

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KULLANILAN GAZ TÜRBİNLERİNİN
İNCELENMESİ VE BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Biol ÇİFTKAYA**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

ŞUBAT 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KULLANILAN GAZ TÜRBİNLERİNİN
İNCELENMESİ VE BENZETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİROL ÇİFTKAYA
(504931316)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Aralık 2009
Tezin Savunulduğu Tarih : 01 Şubat 2010**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Emin Fuat KENT (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Lale ZEYNELGİL (İTÜ)**

ŞUBAT 2010

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyip beni yönlendirip cesaretlendiren değerli hocam Prof.Dr.Ayşen Demirören'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca İstanbul Teknik Üniversitesindeki öğrenim hayatım boyunca mesleki gelişimim için değerli katkılarını esirgemeyen öğretim görevlilerine ve tez çalışmam kapsamındaki çizimlerde desteğini esirgemeyen meslektaşım Büşran Arslanoğlu'na teşekkürlerimi sunarım.

ŞUBAT 2010

Birol ÇİFTKAYA
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	2
1.3 Hipotez.....	3
2. KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	5
2.1 Genel.....	5
2.2 Ambarlı DGKÇ Santralinin Temel Özellikleri.....	6
2.2.1 Gaz türbinleri.....	6
2.2.2 Atık ısı kazanları.....	7
2.2.3 Buhar türbinleri.....	8
2.2.4 Generatör ve transformatörler.....	8
2.2.5 Şalt sistemi.....	8
2.2.6 Kondenser ve soğutma suyu sistemi.....	9
2.2.7 Demineralize su sistemi.....	9
3. GAZ TÜRBİNLERİNİN GELİŞİMİ.....	11
3.1 Genel.....	11
3.2 Teknik Gelişmeler.....	15
3.3 Dünyada Doğal Gaz Rezervleri ve Muhtemel Gelişmeler.....	16
4. GAZ TÜRBİNLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ	17
4.1 Genel.....	17
4.2 Gaz Türbinlerinin Modellenmesi.....	17
4.3 Brayton Çevrimi veya Basit Gaz Türbini Çevrimi.....	18
4.4 Termodinamik olarak Gaz Türbini Çeşitlerinin İncelenmesi.....	22
4.4.1 Regneratörlü (reküperatörlü) gaz türbinleri.....	22
4.4.2 Ara soğutmalı gaz türbinleri.....	24
4.4.3 Ara ısıtmalı gaz türbinleri.....	25
5. HIZ REGÜLATÖRÜ.....	29
5.1 Genel Bakış.....	29
5.2 Temel Hız Regülatörü.....	29
5.3 Elektrohidrolik Hız Regülasyon Sistemi.....	31
5.4 Hız ve Yük Kontrolörleri.....	32
5.5 Yedek Hız Yöneticisi Olarak Mekanik Hidrolik Hız Yöneticisi.....	33

5.6 Performans Bakış Açıları	34
5.6.1 Regülasyon veya düşü karakteristiği.....	34
5.6.2 Geçici hal davranışı.....	35
5.6.3 Vana açıklığı -akış debisi karakteristiği.....	35
5.6.4 Geçici hal hız yükselmesi (TSR)	36
5.6.5 Hız regülatörün duyarsızlığı veya ölü bant	37
5.7 Hız Yöneticisinin Diğer Sistemlerle İlişkisi.....	38
5.7.1 Türbin otomasyon paketi.....	38
5.7.2 Ünite güdümlü kontrol sistemi	38
5.7.3 Otomatik yük frekans kontrol sistemi.....	38
6. GAZ TÜRBİNİ VE GENERATÖRÜN KONTROLÜ	41
6.1 Kontrol Sisteminin Görevleri	41
6.2 Kontrol Sisteminin Planı	42
6.3 Elektrohidrolik Kontrolörce Yol verme	42
6.4 Elektrohidrolik Çevirici.....	44
6.5 Elektrohidrolik Kontrolör.....	45
6.5.1 Hız kontrol sistemi.....	46
6.5.2. Yük kontrol sistemi.....	51
6.5.3 Sıcaklık sınırlayıcı kontrol sistemi.....	54
6.5.4 Kontrol transfer devresi.....	57
6.5.5 Kontrol vanası açıklık kontrol sistemi	59
6.5.6 Yakıt oranlayıcı.....	60
6.5.7 Elektrohidrolik kontrolör ile hidrolik hız yöneticisinin etkileşimi	62
6.5.8 Frekans etkisi kontrol devresi.....	62
6.5.9 Kontrol kabinlerinin beslenmesi	66
7.GAZ TÜRBİNLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİNİN VE KONTROL BLOKLARININ İFADE EDİLMESİ.....	67
7.1 Giriş.....	67
7.2 Basitleştirilmiş Gaz Türbininin Benzetimi ve Kontrol Blokları.....	68
7.3 Paralel Çalışma Durumu için Benzetim ve Kontrol Blokları.....	74
7.4 Benzetim Modelinin Basitleştirilmesi.....	74
8. GAZ TÜRBİNLERİNİN ÇIKIŞ GÜCÜNÜ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ VE BENZETİMİ	77
8.1 Giriş.....	77
8.2 Gaz Türbini Model Yapısı.....	78
8.3 Model Parametrelerinin Belirlenmesi	81
8.4 Gaz Türbini ve Kontrol Bloklarının Benzetimi	83
9. BENZETİM SONUÇLARI	89
9.1 Çıkış Gücünün Şebeke Frekansına Bağlı olarak Değişimi	89
9.2 Çıkış Gücünün Atmosfer Basıncı ve Sıcaklığına Bağlı olarak Değişimi	90
10. SONUÇ.....	93
KAYNAKLAR.....	95
EKLER	97
ÖZGEÇMİŞ.....	109

KISALTMALAR

HRSG	: Atık Isı Kazanı
DKÇS	: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali
CCPP	: Kombine Çevrim Santrali
RMS	: Basınç Düşürme ve Ölçme İstasyonu
EHC	: Elektro Hidrolik Çevirici
MHG	: Mekanik Hidrolik Governor
MHC	: Mekanik Hidrolik Kontrolör
EHG	: Elektrohidrolik Governor
HG	: Hidrolik Governor
HHC	: Hidrolik Hidrolik Çevirici
DSP	: Digital Sinyal İşleme
P	: Orantısal Kontrol
PI	: Orantısal ve Entegral Kontrol
PD	: Orantısal ve Türev Kontrol
PID	: Orantısal Entegral ve Türev Kontrol
TSR	: Geçici Hız Artışı
LSR	: Load Shedding Relay
HP	: Yüksek Basınç
IP	: Orta Basınç
LP	: Alçak Basınç
UCC	: Unite Coordinated Control
ALFC	: Otomatik yük frekans Kontrolü
AGC	: Otomatik Üretim Kontrolü
FG	: Gaz Yakıt
FO	: Sıvı Yakıt
GTC	: Gaz Türbini Kontrol Kabini
LT	: Yük Algılayıcı
AL	: Hızlanma Sınırlayıcısı
CV	: Kontrol Vanası
ISO	: International Organization for Standardization
IGV	: Giriş Havaası Kontrol Vanası
CPR	: Kompresör Sıkıştırma Oranı
UCTE	: Avrupa Elektrik İletim Koordinasyon Birliği

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : Buhar Türbinleri ile Birlikte Gaz Türbinlerinin Gelişimi.....	14
Çizelge 3.2 : Ülkemizde ve Dünyada Gaz Türbini Uygulamaları.....	15
Çizelge 7.1 : Örnek Bir Gaz Türbini Karakteristikleri.....	73

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Türkiye kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı	2
Şekil 2.1: İki gaz türbini bir buhar türbini konfigürasyonunun şematik gösterimi .	5
Şekil 4.1 : Basit gaz türbini çevrimi... ..	19
Şekil 4.2 : Brayton ve Carnot çevrimlerinin verimlerinin karşılaştırılması	19
Şekil 4.3: Yanma odasındaki kütle dengesi.....	22
Şekil 4.4 : Regneratörlü ideal gaz türbini çevrimi	23
Şekil 4.5 : İki milli basit gaz türbini santrali.....	24
Şekil 4.6 : Ara soğutmalı ideal gaz türbini çevrimleri	25
Şekil 4.7 : Ara ısıtmalı ideal gaz türbini çevrimleri	26
Şekil 4.8 : Ara soğutmalı, ara ısıtmalı ve regneratörlü ideal gaz türbini çevrimi .	27
Şekil 5.1: Buhar /Gaz türbini hız regülatörü şeması	30
Şekil 5.2: Hız regülatörü fonksiyonel blok diyagramı	30
Şekil 5.3: Elektrohidrolik hız regülatörü şeması.....	32
Şekil 5.4 : EHG deki hız ve yük kontrolörleri	33
Şekil 5.5: Yedek hız regülatörü olarak mekanik hidrolik hız regülatörü	34
Şekil 5.6: Düşü karakteristiğine bağlı güç frekans eğrisi	34
Şekil 5.7: Tipik hız osilasyonu.....	35
Şekil 5.8: Yük atma durumunda.....	36
Şekil 5.9: Ölü bant karakteristiği	37
Şekil 5.10: Otomatik yük frekans kontrol sistemi.....	39
Şekil 6.1: Türbin kontrol sisteminin planlanması	42
Şekil 6.2: Örnek bir gaz türbininin yükleme ve yük atma grafiği.....	44
Şekil 6.3 : Elektrohidrolik çeviriciye ait şematik gösterim	45
Şekil 6.4: Elektrohidrolik türbin kontrolörünün blok şeması	46
Şekil 6.5: Elektrohidrolik türbin kontrolörünün blok şemaları.....	47
Şekil 6.6: Hız kontrol sistemi.....	48
Şekil 6.7: Generatör mil hızının ölçülmesi	50
Şekil 6.8: Hız kontrolörünün yük kontrolörü olarak kullanılması	51
Şekil 6.9: Yük kontrol sistemi	52
Şekil 6.10: Gerçek yükün ölçülmesi.....	53
Şekil 6.11: Sıcaklık sınırlama kontrol sistemi	55
Şekil 6.12: Gerçek sıcaklık değerinin elde edilmesi	56
Şekil 6.13: Kontrol transfer devresi	58
Şekil 6.14: Açıklık kontrol sistemi.....	59
Şekil 6.15 : Yakıt Oranlayıcısı	61
Şekil 6.16: Frekans etkisi devresi.....	63
Şekil 6.17: Düşü karakteristiği.....	64
Şekil 6.18: Frekans kontrolüne katılan bir ünite UCTE şartı.....	64
Şekil 6.19 : Primer Frekans kontrolüne katılan bir ünitenin çıkış gücü grafiği ...	65

Şekil 6.20 :28.05.2009 Tarihli Türkiye şebekesi günlük frekans değişim grafiği.	65
Şekil 6.21 :03.09.2009 Tarihli Türkiye şebekesi günlük frekans değişim grafiği.	66
Şekil 6.22 : Kontrol kabinlerinin beslenmesi	66
Şekil 7.1 : Basitleştirilmiş tek milli gaz türbini benzetim blokları	70
Şekil 7.2 : Hız regülatörünün çıkış işareti ile yakıt akış miktarı arasındaki ilişki.	72
Şekil 7.3 : Paralel çalışma için yapılan değişiklikler	74
Şekil 7.4 : Şebeke ile paralel çalışma durumunda eşdeğer blok yapısı.....	75
Şekil 7.5 : Küçük zaman sabitlerine sahip blokların iptal edilmesi.....	75
Şekil 7.6 : Çok büyük bir şebeke ile çalışmada basitleştirilmiş model.....	76
Şekil 8.1 : Gaz türbini ve ilgili değişkenler.....	78
Şekil 8.2 : Gaz türbini ve kontrol blokları.....	79
Şekil 8.3 : Hava debisi hız faktörü.....	81
Şekil 8.4 : Kompresör basınçlandırma	81
Şekil 8.5 : Egzost sıcaklığı	81
Şekil 8.6 : Güç çıkışı.....	81
Şekil 8.7 : Benzetim programının blok yapısı	85
Şekil 8.8 : Yanma havası hesaplama bloğu	86
Şekil 8.9 : Egzost gazı sıcaklığı hesaplama bloğu	87
Şekil 8.10 : Türbin çıkış gücü hesaplama bloğu.....	87
Şekil 9.1 : Gaz Türbini Çıkış Gücünün Şebeke Frekansına Bağımlılığı.....	89
Şekil 9.2 : Gaz Türbini Çıkış Gücünün Atmosfer Sıcaklığına Bağımlılığı.....	91
Şekil 9.3 : Gaz Türbini Çıkış Gücünün Atmosfer Basıncına Bağımlılığı	91
Şekil A.1 : DGKÇ Santrali Genel Prensip Şeması	98
Şekil A.2 : Gaz Türbinleri Genel Prensip Şeması	98
Şekil A.3 : Atık Isı Kazanı Prensip Şeması.....	99
Şekil A.4 : Atık Isı Kazanı Prensip Şeması.....	99
Şekil A.5 : Buhar Türbini Genel Prensip Şeması	100
Şekil A.6 : Buhar Türbini Genel Prensip Şeması	100
Şekil A.7 : Hava Soğutmalı Generatör Prensip Şeması	101
Şekil A.8 : Hidrojen Soğutmalı Generatör Prensip Şeması	1021
Şekil A.9 : 380 kV Bara Sistemi Prensip Şeması	102
Şekil A.10 : 154 Kv Bara Sistemi Prensip Şeması	102
Şekil A.11 : 6 kV Bara Sistemi Prensip Şeması	103
Şekil A.12 : 6 kV-0.4 kV Bara Sistemi Prensip Şeması	103
Şekil A.13 : Buhar Türbini İç İhtiyaç Elektrik Prensip Şeması.....	104
Şekil A.14 : Gaz Türbini İç İhtiyaç Elektrik Prensip Şeması.....	104
Şekil A.15 : Soğutma Suyu Sistemi Prensip Şeması	105
Şekil B.1 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	105
Şekil B.2 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	106
Şekil B.3 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	106
Şekil B.4 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	107
Şekil B.5 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	107
Şekil B.6 : Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı.....	108

