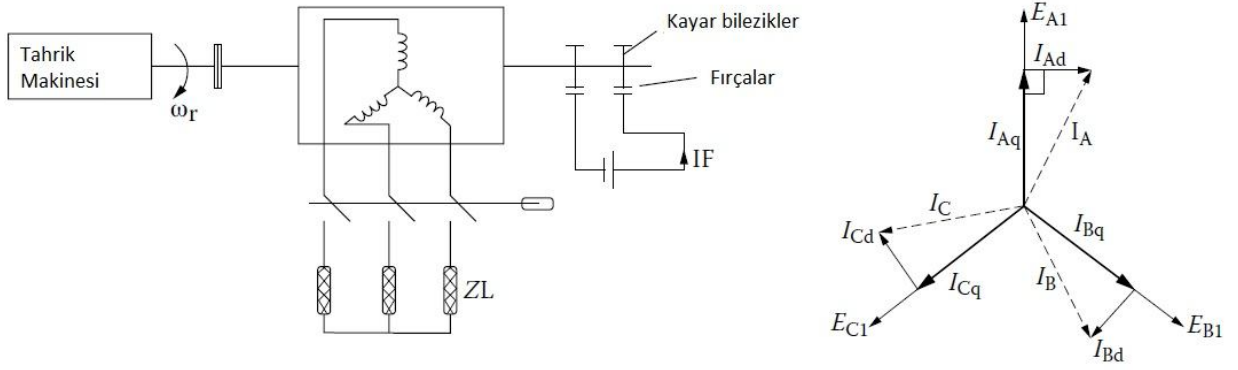
$$E_{A1}(t) = E_1 \sqrt{2} \cos w_r t \quad (3.32)$$

$$E_{1m} = \pi \sqrt{2} \left(\frac{w_r}{2\pi}\right) B_{gFm1} l_{stack} W_1 K_{W1} \frac{\tau^2}{\pi} \quad (3.33)$$

Üç fazın da simetrik olduğu kabul edildiğinde EMK ifadesi,

$$E_{A,B,C}(t) = E_{1m} \sqrt{2} \cos \left[w_r t - (i - 1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (3.34)$$

SG yüksüz durumda, rotor rotor sargıları uyarılmış ve w_r hızı ile döndürülmektedir. Bu durumda dengeli 3 faz bir yük stator sargılarına bağlandığında, w_r frekansına sahip EMK doğal olarak aynı frekansta akım üretecektir. Akım ve EMK'lar arasında faz farkı yükün doğasına (güç faktörü) ve makine parametrelerine bağlıdır. Sinüs halindeki akım ve EMK'lar Şekil 3. 14'de gösterilmektedir. Her faza ait akımları d ve q bileşenlerine ayırmak analiz için daha faydalı olmaktadır. Bu bileşenler arasında 90 derece faz farkı bulunmaktadır. Bu akımlar $\underline{I}_{Aq}, \underline{I}_{Bq}, \underline{I}_{Cq}$ ve $\underline{I}_{Ad}, \underline{I}_{Bd}, \underline{I}_{Cd}$ olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3. 14 Üç fazlı simetrik, dengeli bir yük ve ω_r frekansı için oluşan EMK ile akım fazörleri

$$F_d(x, t) = -F_{dm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x_s - \omega_r t \right) \quad (3.35)$$

$$F_{dm} = \frac{3\sqrt{2}I_d W_1 K_{W1}}{\tau p_1}; I_d = |I_{Ad}| = |I_{Bd}| = |I_{Cd}| \quad (3.36)$$

$$F_q(x, t) = F_{qm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x_s - \omega_r t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.37)$$

$$F_{qm} = \frac{3\sqrt{2}I_q W_1 K_{W1}}{\tau p_1}; I_q = |I_{Aq}| = |I_{Bq}| = |I_{Cq}| \quad (3.38)$$

Özet olarak, d düzlemindeki stator akımı, uyarım sargılarının ürettiği hava aralığı akı yoğunluğu dalgaları hizasında fakat ters yönlü bir MMK üretmektedir. D magnetik alanı rotor ile birlikte dönmektedir. Q düzlemindeki bileşenler de rotora sabitlenmiş şekildedir ve rotor ile birlikte dönmektedir.

I_{FA}, I_{FB} ve I_{FC} , I_F akımından türeyen ve RMS değerleri kullanılan hayali akımlardır.

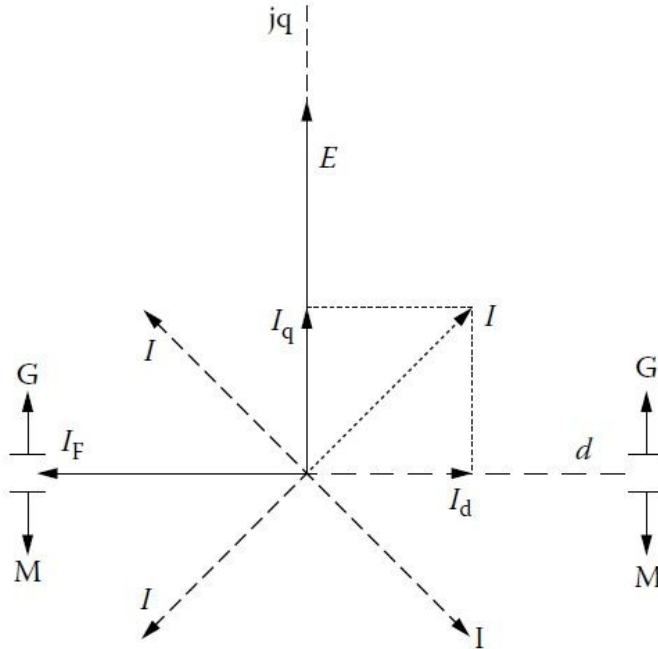
$$\underline{E}_{A,B,C} = -j\omega_r M_{FA} \underline{I}_{FA,B,C} \quad (3.39)$$

$$E_A(t) = 2\pi \frac{\omega_r}{2\pi} K_{W1} \frac{2}{\pi} l_{stack} \tau \frac{\mu_0 W_f I_f K_{F1}}{K_c g (1 + K_{S0})} \cos \omega_{1t} \quad (3.40)$$

M_{FA} , alan ve stator sargılarının oluşturduğu karşılıklı endüktans değeridir.

$$M_{FA} = \mu_0 \frac{\sqrt{2} W_1 W_F K_{W1} \tau. l_{stack}}{\pi K_c g (1 + K_{S0})} K_{F1} \quad (3.41)$$

Şekil 3.15’de generatör ve motor çalışma bölgeleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 15 Generatör ve motor çalışma bölgeleri

Bu bölgelendirme aktif güç göz önünde bulundurularak yapılmaktadır.

$$P_{elm} = 3R_e(\underline{E} \cdot \underline{I}^*) > 0 \text{ generatör}, < 0 \text{ motor} \quad (3.42)$$

$$Q_{elm} = 3I_m \text{ag}(\underline{E}, \underline{I}^*) < > 0 \text{ (generator/motor)} \quad (3.43)$$

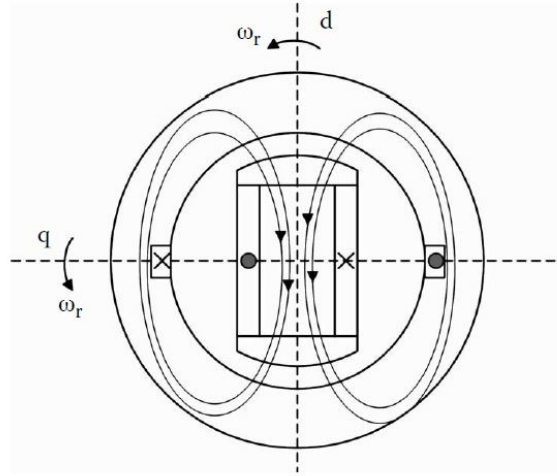
Reaktif güç motor ve generatör için de pozitif ve negatif olabilmektedir. Reaktif güç üretimi için I_d , I_F ile ters yönde olmalıdır.

Endüvi reaksiyonu hava aralığı alanı, uyarım sargılarının oluşturduğu hava aralığı alanına zıt yönde etki etmektedir. Fazlası makinayı aşırı uyarım durumuna sürüklemektedir. Yani, sabit aktif güç için, SG tarafından üretilen reaktif güç I_F alan akımının azaltılmasıyla düşürülebilmektedir. Tam tersi durumda (düşük uyarım) reaktif güç negatif olmaktadır yani şebekeden çekilmektedir. Bu özellik SG'lerin güç sistemlerinde uyarım kontrolü ile (I_F) gerilim kontrolü yapmalarını sağlamaktadır.

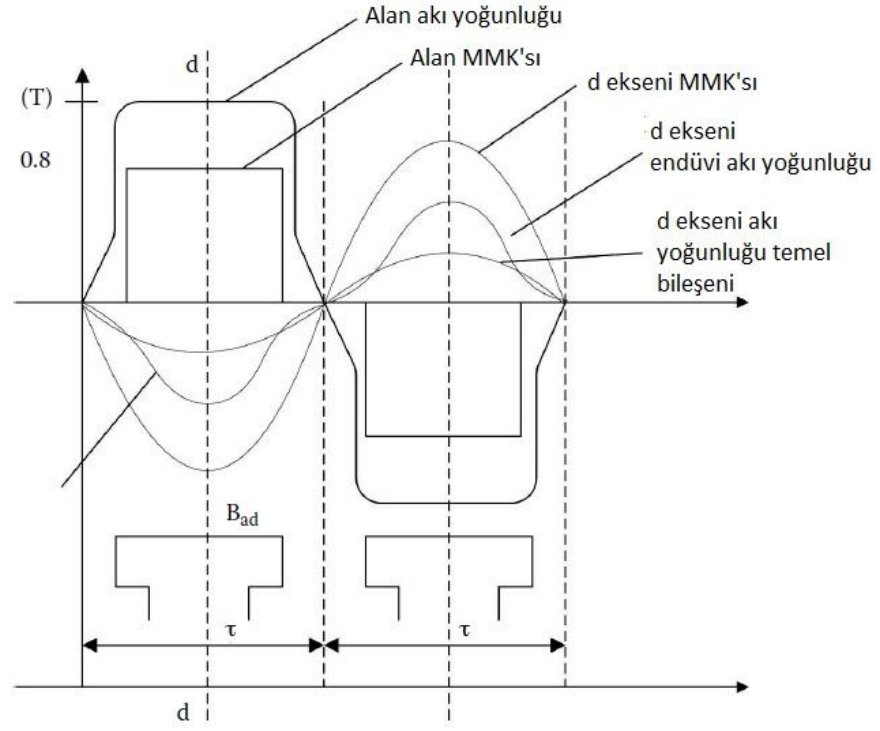
Ayrıca ω_r frekansı da, tahrik makinalarının hızı ile ayarlanmaktadır ($\Omega_r = \omega_r/p_1$). Sabit frekans için, hız sabit olmalıdır.

3.4 Senkron Reaktans

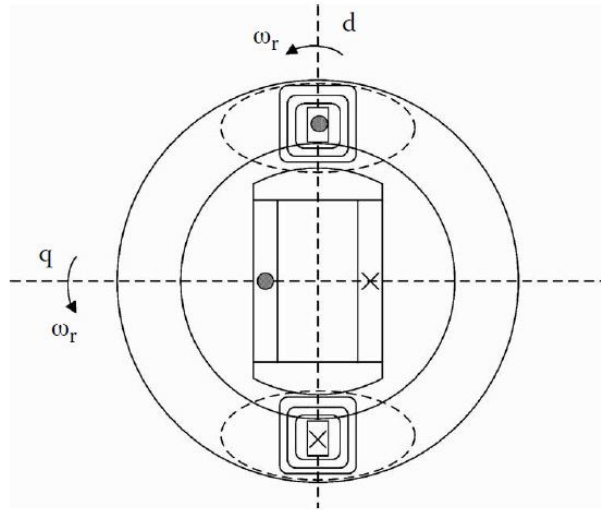
Kararlı hal durumunda, rotor uyartım sargılarının hava aralığında ürettiği alan ve stator sargılarının ürettiği alan birbirine etkilemektedir. Endüvi reaksiyonu alanı rotor hızında dönmektedir. D eksen akımları I_{dA}, I_{dB}, I_{dC} ve q eksen akımları I_{qA}, I_{qB}, I_{qC} adlandırılır. Endüvi reaksiyonunun dağılımı şekil 3.15 ve 3.16'da yer almaktadır (sadece temel bileşenler göz önünde tutulmuştur). Endüvi reaksiyonu etkisi çıkık kutuplu SG'lerde hava aralığının sabit olmamasından dolayı daha açıkça gözlenebilmektedir.



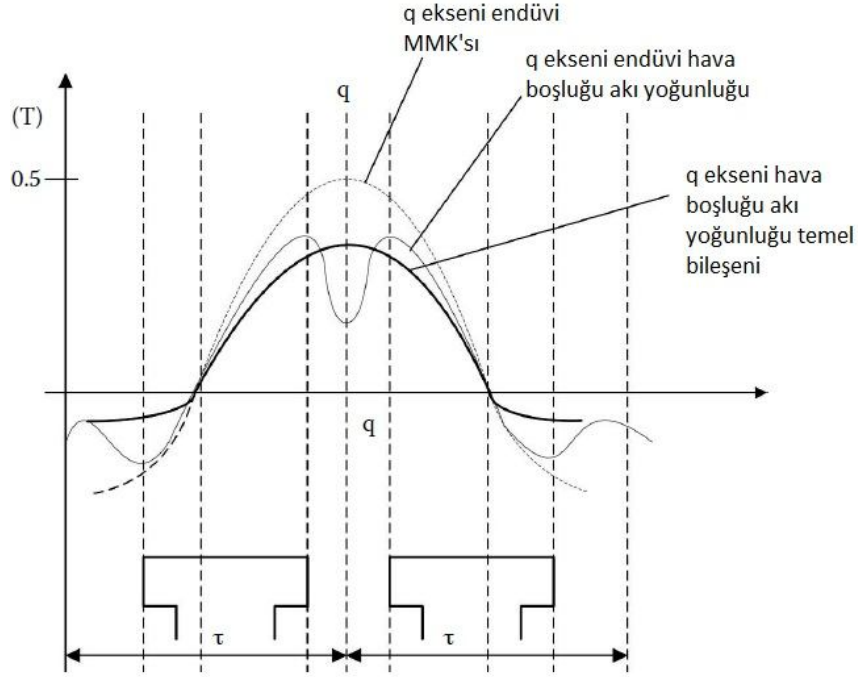
Şekil 3. 16 D eksen endüvi reaksiyonu akı yolu



Şekil 3. 17 D eksenine ait hava boşluğu akı yoğunluğu ve MMK



Şekil 3. 18 Q eksenli endüvi reaksiyonu akı yolu



Şekil 3. 19 Q eksenine ait hava boşluğu akı yoğunluğu ve MMK

Daha detaylı ve doğru bir akı yoğunluğu dağılımı hesaplanmak isteniyorsa sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

$$B_{ad1} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_{ad}(x_r) \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_r\right) dx_r \quad (3.44)$$

$$0 < x_r < \frac{\tau - \tau_p}{2} \text{ ve } \frac{\tau + \tau_p}{2} < x < \tau \text{ için } B_{ad} = 0 \quad (3.45)$$

$$\frac{\tau - \tau_p}{2} < x_r < \frac{\tau + \tau_p}{2} \text{ için } B_{ad} = \frac{\mu_0 F_{dm} \sin \frac{\pi}{\tau} x_r}{K_c g (1 + K_{sd})} \quad (3.46)$$

D eksenine akı yoğunluğu,

$$B_{ad1} = \frac{\mu_0 F_{dm} K_{d1}}{K_c g (1 + K_{sd})}; K_{d1} \approx \frac{\tau_p}{\tau} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{\tau_p}{\tau} \pi \quad (3.47)$$

Aynı dönüşümü q eksenine bileşeni için uygulanırsa,

$$0 \leq x_r \leq \frac{\tau_p}{2} \text{ ve } \frac{\tau + \tau_p}{2} < x < \tau \text{ için } B_{aq} = \frac{\mu_0 F_{qm} \sin \frac{\pi}{\tau} x_r}{K_c g (1 + K_{sq})} \quad (3.48)$$

$$\frac{\tau_p}{2} < x_r < \frac{\tau + \tau_p}{2} \text{ için } B_{aq} = \frac{\mu_0 F_{qm} \sin \frac{\pi}{\tau} x_r}{K_c g (1 + K_{sq})} \quad (3.49)$$

$$B_{aq1} = \frac{\mu_0 F_{qm} K_{q1}}{K_c g} \quad (3.50)$$

$$K_{q1} = \frac{\tau_p}{\tau} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{\tau_p}{\tau} \pi + \frac{2}{3\pi} \cos \left(\frac{\tau_p}{\tau} \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.51)$$

(3.49) eşitliğinde x_r , rotor koordinatlarını temsil etmektedir.

Endüvi reaksiyonunu akı yoğunluğunun temel bileşeninin d ve q eksen büyüklükleri stator MMK'sı ile doğru orantılı fakat hava aralığı ve manyetik doyum katsayıları olan K_{sd} ve K_{sq} ile ters orantılıdır ($K_{sd} \neq K_{sq}$).

B_{ad1} ve B_{aq1} endüvi reaksiyonu katsayısı olarak belirtilen K_{d1} ve K_{q1} ile doğru orantılıdır. Hava aralığının her yerde sabit olmamasından dolayı hesaba katılmaktadırlar (sargı oluklarından kaynaklanan bozulmalar Carter katsayısı ile hesaba katılmaktadır) .

Aynı stator yapısı için hava aralığı akı yoğunluğunun temel bileşeni,

$$B_{a1} = \frac{\mu_0 F_1}{K_c g (1 + K_s)}; F_1 = \frac{3\sqrt{2} W_1 K_{W1} I_1}{\pi p_1} \quad (3.52)$$

Her fazda endüklenen EMK,

$$E_{a1} = w_r W_1 K_{W1} \Phi_{a1}; \Phi_{a1} = \frac{2}{\pi} B_{a1} \tau \cdot l_{stack} \quad (3.53)$$

(3.52) ve (3.53) ifadelerinden mıknatıslanma reaktansı olan X_m 'i türetilirse,

$$X_m = \frac{E_{a1}}{I_1 \sqrt{2}} = \frac{6\mu_0 w_r}{\pi^2} \frac{(W_1 K_{W1})^2 \tau \cdot l_{stack}}{K_c g (1 + K_s)} \quad (3.54)$$

X_{dm} ve X_{qm} kendi akı yoğunlukları ile doğru orantılıdır,

$$X_{dm} = X_m \frac{B_{ad1}}{B_{a1}} = X_m \cdot K_{d1} \quad (3.55)$$

$$X_{qm} = X_m \frac{B_{aq1}}{B_{a1}} = X_m \cdot K_{q1} \quad (3.56)$$

(3.55) ve (3.56) ifadelerindeki reaktanslar kararlı hal durumlarında ve dengeli stator akımları için geçerli olmaktadır. Mıknatıslanma reaktanslarına ek olarak kaçak reaktanslar da eklendiğinde sonuç olarak senkron reaktans denilen kavram elde edilmektedir,

$$X_d = X_{1l} + X_{dm} \quad (3.57)$$

$$X_q = X_{1l} + X_{qm} \quad (3.58)$$

Damper sargılarından akan akım kalıcı hal durumunda sıfırdır.

3.5 Kararlı Hal ve Dengeli Yükler İçin Denklemler

Her faza ait fazör açılımlar,

$$\underline{I}_1 + R_1 + \underline{V}_1 = \underline{E}_1 - jX_d \underline{I}_d - jX_q \underline{I}_q \quad (3.59)$$

$$\underline{E} = -jX_{Fm} \times \underline{I}_F; X_{Fm} = w_r M_{FA} \quad (3.61)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_d + \underline{I}_q \quad (3.62)$$

(3.59), (3.61) ve (3.62) ifadelerinde RMS değerleri kullanılmaktadır.

$\underline{I}_F$ akımının d (gerçek) eksenini boyunca uzanmaktadır,

$$\underline{I}_q = I_q \times \left(-j \frac{I_F}{I_F} \right) \quad (3.63)$$

$$\underline{I}_d = I_d \times \frac{I_F}{I_F} \quad (3.64)$$

$$I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3.65)$$

I_q generatör çalışma için pozitif, motor çalışma için negatif olmaktadır. $I_F > 0$ iken, düşük uyarım için ($E_1 < V_1$) I_d pozitif, aşırı uyarım için ($E_1 > V_1$) I_d negatiftir. $\underline{V}_1$ tek bir faza ait uç gerilimini, $\underline{Z}_L$ empedansının gerilimini temsil etmektedir,

$$\underline{Z}_L = \frac{\underline{V}_1}{\underline{I}_1} \quad (3.66)$$

Bir güç sistemi eşdeğer EMK'si $\underline{E}_{PS}$ ve empedansı $\underline{Z}_{PS}$ ile ifade edirse,

$$\underline{V}_1 = \underline{E}_{PS} + \underline{Z}_{PS}\underline{I}_1 \quad (3.67)$$

Sonsuz bir güç sistemi için $|\underline{Z}_{PS}| = 0$ ve $\underline{E}_{PS}$ sabittir. Fakat sınırlandırılmış bir güç sistemi için $|\underline{Z}_{PS}| \neq 0$ ve $\underline{E}_{PS}$ büyüklük ve frekans açısından değişebilmektedir. Güç sistemi empedansı $\underline{Z}_{PS}$ paralel bağlı birçok generatörü, transformatörü ve iletim hatlarını içermektedir.

Güç dengesi (3.67) ifadesine uygulandığında,

$$P_1 + jQ_1 = 3\underline{V}_1\underline{I}_1^* = 3\underline{E}_1\underline{I}_1^* - 3(\underline{I}_1)^2 R_1 - 3jX_{1l}(\underline{I}_1)^2 - 3j(X_{dm}\underline{I}_d + X_{qm}\underline{I}_q)\underline{I}_1^* \quad (3.68)$$

P_1 aktif gücü, Q_1 ise reaktif gücü temsil etmektedir. Her iki büyüklükte SG tarafından sağlandığı için pozitiftir.

$$P_1 = 3E_1I_q - 3I_1^2R_1 + 3(X_{dm} - X_{qm})I_dI_q = 3V_1I_1 \cos \varphi_1 \quad (3.69)$$

$$Q_1 = -3E_1I_d - 3I_1^2X_{sl} + 3(X_{dm}I_d^2 - X_{qm}I_q^2) = 3V_1I_1 \sin \varphi_1 \quad (3.70)$$

(3.69) ve (3.70) ifadelerinden aşağıdaki sonuçlar çıkartılmaktadır,

- Sadece $I_q > 0$ ise aktif güç pozitiftir (generatör çalışma için).
- $X_{dm} \geq X_{qm}$ ve I_d pozitif ise aktif güç pozitiftir (generatör çalışma için).
- Reaktif güç denkleminde I_d pozitif ise, reaktif güç negatiftir (şebekeden çekilir). Yani SG düşük uyarımla çalışmaktadır.
- Yuvarlak kutuplu SG'lerde $X_{dm} \approx (1.01 - 1.05)X_{qm}$ olarak seçilmektedir.

Stator sargı kayıpları ($3R_1I_1^2$) hesaba katıldığında toplam elektromanyetik güç,

$$P_{elm} = 3E_1 I_q + 3(X_{dm} - X_{qm}) I_d I_q \quad (3.71)$$

Moment eşitliği ise,

$$T_e = \frac{P_{elm}}{\frac{\omega_r}{p_1}} = 3p_1 [M_{fA} I_F I_q + (L_{dm} - L_{qm}) I_d I_q] \quad (3.72)$$

$$L_{dm} = X_{dm} / \omega_r; L_{qm} = X_{qm} / \omega_r \quad (3.73)$$

Daha önce belirtilen gerilim bağıntısından yola çıkarak (3.74) ifadesi yazılmaktadır,

$$E_1 = w_r M_{fA} I_F \quad (3.74)$$

Stator fazlarının akı bağıntıları da (₁) d ve q eksenlerine yarılrırsa,

$$\Psi_d = M_{fA} + L_d I_d \quad (3.75)$$

$$\Psi_q = L_q I_q \quad (3.76)$$

$$L_d = X_d / \omega_r; L_q = X_q / \omega_r \quad (3.77)$$

Toplamda stator faz akısı ₁,

$$\Psi_1 = \sqrt{\Psi_d^2 + \Psi_q^2}; I_1 = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (3.78)$$

Elektromanyetik moment frekansa (hız) w_r bağılı değildir. Sadece alan akımına ve stator akımı bileşenlerine bağılıdır.

I_F, I_d ve I_q akımları stator ve rotor çekirdeklerindeki manyetik doymanın seviyesini etkiler. Bu yüzden M_{fA}, L_{dm} ve L_{qm} hepsinin birer fonksiyonudur.

T_a şaft momenti T_e bağıntısından elde edilmektedir,

$$T_a = T_e + \frac{P_{mec}}{\left(\frac{\omega_r}{p_1}\right)} \quad (3.79)$$

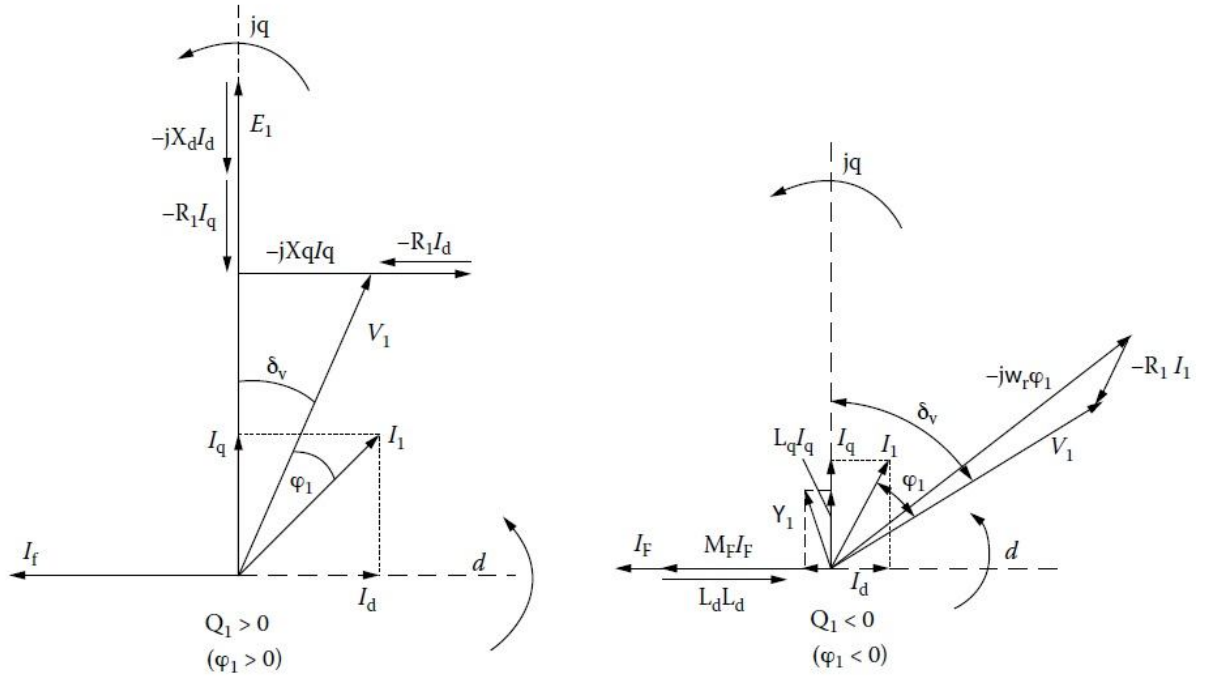
Generatör işletim modu için T_e pozitifdir ve böylece $T_a > T_e$ olmaktadır. Fakat şimdiye kadar ortaya konulan ifadeler stator çekirdeğindeki kayıpların ihmal edilerek hesaplanmasıyla oluşturulmuştur.

3.6 Fazör Diyagramlar

Bölüm 3.5’de ortaya konulan ifadelerden yola çıkarak yeni bir gerilim eşitliği yazıldığında,

$$\underline{I}_1 + R_1 + \underline{V}_1 = -j\omega_r \underline{\Psi}_1 = \underline{E}_t; \quad \underline{\Psi}_1 = \Psi_d + j\Psi_q \quad (3.80)$$

$\underline{E}_t$, SG’de üretilen toplam EMK’dır. Şekil 3.20’de fazör diyagramlar yer almaktadır.



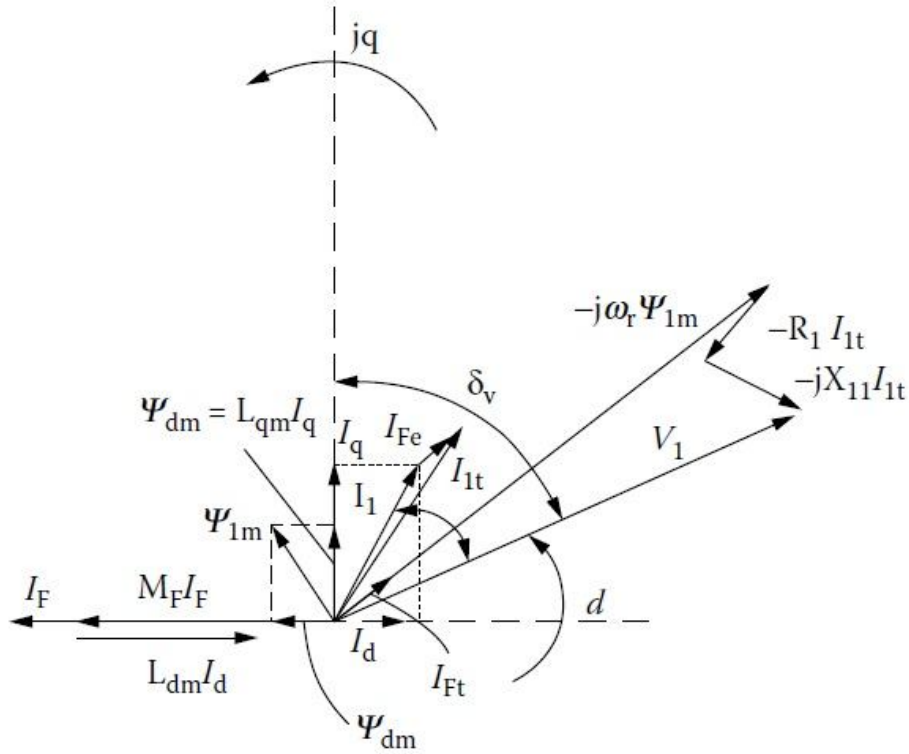
Şekil 3. 20 Senkron generatör fazör diyagramları

$\underline{E}_1$ ve V_1 arasındaki açı (δ_v) iç güç açısı olarak adlandırılmaktadır. Eğer $I_q > 0$ ve $\delta_v > 0$ ise makine generatör modunda, $I_q < 0$ ve $\delta_v < 0$ ise motor bölgede çalışmaktadır. Büyük güçlü SG’lerin çoğunda stator resistif büyüklükleri ihmal edilmektedir.

Uyartım ve endüvi sargılarının ürettiği manyetik alandan ötürü nüvede kayıplar meydana gelmektedir. Nüve kayıpları doğrudan hava aralığı akısı ile ilişkilidir.

$$\underline{\Psi}_{1m} = M_{FA} \underline{I}_F + L_{dm} \underline{I}_d + L_{qm} \underline{I}_q = \Psi_{dm} + j\Psi_{qm} \quad (3.81)$$

$$\Psi_{dm} = M_{FA} I_F + L_{dm} I_d; \Psi_{qm} = L_{qm} I_q \quad (3.82)$$



Şekil 3. 21 Nüve kayıpları hesaba katılmış senkron generatör fazör diyagramı

Kaçak akı bağıntıları olan $L_{sl}I_d$ ve $L_{sl}I_q$ fazla önemli miktarda bir kayıba sebep olmamaktadırlar. Genel olarak $L_{sl}/L_{dm} < 0.15$ olmaktadır ve kaçak akı yolları çoğunlukla hava olan kısımlardan akmaktadır.

Nüve kaybını hesaplayabilmek için hayali, üç fazlı kısa devre edilmiş bir sargı olarak R_{Fe} 'yi düşünülebilir.

$$-\frac{d\Psi_{1m0}}{dt} = R_{Fe} I_{Fe} = -j\omega_r \Psi_{1m0} \quad (3.83)$$

R_{FE} ana EMK'ya paralel olarak bağlanmaktadır.

$$\underline{I}_{1t} = (R_1 + jX_{sl}) + V_1 = -j\omega_1 \underline{\Psi}_{1m} \quad (3.84)$$

$$\underline{I}_{1t} = \underline{I}_d + \underline{I}_q + \underline{I}_{Fe} = \underline{I}_1 + \underline{I}_{Fe} \quad (3.85)$$

Nüve kayıpları SG'lerde küçüktür ve fazör diyagramlarında çok büyük değişikliğe sebep olmamaktadırlar fakat daha doğru bir verim hesabı için kullanılmaktadırlar.

Sonuç olarak güç eşitliği,

$$P_1 = 3V_1 I_{1t} \cos \varphi_1 \quad (3.86)$$

$$= 3w_r M_{FA} I_F I_q + 3w_r (L_{dm} - L_{qm}) I_d I_q - 3R_1 I_{1t}^2 - 3 \frac{w_r^2 \Psi_{1m}^2}{R_{Fe}}$$

$$\underline{\Psi}_{1m} = M_{FA} I_f + L_{dm} I_d - j L_{qm} I_q \quad (3.87)$$

$$\underline{I}_{Fe} = \frac{-j w_r \underline{\Psi}_{1m}}{R_{Fe}}; \underline{I}_t = \underline{I}_d + \underline{I}_q + \underline{I}_{Fe} \quad (3.88)$$

Verim için kullanılacak olan ifade ise (3.89) eşitliğinde belirtilmiştir,

$$\eta_{SG} = \frac{P_1}{P_1 + P_{Fe} + P_{copper} + P_{mec} + P_{add}} = \frac{P_{elm} - P_{copper} - P_{Fe} - P_{add}}{P_{elm} + P_{mec}} \quad (3.89)$$

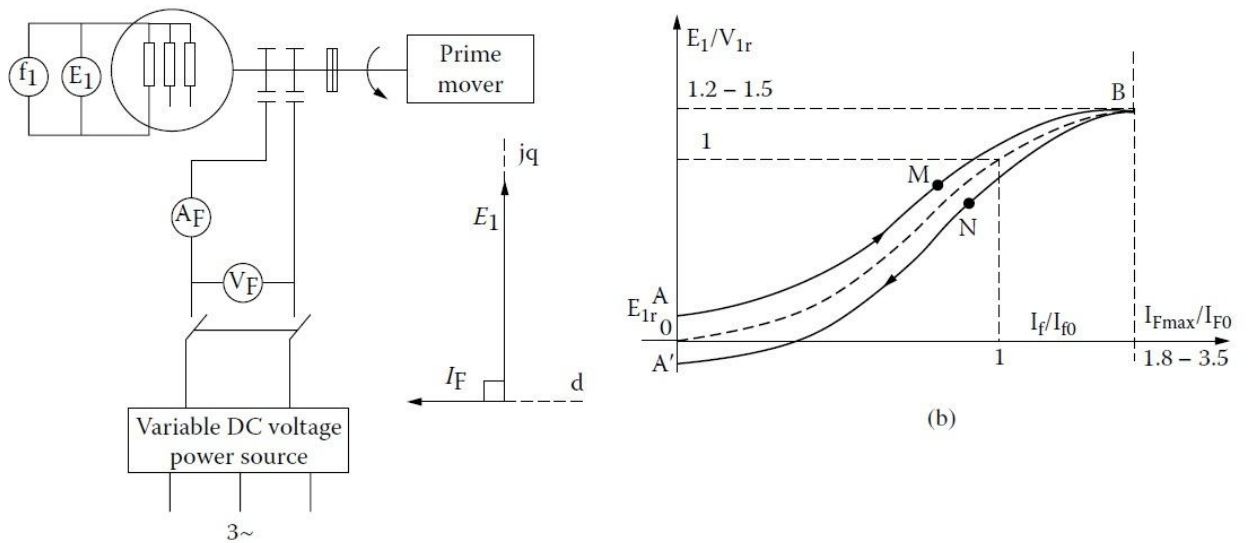
SENKRON GENERATÖR KARAKTERİSTİKLERİ

4.1 Boşta Çalışma Karakteristiği

Bu karakteristiğin amacı, sabit devir sayısı ile tahrik olan bir senkron generatörün doğru akım ile uyarılmasında boşta çalışma geriliminin uyarma akımı ile değişimini görmektir.

Sıfır stator akımı durumunda, generatör tahrik makinasıyla döndürülmektedir. Statorda gerilim endüklenmemiş durumda EMK ve alan akımı ölçülür. Daha sonra alan akımı, nominal gerilim %120-150 mertebelerine çıkıncaya kadar arttırılmaktadır.

Uyarma akımı 0 değerindeyken bile rotor çekirdeğindeki artık mıknatisiyetten dolayı stator sargılarında nominal gerilimin %2-8 arasında bir EMK endüklenmektedir. Bu işletme açısından da risk yaratan bir durumdur.



Şekil 4. 1 Deneysel düzenek ve açık devre karakteristiği [5]

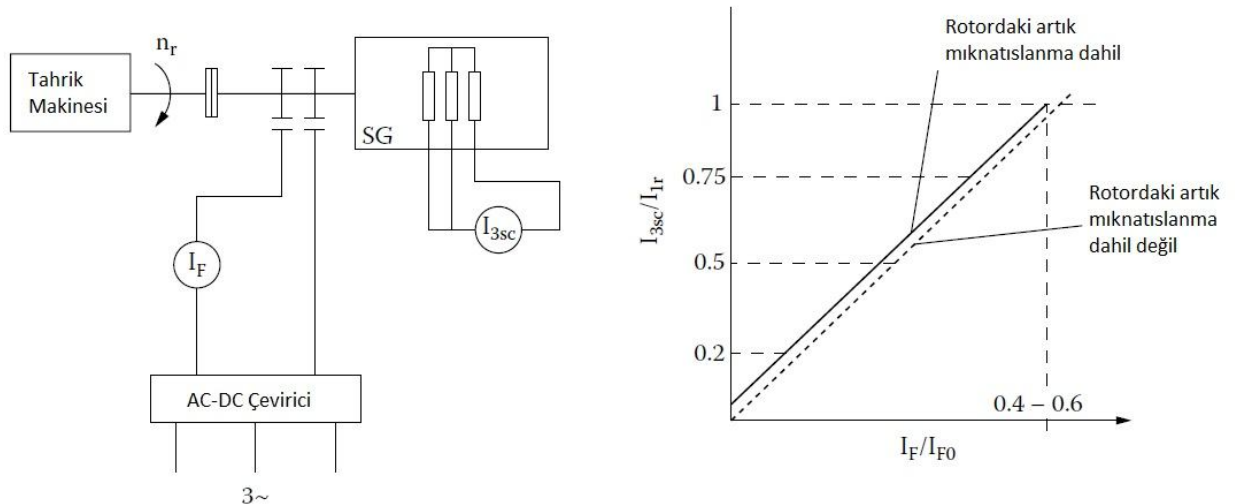
Şekil 4.1'den görüldüğü üzere alan akımı arttırılırken endüklenen gerilim değeri AMB eğrisini izlemektedir. Daha sonra alan akımı azaltıldığında bu sefer eğri BNA' yolunu izleyecektir. Eğer başlangıç noktası A' olsaydı, alan akımı arttırıldığında EMK önce azalacak sonra ters yönde artmaya başlayacaktır.

Bu iki eğrinin ortalaması alındığında generatörün boşa çalışma karakteristiğini elde edilmiş olur. Boştaki gerilimi uygun değere getiren uyarım akımının nominal uyarım akımına oranı genellikle 1,8-3,5 arasında olmaktadır. Nominal gerilimde ve tam yükte güç faktörü ne kadar düşük olursa, I_f/I_{f0} oranı o kadar büyük olmaktadır. Ayrıca bu oran hava boşluğu, kutup taksimatı ve kutup çifti sayısına da bağlıdır.

4.2 Kısa Devre Karakteristiği

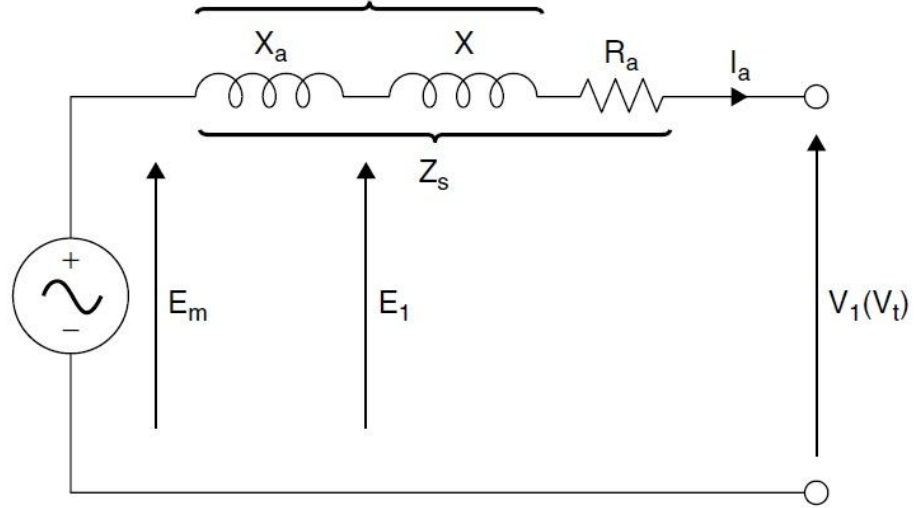
Kısa devre karakteristiği, stator sargıları kısa devre edilmiş ve generatör nominal hızındayken stator akımının (sıfırdan nominal akıma gelinceye kadar) uyarım akımının bir fonksiyonu olarak çizilmesidir. Genellikle açık devre karakteristiği ile birlikte kullanılmaktadır.

Çoğunlukla lineer bir karakteristiğe sahiptir, çünkü bu akım seviyelerinde generatörde doyum gözlenmemektedir.



Şekil 4. 2 Deneyel düzenek ve kısa devre karakteristiği

Bu eğrinin diğer ismi de “senkron empedans eğrisi” dir. Çünkü stator akımını belirleyen senkron empedans değeridir. Şekil 4.3’de basitçe devre şeması gösterilmektedir.