SEMBOL LİSTESİ

$W_{in,c}$: Kompresörün harcadığı enerji
W_T	: Türbinin sağladığı iş
$W_{çevrim}$: Çevrimin sağladığı iş
m	: Kütleli debi
h	: Entalpi
T_n	: Entegral reset zamanı
P_{spc}	: Ayarlanılan güç değeri
P_{act}	: Ölçülen gerçek güç değeri
T_{OTC}	: Gerçek sıcaklık değeri (Düzeltilmiş değer)
W,X,Y,Z	: Hız Yöneticisi transfer fonksiyonu katsayıları
K_D	: Hız Yöneticisi Kazancı
s	: Laplace operatörü
a, b, c	: Yakıt sistemi transfer fonksiyonu katsayıları
VCE'	: Yakıt talep sinyali
K_F	: Yakıt sistemi geri besleme katsayısı
Γ_F	: Yakıt sistemi zaman sabiti
T_R	: Set edilen limit sıcaklık değeri
F_1	: Türbin egzost sıcaklığı
F_2	: Türbin momentini
ϵ_{CR}	: Yanma reaksiyonu zaman gecikmesi
Γ_{CD}	: Kompresör deşarj zaman sabiti
ϵ_{TD}	: Türbin ve egzost sistemi zaman gecikmesi
Γ_T	: Sıcaklık kontrolörü entegral oranı
Γ_I	: Türbin rotoru zaman sabiti
W_a	: Hava debisi
P_a	: Atmosfer basıncı
T_a	: Atmosfer sıcaklığı
T_{ao}, P_{ao}	: 15 °C Atmosfer sıcaklığı ve 1 Atm Atmosfer basıncı
W_f	: Yakıt debisi
T_X	: Türbin egzost sıcaklığı
w, n	: Mil hızı
W_c	: Sıcaklık düzeltmeli mil hızı
f	: Frekans
A_0, A_1, A_2	: Sabit katsayılar
A_3, A_4, A_5, A_6	: Sabit katsayılar
Θ_{IGV}	: IGV'nin açıklık açısı
Θ_0	: IGV'nin geometrisine bağlı bir başlangıç açıklığı
Θ_{MAX}	: IGV'nin ulaşabileceği maksimum açıklık açısını
CPR	: Kompresör basınçlandırma oranı

ELEKTRİK ÜRETİMİNDE KULLANILAN GAZ TÜRBİNLERİNİN İNCELENMESİ VE BENZETİMİ

ÖZET

Enerji modern çağda yaşamımızın ayrılmaz bir parçası konumuna gelmiştir. En temel yaşam ihtiyaçlarımızın karşılanmasında enerji olmazsa olmazı ifade etmektedir. Dünya ve ülkemiz nüfusundaki hızlı artış yeni enerji kaynaklarının oluşturulması ve uygulanabilir hale getirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu anlamda doğal gaz hem ısınmada hem de elektrik enerjisi üretiminde son yıllarda gittikçe artan bir grafik çizmektedir. Gerek emisyon değerleri bakımından çevresel etkilerinin olumsuz olmaması gerekse kurulum ve devreye alma sürelerinin kısa olması nedeniyle gaz türbini uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Gaz türbini uygulamalarının yaygınlaşmasındaki en önemli etkenlerden bir diğeri ise basit çevrimde % 40'larda olan verimin kombine çalışmada % 61'lere kadar ulaşmış olmasıdır.

Güç sistemlerinin kararlılığı ile ilgili yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere, gaz türbini ve generatörlerin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, güç sistemlerinin kararlılığı, dağıtım stratejilerinin geliştirilmesi ve beklenmeyen arıza durumunda olacakların keşfedilmesi amaç edinilmiştir. Her bir isteğe vurgu yapacak şekilde matematiksel modelin basitleştirilmesi düşünülmüştür. Ayrıca, çalışma kapsamında alışlagelmiş yakıt sistemi, sıvı ve gaz yakıt çalışma durumları, özel çalışma koşulları olan paralel ve izole çalışma durumları incelenmiş ve entegral regülatörün kullanımından da bahsedilmiştir.

Çalışma blok diyagramlar üzerine kurulmuş ve ayrıca tamamlayıcı denklemler de ifade edilmiştir. Tasarım değerlerini temsil etmek üzere; sistem kazançları, katsayıları ve zaman sabitleri bu çalışmaya dahil edilmiştir. Bu katsayılar testler, gerçek saha tecrübeleri ve bir çok farklı montajlardan elde edilen tecrübeler ile doğrulanmaktadır. Bu çalışma basit çevrim ile sınırlandırılmış olup; ortak tek mil üzerindeki türbin tahrikli generatör dikkate alınmıştır.

Bu gelişmeler çerçevesinde, bu tez çalışmasında elektrik üretiminde son yıllarda yaygın olarak kullanılan gaz türbini santrallerinin temel özellikleri incelenmiş, gaz türbini ve kontrol sistemlerinin temel fonksiyonlarını analiz ederek bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model baz alınarak ve MATLAB bilgisayar programının Simulink Toolbox'ı kullanılarak bilgisayar benzetim programı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen matematiksel model ve benzetim programı ile gaz türbini santrallerinin çıkış güçlerini etkileyen parametreler analiz edilmiştir.

Tez çalışmasına, halen çalışmakta bulunduğum Ambarlı Doğal Gaz Kombine Çevrim Santralinin teknik özelliklerinin ve uygulamalarının incelenmesi de ışık tutmuştur.

INVESTIGATION OF HEAVY DUTY GAS TURBINES AND THEIR SIMULATION

SUMMARY

Energy has a huge importance in human life. This importance has been an increasing trend. It also has an importance to provide people's basic needs. Population in both the world and our country currently increase. So, there is an obligation to find new energy source to provide people's needs. Therefore, natural gas and their application have a popularity in the last decades.

There are a few main reasons producing electricity from natural gas to become widespread. One of the main reason is for building this plant is the high overall efficiency nearly 61 % at combined cycle and 40 % simple cycle operation. Moreover, their comparably short construction time and ease of operability. The other reason is low emmison value.

This thesis provides simplifield mathematical representations of heavy duty gas turbines that are suitable for use in dynamic power system studies and in dynamic analyses of connected equipment. The full range of heavy duty single shaft gas turbines are covered as well as both liquid and gas fuel systems, paralel and isolated operation, droop and isochronous governors. Alterations to the models for the purpose of further simplification are also discussed. Terminology used throughout the block diagrams and supplementary tabels The systems gains, coefficients, and time constants included in this paper represent design and calculated values. The subject of this thesis has been limited to simple cycle single shaft generator drive gas turbines only.

In this thesis, basic properties of gas turbines were investigated and main control bloks were analized to optain correct mathematical model. Gas turbine and their control blocks were simulated by using MATLAB Simulink toolbox software. The main parameters which affect on the maximum continuous power output of gas turbine were analized by the simulation program. The frequency dependency of the gas turbine power output were analized too. The optained model is suitable for long-term simulation of power system dynamic performance involving abnormal frequency conditions.

Also Ambarlı Combined Cycle Power Plant has a importance to pick up basic information and investigate some hints.

1. GİRİŞ

1.1 Tezin Amacı

Son 15 yıl içerisinde özellikle kombine çevrim santralleri olmak üzere, gaz türbinli elektrik santrallerinin kurulması, tüm dünyada büyük oranda artış göstermiştir. Bu santrallerin kurulmasındaki en önemli sebep yaklaşık % 61'lere varan yüksek verimliliklerinin yanı sıra kurulum sürelerinin kısa ve kullanımlarının basit olmasıdır. Isıl güç yardımıyla buhar elde edilmesine dayalı elektrik santrallerinde ise, buharın elde edilmesi esnasında istenmeyen durumlarla karşılaşılması sistem kararlılığı açısından endişe verici bir durumdur. Bunun sonucunda da şebeke davranışları beklenmedik şekilde değişmektedir.

Şebekelerde temel yük ihtiyacı yerine puant yük gereksinimlerinin artış göstermesi, ABD'de çok sayıda basit çevrimli gaz türbinli elektrik santrallerinin kurulmasına sebep olmuştur. Ayrıca Avrupa'da, puant yükü karşılamak için üretimin hızlı bir şekilde sağlanmasına duyulan ihtiyaç sonucunda da güçlü gaz türbinlerine sahip olan kombine çevrimli elektrik santralleri kurulmuştur.

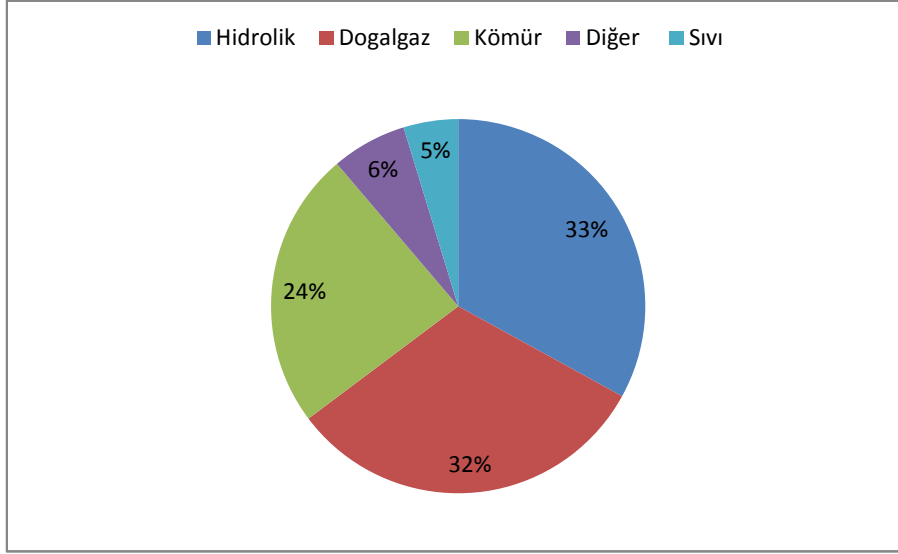
Yukarıdaki sebeplerin yanı sıra, Rusya ile Türkiye arasında imzalanan doğal gaz anlaşmaları sonucu Türkiye, çok büyük miktarlarda doğalgaz satın almaya ve ayrıca yaşanan elektrik enerjisi krizinden de kurtulmaya zorunlu bırakılmıştır. Bu yüzden kombine çevrimli elektrik santrallerinin kurulması, Türkiye için tek çare olarak görülmüştür. Bu gün itibari ile ülkemizde kurulu bulunan termik santrallerin yaklaşık % 56'sını doğalgaz santralleri oluşturmaktadır. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere başka bir ifade ile ülkemizdeki toplam kurulu gücün % 32'sini doğalgaz santralleri oluşturmaktadır [1]. Ayrıca ülkemizdeki elektrik üretiminin yaklaşık %50'si doğalgaz ile gerçekleştirilmektedir.

Bu tez çalışması, akademik çevre ile iletim sistemi operatörleri ve enerji santrali çalışanları gibi teknik çevre arasında bir köprü olarak düşünülebilir. Bu çalışma, aynı zamanda Türkiye şebekesinin frekans karakteristiğinde meydana gelecek

değişikliklerin gaz türbinli üretim merkezlerini nasıl etkileyeceğini tespit etme amacı da taşımaktadır.

Gaz türbinlerinin çok değişken, karmaşık ve dinamik yapıları, bir benzetim programında analiz edilmiş ve uygulanmıştır. Benzetim programı yardımı ile giriş parametreleri değiştirilerek gaz türbini çıkış gücünün değişimi incelenmiştir. Benzetim iki farklı model esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

Frekans değişiminin gaz türbini çıkış gücü üzerindeki etkisi ve çevresel şartların (atmosferik) gaz türbini çıkış gücü üzerindeki tesiri bu çalışmanın temelini oluşturacaktır.



Şekil 1.1 : Türkiye kurulu gücünün kaynaklara göre dağılımı [1].

1.2 Literatür Özeti

General Electric'ten Rowen ve Undrill'in yaptığı çalışmalar, gaz türbinleri, kombine çevrim santralleri ve bunların temel kontrol sistem karakteristiklerinin modellenmesi hakkında ilk çalışmalardır. Rowen'in, gaz türbinlerinin modellenmesi ve kombine çevrim santrallerinin işletme karakteristikleri üzerindeki çalışmaları, bu bilimsel tez çalışmasının başlangıç noktasını oluşturmaktadır [2,3].

Malezya'da 1996 yılında meydana gelen şebeke arızası sonucunda 5.760 MW'lık üretim kaybı olmuş ve bunun sonucunda da şebeke frekansı 1,5 Hz düşmüştür. Frekansın düşmesine bağlı olarak gaz türbini üniteleri de sıralı olarak devreden çıkmış ve geniş bir alanı etkileyen şebeke çökmesi yaşanmıştır.

Joonya'da 2003 verilerine göre gaz türbinleri toplam kurulu gücün %10'unu oluşturmaktadır. Malezya'da meydana gelen bu problemin benzerinin Japonya'da yaşanmaması için Kunitomi, Kurita, Okamoto ve Tada gaz türbinlerinin çıkış gclerinin frekansa değişimine ne kadar bağımlı olduğuna dair çalışmalar yapmışlardır [4]. Kunitomi, Kurita, Okamoto ve Tada'nın Gaz türbini çıkış gücünün şebeke frekansına olan bağımlığı ile ilgili yapmış oldukları çalışma yapılan benzetim programının matematiksel alt yapısını oluşturur [2]. Aynı kaynakta, çıkış gücünün şebeke frekansına bağımlılığının yanında atmosferik şartlara da ne kadar bağımlı olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca Kakimoto ve Baba yaptıkları çalışmalarla gaz türbini çıkış gücünün şebeke frekansına bağımlılığını ortaya koyup modellemişlerdir [5].