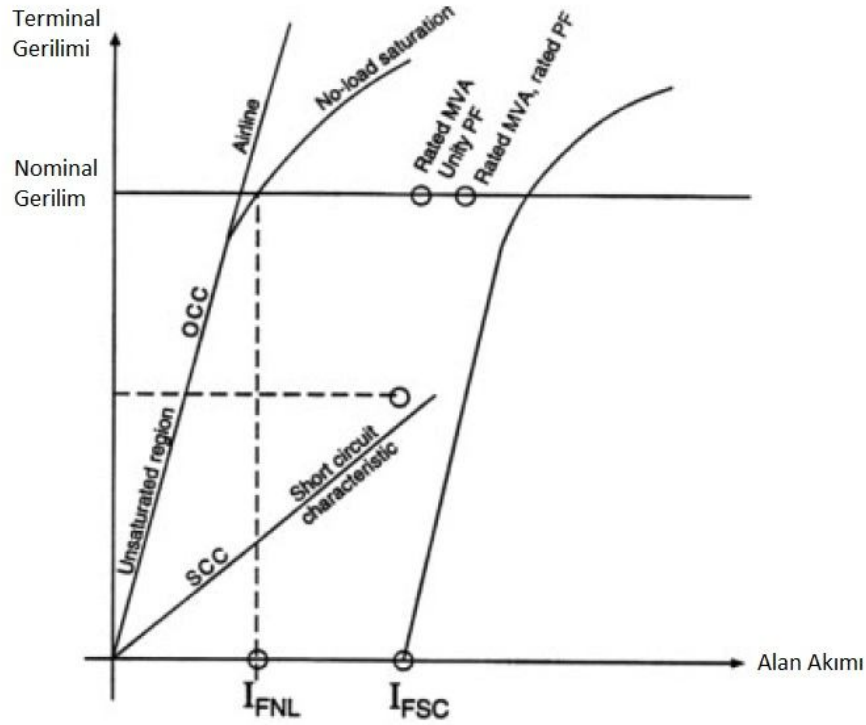
Şekil 4. 3 SG'nin basite indirgenmiş kararlı hal eşdeğer devresi

Senkron empedans değeri makinenin endüvi reaksiyonuna da bağlıdır (x_a).

4.3 Kısa Devre Oranı

Kısa devre oranı, açık devre ve kısa devre karakteritiklerinin oluşturulmasında kullanılan alan akımlarıyla ilgili önemli bir parametredir.

$$KDO(SCR) = \frac{I_{FNL}}{I_{FSC}} \text{ (nominal devirde)} \quad (4.1)$$



Şekil 4. 4 Açık devre ve kısa devre karakteristikleri

KDO doymuş d eksenli reaktansı ile de ifade edilmektedir,

$$KDO = \frac{1}{x_{d(sat)}} \quad (4.2)$$

KDO kalıcı hal kararlılığı ve sistemden çekilen reaktif güç ile doğrudan ilişkilidir. Büyük KDO, daha küçük bir $x_{d(sat)}$ ve daha büyük bir hava aralığı demektir [7]. Bu da aynı görünür gücü elde etmek için uyarım sargılarında daha fazla MMK ihtiyacını doğurmaktadır.

SG'lerin izolasyon sınıfı için izin verilen sıcaklık artışı limitleri doğrultusunda (B sınıfı, $\Delta t=130^\circ$), daha çok uyarım MMK'sı için daha büyük bir rotor hacmine yani daha büyük bir SG'ye ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. KDO boyutsal açıdan SG'leri sınırlayan bir faktördür.

Ayrıca KDO'nun SG'lerin verimleri üzerinde de etkisi vardır. KDO 0.4'den 0.5'e yükseldiğinde verimde 0.02% ile 0.04% arasında bir düşüş olmaktadır. Bu sırada makine hacminde %5 ile %10 arasında bir artış meydana gelmektedir.

KDO'nun SG'nin kalıcı hal kararlılığı üzerindeki etkisi ,sonsuz baraya bağlı kayıpsız bir SG'deki P.U. cinsinden yazılan elektromanyetik tork ifadesiyle açıklanmaktadır,

$$t_e \approx KDO \cdot E_0 \cdot V_1 \sin \delta \quad (4.3)$$

Büyük bir KDO, önceden belirlenmiş yüksüz durum gerilimi (E_0),terminal gerilimi (V_1) ve güç açısı (δ) için daha büyük bir tork demektir. Eğer terminal gerilimi düşerse, sabit tork değeri (sabit aktif güç) ve sabit alan akımı için güç açısı (δ) artmaktadır.

x_e bir iletim hattının (generator yükseltici transformatörü dahil) reaktansı kabul edilirse ve V_1 de sonsuz baranın gerilimi olan V_g olarak gösterildiğinde, SG'nin tork eşitliği t'_e (4.4) ifadesindeki gibi gösterilir.

$$t'_e = KDO \times E_0 \times V_g \times \frac{\sin \delta'}{(1 + x_e/x_d)} \quad (4.4)$$

Güç açısı δ' generatörün E_0 gerilimi ile sonsuz baranın gerilimi olan V_g arasındaki açıdır. KDO'nun artması , x_e/x_d değerinin artması ile maksimum çıkışın üzerine azaltıcı bir etki yapmaktadır.

Örnek olarak, eğer SG ileri güç faktörü 0,95 ve SG nominal MW değerinin 85% çıkış değerlerine sahipse ve iletim hattı reaktansı oranı olan x_e/x_d 0,17'den 0,345'e artarsa,KDO'nun 0,4'den 0,5'e artması durumunda aynı maksimum çıkış değerleri elde edilmektedir.

Tarihsel olarak SG'lerin KDO'larındaki değişime bakacak olursak giderek azalan değerler göze çarpmaktadır. 80 yıl önce 0,8 ile 1,0 arasında olan değerler 60'lı yıllarda 0,58 ile 0,65 değerlerine düşmüştür. Günümüzde ise 0,5 ile 0,4 değerleri arasındadır. Daha düşük KDO daha küçük SG hacmi,daha az kayıp ve daha az maliyet demektir.

Sonsuz baraya bağlı bir SG'nin yükseltici transformatörün yüksek gerilim tarafında meydana gelen 3 faz kısa devrenin temizlenme zamanı SG'nin geçici hal kararlılığı limitlerini belirleyen bir performans değeridir.

Kısa devrenin temizlenmesinden önceki geçici hal durumunda tork eşitliğini yaklaşık olarak hesaplamak için x_d yerine x'_d kullanılır. Düşük x'_d değerleri büyük kısa devre temizleme zamanlarına ve dolayısıyla büyük atalet değerlerine sebep olmaktadır. Hava

soğutmalı SG'ler hidrojen soğutmalı SG'lere göre daha büyük atalet/MW değerine ve daha büyük rotor boyutlarına sahiptirler.

İşletme sırasında, değişen yüklere karşı gerilimi sabit tutmak için uyarım devresi KDO ile ters orantılı olarak çalışır. Yani, düşük KDO'ya sahip bir SG, büyük KDO'ya sahip bir makineye göre uyarımda daha büyük bir değişikliğe ihtiyaç duymaktadır.

Yüksek KDO daha kararlı fakat daha verimsiz bir senkron generatör demektir. Fakat senkron generatörün kararlılığını sadece KDO belirlemez. Buna ek olarak gerilim regülatörünün cevap hızı, uyarım sistemi, türbin ve generatörün zaman sabitleri, ataletleri de kararlılık için önemli parametrelerdir.

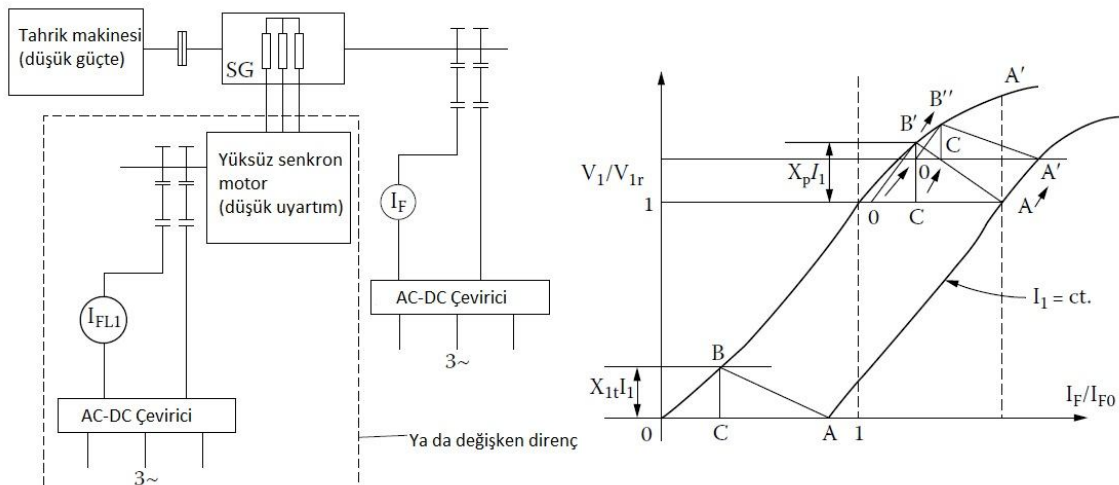
4.4 Sıfır Güç Faktörü Eğrisi

Sıfır güç faktörü ve sıfır kayıp durumlarında gerilim eşitliği,

$$V_1 = E_1 - jX_d I_d; \quad I_1 = I_d; \quad I_q = 0 \quad (4.5)$$

Tamamen reaktif bir yük ve sıfır kayıp için elektromanyetik moment de sıfır olmaktadır.

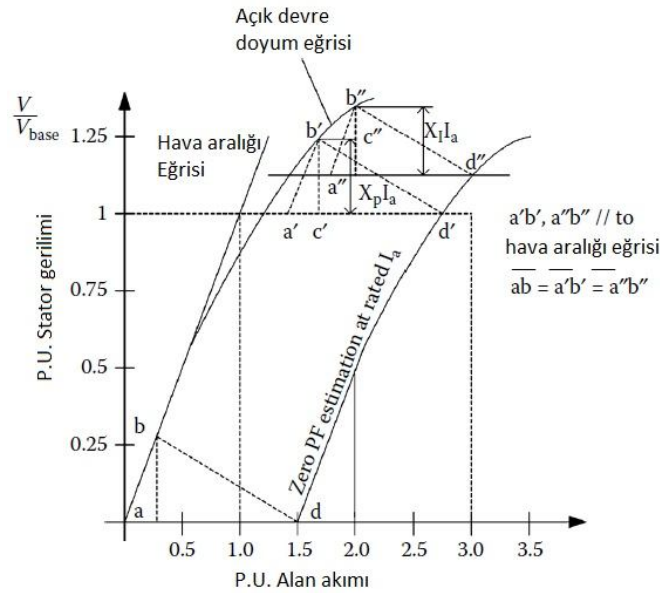
SG'nin 0 güç faktörü ve sabit I_d akımı altındaki reaktif gücünü ortaya koymak için düşük uyarımlı ve yüksüz bir senkron motor kullanılmaktadır. Motorun uyarım devresindeki akım arttırıldıkça SG'nin gerilimi düşerken, stator akımı I_d 'yi sabit tutmak için SG alan akımı eş zamanlı olarak azalmaktadır. Böylelikle sabit I_d için $V_1(I_f)$ ortaya konulmuş olur.



Şekil 4. 5 Deneyel düzenek ve sıfır güç faktörü karakteristiği

Bu eğrinin amacı kaçak reaktansları Potier metoduyla hesaplamaktır. Hesaplanan Potier reaktans (X_p) gerçek kaçak reaktansdan %20-30 oranında daha büyük olabilmektedir. Bu hata oranını en aza indirmek için terminal gerilimini %115-120 arasında arttırmak gerekmektedir. Fakat bunu her SG üreticisi sağlayamayabilir.

Bu karakteristiğe daha detaylı bakacak olursak Şekil 4.6'yı kullanılarak yaklaşık kaçak reaktans elde edilebilmektedir.

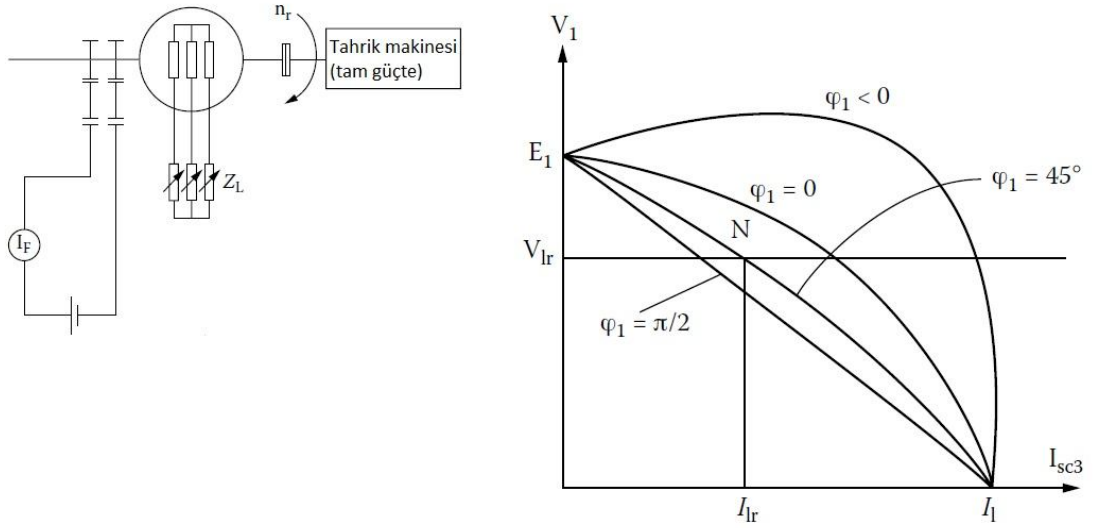


Şekil 4. 6 Kaçak reaktansın sıfır güç faktörü eğrisinden bulunması

$$X_l \approx X'_p \approx \frac{\overline{b''c''}}{I_a} \quad (4.6)$$

4.5 V-I Karakteristiği

V-I karakteristiği, dengeli yükte, sabit alan akımında, sabit güç faktörü ve hızda yük akımına karşı terminal gerilim değişimini vermektedir. V-I eğrisinin gerçekten tam yükte elde edilebilmesi gereklidir. Bu yüzden küçük ve orta güçlü SG üreticileri bu eğriyi sağlayabilirken büyük güçler için sahada devreye alma aşamasında bu eğri elde edilmektedir. Şekil 4.7'den görüldüğü üzere rezistif ($\varphi_1 = 0$) ve rezistif-endüktif ($\varphi_1 > 0$) yük için, gerilim artan yük (I_1) ile düşmekte, ve rezistif-kapasitif ($\varphi_1 < 0$) yük için önce artmakta sonra düşüşe geçmektedir.

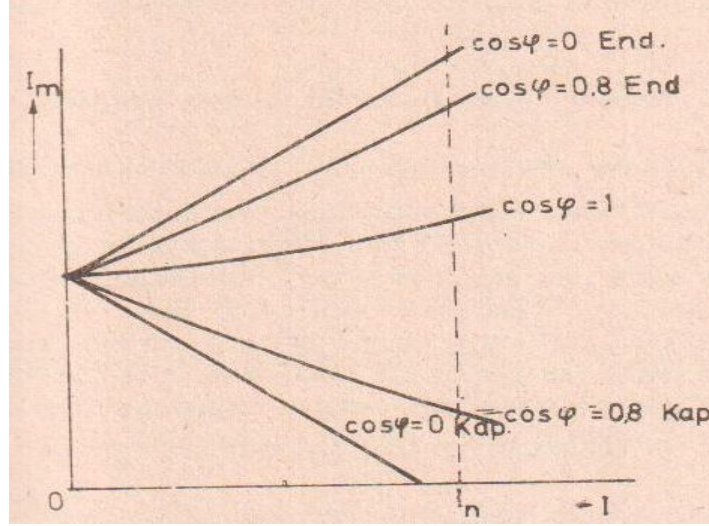


Şekil 4. 7 Deneysel düzenek ve V-I karakteristiği

Yük karakteristiği ne olursa olsun, uç gerilimi yükle sabit kalmamaktadır. Fakat genellikle işletmelerde gerilimin sabit kalması istenmektedir. SG'lerin ve birçok elektrik makinasının nominal güçleri sadece nominal gerilimlerinde sağlandığı gibi, verim ve ömürlerine gerilim değişmesi olumsuz yönde etki yapmaktadır.

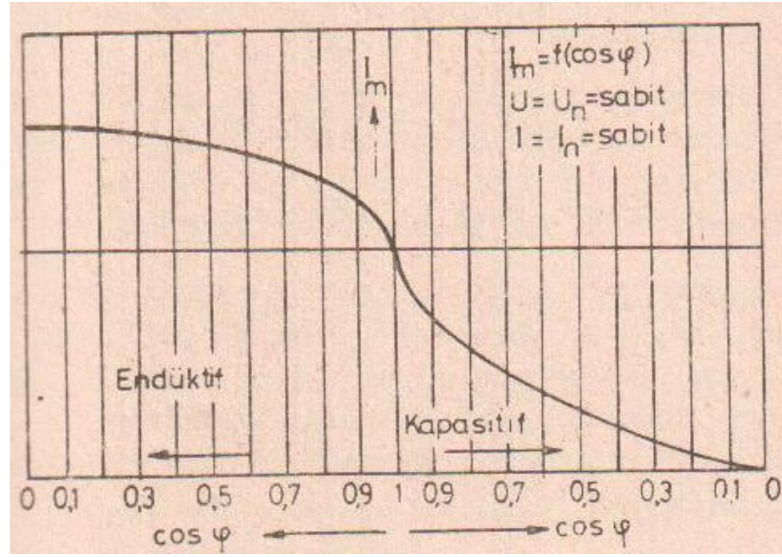
Bu nedenle tek başına çalışan bir generatörün uyarma akımını değiştirerek uç gerilimini ayarlamak gerekmektedir.

Şekil 4.8'de sabit tutulan değişik $\cos\varphi$ değerleri için ayar karakteritikleri çizilmiştir. Buradan görüleceği üzere, uç gerilimini sabit tutmak için, kapasitif yüklerde uyarma akımını, boştaki çalışma durumundakine oranla küçültmek ve endüktif yüklerde büyültmek gerekmektedir. Omik yükte ise, uyarma akımını endüktif yüklere oranla az bir miktar arttırmak uç gerilimini sabit tutmaya yetmektedir.



Şekil 4. 8 Senkron generatörün ayar karakteristikleri

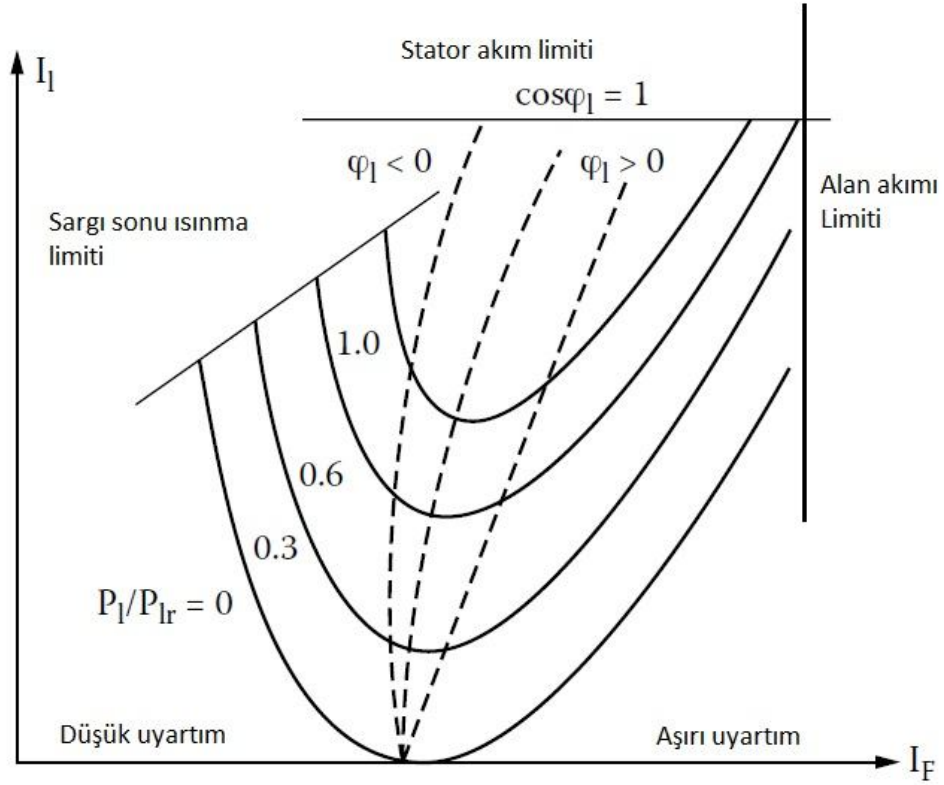
Şekil 4.9 ise sabit bir yük akımı için değişik $\cos \varphi$ lerde kutup gerilimini sabit tutarak uyarıma akımının nasıl değiştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



Şekil 4. 9 Senkron generatörde uyarıma akımının $\cos \varphi$ ye bağlı olarak değişimi

4.6 V Eğrisi

V eğrileri, hız ve stator gerilimini nominal değerlerde tutarak, çeşitli güç faktörleri için görünür gücün (MVA) uyarıma akımının bir fonksiyonu olarak çizilmesi ile ortaya konulan bir krakteristiklerdir.

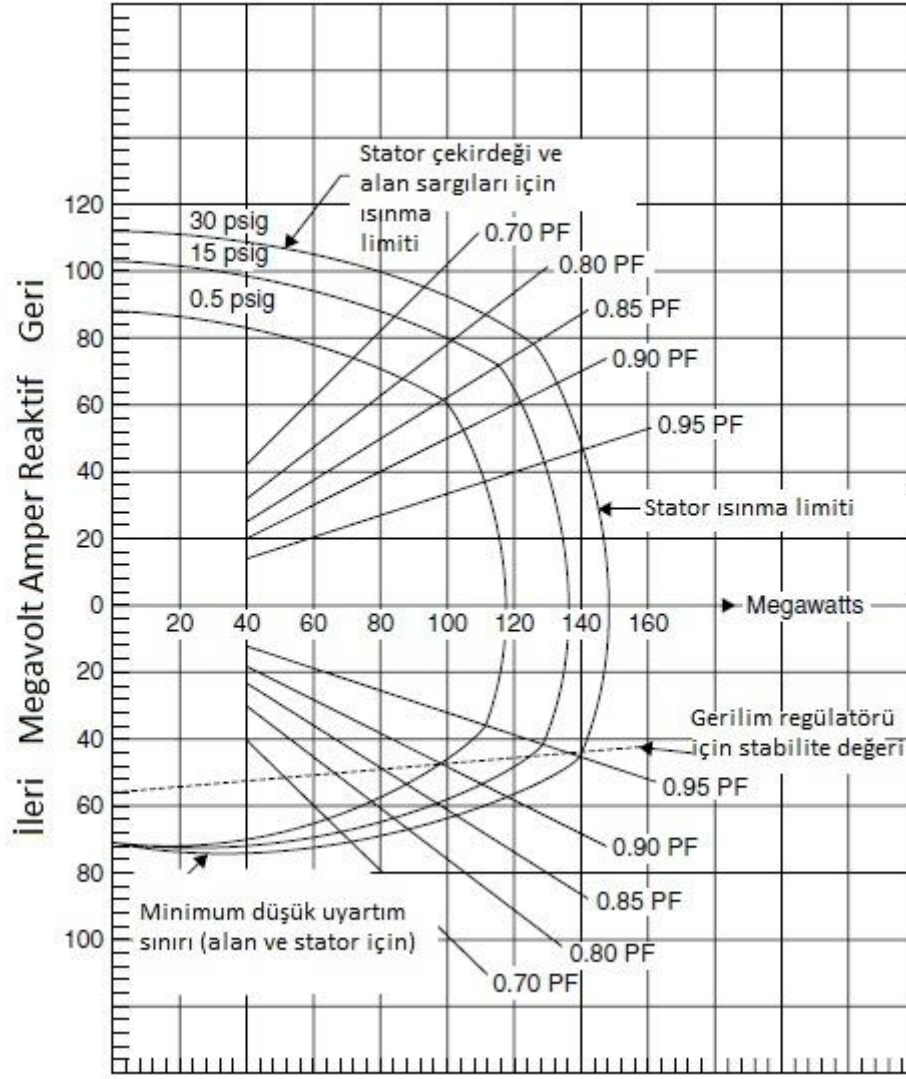


Şekil 4. 10 Senkron genertöre ait V eğrisi

4.7 Kapasite Eğrisi

Kapasite eğrisi nominal gerilimde aktif ve reaktif güç değerlerini kullanarak SG'nin görünür yük kapasitesini ortaya koymaktadır. X eksenı görünür gücü, y eksenı reaktif gücü ve çember oluşturan dış kısımdaki eğri de sabit bir görünür gücü (MVA) temsil eder.

Eğride birçok noktada makineyi sınırlayan bölgeler belirtilmiştir. Bunlar uyartım akımı ve stator akımından dolayı ortaya çıkan ısınma limitleridir. Generatörün bu sıcaklık limitleri arasında çalışması makinenin ömrü açısından önemlidir [8].



Şekil 4. 11 Senkron generatöre ait örnek kapasite eğrisi

Türbin ve generatör birlikte çalışacak şekilde dizayn edilmektedir. Generatör gücü türbinden daha büyük seçilerek her koşulda sorunsuz olarak mekanik gücü elektriki güce çevirmelidir.

Diğer bir önemli konu ise düşük uyarım sınırında çalışan SG'lerin stator sargı sonlarında eddy akımları oluşarak ısınmaya sebebiyet vermesidir. Bunun sebebi düşük uyarım bölgesinde alan akımı ve stator akımı arasındaki açının 90° den küçük olması ve bu yüzden de sargı sonlarındaki alan akımlarının birbirine eklenmesidir. Fazla kapasitif çalışan bölgelerde bu ısı tehlike ortaya çıkmaktadır ve belirli bir sınırın altına inilmesi önlenerek generatör korunmaktadır.

BÖLÜM 5

SENKRON GENERATÖRDE İŞLETME KOŞULLARI

Bir santral için generatör seçilirken birçok değer göz önünde bulundurulmalıdır. Özellikle dikkat edilmesi gereken başlıca özellikler çizelge 5.1’de listelenmiştir.

Çizelge 5. 1 Senkron generatör etiketinde belirtilen değerler

Görünür Güç	MVA	Megavolt-ampere
Gerçek Güç	MW	Megawatt
Reaktif Güç	MVAR	Megavolt-ampere Reaktif
Güç faktörü	pf	
Stator Terminal Gerilimi	V_t	AC Gerilim
Stator Akımı	I_a	AC Akım
Uyarma Gerilimi	V_f	DC Gerilim
Uyarma Akımı	I_f	DC Akım
Frekans	Hz	Hertz
Hız	rpm	Dakikadaki devir sayısı
Aşırı hız kapasitesi	rpm	Dakikadaki devir sayısı
Soğutucu Akışkanın Basıncı	bar	
Soğutucu Akışkanın Sıcaklığı	°C	
Stator Sargı İzolasyon Sınıfı	F,B,H...	
Stator Sargısı	F,B,H...	

Sıcaklık Sınıfı		
Rotor Sargı İzolasyon Sınıfı	F,B,H...	
Rotor Sargısı Sıcaklık Sınıfı	F,B,H...	
Kısa Devre Oranı	%	

5.1 Senkron Generatör İşletme Modları

5.1.1. Devre Dışı Kalma

Generatör sıfır hızda, güç sistemine bağlanmamış (generatör kesicisi açık) ve enerji üretmiyor haldedir. Sistem durmaya giderken türbin generatörden önce durdurulmaktadır.

5.1.2. Düşük Hız

Generatör düşük hızda işletilmektedir. Düşük hızda döndürülmeye iki durumda ihtiyaç vardır. Bunlardan biri, generatör-türbin sistemi ilk ivmelenirken daha yumuşak bir kalkış sağlanması, diğeri de generatör devreden çıkarken, soğutma amaçlıdır. Soğutma amaçlı olarak bir süre türbin ve generatör birlikte düşük hızda döndürülmektedir. Bunun sebebi dönerek soğutma sağlanamadığı takdirde rotorda burkulmaların meydana gelmesidir. Bu hızlar yaklaşık 3-50 rpm arasında olmaktadır.

5.1.3. Hızlanma ve Yavaşlama

Yavaş hızda dönen generatörü nominal devrine çıkartmak ya da nominal devirde çalışan generatörü daha yavaş bir hıza indirgeme eylemidir.

Örnek olarak gaz türbinlerinde kullanılan iki ayrı kalkış tipi verilebilir,

5.1.3.1. Ek kalkış motoru kullanılması

Generatör-türbin sisteminin ataletini yenmesi için aynı mili çeviren ek bir kalkış motoru bulunmaktadır. Sistem ataletini yendikten sonra türbin ateşlenerek generatörün nominal devire çıkması sağlanır.

Örnek olarak 50 MW bir gaz türbini için 150 kW'lık bir kalkış motoru gerekmektedir.

5.1.3.2. Generatörün motor olarak çalıştırılması

Bu tip sistemlerde generatörün sargılarına başka bir kaynak yolu vasıtasıyla v/f kontrolü yapan bir güç elektroniği hız kontrol cihazı bağlanır. Generatör, ana generatör kesicisi açık durumdayken başka bir kesici üzerinden VFD yardımıyla motor olarak çalıştırılır ve generatör-türbin sisteminin ataleti ortadan kaldırılarak türbini ateşlenmeye hazır hale getirilir.

Bu iki metod da günümüzde birçok generatör-türbin üreticisi (GE-SIEMENS) tarafından kullanılmaktadır. Büyük güçlerde generatörün motor olarak çalıştırarak ivmelenme sağlanmaktadır.

5.1.4. Açık Devre Çalışma

Bu durumda SG nominal devirde dönerken uyarım sargılarına gerekli miktarda akım uygulanarak generatör nominal gerilimine getirilir ve güç sistemine bağlanmadan hazırda bekletilmektedir.

5.1.5. Senkronizasyon ve Yükleme

Açık devre çalışma sırasında, generatör nominal hızında ve gerilimindedir. Sinüs formundaki generatör çıkış gerilimi sonsuz baradaki gerilim ile birebir örtüşmeli ve aynı frekansa olması gerekmektedir.

Frekans ve gerilim dengesi açık devre durumunda sağlanmaktadır. Faz kaydırma işlemi senkronoskop ile yapıldıktan sonra tüm senkron koşulları sağlanır ve generatör kesicisi kapatılarak SG güç sistemine bağlanır. Bu durumdan sonra aktif güç ayarı (MW) türbine uygulanan moment ile ayarlanır ve gerilim-reaktif güç ayarı uyarı akımı ile yapılmaktadır.

Çizelge 5. 2 Senkron generatörün devreye alma aşamaları

	Generatör Kesicisi	Alan Sargıları Kesicisi	Rotor Hızı (rpm)	Uç Gerilim
Devre Dışı	Açık	Açık	0	0
Düşük hız	Açık	Açık	$0 < \text{rpm} < 50$	0

Hızlanma/Yavaşlama	Açık	Kapalı	50 < rpm < nominal hız	0
Açık Devre	Açık	Kapalı	Nominal hız	Nominal ve ya daha düşük güç
senkronizasyon	Kapalı	Kapalı	Nominal	Nominal $\pm 5\%$

5.2 Uyarım ve Gerilim Regülasyonu

Uyarım sistemi alan sargılarını kontrollü bir dc gerilim ile beslemektedir. Uyarım sisteminin boyutlandırılması SG'nin çıkış gücüne, akımına ve gerilimine bağlı olduğu gibi makinenin termal limitleriyle de bağlantılıdır (aşırı uyarım, düşük uyarım gibi).

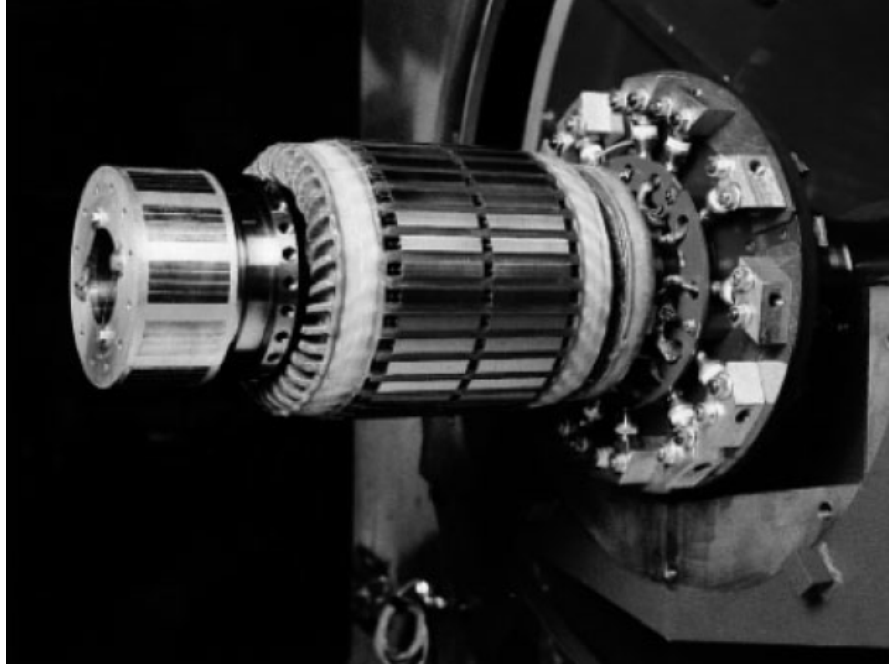
Eski turbogeneratörlerde uyarım sistemi olarak komütatörlü tipte DC generatör kullanılmaktaydı. Günümüzde daha modern sistemler ortaya çıkmıştır. Bunlardan bazıları,

- Aynı mile akuple alternatör ve diyod doğrultucu
- Generatör veya güç sisteminin herhangi bir noktasından beslenen trafo ve bu trafo yardımıyla beslenen tristörlü doğrultucu
- Aynı mile akuple ve stator sargıları rotoru besleyen alternatör (çıkış sargılarındaki akım yarı iletken doğrultucular yardımıyla doğrultulmaktadır)

Uyarım sistemlerinin asıl amacı, uygun dc gerilim seviyesinde alan sargılarını beslemek, güç sistemine gerekli görünür gücü, uygun gerilim ve güç faktörü ile sağlamaktır. Ayrıca uyarım sistemi gerekli maksimum alan gerilimini sağlayacak kapasitede olmalı ve bu gerilimi belirtilen süre boyunca sağlayabilmelidir. Bu gereklilik gerilim cevap süresi ile ilişkilidir. Bu oran uyarım sistemi şartnamelerinde özellikle belirtilmektedir.

Bu özelliğin tanımı, uyarım geriliminin ayarlanması gerektiği durumlarda 0,5 sn içerisinde uyarım sistemi geriliminin değişme oranıdır.

Generatör-türbin miline akuple uyartım sistemi, türbin sistemindeki vibrasyon ve sıcaklık dolayısıyla meydana gelen genleşmelerden etkilenmeyecek şekilde dizayn edilmektedir.



Şekil 5. 1 Fırçasız uyartım düzeneğine sahip rotor

5.2.1. Kalıcı Hal Durumunda Uyartım Sistemi Kontrolü

Türbin vanası sabitken, generatörün aktif gücü de sabit olmaktadır. Böyle bir durumda güç sistemi bileşenlerinin de sabit olduğunu düşünürsek, uyartım gerilimindeki bir artış stator gerilimini arttırmaya çalışacaktır. Bu değişim güç faktörünü değiştirecek ve dolayısıyla generatör tarafından şebekeye sağlanan reaktif gücü arttıracaktır. Kısacası aktif güç ayarı türbin kontrol vanası (governor), reaktif güç ve gerilim dengesi ayarı uyartım sistemi ile sağlanmaktadır. Gerilim kontrolü, uyartım sistemi içerisinde yer alan gerilim regülatörü ile sağlanmaktadır.

Alan sargıları için bir yüksek değer bir de düşük değer limiti belirlenmektedir. Yüksek değer, alan sargılarının ısınması ile ilişkili olup, düşük alan akımı değerleri stator sargı sonlarında ısınmaya sebep olmakta ve SG'nin kararlı hal durumundan çıkmasına neden olmaktadır.

Ayrıca uyartım sistemi V/f kontrolü yaparak generatörü aşırı akı üretimine karşı korumaktadır.

$$B_{max} \propto \frac{V}{Hz} \quad (5.1)$$

Akı limitlerinin üstüne çıkıldığında yüksek eddy kayıpları ve sargılarda fazla ısınma meydana geleceğinden makinenin ömrü kısalmaktadır [7].

5.2.2. Geçici hal durumunda uyarım sistemi

Uyarım sistemi, güç sistemi kararlılığı için hızlı bir şekilde gerekli alan gerilimi ihtiyacını karşılayacak kapasitede olmalıdır. Eğer bir SG uzun bir iletim hattından sonra tüketim noktalarına bağlanıyorsa, iletim hattının yüksek reaktansından ötürü kararlılığı sağlamak zor olmaktadır. Bu noktada, gerilim cevap hızı yüksek bir uyarım sistemi tedarik etmek yeni bir iletim hattı çekmekten çok daha uygun bir çözüm olmaktadır.

GÜÇ SİSTEMLERİNDE SENKRON GENERATÖR KORUMASI

Bir elektrik şebekesi için en önemli konulardan biri koruma sistemidir. Koruma fonksiyonu bir sistem olarak tanımlanır çünkü içerisinde birçok cihaz ve algoritmayı (koordinasyon) barındırmaktadır.

İyi bir koruma sistemi için röle ayarları uygun yapılmalı ve aralarındaki koordinasyon detaylı incelenerek ortaya konulmalıdır. Yanlış ayarlar, koruma fonksiyonunu gerekli yerlerde devre dışı bırakabilir ya da gereksiz açtırmalara sebep olarak sistemi enerjisiz bırakabilmektedir.

SG güç sistemlerindeki en kritik ekipmanlardan biridir. Aynı derecede olmasa da yükseltici transformatörler de büyük önem arzederler. Bu sebeple bazı koruma fonksiyonları bu iki sistem için birlikte çalışmaktadır.

SG'de birincil korumalar için kullanılan bilgiler akım, gerilim ve akıdır. Çoğu zaman vibrasyon da bunların içine dahil edilebilir. Diğer korumalar genellikle izleme amaçlıdır.

6.1 Senkronizasyon ve Senkron Kontrol Rölesi (15-25)

Bu fonksiyonun amacı generatörü nominal hızına otomatik olarak çıkartıp sisteme senkron etmektir. Senkronizasyon için, generatör terminal gerilimi ve şebeke gerilimi birbirine eşit olmalıdır ki, generatör kesicisi kapatılabilsin. Ayrıca faz açılarının ve kaymanın (frekans farkı) belirli sınırlar içinde bulunması gerekmektedir. Bu iki önemli görevi 15 ve 25 fonksiyonuna sahip röleler üstlenir.

Eskiden generatörleri nominal devire getirmek manuel olarak kontrol edilmekteydi ve senkron anında kesicinin kapatılması başlı başına bir sorun teşkil etmekteydi. Günümüzde bu iki fonksiyonlu röleler ile bu işlem daha da kolaylaştırılmaktadır.

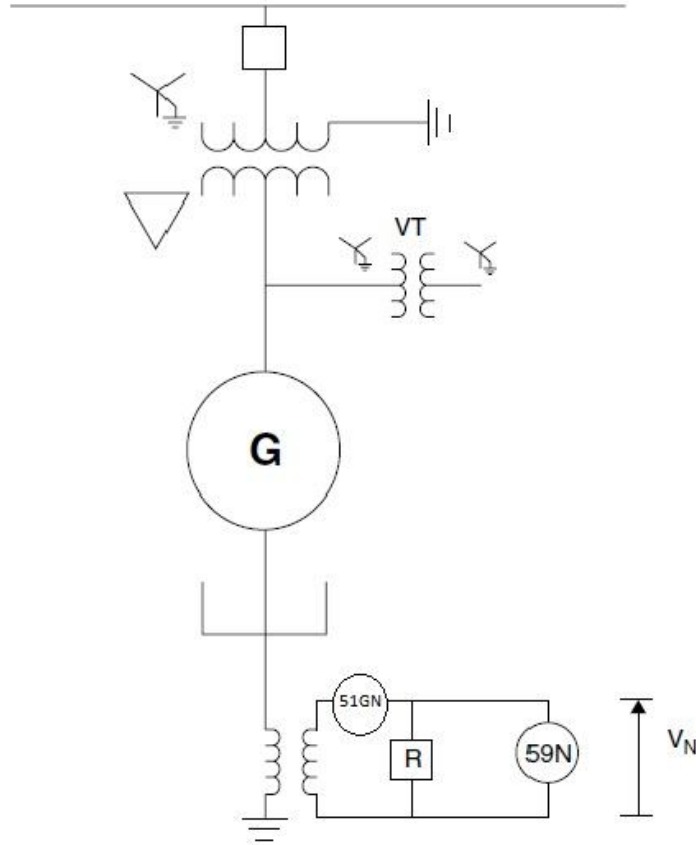
6.2 Kısa Devre Koruması (21-50-51-51V-87)

Bu tip koruma fonksiyonları, sargı çerisinde ve ya dışında oluşabilecek kısa devrelere karşı generatörü korumaktadırlar. Sargı dışı denildiğinde, SG'nin bağlı olduğu barada, yükseltici transformatörlerde, kabloda, izoleli faz baralarında (IPB) meydana gelen kısa devreler olarak düşünülebilir.

Büyük ünitelerde IPB, generatör ve trafo arasında meydana gelebilecek kısa devreleri faz-toprak hatası ile sınırlar ve yüksek akımlar üreten büyük güçlü SG lerin yükseltici transformatör ile bağlantısını sağlar. Çünkü çok büyük güçlerde uygun kesitli bakır veya aliminyum kablo bulunması çok zorlaşmaktadır.

Generatörün yıldız noktasının yüksek empedans üzerinden topraklanması sebebiyle faz-toprak arızalarında çok yüksek hata akımları ortaya çıkmamakta fakat generatör içerisindeki sargılarda meydana gelen bir faz-toprak arızası sargıları zedeleyerek bir faz-faz arızasına sebep olabilmektedir.

51V, gerilim kontrollü aşırı akım rölesidir. Gerilim farkına bakarak düşük hata akımlarını yakalar. Akım korumalı fonksiyonlar ihtiva eden rölelerin yedek koruması gerilim değerine göre çalışan röle fonksiyonlarıdır. Ya da tam tersi de olabilmektedir. Örnek olarak Şekil 6.1'de aşırı gerilim (59N) korumasına ek olarak aşırı akım (51GN) koruması yapılmıştır.



gerilim trafosunun arızalarını veya enerjisiz bara durumlarını algılamak için kullanılmaktadır.

6.5 Ters Güç Akışı (Motor çalışma) Koruması (32)

Bu koruma fonksiyonu , güç sisteminden generatöre doğru bir güç akışı olduğunda generatörü devre dışı bırakmaktadır. Böyle bir arıza durumunda alan durumuna göre generatör senkron veya endüksiyon motoru gibi çalışabilmektedir. Bu durumda rotorda kayma frekansı akımları oluşur, damper sargıları zedelenir.

Buhar türbinlerinde, gaz türbinlerine oranla bu koruma daha hassas yapılmalıdır. Çünkü buhar türbinlerinde generatör gücünün çok düşük bir yüzdesi ile motor olarak çalışabilmektedir. Gaz türbinlerinde bu oran %50 ye kadar çıkmaktadır.