Undrill'in, modelleme ve enerji santrallerindeki işletme sorunları üzerindeki çalışmaları, frekans kontrolünde etkili olan enerji santrallerinin işletme modu ile ilgili çoğunlukla gözden kaçan gerçeklerin altını çizmiştir [6].

1.3 Hipotez

Tezin amacı bölümünde yapılan açıklamalar ışığında, büyük üniteler halindeki gaz türbinli elektrik santrallerinin üretime katılmasıyla, şebekelerin iyi tanınması ve sistem üzerinde oluşacak etkilerin öngörülebilmesi için gerekli olan dinamik modellemenin tam ve doğru yapılması büyük önem taşımaktadır.

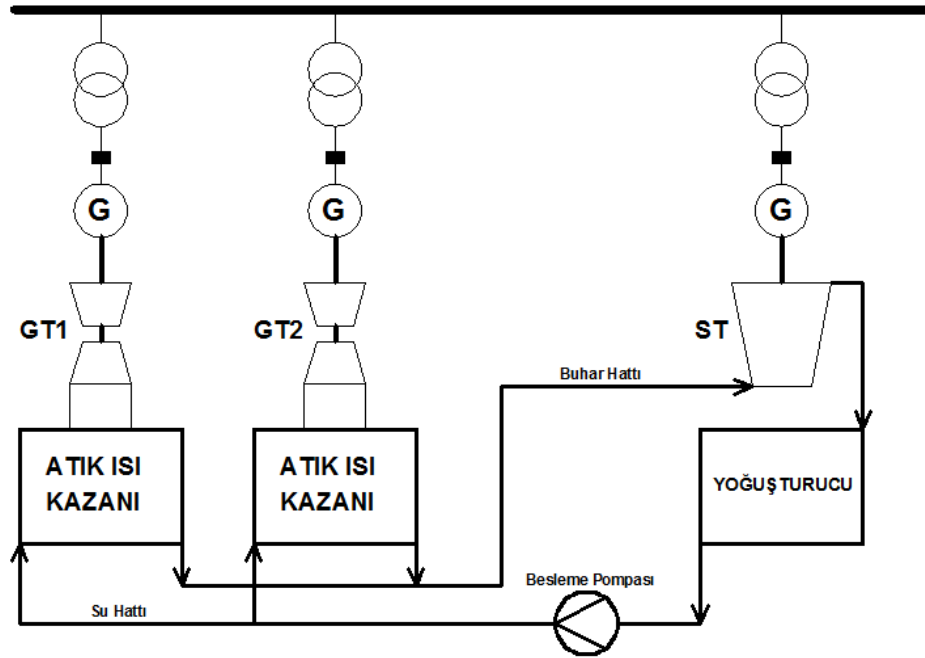
Bu durum; gaz türbinlerinin, türbin ünitelerinin kontrolünde önem taşıyan yk kontrolörleri, hız kontrolörleri ve sıcaklık kontrolörlerini içeren iyi bir modellemenin yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. şebeke ile ilgili yapılacak analiz çalışmalarında, gaz türbinleri için hangi modelin kullanılabilir olduğu ve bu modellerin birbirlerine üstünlüklerinin araştırılması bu çalışmanın esasını teşkil etmektedir.

Ayrıca yapılacak model çalışması gaz türbini çıkış gücünün şebeke frekansına ne kadar bağımlı olduğunu ortaya çıkartacak ve çıkış gücünü etkileyen diğer parametrelerin tespiti ile bu parametrelerin etkilerini ortaya koyacaktır.

2. KOMBİNE ÇEVİRİM SANTRALLERİNİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1 Genel

Kombine çevrim elektrik santrallerinin temel elemanları; yanma odasına basınçlı havayı sağlayan kompresör, yanma odası, yanma odasında elde edilen yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınçtaki gaz ile tahrik edilen gaz türbini, gaz türbininden çıkan egzost gazı ile buhar üretilen atık ısı kazanı ve atık ısı kazanında üretilen buhar ile elektrik üreten buhar türbinleridir.



Şekil 2.1: İki gaz türbini bir buhar türbini konfigürasyonunun şematik gösterimi [7].

Türbinden çıkan egzost gazları, basit bir ısı değıştirici olan atık ısı kazanının (HRSG) içerisinde geçer ve bu sayede basınçlı buhar üretilmiş olur. Bu buhar, güç üretmesi için buhar türbinine gönderilir. Sonuç olarak kombine çevrim diye adlandırılan ve iki ayrı çevrimin birleştirilmesinden oluşan bu sistem sayesinde

yüksek verimle güç üretimi sağlanmış olur. Basit çevrimin verimi %40'lar da iken kombine çevrim ile toplam verim %60'lara çıkartılabilmektedir.

Kombine çevrim santralleri genellikle ikiye bir konfigürasyonu olarak kurulurlar. Bu sistemlerde 2 gaz türbini tarafından beslenen atık ısı kazanlarından çekilen buhar, 1 adet buhar türbinine gönderilir ve bunların her biri ayrı miller üzerindedir. Genellikle bu konfigürasyon “blok” ya da “güç bloğu” olarak adlandırılır. Bir kombine çevrim santrali aynı özelliklere sahip bu bloklardan bir ya da daha fazlası kullanılarak kurulabilir. Şekil 2.1'de iki gaz ve bir buhar türbininden oluşan kombine çevrim santralinin blok diyagramı gösterilmiştir.

Ülkemizde kurulu bulunan Ambarlı Doğal gaz kombine çevrim santrali (DGKÇ) 6 adet gaz türbini ve 3 adet buhar türbininden oluşan 3 adet güç bloğuna sahiptir. Her bir güç bloğu 450 MW olmak üzere toplam kurulu gücü 1.350 MW dır. Ayrıca diğer kamu santrallerinden olan Hamitabat DGKÇ Santrali toplam gücü 1.120 MW olan 4 bloktan ve Bursa DGKÇ Santrali ise toplam gücü 1.432 MW olan 2 bloktan oluşmaktadır. Konfigürasyonlar her üç santralde de 2 gaz bir buhar türbini üzerine kurulmuştur.

Doğal gaz santrallerinin en büyük dezavantajı yüksek üretim maliyetidir. 1.000 m³ doğal gazın 277 \$ olduğu piyasa şartlarında, doğal gazın elektrik üretimindeki yakıt maliyeti 130 TL/MWh olmaktadır. Ayrıca ikincil yakıt olarak motorin kullanılması durumunda motorin yakıt maliyeti; tonun 570 \$ olduğu piyasa şartlarında 170 TL/MWh olmaktadır.

2.2 Ambarlı DGKÇ Santralinin Temel Özellikleri

Bu bölümde ülkemizde kurulu bulunan Ambarlı DGKÇ Santraline ait bilgiler örnek olarak verilecektir. Şekil A.1'de Ambarlı DGKÇ Santraline ait genel prensip şeması verilmiştir.

2.2.1 Gaz türbinleri

Ambarlı DGKÇ Santralinde her biri diğerinin eşdeğeri olan 140 MW gücünde 6 adet gaz türbini bulunmaktadır. Gaz türbinlerinde üç farklı yakıtı yakabilecek şekilde hibrit yakıcılar seçilmiştir. Yakıcılar doğalgaz, motorin ve 6 nolu fuel oil yakabilmektedirler. Botaş tarafından Rusya dan temin edilen doğalgaz bir regülasyon

ve ölçme istasyonunda (RMS) geçirilerek santralin çalışma basıncı olan 17-20 bara düşürülür ve santrale gönderilir. Ambarlı DGKÇ Santral sahası içerisindeki filtre istasyonundan geçirilen doğalgaz gaz türbinlerinin yanma odalarına acil stop ve regülasyon vanaları üzerinden geçirilerek gönderilir.

Ortak mil üzerinde 16 kademeli kompresör ve 4 kademeli türbin bulunmaktadır. Her bir gaz türbini iki adet büyük silo tipi çok yakıclı yanma odası ile donatılmıştır. Her bir yanma odasına 8 adet yakıcı tesis edilmiştir. Yakıcılar iki farklı yanma teknolojisi ile donatılmış olup, yanma sonrası oluşan atık gaz çevre mevzuatı açısından gerekli olan eşik değerin altında NO_x gazı içermektedir. Çevre mevzuatı açısından 300 mg/Nm^3 sınırlaması söz konusu iken, revizyon geçiren iki grup 100 mg/Nm^3 diğer 4 grup ise 240 mg/Nm^3 emisyon değerine sahiptir. Yeni yakıcı tasarımları ile bu değerler tek haneli sayılara düşürülmeye çalışılmaktadır.

Yanma odası için gerekli olan hava açık çevrim ile sağlanmakta olup, iki kademeli hava filtresi tesis edilmiştir. Gaz türbinlerinin yanma odalarına gönderilen hava ile birlikte gaz türbini generatörünün soğutulması için gerekli olan hava da aynı emiş kasasında temin edilir. Gaz türbinlerinin genel prensip şeması Şekil A.2'de verilmiştir.

2.2.2 Atık ısı kazanları

Ambarlı DGKÇ Santralinde her biri bir gaz türbini tarafından sağlanan egzost gazını ısı kaynağı olarak kullanan 6 adet birbirinin aynı olan atık ısı kazanı bulunmaktadır. Kazanlar hem yüksek basınçlı hem de alçak basınçlı kızgın buhar üretecek şekilde boru paketleri ile donatılmışlardır. Kazanlar alçak ve yüksek basınç domuna sahip olup domda dolaşım doğal olarak gerçekleşmektedir.

Her iki kazan için ortak olarak tesis edilen kazan besleme tankından alınan su yüksek ve alçak basınç pompaları vasıtası ile kazanın alçak ve yüksek basınç kısımlarına pompalanır.

Yüksek basınç bölümüne gönderilen su miktarı alçak basınç kısmına gönderilen sudan daha fazla olduğundan, alçak basınç için bir ekonomizer boru paketi tesis edilmiş iken yüksek basınç kısmı için iki ekonomizer boru paketi tesis edilmiştir.

Kazanlara gaz türbinlerinden $538 \text{ }^\circ\text{C}$ ve 510 kg/s 'lik debide çıkan egzost gazı girerken, kazandan yine aynı debide ve $98 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta atık gaz atmosfere bırakılmaktadır.

Kazanların verimi % 93 olup, kazanlarda 79 bar, 526 °C ve 7 bar, 200 °C değerlerinde buhar üretilerek buhar türbinlerine gönderilmektedir. Kazana ait prensip şeması Şekil A.3 ve Şekil A.4'de verilmiştir.

2.2.3 Buhar türbinleri

Ambarlı DGKÇ santralinde her bir buhar türbini iki kazan tarafından beslenmektedir. Buhar türbinleri 170 MW nominal çıkış gücüne sahiptir. Kazanlardan gelen alçak ve yüksek basınç buharları ayrı ayrı karışım kaplarında karıştırılarak buhar türbinlerinin ilgili kademesine gönderilirler. Yüksek basınç kısmı 26 kademeli reaksiyon tipi kanatlardan oluşmuştur. Buhar türbininin yüksek basınç kısmında iş gören buhar kazanın alçak basınç kısmından gelen buharla birleşerek buhar türbininin alçak basınç kısmına uygulanılır. Yüksek basınç kısmına 79 bar basınçta, 128 kg/s debide buhar gelirken alçak basınç kısmına 7 bar basınçta, 153 kg/s debide buhar gelir. Buhar türbinlerine ait prensip şeması Şekil A.5 ve Şekil A.6'da verilmiştir.

2.2.4 Generatör ve transformatörler

Gaz türbinlerinin tahrik ettiği generatörler hava soğutmalı olup, buhar türbininin tahrik ettiği generatörler ise hidrojen soğutmalıdır. Generatör soğutma sistemlerine ait prensip şemaları Şekil A.7 ve Şekil A.8'de verilmiştir.

Gaz türbini generatörleri 160 MVA gücünde ve % 98.5 verimliliktedirler. Uyarma sistemleri statik ikaz sistemidir. Generatör çıkış gerilimi 10.5 kV olup, blok transformatör ile 154 kV ve 380 kV'a yükseltilmektedir. Blok trafoları 180 MVA gücündedir. İç ihtiyaç transformatörü ise 10.5 / 6.3 kV değerinde olup, 2 MVA gücündedir.

Buhar türbini generatörleri 216 MVA gücünde ve % 98.8 verimliliğindedir. Uyarma sistemleri statik ikaz sistemidir. Generatör çıkış gerilimi 15.75 kV olup, blok transformatör ile 154 kV ve 380 kV'a yükseltilmektedir. Blok transformatörler 200 MVA gücündedir. İç ihtiyaç transformatörü ise 15.75 / 6.3 kV değerinde olup, 10 MVA gücündedir.

2.2.5 Şalt sistemi

Altı adet gaz türbini ve üç adet buhar türbininin tahrik ettiği generatörlerin çıkışları blok transformatörler üzerinden santral sahası içinde tesis edilmiş olan 154 kV ve

380 kV'luk baralara bağlıdır. Şalt sahası içersinde 154 kV ve 380 kV'luk baraları bir birine bağlayan iki adet 150 MVA'lık oto transformatörler tesis edilmiştir.

Şalt sahası içersinde SF6 gazlı kesiciler tesis edilmiştir. Ayrıca tüm sistemin çökmesi durumunda (black start) santralin kendi kendine tekrardan üretim yapabilmesi için 2 MVA gücünde diesel generatör tesis edilmiştir.