Genellikle bu durum türbinden sağlanan gücün Türbin-generatör ünitesinin kayıplarından bile daha az olduğu durumlarda ortaya çıkar. Ayrıca buhar türbinlerinde kanatların meydana getirdiği ventilasyon kaynaklı ısıltürbinler için tehlikelidir. Buhar vanasının kapatıldığı ve generatörün motor olarak çalıştığı durumlarda bu ısılar üst seviyelere çıkarak tehlikeli arızalara sebebiyet verebilmektedir [9]. Motor çalışmanın önlenmesi sadece generatör değil, türbin koruması için de önemli bir fonksiyondur.

6.6 Alan Kaybı Koruması (40)

Uyartım alanı kaybı hatası, alan sargılarını besleyen devrenin kesilmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Alan gerilimi kesildiğinde generatör nominal hızın %3-5 üzerine çıkar. Makine şebeke ile senkron olduğundan gerilimini düşürememekte ve şebekeden reaktif güç çekmeye başlamaktadır. Bu durumda generatör de endüksiyon motorları gibi çalışacak ve şebekeden çektiği aşırı VAR güç ile stator sargılarında aşırı ısınmalar oluşacaktır. Bunu önlemek için çeşitli yöntemler kullanılarak 40 fonksiyonu devreye girmektedir.

6.7 Dengesiz Stator Akımı Koruması (46)

Birçok sebep stator terminallerinden dengesiz üç faz akımı çekilmesine sebep olabilmektedir. Bunlara örnek olarak, dengesiz yükler, tek kutbu açılmış bir kesici, açık devreler verilebilir.

Dengesiz yükler, rotor çevresinde sıfır bileşenli akımlar oluşturmaktadır. Bu da rotor ve rotor ekipmanlarında aşırı ısınmaya sebep olur. ANSI, IEEE ve IEC standartlarında minimum dengesiz yüklenebilme limitleri belirtilmektedir.

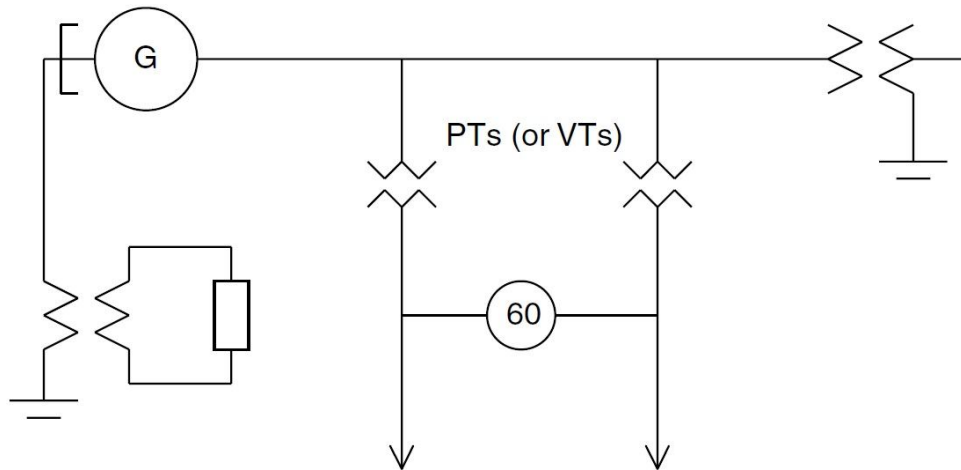
6.8 Stator Ve Rotor Termal Koruması (49)

Stator sargıları, stator gövdesi ve soğutucu olarak kullanılan akışkanın (su, hava...) sıcaklığı direkt olarak ölçülebilmektedir. Fakat rotor sıcaklığı alan sargı akımı ve gerilimi ölçülerek hesaplanır. Genellikle aşırı yüklenme, dengesiz yüklenme ve soğutucu akışkanda meydana gelen sorunlardan ötürü sıcaklık artışı meydana gelmektedir. Sıcaklık limitleri ve soğutma yöntemleri için uygun limitler seçilmelidir (ANSI, IEEE, IEC standartlarından). Örnek olarak, standartlara uygun olarak tasarlanmış bir SG %130 aşırı yüklendiğinde sorunsuz olarak 60 saniye boyunca çalışmaya devam etmektedir.

Stator sargılarındaki RTD (sıcaklık sensörleri) direnç ölçme yoluyla sıcaklığı belirlemeye yararlar. Minimum her faz sargısına 2 adet konularak yedekleme yapılmaktadır. Amerikan standartlarına göre 25°C’de bir RTD 25 ohm değerini göstermektedir.

6.9 Gerilim Dengesi Koruması (60)

Bu fonksiyonun amacı, gerilim trafolarında meydana gelen bir arızadan dolayı diğer fonksiyonların gereksiz yere çalışarak kesiciyi açtığını önlemektir. Örnek olarak gerilim trafolarının sekonder taraflarındaki sigortalarının atması verilebilir.



Şekil 6. 2 Gerilim dengesi koruması

Şekil 6.2'den görüldüğü üzere bu fonksiyon iki gerilim transformatörü arasına konularak herhangi bir ölçü transformatörü arızası oluştuğunda bunu algılamakta ve ana koruma fonksiyonlarını bloke ederek alarm vermektedir. Daha çok günümüzde yeni teknoloji ürünü olan sistemlerde kullanılmaktadır.

6.10 Kesici Hatası Koruması (62B)

Bir arıza durumunda kesicinin açmaması ek olarak diğer arızaları da beraberinde getirmektedir. Örnek olarak sıfır bileşen akımlarının oluşması ve motor çalışma gösterilebilir. Çeşitli sebeplerden ötürü kesici açmamışsa, 62B fonksiyonu bunu algılayarak ikincil koruma olarak üst taraftaki başka bir kesiciyi açtırma yoluna giderek arızayı temizlemeye çalışmaktadır.

6.11 Rotor-Toprak Arıza Koruması (64F)

Bu arızanın ortaya çıkmasında aşağıdaki olaylar sebep olmaktadır,

- Dengesiz hava aralığı akısı ve bunun meydana getirdiği rotor vibrasyonları
- Vibrasyonlardan dolayı rotorda meydana gelen dengesiz ısınmalar
- Senkron generatörün değişen reaktif güç ihtiyacı ve uç gerilim değeri

6.12 Yüksek/Düşük Frekans Koruması (81)

Tamamen ve ya kısmen oluşan yük düşümü ve aşırı yüklenme durumlarında ortaya çıkmaktadır. Örnek olarak %30'luk bir yük düşümü için, governör %5'lik bir düşüş karakteristiği göstererek 1,5%'luk bir hızlanmaya sebep olmaktadır. Bu fonksiyon ile devir sayısındaki ani değişimlere karşı bir koruma sağlanmaktadır.

6.13 Senkronizasyon Kaybı Koruması (78)

Senkron generatörler güç sistemindeki dalgalanmalardan dolayı hızlanmak ve ya yavaşlamak isteyebilirler. Bu durumda kontrol sistemi SG'yi sabit devirde tutmaya çalışacaktır fakat ufak sebeplerden ötürü dahi makine senkronizasyon kaybına uğrayabilmektedir.

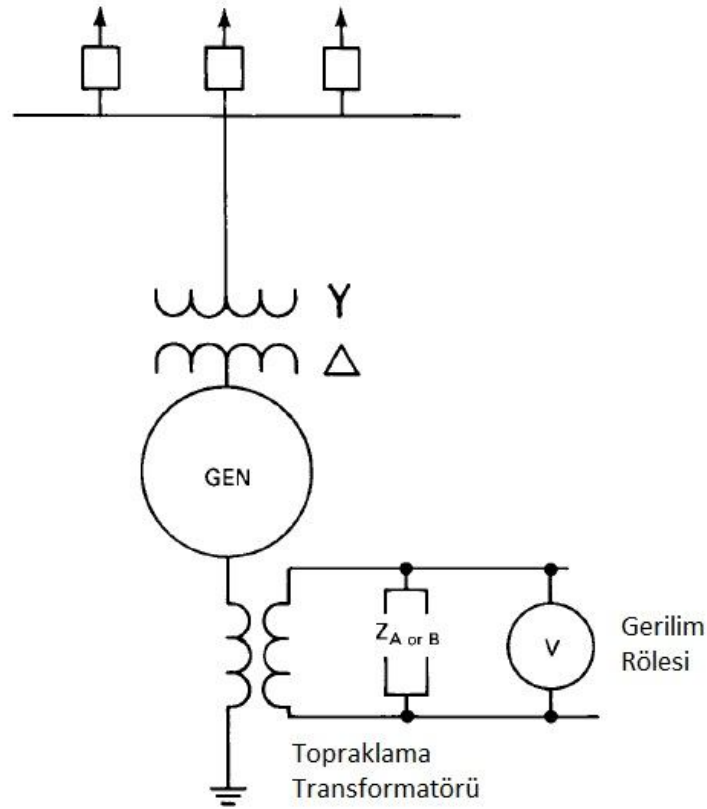
Senkronizasyon kaybı stator ve rotor kısımlarında mekanik zorlanmalar oluşturarak hem sargılarda hem de çekirdek kısımlarında büyük hasarlar oluşturabilir. Kaymanın meydana geldiği ilk anda devreyi kesmek SG’de meydana gelebilecek büyük titreşimleri önlemektedir.

6.14 Senkron Generatörlerin Topraklanması

Senkron generatörlerin topraklanmasının amacı,

- İç kısımda oluşan faz-toprak arızalarının sebep olacağı hasarı minimuma indirmek
- Harici kısımlarda oluşabilecek faz-toprak arızalarının yaratacağı mekanik zorlanmaları minimuma indirmek
- Generatör izolasyonunda meydana gelebilecek geçici aşırı gerilimleri sınırlamak
- Aynı gerilim seviyesindeki diğer koruma ekipmanlarıyla koordinasyonu sağlayarak generatörü korumak

Orta ve büyük güçlü yuvarlak kutuplu senkron generatörler genel olarak güç sistemlerine direkt olarak bir yükseltici tip transformatör üzerinden bağlanmaktadır. Büyük çoğunlukta da yıldız noktalarını topraklarken, topraklama transformatörü ve direnç kullanılmaktadır.



Şekil 6. 3 Senkron generatörün yıldız noktasının transformatör ve direnç yardımıyla topraklanması

Bu direnç nispeten küçük değerli fakat büyük güçlere dayanıklı yapıda seçilmektedir. Toprak transformatörünün primer akımı generatörün gücüne göre 5-15 A arasında bir değerde sınırlanmaktadır [10]. Geçici durumlarda gerilim yükselmeleri, uygun direnç seçimi ile belirli değerlerde sınırlanır.

Nötr transformatörünün primer gerilimi, generatörün faz-toprak arası gerilimine eşit ve ya biraz daha büyük olmalıdır. Örnek olarak; 15-22 kV arası gerilim seviyesindeki generatörler için 14.4 kV 'luk, 6.3-15 kV arası gerilim seviyesindeki generatörler için 6640 V'luk primer gerilimine sahip transformatörler kullanılmaktadır. Sekonder taraf genellikle 115 ve ya 240 V seçilmektedir.

BÖLÜM 7

SENKRON GENERATÖRLERİN TAHRİK EDİLMESİNDE KULLANILAN MAKİNELER

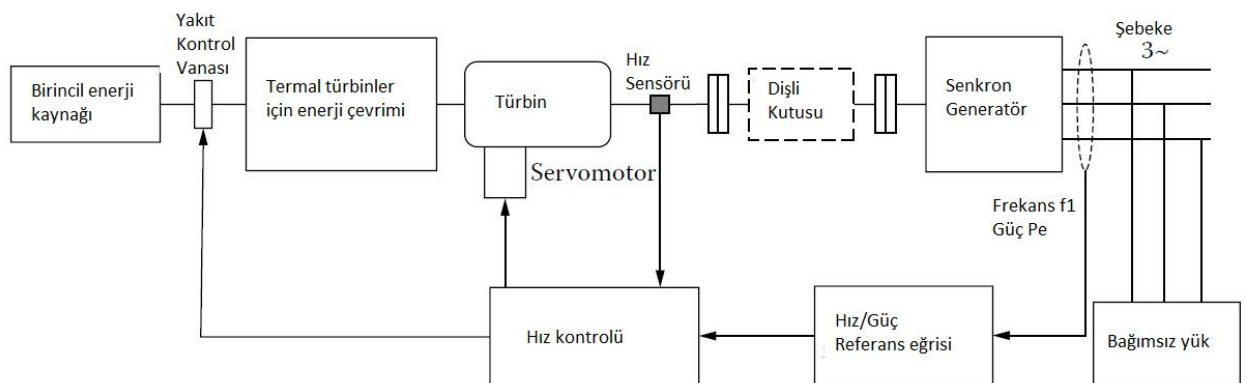
Senkron generatörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedirler. Gerekli mekanik enerjiyi millerine akuple olan tahrik makinelerinden (türbinlerden) alırlar.

Mekanik enerji elde etmek için de daha çok fosil yakıtlar (kömür, yağ, doğal gaz) ve buhar kullanılmaktadır. Gaz türbinleri ve buhar türbinleri, yuvarlak kutuplu senkron generatörlerin tahriğinde kullanılan başlıca makinelerdir.

Temel olarak fosil yakıtlar yanma odasında yakılarak termal enerji elde edilir. Termal enerji başka bir akışkana aktarılarak tahrik makinelerinde mekanik enerjiye çevrilirler. Kömür ve nükleer yakıtlı türbinler için buhar, gaz türbinleri için hava ile karışmış gaz transfer akışkanıdır.

Çizelge 7. 1 Tahrik makinelerinin sınıflandırılması

Yakıt	Transfer Akışkanı	Güç (tek bir ünite için)	Uygulama Alanı	Türbin Sınıfı	Not
Kömür ve ya Nükleer Yakıt	Buhar	1500 MW'a kadar	Güç Sistemlerinde	Buhar Türbinleri	Yüksek Hız
Gaz ve ya Yağ	Gaz(yağ) + hava	kW mertebelerinden birkaç yüz MW'a kadar	Büyük ve dağıtılmış güç sistemlerinde, ada modu uygulamalarında	Gaz türbinleri, dizel makineler, içten yanmalı makineler	Döner hareketli ve aynı zamanda pistonlu maknelerde de kullanılabilir
Su Enerjisi	Su	1000 MW'a kadar	Büyük ve dağıtılmış güç sistemlerinde, ada modu uygulamalarında	Hidrolik türbinler	Orta ve düşük hızlarda, 75 rpm
Rüzgar Enerjisi	Hava	5MW'a kadar	Dağıtılmış güç sistemlerinde, ada modu uygulamalarında	Rüzgar ve ya dalga türbinleri	10 rpm'den düşük hızlarda



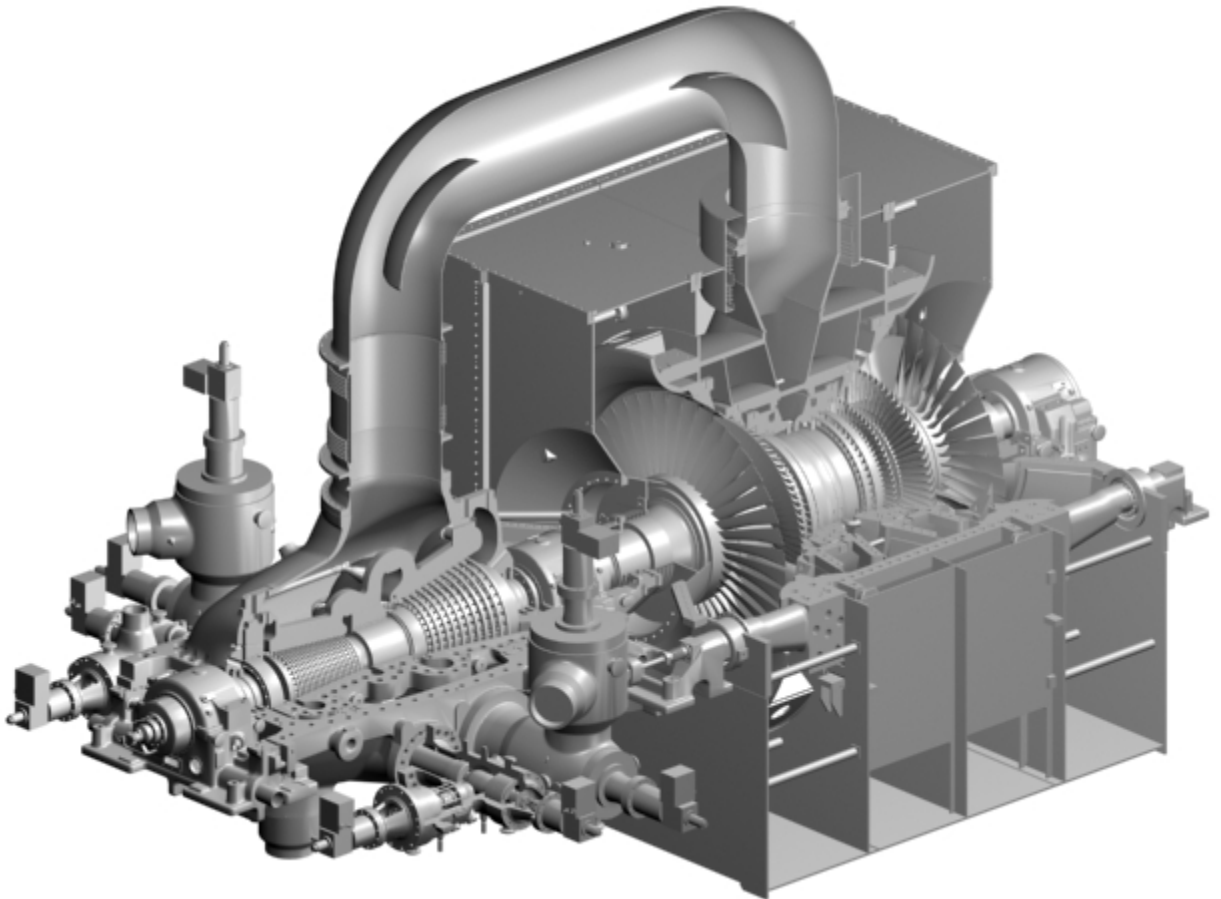
Şekil 7. 1 Türbin ve generatör sistemi

Tahrik makinesinin kontrolü, generatörün frekans ve güç eğrilerine göre sağlamaktadır. Genellikle bu kontrol, akışkanın debisini ayarlayan bir kontrol vanası ile sağlanır. Bu vanalar türbine uygulanan mekanik gücü kontrol etmektedirler.

7.1 Buhar Türbinleri

Kömür, yağ gibi yakıtlar yüksek basınç ve yüksek sıcaklıkta buhar elde etmek için kazanlarda yakılırlar. Buhardaki potansiyel enerji daha sonra aksiyal türbinlerde mekanik enerjiye çevrilirler. Buhar türbinlerinde genellikle 3 farklı basınç kademesi bulunmaktadır,

- Yüksek basınç (HP)
- Orta Basınç (IP)
- Düşük Basınç (LP)

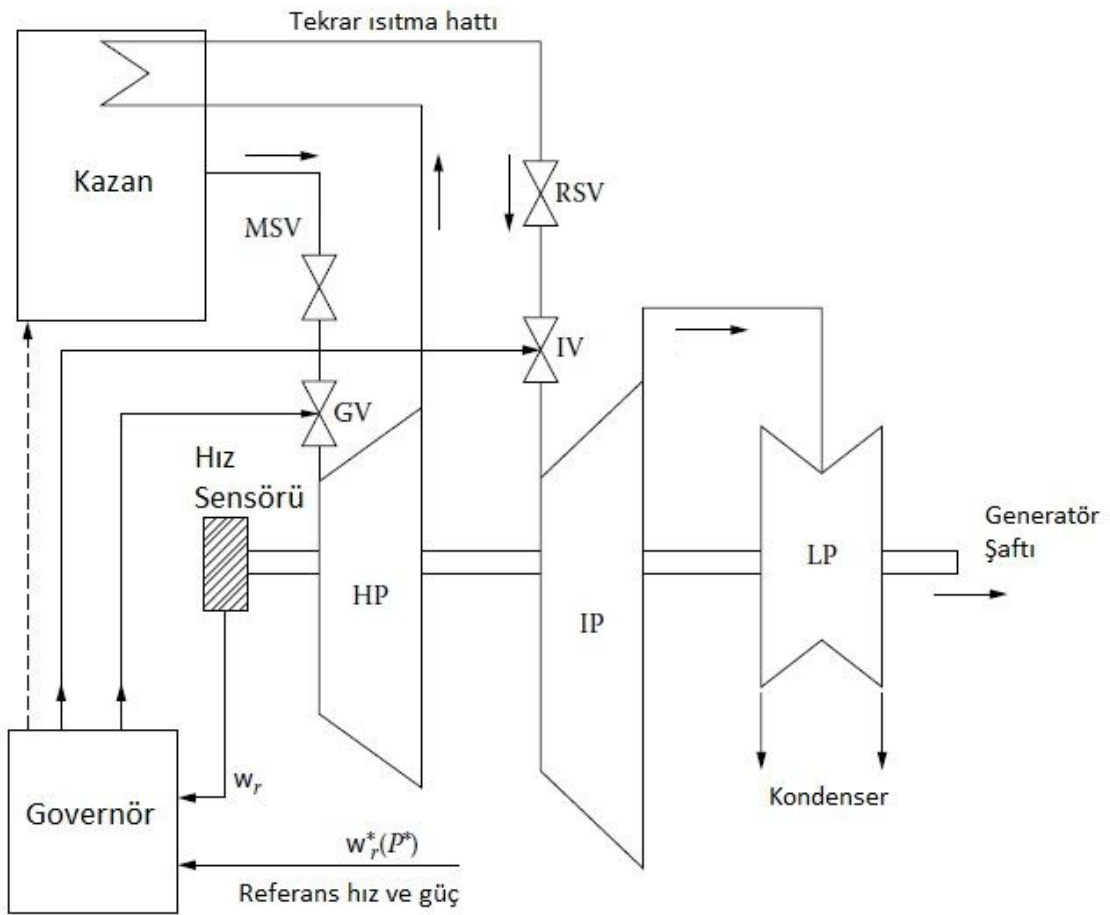


Şekil 7. 2 Üç basınçlı buhar türbini

Türbin içerisindeki kanat yapıları ve büyüklükleri bu üç kademeye göre farklılık göstermektedir. Kazandan çıkan ve yüksek basınç-sıcaklık değerine sahip olan buhar ilk

olarak yüksek basınç kademesinden buhar türbinine giriş yapar ve enerjisini türbin kanatlarına çarparak kaybeder. Yoğuşan buhar, türbin çıkışında yer alan ve kondenser olarak adlandırılan bir eşanjörde toplanır (su soğutmalı ünitelerde). Daha sonra tamamen su fazına getirilerek tekrar basınçlandırılmakta ve kazana gönderilmektedir.

100 MW altındaki türbinlerde tekrar ısıtma sistemi kullanılmamakta fakat 100 MW ve üzeri türbinlerde verimi arttırmaya yönelik tekrar ısıtma (reheat) uygulanmaktadır. Bu sistemde HP türbinden çıkan buhar önce kazana gönderilip tekrar ısıtılır ve türbine orta basınç seviyesinden tekrar sokulmaktadır. HP toplam gücün %30'unu, IP %40'ını, LP %30'unu oluşturmaktadır.



Şekil 7.3 Tekrar ısıtmalı ve 3 basıncılı tek mil üzerindeki buhar türbini

Buhar türbini kontrol sistemleri birçok fonksiyonu bünyelerinde barındırmaktadırlar. Bunlardan en önemli olanları,

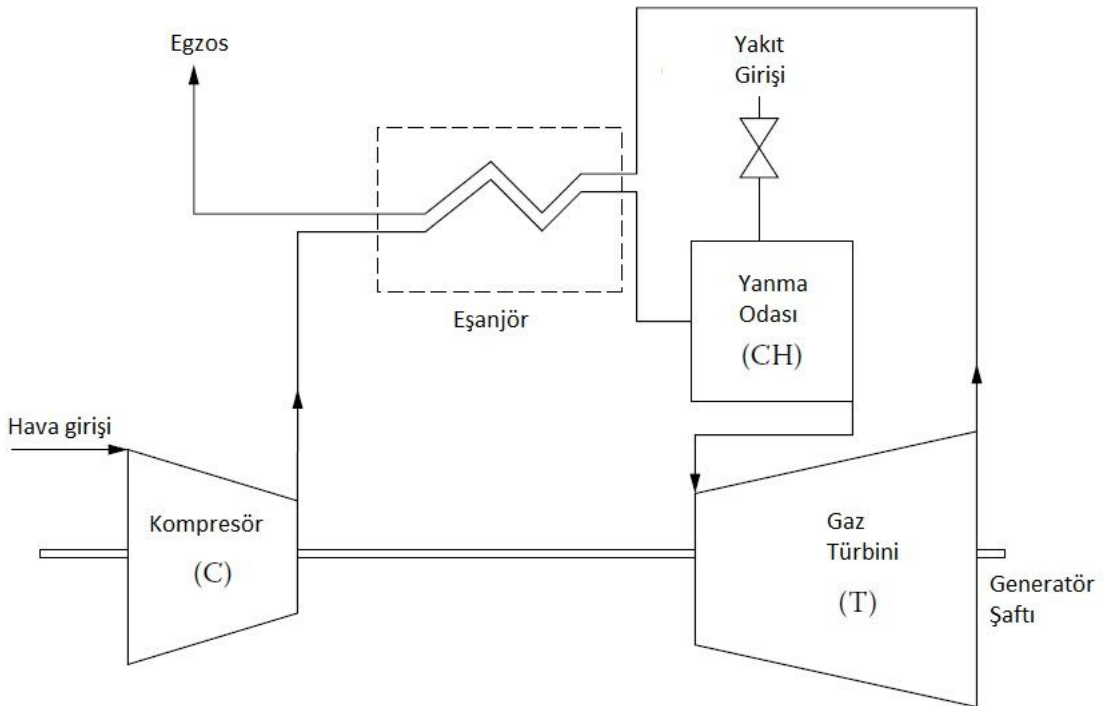
- Hız (frekans) / yük (güç) kontrolü : Kontrol vanası (GV) ile
- Aşırı hız kontrolü (IV ile)

- Aşırı hız koruması (MVS ve RVS ile)
- Kalkış ve duruş kontrolü

7.2 Gaz Türbinleri

Gaz türbinleri Doğal Gaz Kombine Çevrim enerji santrallerinde generatörün tahrik mekanizması olarak kullanılmaktadırlar. Diğer termal tipte santraller ile kıyaslandığında daha az yer kaplarlar. İlk kurulum maliyetleri düşük olmakla birlikte teslim süreleri ve devreye alma süreleri de kısadır.

Günümüzde çeşitli yakıtlar ile çalışabilen gaz türbinleri mevcuttur. Ayrıca NOx emisyon kontrol teknikleri uygulanarak çevresel yaptırımlara uyulması gaz türbinleri açısından önem teşkil etmektedir. Gaz türbinleri genel olarak kompresör, yanma odası ve türbin olarak adlandırılan üç ana kısımdan oluşmaktadırlar.



Şekil 7. 4 Gaz türbini

7.2.1. Kompresör

Günümüzde sağladığı avantajlardan dolayı santrifüj kompresörler tercih edilmektedir. Santrifüj kompresörler, havaya yüksek hız kazandıran dönen bir çarkı içerisinde

bulunduran sabit bir muhafazayla, havayı yavaşlatarak basıncını artıran, belirli sayıdaki genişleyen pasajlardan oluşmaktadır.

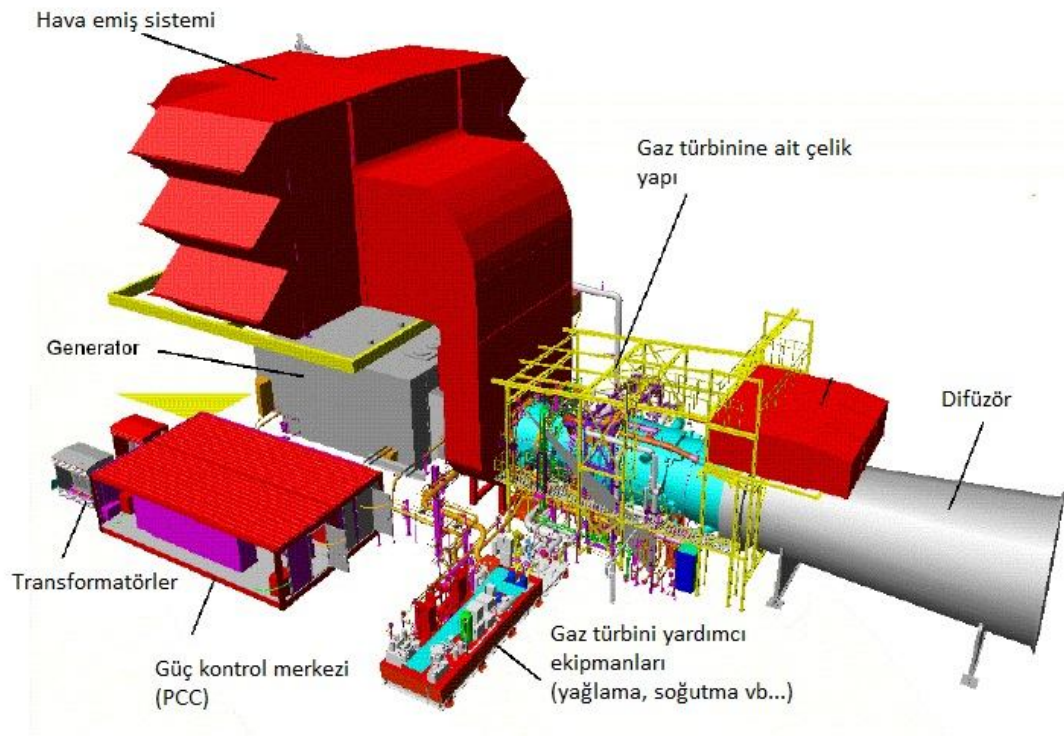
7.2.2. Yanma Odası

Gaz türbinlerinin yanma odaları, kompresör tarafından sağlanan bol miktarda hava ile yakıt sprey nozullarından püskürtülen yakıtı karıştırarak yakılan bölümlerdir.

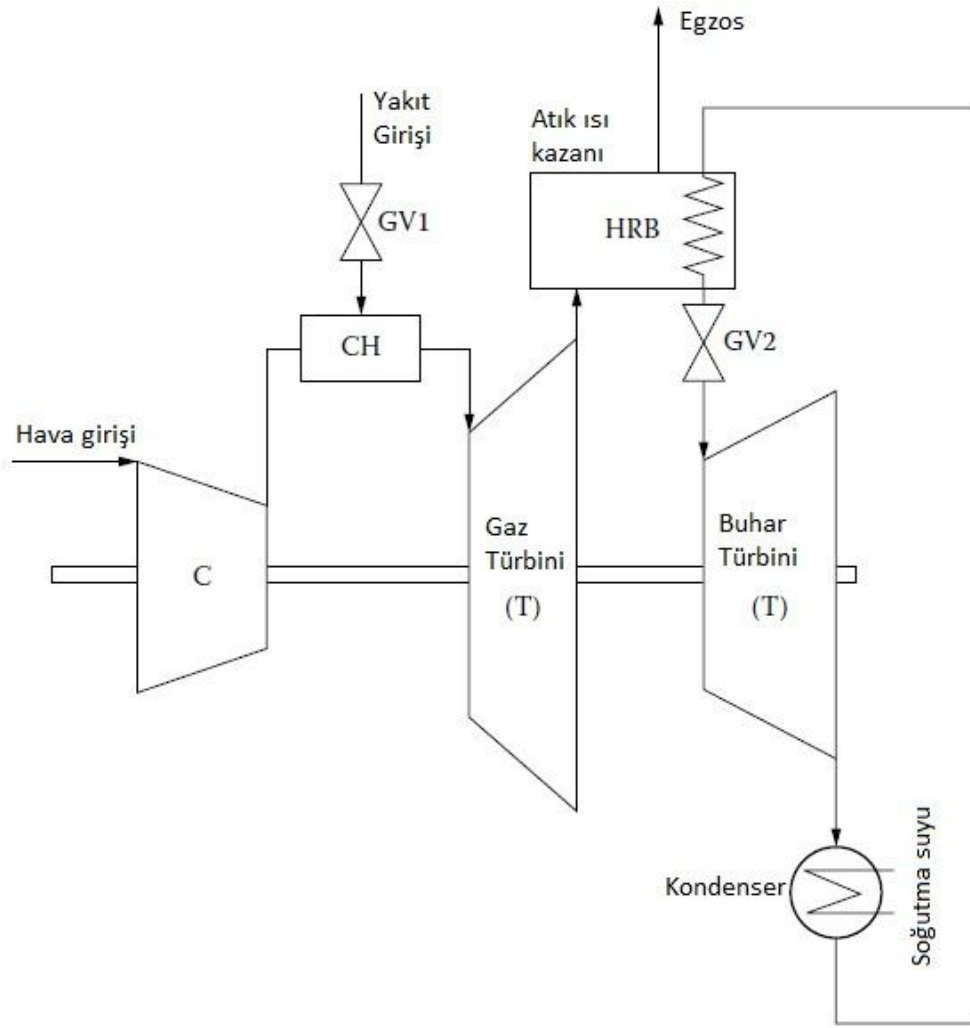
7.2.3. Türbin

Gaz türbinlerinde verimliliklerinden dolayı genellikle aksiyal türbin kullanılmaktadır [11]. Aksiyal türbinlerde yüksek sıcaklık ve basınçtan ortaya çıkan enerji yüksek hızlarda türbin kanatlarına çarparak hareket enerjisine dönüştürülmektedir.

Gaz türbinlerinin verimleri ortalama %35 civarlarındadır. Büyük üniteler küçük güçlere göre daha verimli çalışmaktadırlar. Kombine çevrim santrallerde egzoz atık ısı da, atık ısı geri kazanımı yoluyla kullanılıp buhar türbinlerinde ek elektrik üretildiğinden toplam verim %55 mertebelerine çıkmaktadır. Günümüzde %60 verime sahip kombine çevrim enerji santralleri mevcuttur.



Şekil 7. 5 Gaz türbini ünitesi ve yardımcı ekipmanları



Şekil 7. 6 Tek mil üzerinde kombine çevrim enerji santrali

SENKRON GENERATÖRLERİN SEÇİLMESİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN HUSUSLAR

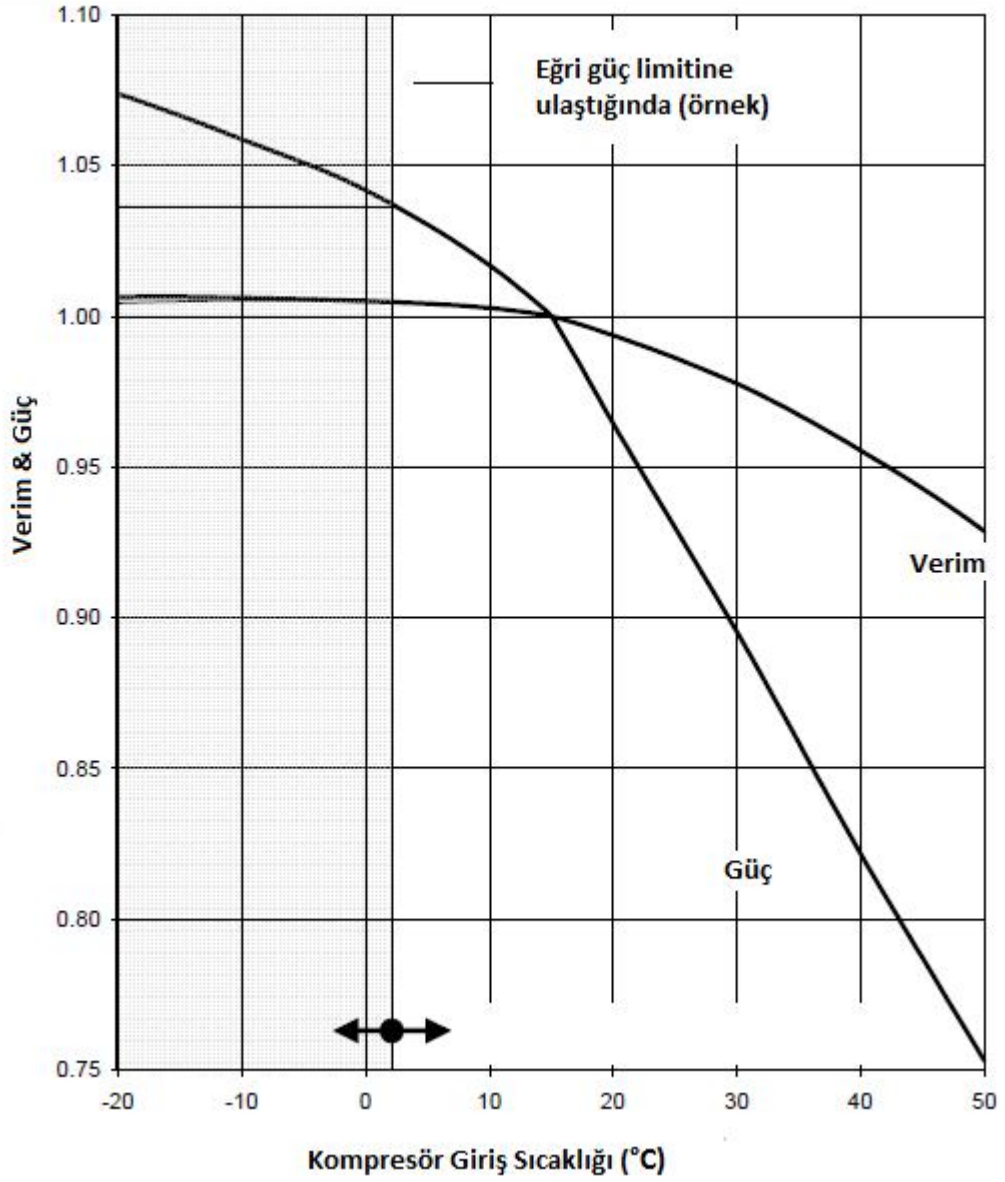
8.1 Generatör Gücü

Generatör gücü, SG'lerin seçiminde en önemli faktördür. Bu gücün belirlenmesi tahrik makinesine, ortam koşullarına, soğutucu olarak kullanılan akışkanın tipine, bağlanacağı güç sisteminin karakteristiğine bağlıdır.

Gaz türbinlerinin çıkış gücü ortam sıcaklığı, bağıl nem ve yükseklik gibi değerler değiştikçe farklılık göstermektedir. Bu yüzden GT için seçilecek generatörün her çalışma noktası için türbin değerlerini karşılayabilecek kapasitede olması gerekmektedir.

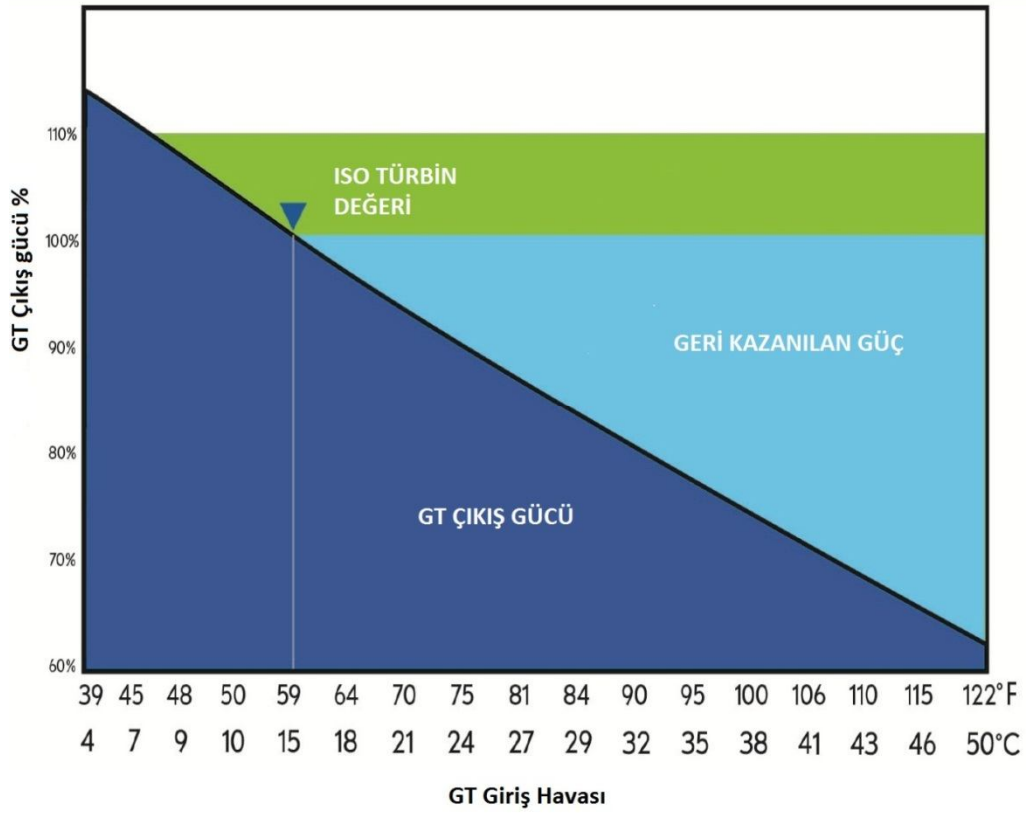
Şekil 8.1'de örnek olarak bir GT için çıkış gücü ve GT veriminin ortam sıcaklığına bağlı değişimi verilmiştir. Generatörün sıcaklığa bağlı değişimi için çizilecek eğri, her nokta için mutlaka bu eğrinin üst kısmında yer almalıdır.

Ortam sıcaklığı arttıkça birim hacim başına düşen oksijen miktarı azalmakta ve kompresör yeterli miktarda oksijeni sıkıştıramadığından yanma odasında gerekli miktarda yanma gerçekleştirilememektedir. Yüksek rakımlı yerlerde kurulan gaz türbinleri için yine aynı sorun ortaya çıkmaktadır. Yükseklerle çıkıldıkça havadaki oksijen yoğunluğu azaldığından GT çıkış gücünde yine bir azalma olmaktadır.