Santralde orta gerilim kademesi olarak 6 kV'luk baralar oluşturulmuştur. Büyük güçlü tahrik makineleri doğrudan 6 kV baradan beslenmekte olup, alçak gerilim için ise 6/0,4 kV'luk transformatörler bulunmaktadır. Ayrıca santral için hayati önem taşıyan teçhizatın enerjisiz kalmaması için 2 adet invertör ve 2 adet kesintisiz güç kaynağı bulunmaktadır. Kumanda ve Koruma röleri için ise 220 V DC ve 24 V DC baralar oluşturulmuştur. Şalt sistemine ait tek hat şemaları Şekil A.9, Şekil A10, Şekil A.11, Şekil A.12, Şekil A.13 ve Şekil A.14'de verilmiştir.

2.2.6 Kondenser ve soğutma suyu sistemi

Deniz soğutma suyu sistemi, türbin kondenserlerine ve tesisat soğutma suyu sistemine temizlenmiş soğutma suyu sağlar. Her bir buhar türbini yaklaşık olarak 20.000 m³/s'lik soğutma suyuna gereksinim duyar. Denizden çekilen soğutma suyu kum pompaları, tırmıklar, elekler ve midye filtrelerinden geçirilir.

Buhar türbinlerinin alçak basınç kısmında iş görerek buhar haznesine dökülen çürük buharın tekrar yoğuşturulup kazana gönderilmesi gerekmektedir. Bu amaçla alçak basınç türbini alt yatak eksenine dik ve içi titanyum kaplı boru demetleri ile donatılmış kondenserler tesis edilmiştir. Soğutma suyu sistemine ait prensip şeması Şekil A.15'de verilmiştir.

2.2.7 Demineralize su sistemi

Ambarlı DGKÇ Santralinde su buhar çevrimindeki kayıplardan ortaya çıkan katma suyu ihtiyacını karşılamak üzere demineralize su üretim tesisi bulunmaktadır. Doğal kaynaktan temin edilen su, kum ve aktif karbon filtrelerinden geçirilerek ön arıtma işlemine tabi tutulur. Ön arıtmadan geçirilen su katyon, anyon ve karma iyon değiştiricilerinden geçirilerek demineralize hale getirilir. Ayrıca kondensat suyunun iletkenliğine bağlı olarak çalışan kondensat polishing sistemi de mevcuttur. Sistem katyon ve karma iyon değiştiricilerinden oluşur. Kondensat polishing ve demineralizasyon tesisi atık suları nötrale edilerek soğutma suyu hattının giderine verilir ve denize deşarj edilir.

3. GAZ TÜRBİNLERİNİN GELİŞİMİ

3.1 Genel

Buhar türbinlerinin geliştirilmesi sürecinde elde edilen tecrübe ve birikimler gaz türbinlerinin geliştirilmesinde aktif olarak kullanılmışlardır. Buhar türbinleri ile gaz türbinleri arasındaki benzerlikler şaşırtıcı değildir. Günümüzdeki aksel kompresörlü gaz türbinleri reaksiyon buhar türbinlerine çok benzemektedir. Birçok kimse gaz türbinleri ile buhar türbinlerinin benzerliklerinin bugünlerde farkına varmaktadır. Hikaye bize gaz türbini ve buhar türbininin fikir olarak düşünülmesinin eş zamanlı olduğunu söylemektedir. John Barber'in 1791'lerin başında aldığı buhar türbinlerine ilişkin patent potansiyel diğer sıvı ve gaz enerji kaynaklarını da tanımlıyordu. John Barber' in düşündüğü sistem klasik gaz türbinini tanımlayan, ısıtılmış kömürden elde edilen gazın sıkıştırılmış hava ile yakılmasını şeklinde ifade edilmişti. John Barber'in düşüncelerinden önce, Giovanni Branca'nın 1629'daki darbe buhar türbini, Leonardo Vinci'nin 1550'deki smoke mill'i ve Hero of Alexandria'nın buhar türbini sadece birer fikirden ibaretti. Bu fikirlerin 19. yüzyılın başına kadar çalışan bir makineye dönüştürüldüğüne dair kanıt bulunmamaktadır. Son 100 yıla kadar çok değişik fikirler olmasına rağmen çalışan bir makine tasarlanamamıştır [8].

1808 de John Dumball'da çok kademeli bir gaz türbinini fikri oluşturdu. Bu tasarım, akışı bir sonraki kademeye iletecek sabit kanatlar olmadığı ve sadece hareketli kanatların olduğu tasarımdı. Dönen kanatlar arasında sabit kanatların olması gerekliliğini anlayabilmiş olsaydı, aksel akışlı türbinlerin kaynağı olurdu.

Paris'te 1837'de Bresson'un fikri bir fan kullanarak basıncı artırılan havayı yanma odasına göndermekti. Bu şekilde yanma odasında basınçlı hava yanıcı gaz ile karışık yanma oluşacaktı. Yanma sonrası oluşan sıcak gaz türbine gönderilecekti; ayrıca, yanma odası ve diğer ekipmanları soğutmak için daha fazla hava temin edilecekti. İngiltere'de 1850'de Fernimough karma gaz ve buhar türbini modelini önermiştir. Bir kömür kazanındaki sıcak gaza su püskürtülürken hava da üflenmesi sonucu elde edilen gaz ve buhar karışımını iki kademeli rotora aktarmayı planlamıştı.

1872’de Dr Franz Stolze, John Barber ve John Dumball’ın fikirlerini birleştirerek bir eksenel türbini tarafından sürülen bir eksenel kompresör geliştirmiştir. Ancak fon yetersizliğinden fikirlerini bir makineye dönüştürememiştir. 1900’lerin başında Dr Stolze, çok kademeli eksenel kompresör, tek yanma odası, çok kademeli eksenel türbini ve egzost gazından faydalanarak, kompresör deşarj havasını ısıtan parçalardan oluşan bir tasarım yapmıştır. Tasarım 1900 ile 1904 yılları arasında test edilmiş ancak asla düzgün alıştırılamamıştır [8].

Dikkat edileceği gibi yukarda ifade edilen denemeler ve fikirler bu günkü gaz türbini uygulamalarında kullanılmaktadır; şöyle ki Bresson’un hava soğutma sistemi ile türbini teşkil eden malzemelerin mrlерinin uzatılması, Fernimough’un su enjeksiyonu yöntemi ile düşük NOx emisyonlarının elde edilmesi, Dr Franz Stolze’nin atık gazı kullanma yöntemi ile toplam verimliliğin artırılması günümüzde de uygulanmaktadır.

1884’e kadar Sir Charles Parson’un reaksiyon tipi buhar türbini ve gaz türbini patenti ile Giovanni Branca’nın fikri olan darbe buhar türbini zerine Charles de Laval’ın uygulamaları çalışan ilk modeller olmuştur. 1895-1896 yıllarında August C. Rateau, Charles Curtis ve Dr. Zoelly darbe buhar türbini üzerinde geliştirme çalışmaları yapmıştır.

Buhar türbini donanımlarında elde edilen tecrübeler gaz türbini uygulamalarına doğrudan aktarılmıştır. 1903’de Rene Armengaud ve Charles Lemale başarılı bir şekilde test edilen gaz türbini yapmışlardır. Rene Armengaud ve Charles Lemale birkaç gaz türbini deneysel yöntemler ile de test etmişlerdir. Test edilen makinelerden bir 25 HP gücünde Laval buhar türbini ile sürülen bir kompresöre sahip olup, 4.000 d/d’lık hız ile dönmekteydi. Türbini kanatlarının sıcaklığını sabit tutmak için buhar enjeksiyonu uygulanmaktaydı. 1914’de Dr Navy türbini kanatlarını soğutmayı türbini tasarımının bir parçası olarak dşnmşti. Gaz türbini gclerinin küçük olmasından dolayı egzost gaz sıcaklık değerleri de kkti; bu nedenle, gaz türbini tasarımının öncüleri yanma odası, türbini nozulları ve kanatlarını buhar ve su ile soğutmıştır.

Daha sonra Brown Boveri ve şirketi 500 HP gücünde üç kademeli santifürüj kompresörlü gaz türbini yapmıştır. 20. Yüzyılın ilk çeyreğinde gaz türbini üzerine çalışmalar yavaş bir şekilde devam etmiştir. Gelişmelere engel olan yüksek sıcaklık

ve strese dayanıklı malzemelerin yetersizliği idi. Bu sınırlamalardan dolayı, kompresör basınç oranları, türbin sıcaklıkları ve verim düşük olmuştur.

1905 yılında Philadelphia'da Marcus Hook Refinery'ye Brown Boveri tarafından 5.300 kW gücünde ilk gaz türbini ünitesi kurulmuştur. Ayrıca ilk elektrik santrali uygulaması olarak da İsviçre'nin Neuchatel şehrinde 4.000 kW'lık gaz türbini Brown Boveri tarafından kurulmuştur [8].

Gaz türbinlerinin ilk uygulamalarından biri de Oklahoma da Central Power Plant'de kurulan 3.500 kW'lık uygulama olmuştur. 1949 yılında devreye alınan gaz türbini, 15 kademeli bir aksenal kompresör, 6 yakıcılı bir yanma odası ve iki kademeli türbinden oluşmuştur.

1.Dünya savaşı uçakların etkili birer hava saldırı silahı olduğunu göstermiştir. Ancak 1918 ile 1920 arasında pistonlu dizel motorlar uçak motorlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Gaz türbinleri çok büyük olup fazlaca yer kaplamaktaydılar. A.C Rateau ve Stanford Moss 1921 yılında egzost gazını tekrar dizel motorlarda kullanmaya yarayan turbo şarjı bulmuşlardır.

1919 yılında İngiliz Hava Kuvvetleri South Kensington Laboratuvar'ından gaz türbinlerinin uçak motorlarında kullanılıp kullanılmayacağı ile ilgili olarak çalışma yapmalarını istemiştir. Grup direktörü Dr W.J Stern bunun mümkün olamayacağını, tasarlanacak gaz türbininin % 9 verim ile çalışacağını ve çok büyük olacağını söylemiştir.

1935 yılında Alman Hans Polast ve Von Ohain turbojet motoru olarak ilk gaz türbinini gerçekleştirmişlerdir ve bu tasarım uçak üreticisi Ernest Heinkel tarafından kullanılmıştır. II. Dünya savaşı yıllarında da bu motorların imalatı konusunda çalışmalar yapılmıştır.

1900'lu yılların başında kompresör sıkıştırma oranı 2,5:1 iken, 1940'larda 5:1'e , 1960'larda 15:1'e ve günümüzde de 40:1'lere ulaşmıştır.

II. Dünya Şavaşı'ndan sonra uçak motoru olarak tasarlanan gaz türbinlerindeki gelişmeler sabit gaz türbini uygulamalarına aktarılmıştır. Kore savaşından sonra Pratt ve Whitney şirketinin geliştirdiği JT3 (askeri modeli JS7) jet motoru elektrik üreticisi olarak tasarlanmıştır. JT3 FT3 adını alarak elektrik üretimi için kullanılan gaz türbinini oluşturmuştur [8].

1959 yılında Cooper Basseman dünyanın ilk temel yük endüstriyel gaz türbinini kurmuştur. Kurulu gücü 10.500 HP olup, 1981 yılında 100.000 çalışma saatini doldurmuş olmasına rağmen halen çalışır vaziyette bulunmaktaydı. Çizelge 3.1’de buhar türbinleri ile birlikte gaz türbinlerinin gelişimleri ve Çizelge 3.2’de ise ülkemizdeki ve dünyadaki gaz türbini uygulamaları verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Buhar türbinleri ile birlikte gaz türbinlerinin gelişimleri [8].

Tarih	Keşfi Yapan	Keşfin Cinsi
1550	Leonardo da Vinci	Italy Smoke Mill
1629	Giovanni Branca	Impulse Steam Turbine
1791	John Barber, England	Steam Turbine and Gas Turbine
1837	M. Bresson	Buhar Türbini
1850	Fernimough	Gaz Türbini
1872	Dr. Stolze, Germany	Gaz Türbini
1884	Charles A. Parsons	Reaksiyon Buhar Türbini ve Gaz Türbini
1888	Charles G.P. de Laval	İmpulse Buhar Türbini
1894	Armengaud+Lemale	Gaz Türbini
1895	George Westinghouse	Buhar Türbini Hakları
1896	A.C. Rateau, France	Multi İmpulse Buhar Türbini
1896	Charles Curtis Velocity	Compound Buhar Türbini ve Gaz Türbini
1895	Dr. Zoelly, Switzerland	Multi İmpulse Buhar Türbini
1900	F. Stolze, Germany	Aksiyel Kompresör ve Gaz Türbini
1901	Charles Lemale	Gaz Türbini
1902	Stanford A. Moss, USA	Gaz Türbini
1903	Armengaud+Lemale	Gaz Türbini
1905	Brown Boveri	Gaz Türbini
1908	Karavodine	Gaz Türbini ile Loyal Buhar Türbini
1908	Holzwarth	Gaz Türbini ile Curtis ve Rateau Kompresör
1930	Frank Whittle, England	Aero Gaz Türbin(jet motoru)
1938	Brown Boveri	İlk Ticari Aksiyel Kompresörlü Gaz Türbini

Çizelge 3.2: Ülkemizde ve dünyada gaz türbini uygulamaları [9-10].