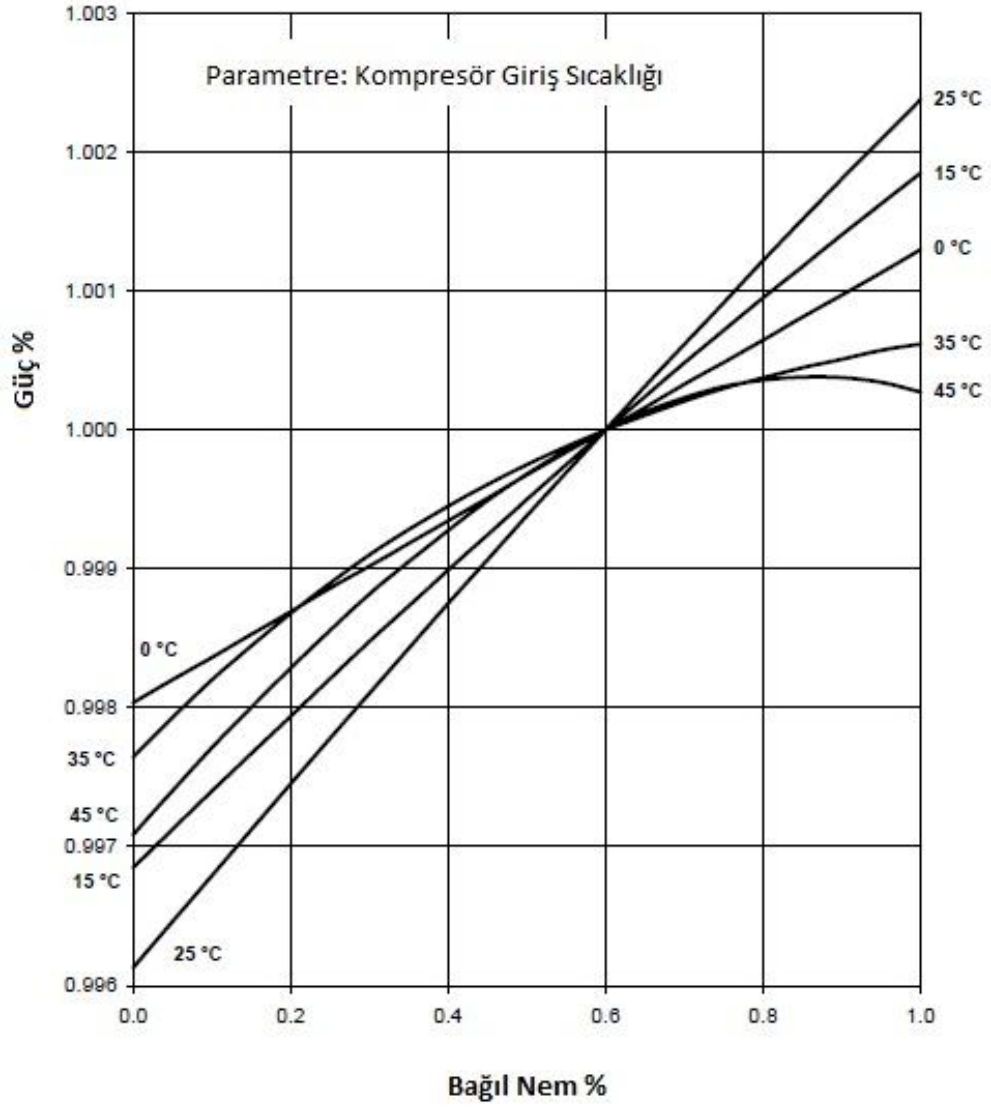
Şekil 8. 1 Gaz türbini'nin ortam sıcaklığına bağlı çıkış gücü ve verimi

Özellikle sıcak havalarda GT'den dizayn şartlarındaki (ISO-15°C,%60 bağıl nem ve deniz seviyesi) çıkış gücünü sağlayabilmek için, kompresör giriş havası soğutulularak (Turbine Inlet Chilling) önemli bir güç artışı elde edilmektedir.

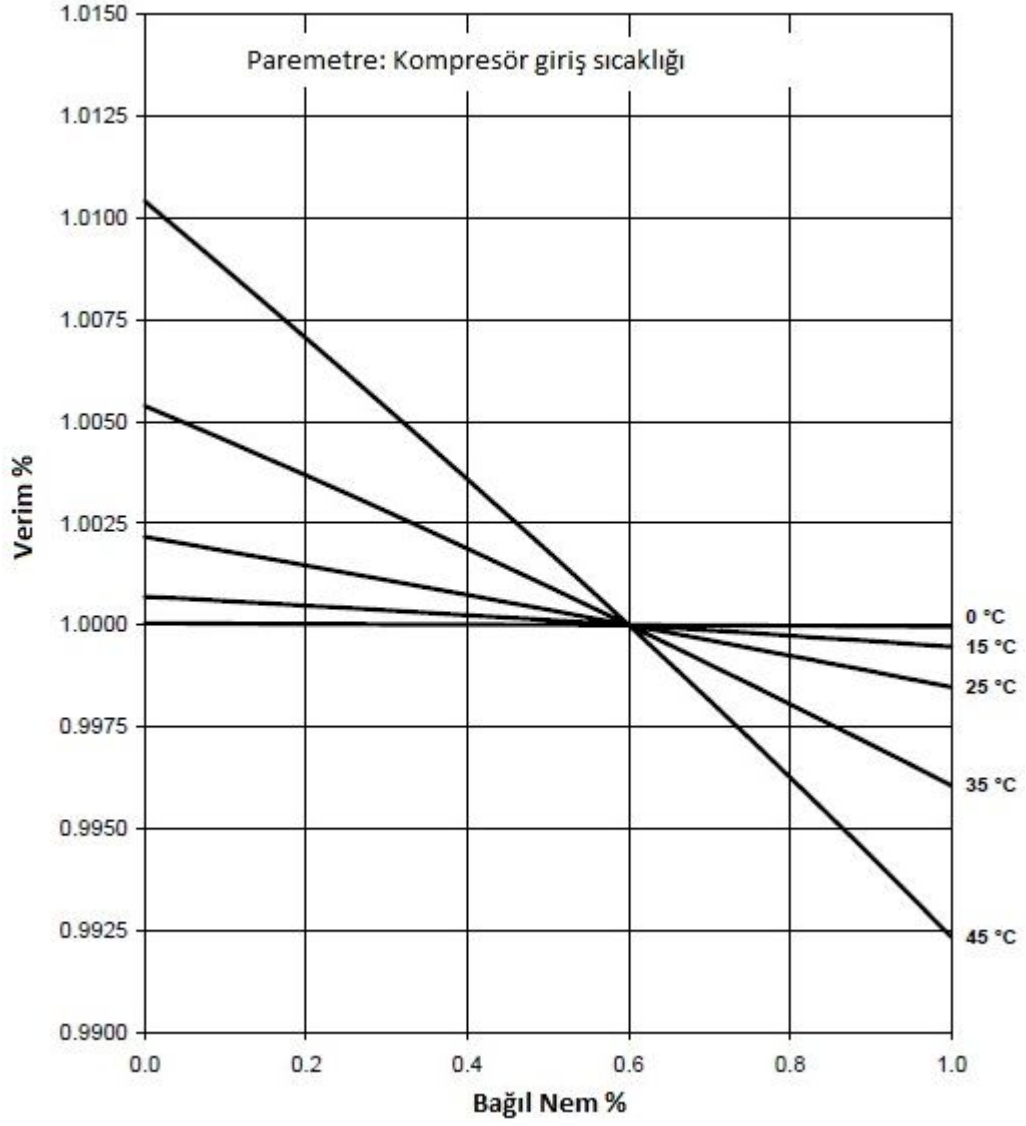


Şekil 8. 2 Kompresör giriş havası soğutma sisteminin çıkış gücüne etkisi [12]

Bağıl nem GT çıkış gücünü ve verimini etkileyen diğer bir parametredir. Bağıl nem arttıkça verim azalırken çıkış gücü artmaktadır. Aşağıda çeşitli sıcaklıklar için bağıl nem ile verim ve güç ilişkisini gösteren eğriler verilmiştir.

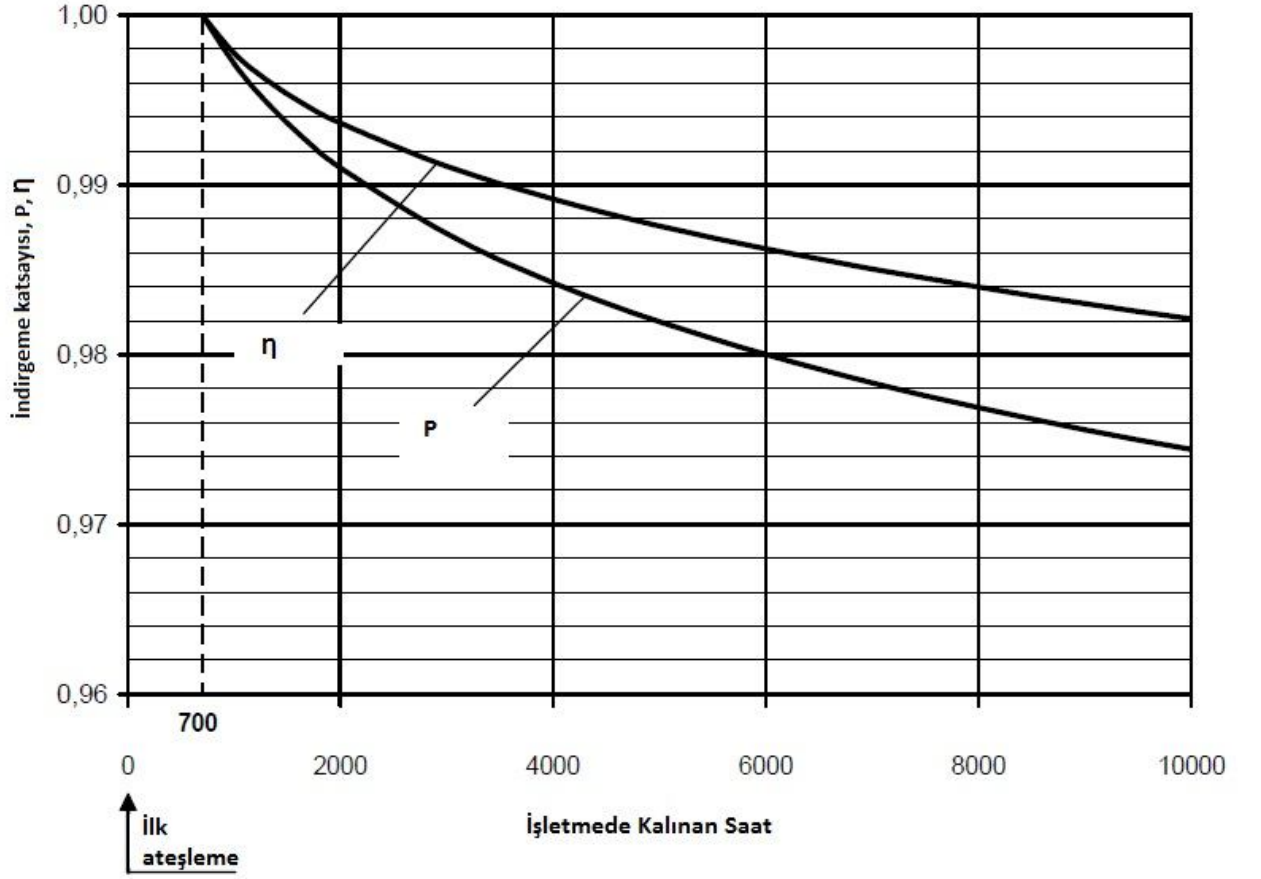


Şekil 8. 3 Gaz türbini'nin bağıl neme bağlı çıkış gücü



Şekil 8. 4 Gaz türbini'nin bağıl neme bağlı verimi

Gaz türbinlerinin verimlerinde ve çıkış güçlerinde, işletmede kaldıkları saat oranında düşüş gerçekleşmektedir. Şekil 8.4 bu ilişkiyi göstermektedir.

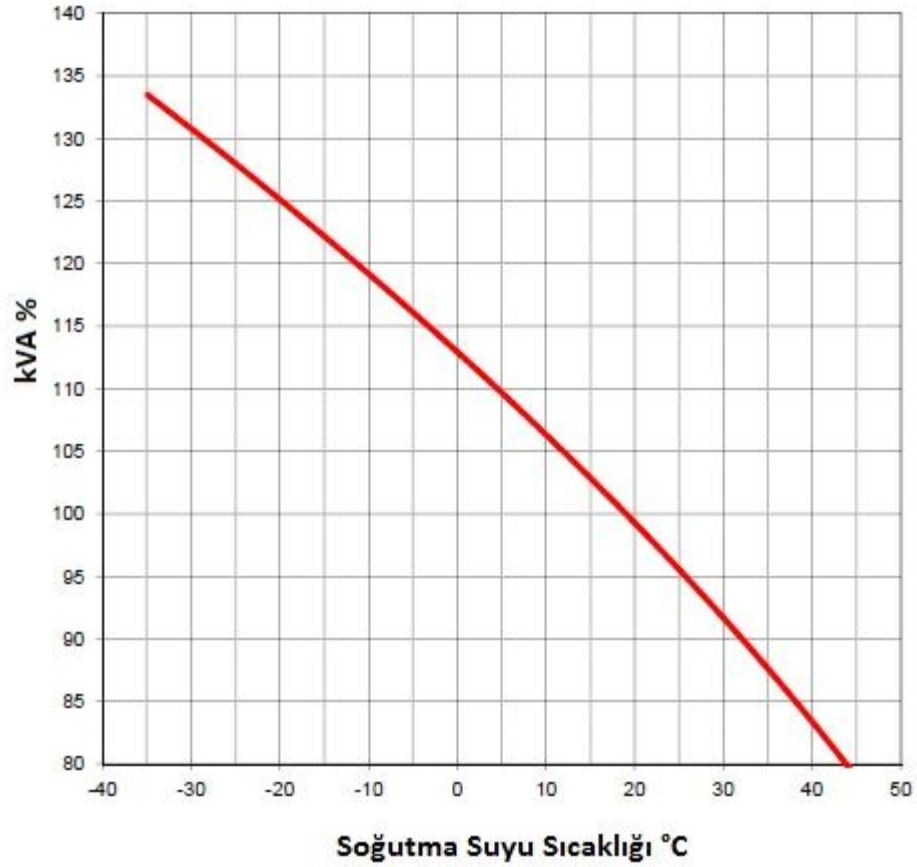


Şekil 8. 5 Gaz türbini'nin işletmede kaldığı saat ile güç ve verim ilişkisi

Buhar türbinleri ortam koşullarından bağımsız olarak çalışmaktadırlar. Eğer brülörlü bir kazanın buharı aracılığıyla tahrik ediliyorsa ortam koşullarına bakmaksızın buhar debisi (vana açıklığı), basıncı ve sıcaklığı güç çıkışını etkilemektedir. Fakat kombine çevrim bir enerji santralinde buhar türbinine buhar sağlayan kazanlar, gaz türbini egzosuna bağlı olarak çalışmaktadırlar. Gaz türbinleri ortam koşullarından etkilendiklerinden dolayı, dolaylı olarak kombine çevrim enerji santrallerindeki buhar türbinleri de ortam şartlarından etkilenmektedirler.

Ayrıca buhar türbini çıkış gücünü etkileyen diğer bir parametre de kondenserdir. Buhar türbini egzoz kısmında yeterli miktarda vakum oluşturulmadığı zaman, karşı basınçtan dolayı çıkış gücünde azalma meydana gelmektedir [13].

Senkron generatörler -20°C ve $+50^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığı için dizayn edilmektedirler. Fakat çıkış gücü, ortam sıcaklığına ve ya soğutucu akışkanın sıcaklığına göre değişebilmektedir. Şekil 8.5'de su soğutmalı (TEWAC) bir senkron generatörün soğutma suyu sıcaklığı ile çıkış gücü arasındaki ilişki gösterilmektedir.



Şekil 8. 6 Soğutma suyu sıcaklığı ile çıkış gücü ilişkisi

8.2 Soğutma Tipi

Türbin generatörleri soğutma açısından stator ve rotor soğutması olarak ayrı ayrı incelenmektedir.

1) Stator soğutma tipi (Direkt ve ya endirekt)

2) Rotor soğutma tipi (Direkt ve ya endirekt)

Direkt soğutmada ana soğutucu akışkan (hava, hidrojen) birebir sargılara temas ederek ısı transferini sağlamaktadır. Hidrojen soğutmalı generatörlerde, hidrojen özel izolasyonlu kanallardan geçerek sargıları soğutmaktadır.

Soğutma sisteminde hidrojen kullanılmasının avantajları [14],

- Yoğunluğu havaya göre daha az olduğundan, vantilasyon kayıpları daha az olmaktadır.
- Oluşan ısıyı bertaraf etmesi havaya oranla 10 kat daha iyidir.

- Hava soğutmalı generatörlerde oluşan oksitlenme ve korozyon hidrojen soğutmalı generatörlerde oluşmamaktadır.
- Herhangi bir arktan dolayı başlayacak olan yangını desteklememektedir.

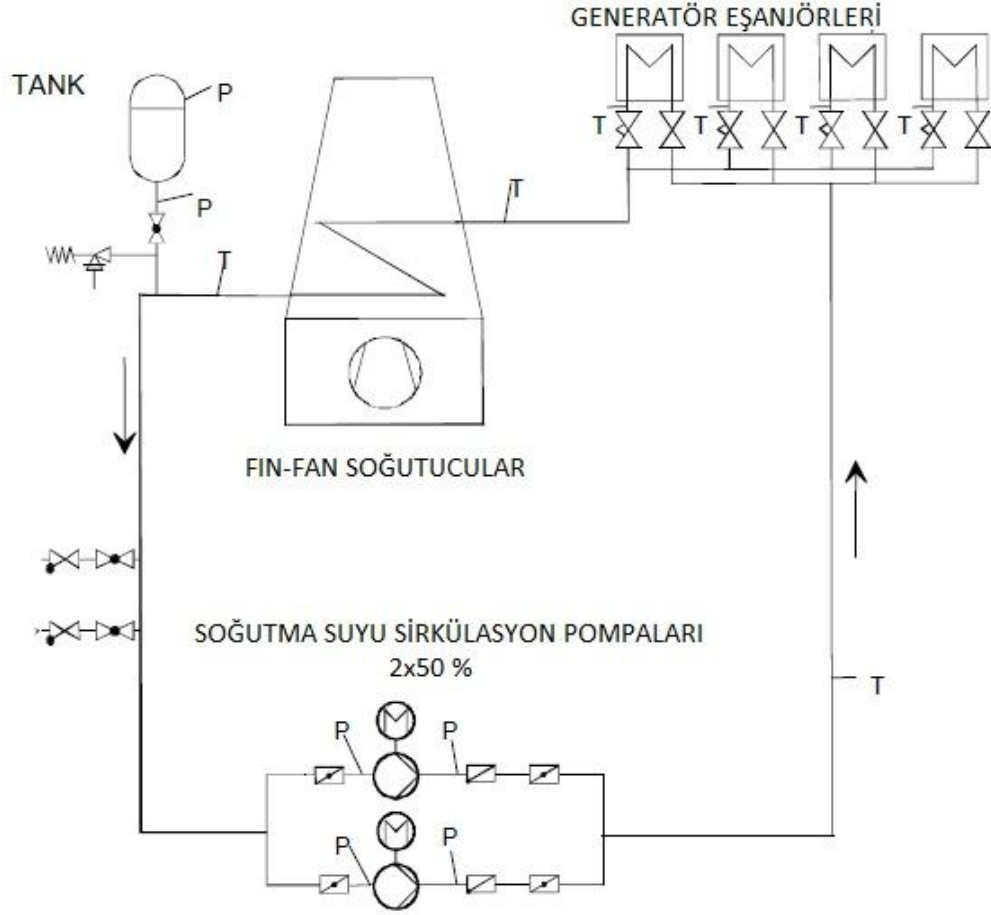
Fakat hava ile birleştiğinde patlayıcı bir özellik kazanmaktadır. Bu yüzden bazı uygulamalarda emniyet açısından iki gaz arasında emniyet açısından CO₂'li bir bölge oluşturulmaktadır.

Endirekt soğutmalı tip generatörlerde akışkan direkt sargı ile temas etmez, stator çekirdeği içerisindeki soğutma kanallarından akmaktadır.

Hava soğutmalı generatörler 3 tipte dizayn edilmektedir,

- Açık tipte generatörler kendinden soğutmalı makinelerdir. Ortam havasını generatör içine alarak soğutmayı sağlarlar. Ana soğutucu akışkan ortam havasıdır. Endüstride ODP (Open drip proof) olarak adlandırılırlar. Kapalı ortamlar için tasarlanmışlardır.
- Koruyucu kasaya sahip generatörler kendinden ventilasyonlu ve ya harici bir ventilasyon sistemine sahip olabilirler. Bu sistemde yine soğutucu akışkan olarak ortam havası kullanılmaktadır. ODP tipte genertörlere göre avantajı dış sahalarda da kullanılabilmesidir. Endüstride bu tip generatörler WP (Weather Protected) olarak adlandırılmaktadırlar.
- Tamamen kapalı bir koruyucu kasaya sahip generatörlerde dış ve iç hava ayrı ve birbirine karışmamaktadır. Generatör içerisinde meydana gelen termal kayıplar eşanjör yoluyla dış ortama verilmektedir. Endüstride bu tip generatörlere TEAAC (Totally enclosed air to air cooled) tipte generatör denmektedir. Aynı özelliklere sahip su soğutmalı generatörler ise TEWAC (Totally enclosed water to air cooled) olarak adlandırılmaktadırlar.

Hidrojen ve su soğutmalı SG'lerin hepsi tamamen kapalı tipte bir kasaya sahip olmalıdır.



Şekil 8. 7 Gaz türbini generatörüne ait sulu soğutma çevrimi

8.3 Sıcaklık Limitleri

Literatürde sıcaklık artışı (Temperature rise) denildiğinde, makinenin bahsedilen kısmının sıcaklığı ile ortam (ya da soğutucu akışkan) sıcaklığı arasındaki farktan bahsedilmektedir. Özellikle stator ve rotor sıcaklık artış limitleri SG'nin önemli parametrelerinden biridir.

SG etiket değerinde çalışırken makine içerisindeki en sıcak noktanın sıcaklık değeri izolasyon sınıfı sıcaklığı için tanımlanan değerden yüksek olmamalıdır. Sıcaklık Limitleri makinenin ömrünü etkileyen bir parametredir. SG'lerin, uygun sıcaklık limiti koşullarında işletildiğinde faydalı olarak 30-40 yıl arasında ömürleri olmaktadır.

İzolasyon ve sıcaklık artış limitleri aşağıdaki şartlar altında standartlarda belirtilmiştir,

- Soğutucu akışkan sıcaklığı 40°C
- Nominal güç ve güç faktörü altında

- Nominal gerilim ve hızda

Ayrıca bu limitler genellikle 12 kV (faz-faz) nominal gerilim seviyesi altındaki generatörler için kullanılmaktadır [15]. Diğer gerilim seviyeleri için Çizelge 8.1 kullanılmaktadır.

Çizelge 8. 1 Gerilim seviyesine göre sıcaklık artış limitleri

$V_n \leq 24 \text{ kV}$	Kilovolt başına -1°C
$V_n > 24 \text{ kV}$	Üretici ve kullanıcı arasındaki karara göre belirlenmektedir

Örnek olarak hava soğutmalı yuvarlak rotorlu generatörler için hazırlanmış sıcaklık limiti değerleri Çizelge 8.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 8. 2 Soğutma tipine göre sıcaklık artış limitleri

No	Makine Parçası	Sıcaklık tespit metodu	Sıcaklık artışı (°C), Soğutucu sıcaklığı 40°C		
			Sınıf 130 (B)	Sınıf 155 (F)	Sınıf 180 (H)
1	Endirekt soğutulan stator sargıları	Oluklara gömülü rezistans ve ya ısılıçift	85	110	130
2	Direkt soğutulan stator sargıları	Deşarh havası	80	100	NA
		Deşarj suyu	50	50	50
3	Endirekt soğutulan Rotor sargıları	Rezistans	85	105	125
4	Direkt hava ile soğutulan rotor sargıları (sayısı 1'den 14'e kadar değişen radyal soğutma kanallarına göre)	Rezistans			
		1,2 çıkış	60	75	NA
		3,4 çıkış	65	80	NA
		6 çıkış	70	85	NA
		8,14 çıkış	75	90	NA
		>14 çıkış	80	95	NA
5	İzolasyon ile temas etmeyen, gövde ve mekanik kısımlar	Dedektör ve ya termometre	İzolasyon kısımlarına zarar vermemektedir		
6	Kollektör halkaları	Termometre	85	85	85
7	Diğer çeşitli kısımlar (fırça vb...) tasarlanırken sıcaklık artış limitlerine dikkat edilmelidir.				

8.4 Generatörün Nominal Değerlerinin Çalışma Aralıkları

Senkron generatörler etiketlerinde yazan nominal değerlerin belirli bir yüzdesi kadar altında ve ya üstünde çalışabilmektedirler. Bu sınır değer şebeke ile paralel çalışan bir SG için önem teşkil etmektedir.

Gerilim için bu çalışma aralığı $\pm 5\%$ iken frekans için $\pm 2\%$ dir. Stator sargılarından 30 saniye boyunca nominal akımın $\%150$ 'si kadar bir akım geçtiğinde makine sorunsuz olarak çalışmaya devam etmelidir. Fakat bu yüklenmenin başladığı noktada SG nominal işletim şartları altında çalışıyor olmalıdır.

Stator sargıları için diğer yüzde yüklenmelerde (8.1) ifadesi kullanılmaktadır,

$$I = 100 \sqrt{\frac{37.5}{t} + 1} \quad (8.1)$$

I yüzde cinsinden stator akımı, t ise saniye cinsinden zamanı ifade etmektedir.

Rotor sargıları için yüzde yüklenmelerde (8.2) ifadesi kullanılmaktadır,

$$I = 100 \sqrt{\frac{33.75}{t} + 1} \quad (8.2)$$

Senkronizasyon için limit değerleri ise Çizelge 8.3'de belirtilmiştir,

Çizelge 8. 3 Senkron generatör için senkronizasyon limitleri

Kesici kapama açısı	$\pm 10^\circ$
Sisteme göre generatör gerilimi	0% - 5%
Frekans farkı	± 0.067 Hz

Yuvarlak rotorlu SG'ler nominal hızlarının $\%120$ katına çıkabilecek yapıda dizayn edilmelidirler.

Hava soğutmalı generatörlerde güç faktörü genellikle 0.90, 0.85, ve ya 0.80 (aşırı uyarım) değerinde kullanılmaktadır. Hidrojen soğutmalı generatörlerde ise bu değer 0.90 ve ya 0.85 alınmaktadır. Düşük uyarım için ise hava ve hidrojen soğutmalı generatörlerde güö faktörü 0.95 va ya üzerinde bir değer seçilmektedir.

8.5 Koruma Sınıfı

Generatörün çalışacağı ortam şartlarına göre koruyucu kasasının yapısı değişiklik göstermektedir. Muhafazadan katı ve sıvı parçacıkların içeriye sızma limitlerine göre belirli standartlar oluşturulmuştur. SG seçilirken bu koruma sınıflarına dikkat edilerek, iç ve ya dış saha çalışma ortamlarına göre uygun bir değer seçilmektedir.

Çizelge 8. 4 Senkron generatör için katı parçacıklara karşı koruma sınıfı [16]

1.RAKAM			
YABANCI KATI CİSİMLERE KARŞI KORUMA		TEHLİKELİ BÖLÜMLERE ERİŞMEYE KARŞI	
RAKAM	AÇIKLAMA	RAKAM	AÇIKLAMA
0	Korumasız	0	Korumasız
1	Çapı ≥ 50 mm. olan katı cisimlere karşı koruma.	1	Tehlikeli bölümlere elin dışıyla erişmeye karşı korumalı
2	Çapı $\geq 12,5$ mm. olan katı cisimlere karşı koruma.	2	Tehlikeli bölümlere bir parmak ile erişmeye karşı korumalı
3	Çapı $\geq 2,5$ mm. olan katı cisimlere karşı koruma.	3	Tehlikeli bölümlere bir parmak ile erişmeye karşı korumalı.
4	Çapı ≥ 1 mm. olan katı cisimlere karşı koruma.	4	Tehlikeli bölümlere bir tel ile erişmeye karşı korumalı.
5	Toza karşı korumalı.	5	Tehlikeli bölümlere bir tel ile erişmeye karşı korumalı.
6	Toz geçirmez.	6	Tehlikeli bölümlere bir tel ile erişmeye karşı korumalı.

Çizelge 8. 5 Senkron generatör için sıvı parçacıklara karşı koruma sınıfı

2. RAKAM	
MAHFAZANIN SUYA KARŞI KORUMA DERECEİ	
RAKAM	AÇIKLAMA
0	Korumasız
1	Düşey olarak düşen su damlalarına karşı korumalı.
2	Mahfaza 150 ye kadar eğik iken düşen olarak akan su damlalarına karşı korumalı.
3	Su püskürtmesine karşı korumalı. (Düşey doğrultunun her iki tarafında 600 'lik açı içindeki su püskürtmelerinin hiçbir Zararlı etkisi olmamalıdır.)
4	Su sıçramasına karşı korumalı. (Mahfazaya karşı herhangi bir doğrultudan sıçrayan suyun zararlı etkisi olmamalıdır.)
5	Su fişkırtmasına karşı korumalı. (Mahfazaya karşı herhangi bir doğrultudan fişkıran suyun zararlı etkisi olmamalıdır.)
6	Güçlü su fişkırtmasına karşı korumalı. (Mahfazaya karşı herhangi bir doğrultudan fişkıran suyun zararlı etkisi olmamalıdır.)
7	Suya geçici daldırma etkilerine karşı korumalı.
8	Suya sürekli daldırma etkilerine karşı korumalı.

Örnek olarak dış ortamda ve korozyon maddelerin bulunduğu bir sahada çalışacak olan generatör için muhafaza kısmı IP 65 seçilerek sorunsuz bir çalışma sağlanabilmektedir.

Ayrıca ortamda korozyon maddeler (H₂S) varsa sadece koruma sınıfı değil, generatör malzemesi de ortama dayanacak şekilde seçilmelidir.

Yanıcı ve patlayıcı gazların (CH₄) bulunduğu bir ortamda çalışacak olan generatör ATEX (ATmosphères Explosives) standartlarınca belirtilen şartlar altında dizayn edilmektedir [17].

8.6 Generatör Transformatörü İle Uyum

SG'ler genellikle orta gerilim seviyelerinde (6.3 kV, 11 kV, 15kV, 20kV) üretildiklerinden 34.5 kV , 154 kV, 400 kV gibi seviyelere çıkmak için transformatör kullanılmaktadır. Yükseltici tipte transformatörler (Generator step-up transformer) güç sistemlerinde senkron generatörleri enterkonnekte şebekeye bağlayan ekipmanlardır.

Generatör transformatörlerin seçiminde ortam sıcaklığı önemli bir parametredir. Transformatörün ortam sıcaklığına göre çizilen güç eğrisinde, her sıcaklık noktası için transformatör, generatör çıkış gücünü karşılıyor olması gerekmektedir. Gaz türbini generatörlerinin transformatörleri, türbinin değişen yük ihtiyacını karşılayabilmek için genellikle fan soğutmalı (ONAF) olarak seçilmektedir. Örnek olarak; 63,5 MVA'lık bir gaz türbin genertörü için 55/65 MVA-ONAN/ONAF tipinde bir trafo seçilerek işletmenin sorunsuz olarak çalışması sağlanmaktadır. Gerilim değişimlerine karşı ise yük altında (OLTC) ve ya yüksüz (OCTC) gerilim kademesi değiştiren kademe değiştiriciler ile donatılmaktadırlar.



Şekil 8. 8 Gaz türbini step-up transformatörü ve IPB bağlantısı

8.7 Generatör Kesicisi

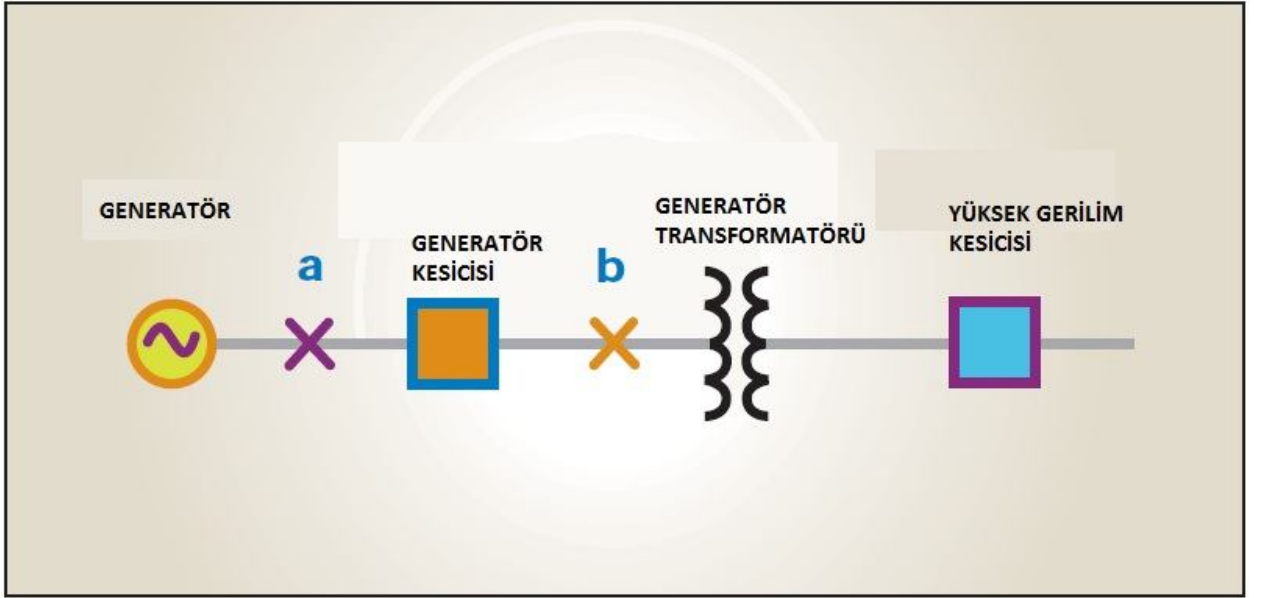
Senkronizasyon ve koruma fonksiyonları açısından generatör kesicisi bir güç sisteminin önemli ekipmanlarından biridir. Kesicinin gerilim seviyesi generatörün nominal

gerilimine göre seçilir. Örnek olarak 11 kV (Faz-faz) gerilim seviyesine sahip bir generatör, standartlar ölçüsünde 12 kV'luk ve ya 15 kV'luk orta gerilim sistemlerine bağlanır.

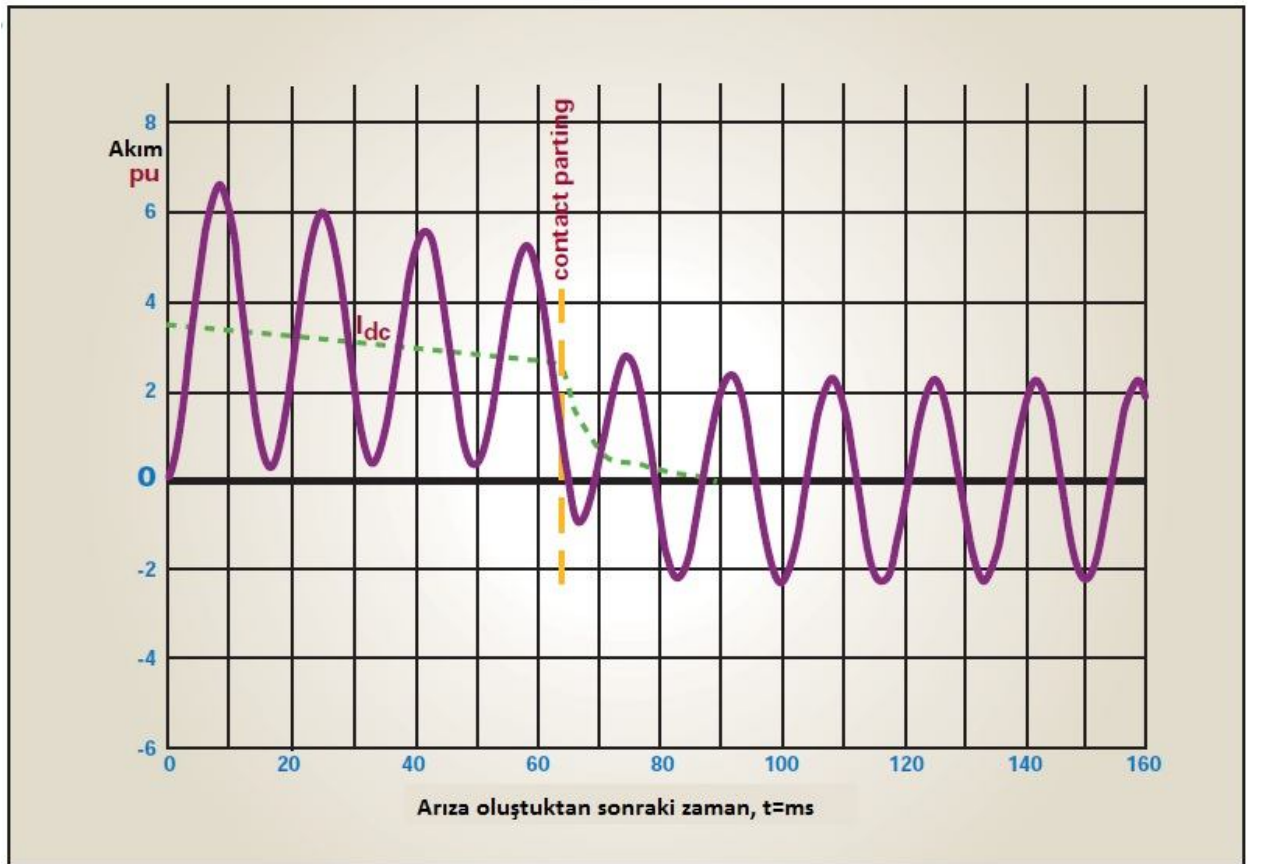
Kesicinin kısa devre dayanımı generatörün bağlı olduğu baradaki maksimum 3 fazlı simetrik kısa devre akımına (I''_{k3p}) göre belirlenmektedir. Bu akımı hesaplarken hem şebeke tarafından gelen kısa devre akımı hem de generatör kaynaklı kısa devre akımı hesaba katılmaktadır.

Kısa devre oluştuğunda simetrik bileşenin yanında X/R oranı dolayısıyla arıza akımında ayrıca dc bileşen denilen ve exponansiyel yapıya sahip bir bileşen de oluşmaktadır [18]. Gaz türbinleri gibi düşük eylemsizlik momentine sahip makinelerde arıza akımındaki ac bileşenin düşüş hızı dc bileşene oranla daha hızlı olmaktadır. Bu sebepten dolayı arız akımının sıfıra düşmesi daha uzun süre almaktadır. Generatör kesicisi akımın sıfıra düşmesini bekleyerek sıfır geçiş anında kesiciyi açmaktadır. Bu süre boyunca da kesici kutupları arıza akımına dayanması gerekmektedir.

Bu durum dağıtım için kullanılan kesiciler ile SG'ler için kullanılan kesicileri ayıran en önemli farklardan biridir. Ayrıca arızayı giderirken kesici kutupları açıldığında oluşan geçici gerilim yükselmesi generatör uygulamalarında 3.2 ile 4.5 kV/ μ s değerleri arasındadır. Bu değer de standart kesiciler için yüksek bir değerdir. Tüm bu özel durumlar göz önünde bulundurulduğunda, senkron genertörün karakteristiğine uygun bir orta gerilim kesicisi seçmek işletmenin devamlılığı ve güvenilirliği açısından en uygun çözüm olmaktadır.



Şekil 8. 9 Generatörün kesici üzerinden şebekeye bağlantısı



Şekil 8. 10 Kısa devre anında generatör kaynaklı arıza akımı

BÖLÜM 9

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada fosil yakıtlı enerji santrallerinde kullanılan yuvarlak kutuplu senkron generatörlerin nasıl seçileceği konusu üzerinde durulmuştur. Özellikle gaz ve buhar türbini generatörlerine ait değerlerin neye göre belirlenmesi gerektiği detaylarıyla incelenmiştir.

Bir enerji santralinde kullanılacak olan generatörün konstrüksiyon yapısını ve elektriksel parametrelerini belirlerken yalnızca makinenin kendisinin göz önünde bulundurmanın yeterli olmayacağı teorik örnek ve pratik sonuçlarla ifade edilmiştir.

Generatörün, tahrik makinesi, bağlandığı güç sistemi, çalıştığı ortam koşulları, yükseltici tip transformatörü, orta gerilim sistemi, topraklama ve koruma ekipmanlarıyla birlikte bir bütün olarak ele alınması gerekliliği ortaya konulmuştur.

Kalıcı hal durumlarında, arıza ve ya senkronizasyon koşullarında senkron generatörün enerji santrallerinde sorunsuz olarak işletilebilmesi için tüm bu ilişkilerin bahsedildiği üzere, tasarım sırasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Dipippo, R., (2012). Geothermal Power Plants, third edition, Butterworth-Heinmann, Oxford
- [2] IEEE std. 421.1, (2007). Standard Definitions For Excitation Systems For Synchronous Machines, IEEE, New York.
- [3] Mergen, F. ve Zorlu, S., (2006). Senkron Makineler, birinci baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul
- [4] Boduroğlu, T., (1988). Elektrik Makinaları Dersleri Senkron Makinalar Teorik Bilgi, Üçüncü baskı, Beta basım yayım dağıtım A.Ş., İstanbul
- [5] Boldea, I., (2006). Synchronous Generators, first edition, CRC Press, Florida
- [6] Boduroğlu, T., (1994). Elektrik Makinaları Dersleri Senkron Makinaların Hesap veKonstrüksiyonu, ikinci baskı, Beta basım yayım dağıtım A.Ş., İstanbul
- [7] Klempner, G. ve Kerszenbaum, I., (2008). Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, Second edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey
- [8] Eberly, T. W. ve Schaefer, R. C., (2002). "Voltage Versus Var/Power-Factor Regulation on Synchronous Generators", IEEE Transactions on Industry Applications, 38 (6), November/December 2002
- [9] IEEE std. 67, (1990). Guide for Operation and Maintenance of Turbine Generators, IEEE, New York.
- [10] IEEE C62.92, (1989). Guide for the Application of Neutral Grounding in Electrical Utility Systems Part II-Grounding of Synchronous Generator Systems, IEEE, New York
- [11] Çetinkaya, S., (1999). Gaz Türbinleri, ikinci baskı, Nobel yayın dağıtım Ltd. Şti, Ankara
- [12] TAS Energy Inc., (2012). Turbine Inlet Chilling, Houston
- [13] Çengel, Y. A. ve Boles, M. A., (2011). Termodinamik, beşinci baskı, Güven bilimsel, İzmir
- [14] Kiameh, P., (2012). Power Generation Handbook, second edition, The McGraw-Hill Companies, New York

- [15] IEEE std. C50.13, (2005). Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above, IEEE, New York
- [16] IEC 60529, (2001). Degrees of protection provided by enclosures (IP Code), IEC, Edition 2.1, Geneva
- [17] IEC 60079-14, (2002). Electrical installations in hazardous areas, IEC, third edition, Geneva
- [18] Boveri, A. B., (1999). ABB Switchgear Manual, tenth edition, Berlin

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Umut ÖZDOĞAN
Doğum Tarihi ve Yeri : 10.11.1986 K.D.Z. Ereğli
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : umutozdogan67@yahoo.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen/Matematik	K.D.Z. Ereğli Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2012-...	TAS Enerji	Proje Mühendisi
2009-2012	BGM Mühendislik	Elektrik Müh/Proje Müh
2008-2009	BGM Mühendislik	Teklif Mühendisi