Uygulamanın Yapıldığı Yer	Üretici Firma	Devreye Giriş Yılı	Kurulu Gücü
Hamitabat DGKÇ Santrali	BBC	1985	92 MW
Ambarlı DGKÇ Santrali	Siemens	1990	140 MW
Bursa DGKÇ Santrali	Mitsubishi	2000	270 MW
Ambarlı Fuel Oil Santrali Rehabilitasyonu	Siemens	2010	280 MW
Siemens	Uygulama Aşamasında	2010	340 MW
Siemens	Test Aşamasında	2011	375 MW

3.2 Teknik Gelişmeler

Son yıllarda gaz türbinlerindeki hızlı gelişmeye aşağıdaki üç faktör sebep olmuştur:

- Metalurji de meydana gelen gelişmelere paralel olarak yanma odası ve türbin bileşenlerinde meydana gelen gelişmeler.
- Termodinamik ve aerodinamik konularında oluşan bilgi birikimi.
- Tasarımda bilgisayar teknolojilerinden faydalanma ve türbin kanatlarını soğutmada kullanılan konfigürasyonların benzetiminin yapılabilmesi.

Yukarıda sıralanılan faktörlerle birlikte düşünecek olursak, kompresör tasarımlarındaki gelişmelerle basınç oranında artma, yanma odası tasarımı ile düşük NOx ve regenerator, türbin tasarımı ile kanat soğutma olanakları artmıştır. Sonuç olarak, toplam performans da artmıştır. Gaz türbinleri geniş bir aralıkta farklı yakıt türleri ile de çalışabilmektedirler. Bunlar sıvı yakıt, gaz yakıt ve ayrıca gaz haline getirilmiş kömür ve ağaçtır. Böylece gaz türbinleri Dünyada en büyük enerji kaynaklarından olan kömürün değerlendirilmesi için ayrı bir yöntem sağlamaktadırlar.

Ayrıca, bu makinelerin yaygınlaşmasında bilgisayar destekli kontrol olanaklarının artmış olması da önemli bir faktördür.

3.3 Dünyada Doğal Gaz Rezervleri ve Muhtemel Gelişmeler

Dünyada doğal gaz tüketimi hızla artış göstermekte olup, doğal gaz tüketiminin dünya enerji kaynakları tüketimi içindeki payı da yükselmektedir. 2020 yılına kadar doğal gaz tüketiminin 167 trilyon kübik feet'e (tcf) (1 kübik feet = 28,32cm³ 1m³=35,3 kübik feet) (4,72 trilyon m³) ulaşması beklenmektedir.1980 yılında 53 tcf ve 1990 yılında 73 tcf olan tüketim, 2000 yılı itibarıyla 85 tcf (2,4 trilyon m³) seviyesine yükselmiştir [11].

Dünya'da doğal gaz talebi Ortadoğu ve Afrika dışında hızla artma eğilimindedir. Asya'daki gelişmekte olan ülkeler ile Güney ve Orta Amerika'da yüksek oranlı doğal gaz talep artışı beklenmektedir. Gelişmiş ülkelerde doğal gaz yıllık tüketim artışının diğer yakıtlara göre yüksek olduğu görülmektedir. 2020 yılına kadar yıllık artışın % 2,1 oranında olması beklenmektedir. Gelişmekte olan ülkelerde de benzeri gelişim izlenmektedir. 1997 yılı itibarıyla gelişmekte olan ülkelerde doğal gaz tüketiminin toplam enerji kullanımındaki payı dünya ortalaması olan % 22 oranının altında ve % 14 oranında bulunmaktadır. Ancak, önümüzdeki dönemde bu ülkelerdeki yıllık gaz tüketiminin % 5,6 oranında artacağı tahmin edilmektedir. Bu ülkelerde, doğal gaz enerji üretiminin yanı sıra ısıtma ve endüstri yakıtı olarak da kullanılmaktadır [11].

Dünya doğal gaz rezervleri son yirmi yılda % 100 oranında artış göstermiştir. 2000 yılı sonu itibarıyla dünya doğal gaz rezervlerinin 5.304 tcf (150,2 trilyon m³) olduğu tahmin edilmektedir. Son yirmi yılda rezerv artışları Eski Sovyet Cumhuriyetlerinde, Ortadoğu, Güney ve Orta Amerika ile Asya Pasifik bölgelerindeki ülkelerde görülmüştür. En önemli artışlar 33 tcf ile Afrika kıtasında Cezayir ve Mısır'da ve 4 tcf ile Asya Pasifik bölgesinde görülmüştür [11].

Dünya'da doğal gaz kaynaklarının bölgesel dağılımına bakıldığında rezervlerin petrole göre daha geniş bir alanda dağıldığı görülmektedir. Ortadoğu Bölgesi petrol rezervlerinin % 65'ine sahip olduğu halde, doğal gaz rezervlerinin % 35'ine sahip bulunmaktadır. Sınırlı petrol rezervlerine sahip bazı bölgeler doğal gaz kaynaklarının daha büyük bir kısmına sahiptirler. Dünya için söz konusu oran rezervlerin kullanım süresini ifade etmekte olup, ortalama 61 yıldır. Bu oran petrol için ise 40 yıl seviyesindedir [11].

4. GAZ TÜRBİNLERİNİN TERMODİNAMİK AÇIDAN İNCELENMESİ

4.1 Genel

Termodinamiğin en önemli uygulama alanlarından biri güç üretimidir. Güç üretimi otomobilleri, uçakları, gemileri hareket ettirmek, elektrik gücü sağlamak, malzemeyi işleyen aletleri ve diğer aletleri çalıştırmak için gereklidir. Güç üreten sistemleri iki ana gruba ayırabiliriz. Bunlar gazlı güç sistemleri ve buharlı güç sistemleridir. Gaz türbinleri ve içten yanmalı motorlar gazlı güç sistemleridir, çalışma sırasında bu akışkanın fazı değişmez ve gaz olarak kalır. Buharlı sistemlerde akışkanın fazı değişir. Faz değişimi akışkanın, duyumsanan ısıtmaya göre daha fazla enerji depolamasını sağlar. Akışkan buhar fazında genişlediği ve sıvı fazında sıkıştırıldığı için, elde edilen işin çok az bir kısmı sıkıştırma için kullanılır. Bu bölümde, gaz türbinli güç santralleri incelenecektir. Bu sistemlerde hava sıkıştırılır, yakılır, türbinde genişletilir ve iş elde edilir.

4.2 Gaz Türbinlerinin Modellenmesi

Gaz türbini terimi iki anlamda kullanılmaktadır. Bazı durumlarda kompresör, yanma odası ve türbinden oluşan tüm sistemi ifade etmekte bazı durumlarda sadece türbini ifade etmektedir.

Şekil 4.1'de şeması verilen basit gaz türbininde atmosferik hava kompresöre girer, sıkıştırılarak yanma odasına gönderilir. Yanma odasında yüksek basınçlı sıcak gaz, yakıt püskürtülerek yakılır. Yanma ürünleri türbinde genişletilerek iş elde edilir. Türbinin sağladığı işin büyük bir bölümü, kompresörü çalıştırmak için harcanır bir kısmı ise yardımcı aletlerde kullanılır, artan kısım santralden elde edilen net iştir.

Gaz türbinleri için en basit model, hava standardı kabullerine dayanan modeldir. Bu modelde,

- İş yapan akışkanın hava olduğu ve havanın, çevrim boyunca ideal gaz gibi davrandığı kabul edilir.

- Yanma işlemi göz önüne alınmaz, akışkana bir dış kaynaktan sabit basınçta ısı verildiği varsayılır.
- Türbin egzost ve kompresörün emme işlemleri göz önüne alınmaz ve türbinden çıkan akışkanın sabit basınçta bir dış kaynağa ısı verdiği sonra kompresöre girdiği kabul edilir.

Türbin, yanma odası, kompresör gibi sistemler sürekli akışlı açık sistemlerdir, ancak santral tamamen kapalı bir sistem olarak göz önüne alınır. Hava standardı kabulleri ile oluşturulan çevrimlere ideal hava çevrimleri denir. Bu kabullerle oluşturulan modellerde başka kabuller de yapılmaktadır. Örneğin, bütün hal değişimlerinin veya bazı hal değişimlerinin tersinir olduğu varsayılmaktadır. Bazı durumlarda, yaklaşık sonuçlar elde etmek için özgül ısıların oda sıcaklığındaki değerlerinde sabit kaldığı kabul edilmektedir. Bu kabullerle oluşturulan modele soğuk hava standardı kabulü ile oluşturulan model denmektedir. Daha önce belirttiğimiz gibi analiz ve tasarımın çeşitli aşamalarında farklı modeller kullanılabilir. Mühendisler standart modellerle değil, duruma en uygun modeli oluşturarak çalışırlar. Bu nedenle hava standardı kabulü her model için aynı kabulleri veya özellikleri içermez.

4.3 Brayton Çevrimi veya Basit Gaz Türbini Çevrimi

Brayton Çevrimi, hava standardı kabulü ile oluşturulmuş, basit bir gaz türbini çevrimidir. Şekil 4.1'deki çevrime ait akış, P-V ve T-s diyagramları gösterilmiştir. Sıkıştırma ve genişleme işlemleri izentropiktir. Isı alışverişleri sabit basınçta yapılmaktadır. (Gaz türbini çevrimleri T-s diyagramında çizilirken, sabit basınç eğrilerinin artan entropi yönünde birbirinden ayrıldığı açıkça gösterilmelidir. Bu şekilde türbinin sağladığı işin kompresörün harcadığı işten fazla olduğu görülür. Aksi halde türbinden amaçlanan iş elde edilmez.)

Gaz türbini çevrimine termodinamiğin 1. yasası uygulanarak türbin işi, kompresör işi, net iş ve verim elde edilir.

Özgül ısılar sabit kabul edilirse (soğuk hava standardı kabulü), verimin basınç oranının fonksiyonu olduğu görülür. Verim maksimum sıcaklığa bağlı değildir. Özgül ısıların değiştiği durumda verim sıcaklığa bağlıdır. T-s diyagramında görüldüğü gibi Brayton çevriminin verimi, aynı sıcaklık aralığında çalışan Carnot çevriminin veriminden daha azdır.

Böylece Brayton çevriminin verimi, aynı sıcaklık aralığında çalışan Carnot çevriminin veriminden daha küçüktür.

Gaz türbininde iş yapan akışkan genellikle havadır ve hava yakıt oranı yüksektir. Bazı uygulamalarda akışkanın kapalı devre olarak çalıştığı başka akışkanlar kullanılır. Bu çevrimlerde, hava standardı kabulleri yapılan çevrimlerde olduğu gibi, yanma işlemi yerine sabit basınçta ısı alma işlemi, egzost ve emme işlemleri yerine de sabit basınçta ısı verme işlemi olduğu varsayılır. Soğuk hava standardı kabulleri ile göz önüne alınan Brayton çevriminin verimi, kompresördeki sıkıştırma oranına ve çevrimdeki akışkanın özgül ısılarının oranına bağlıdır. Hava standardı kabulleri ile oluşturulan model gerçek sistemin eğilimlerini belirler, bu nedenle özgül ısıların oranı havadan farklı olan bir akışkanla sistemi çalıştırmak yararlı olabilir. Geri iş oranı 4.1 denkleminde verildiği gibi tanımlanır.

$$\text{Geri iş oranı} = \frac{\text{Kompresörün harcadığı enerji}}{\text{Türbinin sağladığı iş}} \quad (4.1)$$

$$W_{\text{inc}} = W_T - W_{\text{çevrim}} \quad (4.2)$$

Burada,

Kompresörün harcadığı enerji: $W_{\text{in,c}}$

Türbinin sağladığı iş: W_T

Çevrimin sağladığı iş: $W_{\text{çevrim}}$ olup,

$$\text{Geri iş oranı} = 1 - \frac{W_{\text{çevrim}}}{W_T} \quad (4.3)$$

Bu oran gaz türbini çevrimlerinde büyük olduğundan, kompresör ve türbin verimindeki küçük azalmalar, türbin veriminde büyük azalmalara neden olur. Örneğin, türbinin sağladığı güç 9000 kW, kompresörün harcadığı güç 6000 kW ise santralin net gücü 3000 kW'dır. Kompresör veriminin % 80 den % 72'ye düşmesi, kompresör için gerekli gücü 6670 kW'a çıkarır ve santralin sağladığı gücü % 22.3 azaltır. Santralin ısı verimi aynı ölçüde azalmaz, çünkü kompresör veriminin azalması, kompresör çıkış sıcaklığını artırır, böylece çevrime verilmesi gereken ısı miktarı azalır. Bu örnekte görüldüğü gibi gaz türbini santrallerinde kompresör ve türbin veriminin büyük önemi vardır. Kompresör ve türbin verimleri artırılmadığı

için, gaz türbini santrallerinin gelişimi uzun zaman almıştır. Kompresör ve türbin veriminin % 60-70 aralığındaki değerler için kompresörün harcadığı enerji, türbinin ürettiği işe eşittir ve çevrimden elde edilen iş sıfırdır. Kompresör ve türbinin yukarıda ifade edilen verimlerinden daha düşük değerlerde sistemin çalışması mümkün değildir, çünkü kompresörün harcadığı enerji türbinin ürettiği işten daha büyüktür.

Gerçek gaz türbini santrallerinde sistemdeki aygıtları birbirine bağlayan geçitlerdeki sürtünme ve yanma odasındaki etkiler tersinmezliğin artmasına neden olur. Türbin giriş sıcaklığının artırılması, tersinmezliğin etkilerini azaltır, fakat sıcaklığın artırılması, türbin malzemesinin dayanıklılığı ile sınırlıdır. Türbin sürekli olarak yüksek sıcaklıktaki akışkan ile temas eder; pistonlu makinelerde ise piston silindir ve diğer metal parçalar, çevrimin bir bölümünde yüksek sıcaklıktaki gazla, kalan kısmında çok daha düşük sıcaklıktaki gazla temas ederler. Bu nedenle, gaz türbininde maksimum sıcaklık sınırlandırılmıştır ve pistonlu makinelerdeki maksimum sıcaklık, gaz türbinlerindeki maksimum sıcaklığa göre çok yüksek olabilir.

Gaz türbini çevrimlerinde maksimum sıcaklığı azaltmak için hava yakıt oranı artırılır. Bu nedenle yanma ürünlerinin hava olduğu kabul edilebilir, ancak geri iş oranı çok büyük olduğundan; yakıt kütesinin hesaplara katılması türbinden geçen akışkan kütesini az miktarda, çevrimin net işini ise önemli miktarda artırır. Yakıt kütesinin göz önüne alındığı ve yanma ürünlerinin hava kabul edildiği modellere, yakıt kütesinin göz önüne alındığı ve hava standardı kabullerinin yapıldığı modeller denmektedir. Sürekli akıştaki yanma için birinci yasa ifadesi yazılarak, belirli bir sıcaklık elde etmek için gerekli hava yakıt oranı bulunur:

$$Q = 0 = -\Delta H = \sum_{\text{Girenler}} m(h - h_{\text{ref}}) - \sum_{\text{Ürünler}} m(h - h_{\text{ref}}) - \Delta H_R \quad (4.4)$$

Burada,

m: kütleli debi

h: entalpi

$\frac{\Delta H_R}{m_f}$: birim yakıt kütesinin yanma entalpisidir.

Yukarıdaki denklemde kinetik enerji değişimi ihmal edilmiştir. Şekil 4.3'deki gibi, giren havayı ₂ indisi ile, giren yakıtı _f indisi ile, yanma ürünlerini de ₃ indisi ile gösterelim. Buna göre,

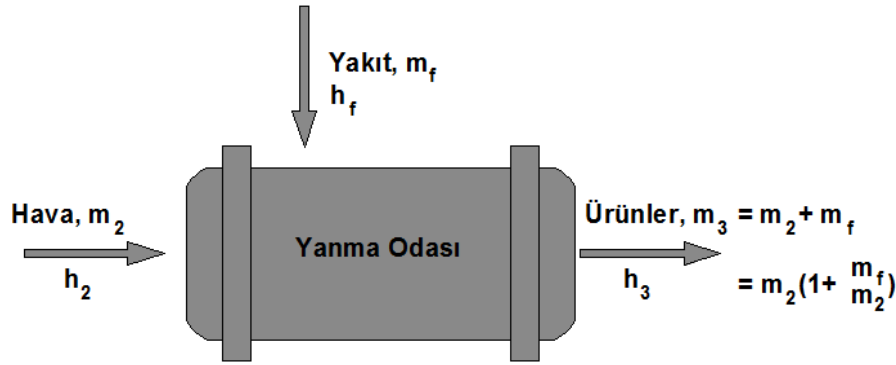
$$0 = m_2 \times (h_2 - h_{ref})_{hava} + m_f \times (h_f - h_{ref})_{yakıt} - m_3 \times (h_3 - h_{ref})_{ürün} - \Delta H_R \quad (4.5)$$

Olur; burada,

$$m_3 = m_2 + m_f \quad (4.6)$$

$$\frac{m_2}{m_f} = \frac{\frac{\Delta H_R}{m_f} + (h_3 - h_{ref})_{hava} - (h_f - h_{ref})_{yakıt}}{h_2 - h_3} \quad (4.7)$$

dür.



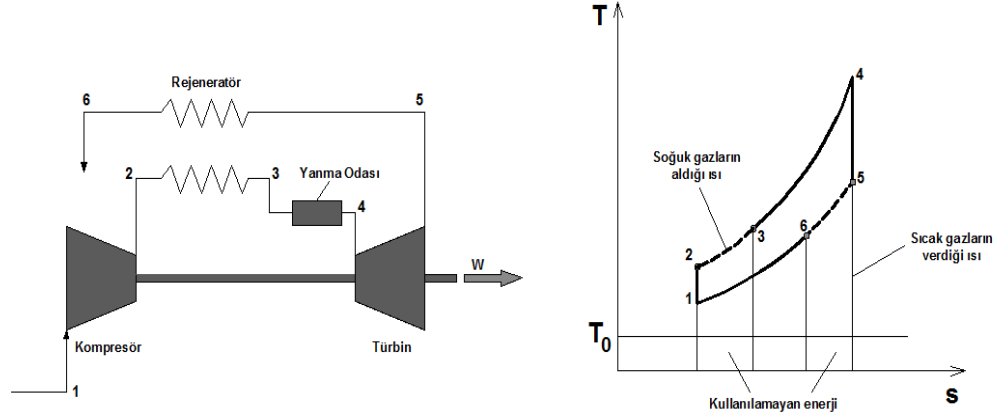
Şekil 4.3: Yanma odasındaki kütle dengesi [12].

4.4 Termodinamik olarak Gaz Türbini Çeşitlerinin İncelenmesi

4.4.1 Regneratörlü (reküperatörlü) gaz türbinleri

Basit gaz türbini çevriminde türbinden çıkan havanın sıcaklığı, kompresörden çıkan havanın sıcaklığından daha büyüktür. Sıcak egzost gazları bir ısı değiştiriciden geçirilerek kompresörden çıkan gazları ısıtmak için kullanılabilir. Bu tip bir ısı değiştirigecine regneratör veya reküperatör denir. Regneratör, sistemde harcanan yakıt miktarını azaltır. İdeal halde regneratördeki akış sabit basınçta gerçekleşir.

Şekil 4.4'de regneratörlü Brayton çevrimi görülmektedir.



Şekil 4.4 : Regeneratörlü ideal gaz türbini çevrimi [12].

Regeneratörden çevreye ısı geçişi olmadığı kabul edilir ve kinetik enerji ihmal edilirse enerji dengesi $h_3 - h_2 = h_5 - h_6$ şeklinde yazılır. $q_{2-3} = -q_{5-6}$ olduğundan T-s diyagramındaki kesik çizgilerle ifade edilen büyüklükler eşittir. Isı geçişi sonlu sıcaklık farkı ile gerçekleşiyorsa, entropinin artması ilkesine göre $s_3 - s_2 + s_6 - s_5 > 0$ veya $\Delta s_{2-3} > \Delta s_{5-6}$ ve regeneratördeki tersinmezlik $i = T_0 (s_3 - s_2 + s_6 - s_5)$ dir.

Regeneratörlü çevrimin veriminin artması için T_3 sıcaklığının mümkün olduğu kadar yüksek olması gerekir. Sınır değer T_5 dir. Bu sınıra yaklaşma derecesi regeneratör verimi ile ifade edilir.

$$\text{Regeneratör verimi} = \frac{(T_3 - T_2)}{(T_5 - T_2)} \quad (4.8)$$

Burada, T: Sıcaklıktır.

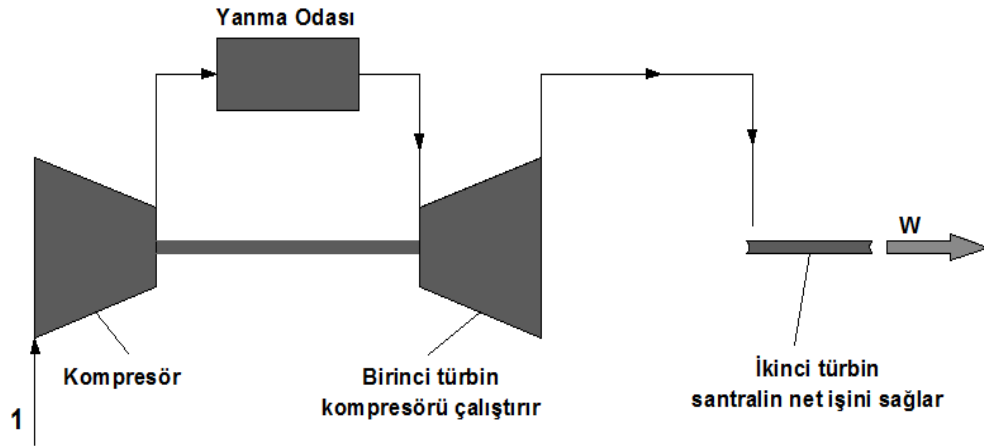
Regeneratör veriminin artması için ısı geçişi yüzeylerinin artırılması gerekir. Bu durumda regeneratörün fiyatı ve kapladığı yer artar. Yüksek verimli regeneratörler ekonomik değildir, çünkü sabit giderleri yakıttan tasarruf edilen miktarı aşar. Bu nedenle gerçek sistemlerde regeneratör verimi % 70 değerini geçmez.

Gaz türbini santrallerinde, rejenerasyon nedeniyle yapılan ek yatırım ve artan bakım masrafı, tasarruf edilen yakıt harcamaları yanında önemsiz ise rejenerasyon yapılır. Uygulamada genellikle bu durum gerçekleşmez. Regeneratör ve regeneratörü sisteme bağlayan borulardaki sürtünme basıncın düşmesine dolayısıyla verimin azalmasına sebep olur. Regeneratörden ve regeneratörü sisteme bağlayan borulardan büyük

hacimli sıcak gazlar geçer ve sürtünme kayıplarının en aza indirilmesi istenir, bu nedenle regneratör ilavesi için yapılan yatırım oldukça fazladır.

Güç üretim sistemlerinin veriminin artırılmasının diğer bir yolu gaz ve buhar türbini santrallerinin birleştirilmesidir. Gaz türbininden çıkan gazların sıcaklığı 550 °C civarındadır ve bu gazlar buhar üretmek için kullanılır.

Gaz türbinlerinin çalışması sırasında mil hızı ve basınç oranları değişir. Bazı santrallerde iki türbin vardır. Birinci türbin sadece kompresörü çalıştırır. Santralin net işini ikinci türbin sağlar. İkinci türbinin devir sayısını yük ihtiyacı belirler. Bu tip bir sisteme ait şematik gösterim Şekil 4.5’de verilmiştir.



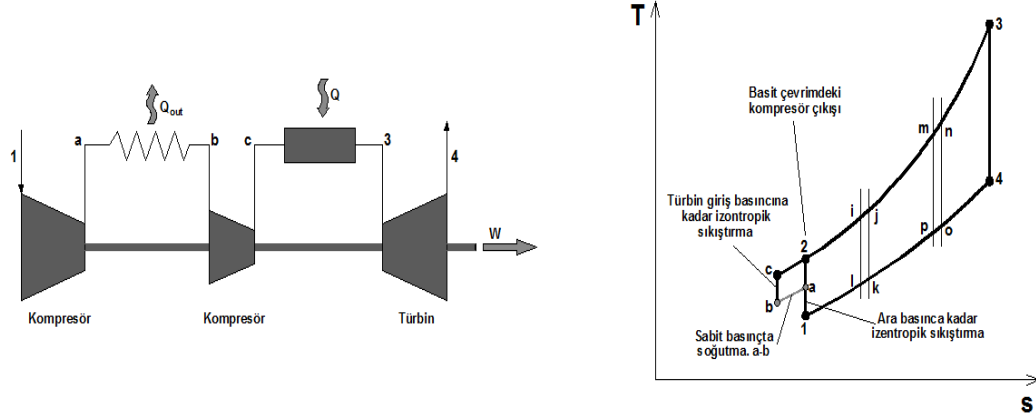
Şekil 4.5 : İki milli basit gaz türbini santrali [12].

4.4.2 Ara soğutmalı gaz türbinleri

Gaz türbini çevriminin net işi türbinin sağladığı iş ile kompresörün harcadığı iş arasındaki farktır. Net iş, türbin işi artırılarak veya kompresör işi azaltılarak artırılabilir. Ara ısıtma ve ara soğutma bu amaçla yapılır.

Gaz türbini çevrimlerinde, sıkıştırma iki veya üç kademede, ara soğutmalı olarak yapılarak, geri iş oranı azalır ve diğer koşullar değişmeden çevrimin net işi artar.

Ara soğutma, gaz türbini çevriminin veriminin azalmasına neden olur. Şekil 4.6’da basit gaz türbini çevrimi 1-2-3-4-1 ve ara soğutmalı gaz türbini çevrimi 1-a-b-c-2-3-4-1 aynı diyagram üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : Ara soğutmalı ideal gaz türbini çevrimleri [12].

Basit gaz türbini çevrimi i-j-k-l-i ve m-n-o-p-m gibi çevrimlere bölünür ve bunların sayısı artırılırsa küçük çevrimler Carnot çevrimine yaklaşır. Özgül ısıların sabit olduğunu kabul edersek, sıcaklık ve basınç arasındaki bağlantı

$$\frac{T_3}{T_4} = \frac{T_m}{T_p} = \frac{T_i}{T_1} = \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} \quad (4.9)$$

Burda, T : sıcaklık ve P : basınçtır.

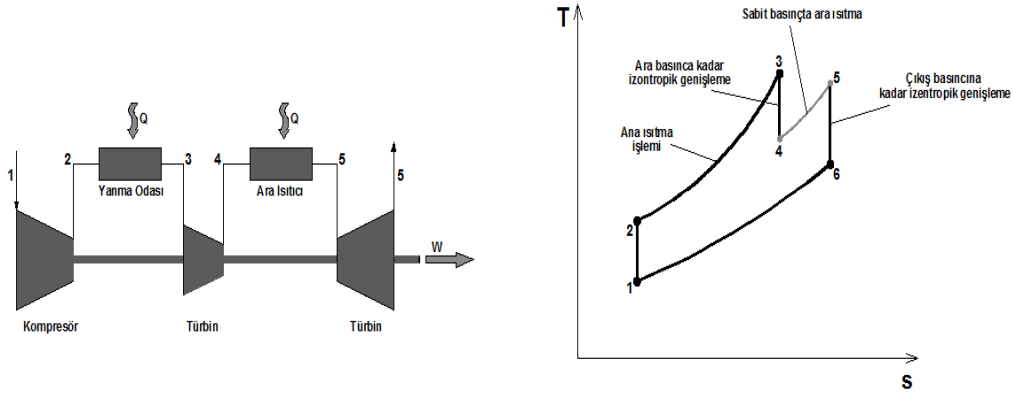
O halde basit gaz türbini çevrimini oluşturan Carnot çevrimlerinin verimleri eşittir. Benzer olarak, a-b-c-2-a çevrimini oluşturan Carnot çevrimlerinin verimi de eşittir, ancak bunların verimleri 1-2-3-4-1 çevrimini oluşturan Carnot çevrimlerinin veriminden daha küçüktür. Dolayısı ile basit çevrime ara soğutucunun eklenmesi verimi azaltır. Verimin azaldığını göstermek için özgül ısıların sabit olduğu kabul edilmişti, aynı sonuca özgül ısıları değişken kabul edilerek de varılır. Ara soğutmalı bir çevrime regneratör ilave edilmesi, c-2 işlemi için gerekli ek ısı miktarının sıcak egzost gazlarından elde edilmesini sağlar ve bu durumda verim artar ve bu durumda daha büyük regneratör kullanılması gerekir.

4.4.3 Ara ısıtmalı gaz türbinleri

Türbindeki genişleme birkaç kademede, kademeler arasında ısıtma yapılarak gerçekleştirilirse, türbinin sağladığı iş ve çevrimin verimi artar. Bu işleme ara ısıtma denir. Bir ara ısıtmalı gaz türbini çevriminin akış ve T-s diyagramı şekil 4.7'de

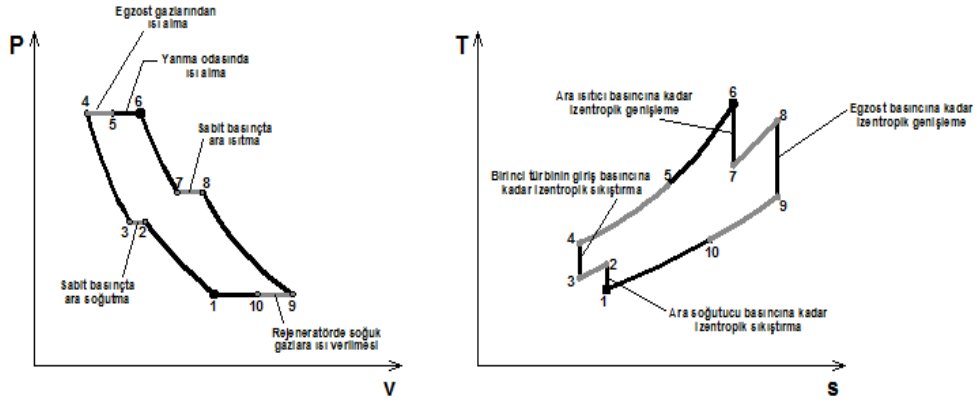
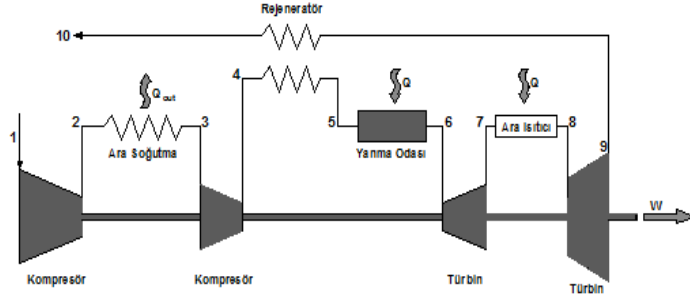
gösterilmiştir. Ara ısıtma yapılması çevrimin verimini azaltır. Ara ısıtma ile birlikte rejenerasyon yapılırsa verim artar.

Ara ısıtma türbin çıkış sıcaklığını artırır, böylece regneratörde türbine giren akışkanın sıcaklığını daha fazla yükseltmek mümkün olur. Ara ısıtma sayısı artırılırsa, türbin çıkış sıcaklığı da artar ve rejenerasyon daha iyi sonuç verir.



Şekil 4.7 : Ara ısıtmalı ideal gaz türbini çevrimleri [12].

Ara ısıtmalı, ara soğutmalı ve regneratörlü gaz türbini çevrimine ait diyagramlar Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Ara soğutma ve ısıtma sayısı ile regneratör verimi artırılırsa Ericsson çevrimine yaklaşılr. Adyabatik genişlemeli ve sıkıştırırmalı sistemlerde, ara ısıtma ve ara soğutma sayısının artırılması ile yapılan harcamalar, yakıt tasarrufundan elde edilen kazancı aşabilir ancak izoterm sıkıştırma ve genişleme koşullarına yaklaşmanın yararları da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.8 : Ara soğutmalı, ara ısıtmalı ve regneratörlü ideal gaz türbini çevrimi [12].

5. HIZ REGÜLATÖRÜ

5.1 Genel Bakış

Elektrik santrallerinin önemli kontrol sistemlerindedir. Türbin hızını ve gücünü regüle ederek şebeke frekansının regülasyonuna katkıda bulunur. Hız regülatörü yol verme ve yüklenmede ana işletme arayüzüdür.

Güç sistemlerinin kararlı hal ve dinamik çalışma performansları elektrik santrallerinin cevap verme yeteneğine bağlıdır. Elektrik santrallerinin cevap verme yeteneklerinde hız regülatörü büyük bir rol oynar. Elektrohidrolik hız yöneticilerindeki gelişmelere bağlı olarak elektrik santrallerinin şebeke performansına katkıları da artmaktadır.

Bu bölümde türbin hız regülatörüne genel bir bakış yapılacak ve hız yöneticisinin frekans kontrolündeki rolü incelenecektir.

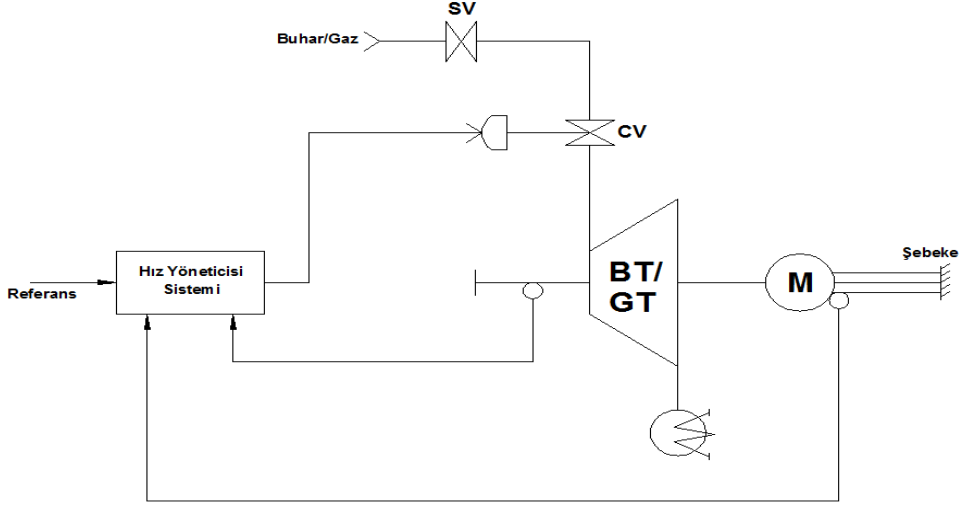
5.2 Temel Hız Regülatörü

Türbinin ürettiği güç sabit kalmayarak tüketicilerin (yükün) değişimine bağlı olarak sürekli değişir. Üretilen güç ile tüketim arasındaki dengesizlik frekansda başka bir ifadeyle türbinin hızında değişim olarak görülür. Eğer yük değişken ise, frekansın sabit kalabilmesi için üretimin de değişken olması gerekir. Bu iş hız yöneticisi tarafından yapılır. Frekans yada hız üretim ile tüketim arasındaki dengesizliğin bir göstergesidir ve üretimi artırıp azaltmak için kullanılır.

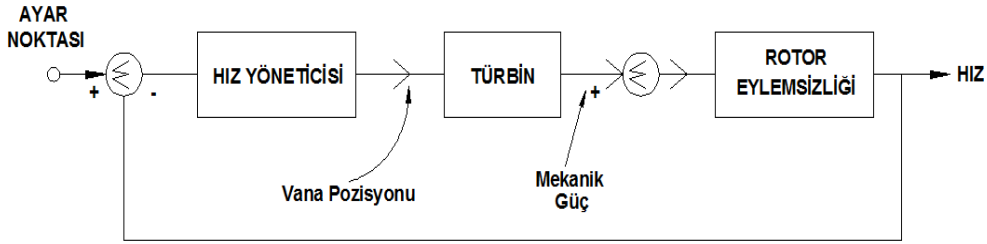
Hız regülatörü, güç ve hız hatasına bağlı olarak buhar türbinlerinde türbine giden buhar miktarını, gaz türbinlerinde de yanma odasına giden gaz miktarını kontrol eder. Bu çevrim kapalı bir çevrim olup, güç ve hız hatası sıfır olana kadar çevrim devam eder.

Temel hız regülatörünün şematik gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir. Buhar türbininde buhar, gaz türbininde gaz ve hidrolik türbinlerde geçen su miktarı kontrol vanası tarafından kontrol edilir. Bu kontrol vanası regülasyon vanasıdır. Kontrol vanasının

önüne seri olarak bağlanan ikinci vana stop vanası olarak adlandırılır ve koruma amaçlıdır. Stop vanası ya açıktır ya da kapalıdır. Koruma sisteminin çalışması durumunda stop vanası kapatılarak buhar, gaz yada su akışını engeller. Şekil 5.2’de hız regülatörünün çalışmasına ait blok diyagram verilmiştir.



Şekil 5.1: Buhar /Gaz türbini hız regülatörü şeması [13].



Şekil 5.2: Hız regülatörü fonksiyonel blok diyagramı [13].

Elektronik devre çıkışı gerilim veya akımdır. Elektrohidrolik çevirici (EHC) vasıtasıyla bu akım veya gerilim sinyalleri hidrolik basınç veya piston konum sinyaline dönüştürülür. Sonuç olarak kontrol vanaları, hidrolik kontrol servo motorlarınca kontrol edilir.

Kontrol vanasından geçen buhar, gaz veya su miktarı, vananın çalışma aralığındaki açıklık oranı ile orantılıdır; dolayısı ile kontrol vanası açıklığının değişmesi ile birlikte türbine giden tahrik maddesi miktarı da değişecek ve buna paralel olarak

türbinin çıkış gücü de değişecektir. Bu şekilde, hız regülatörü türbinin mekanik çıkış gücünü değiştirmiş olur.

Türbinin yüksüz ve şebeke ile senkronize olmadığı bir durumda, dönme kayıpları dışındaki bütün güç rotorun ivmelenmesi için harcanır. Hızdaki değişim oranı rotorun ataleti ile regüle edilir.

Şebeke ile bağlı çalışma durumunda, hız regülatörü kontrol vanasının konumu değiştirdiğinde, güç sistem değişiklikleri için şebekeye aktarılır.

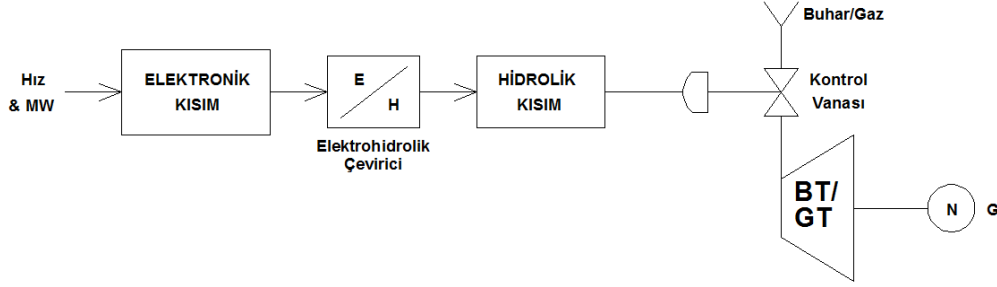
Türbin generatör bloğu devreye alındığında, akışkan miktarı regüle edilerek, hız tam olarak hız regülatörünce kontrol edilir. Türbin generatör bloğu şebekeye senkronize olduktan sonra aynı kontrol sistemi makinenin yüklenmesi için kullanılır. Senkronize olunan şebekenin ataleti çok büyükse (sonsuz güçlü şebeke), senkronize olan generatör şebeke frekansını değiştiremez. Ancak diğer generatör grupları ile otomatik yük frekans kontrolüne dahil olup, frekans regülasyonuna katkıda bulunur.

Blok diyagramdan görüleceği gibi, vana açıklığı, referans değeri değiştirilerek veya hızın değişmesi ile değiştirilir. Bu işlem birincil regülasyon olarak adlandırılır. Referans aktif yük ayar değeri uzaktan yük frekans kontrolünce de değiştirilebilir. Bu işlemde ikincil regülasyon olarak adlandırılır. Üretim gruplarının bazıları ikincil regülasyona katılabilir.

5.3 Elektrohidrolik Hız Regülasyon Sistemi

Hız kontrolünde makine şebekeye bağlı değildir veya şebekeden izoledir. Yük kontrolünde ise makine şebekeye paralel bağlıdır. Hız regülatörü üç temel parçadan oluşur. Bunlar algılayıcılar, sinyal işleme kısmı ve sinyal kuvvetlendirme devreleridir. Bu fonksiyonlar elektronik, mekanik ve hidrolik malzemeler kullanılarak elektrohidrolik hız regülatöründe gerçekleştirilir. Şematik gösterimi Şekil 5.3'de verilmiştir.

Elektrik santrallerinin ilk kurulduğu dönemlerde mekanik ve hidrolik devre elemanları kullanılarak hız regülatörleri tasarlanmaktaydı. Bu tür regülatörler mekanik - hidrolik hız yöneticileri olarak adlandırılırlar (MHG). Elektronik teknolojilerinde meydana gelen gelişmeler sonucunda mikroişlemci ve dijital sinyal işleme (DSP) tabanlı hız yöneticileri tasarlanmakta ve modern elektrik üretim tesislerinde kullanılmaktadırlar.



Şekil 5.3: Elektrohidrolik hız regülatörü şeması [13].

Algılama : Algılayıcılardan kastedilen hız ve üretilen güç bilgisinin bilinmesidir. Herkes tarafından çok iyi bilinen uçan top hız yöneticileri mekanik hız sensörleridir. Hız sinyalini mekanik hareket sinyaline dönüştürürler. Günümüzde ise hall effect etkili elektronik sensörler veya hidrolik sensörler hız bilgisini ölçmek için kullanılırlar. Hidrolik sensörlerde özel bir pompa söz konusudur ve bu pompanın çıkış basıncı pompanın hızı ile lineer olarak değişim gösterir.

Sinyal İşleme : Arzu edilen vana açıklık sinyalinin oluşturulması için orantısal (P), orantısal ve entegral (PI), orantısal ve türev (PD) ile orantısal, entegral ve türev (PID) fonksiyonlarının olduğu kontrol devrelerini içerir. Dijital hız yöneticilerinde bu fonksiyonlar yazılım blokları ile gerçekleştirilir.

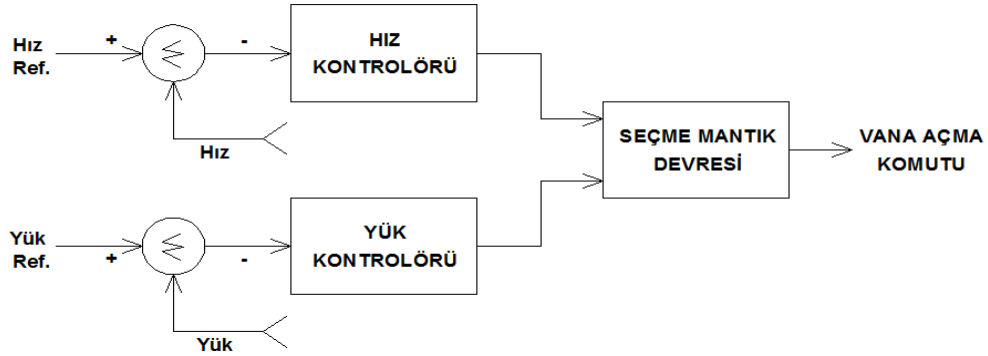
Kuvvetlendirme : Kontrol vanasının açıklığının kontrol edilebilmesi için yeterli gücün üretilmesi gerekmektedir.

5.4 Hız ve Yük Kontrolörleri

Mekanik ve hidrolik hız yöneticilerinin (MHG) kullanıldığı dönemlerde kontrol işlemi sadece hız bilgisi ile orantılı olarak yapılmaktaydı. Vana açma komutu sadece hız hatası ile orantılı olarak oluşturulmaktaydı. Şebeke ile izole olarak çalışılırken hız kontrolü aktif olmakta ve şebeke ile paralel çalışılırken ise güç çıkışı kontrol edilmekteydi. Günümüzde kullanılan elektronik hız yöneticilerinde, hız ve yük kontrolü için bir birinden ayrı kontrol devreleri bulunmaktadır. Bu durum Şekil 5.4'de gösterilmiştir.

Hız osilasyonunu söndürmek amacıyla hız kontrol çevrimi ilave üretim gerektirir. Bu işlem PD kontrolör kullanılarak yapılır. PD kontrolörün kullanılması durumunda,

vana açma komutu hız hatası ile orantılı olduğu gibi onun türevi, diğer bir ifade ile değişim oranı ile de orantılıdır. PD kontrolör sistemin dinamik cevabını iyileştirir.



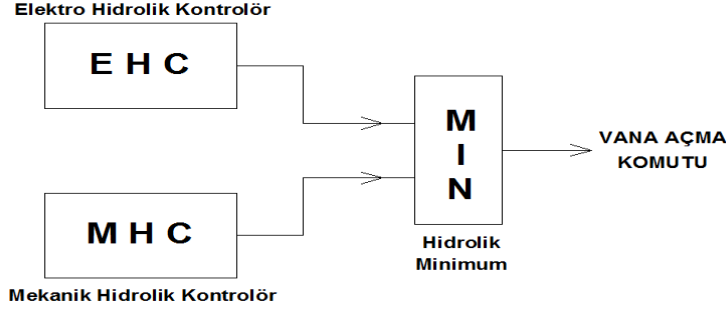
Şekil 5.4 : EHG deki hız ve yük kontrolörleri [13].

Yük kontrol çevrimi sadece üretilen güç hatası ile ilgilidir. Üretilen güç güç algılayıcı üzerinden alınır. Kontrol çevrimi generatör şebeke ile paralel çalışırken etkilidir. Kontrolör PI karakteristiktir. Hangi kontrolörün hakim kontrolör olacağı bir seçim mantık devresi ile belirlenir.

5.5 Yedek Hız Yöneticisi Olarak Mekanik Hidrolik Hız Yöneticisi

Daha önceki kısımlarda bahsedildiği gibi mekanik hidrolik hız yöneticisi hidrolik hız sensörü ve primer kuvvetlendirme devresi (follow up pistons) içermektedir.

Gerek EHG ve gerekse MHG sistemleri sürekli vana açma kapama sinyalleri üretirler. Üretilen vana açma kapama sinyalleri her iki sistem de aynı büyüklüktedir. Bu iki açma sinyali bir hidrolik minimum devresinin girişini oluşturup bunlardan küçük olanı vanaya açma kapama sinyali gönderir. Herhangi bir nedenle EHG'de sorun oluşursa MHG otomatik olarak devreye girer. Birçok ülkede 30 yıldan beri çalışan mekanik hidrolik hız yöneticileri bulunmaktadır. Şekil 5.5'de yedek hız yöneticisi olarak mekanik hidrolik hız yöneticisi blok şeması verilmiştir.

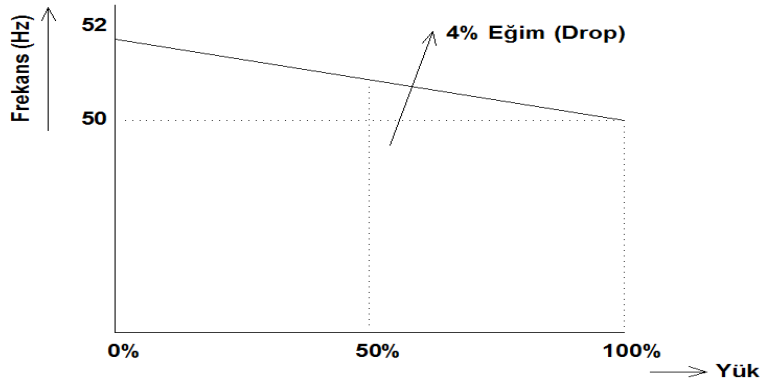


Şekil 5.5: Yedek hız regülatörü olarak mekanik hidrolik hız regülatörü [13].

5.6 Performans Bakış Açıları

5.6.1 Regülasyon veya düşü karakteristiği

Her zaman hız değişikliklerinde üretilen güç ile yük arasında uyumsuzluk vardır. Daha önce de bahsedildiği gibi, hız yöneticisi hız değişikliklerini algılayarak vana açıklığını ayarlar ve bu da güç çıkışının değişmesini sağlar. Bu işlem güç uyumsuzluğu sıfırlanıncaya kadar devam eder, fakat hız hatası kalır. Eğer hızda % 4'lük değişim olduğunda güç çıkışında % 100'lük bir değişim oluyorsa, regülasyon % 4'lüktür denir. Şekil 5.6'da verilen güç frekans eğrisinde regülasyon ifade edilmiştir. Üretim sabit iken yük düştüğünde frekans yükselir. % 4 regülasyonlu bir sistemde, yük % 50 düşerse frekans % 2 artar. Yük % 100 azalırca frekans % 4 artar. Bir başka ifade ile, frekanstaki % 4'lük artış güç üretiminin % 100 azaltılması anlamını taşır. Düşü frekans regülasyonu için önemli parametredir. Kontrol sisteminin sürekli hal kazancı eğimin tersi olarak alınır. Örneğin % 4 düşülü bir sistemde sürekli hal kazancı 25 tir.



Şekil 5.6: Düşü karakteristiğine bağlı güç frekans eğrisi [13].

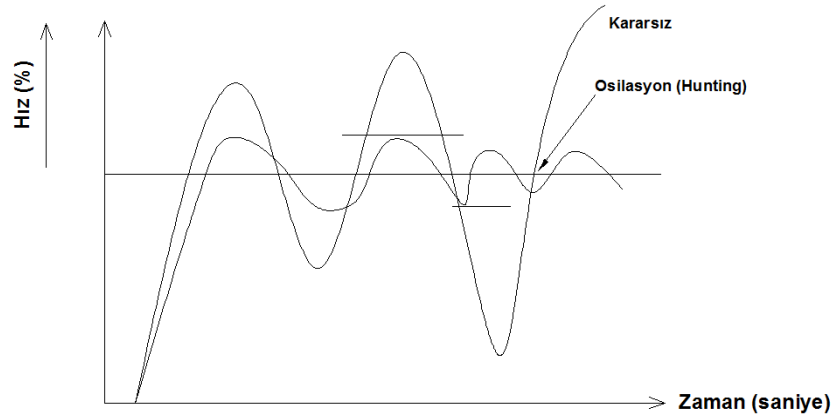
5.6.2 Geçici hal davranışı

Daha önce de belirtildiği gibi, hız yöneticisi sistemi bir kapalı çevrim sistemidir. Kararlılık geri beslemeli sistemler için en önemli parametrelerdendir. Kararlılık ve cevap hızı, çevrimdeki blokların sinyal modifikasyonuna bağlıdır. Kapalı çevrimin kazancı, bağımsız blokların kazancı ve ayarlanabilir hız ve yük kontrolörlerinin kazancına bağlı olup, sürekli hal ve geçici hal çalışmalarında kazanç performans hakkında fikir sahibi olmak için önemli bir parametredir. Şekil 5.7’de gösterildiği gibi, kazanç uygun olmaz ise sistemde dalgalanmalar olabilir. Kontrolörün düzeltme işleminin gerekenden fazla olması sonucu meydana gelen kararsızlık durumu osilasyon olarak adlandırılır. Kontrol edilen büyüklük hedeflenen değer etrafında, ancak bu değere asla ulaşamayacak şekilde salınır. Hız, güç, vana açma ve kapama gibi değişik parametreler sürekli olarak osilasyona uğrayabilir. Sonuç olarak türbinin devreden çıkması da söz konusu olabilir.

5.6.3 Vana açıklığı - akış debisi karakteristiği

Kapalı çevrimin kazancının ne olacağına karar vermek, vana açıklığı - akış debisi karakteristiği üzerindeki etkisi açısından önemlidir.

Tasarımın doğasında var olan nedenlerle bu karakteristik doğrusal değildir. Lineerleştirme gidiş veya dönüş hattı üzerindeki mekanik diş vasıtası ile yapılır. Yükün miktarına bağlı olarak, kapalı çevrimin kazancı karakteristik üzerinde farklı etkiler yapar.



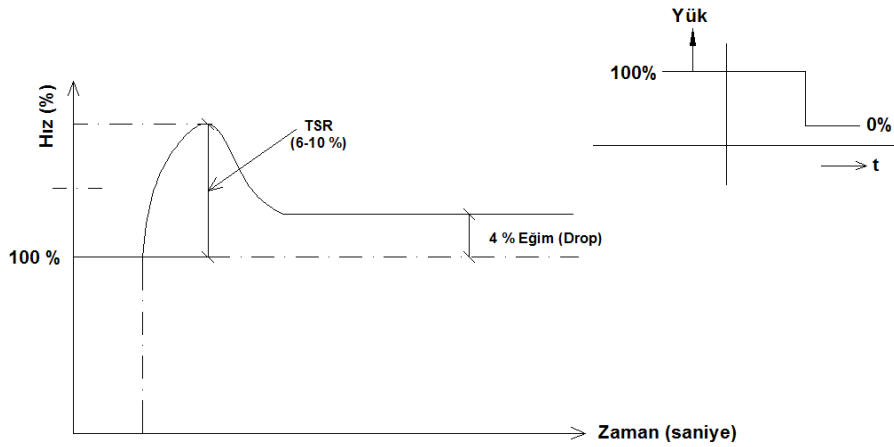
Şekil 5.7: Tipik hız osilasyonu [13].

5.6.4 Geçici hal hız yükselmesi (TSR)

Hız yöneticisi türbin hızını belirtilen referans değere ayarlamaya çalışır. Eğer hızda bozulma varsa çevrimin cevabı olabildiği kadar hızlı olmalıdır; aksi takdirde hızdaki sapma devam eder. TSR, hız yöneticisi sisteminin cevap verme hızını değerlendirmek için önemli bir kriterdir. Yük atmak veya yük reddetmek hızdaki ana bozulma nedenleridir. Türbin ve generatör tam yükte çalışırken generatör kesicisi açarsa, tahrik kaynağı rotorun ivmelenmesine neden olur. Tahrik elemanının tamamen ortadan kaldırılması belirli bir süre alacaktır. Bu süre özellikle buhar ve su türbinlerinde daha uzundur. Bu durumda, hız birden bire artacak ve vananın kapanması ile birlikte lineer olarak azalacaktır. Hızın bu en yüksek değeri geçici hal hız yükselmesi TSR olarak adlandırılır.

Özellikle buhar türbinlerinde kontrol vanası kapanmasına rağmen, buhar kasasında, borularda ve tekrar ısıtıcılarında kalan buhar iş görmeye ve mili hızlandırmaya birkaç saniye daha devam eder. Şekil 5.8'de yük atma durumunda TSR'nin grafiği verilmiştir.

Acil hız yöneticisi, mil hızının % 112'yi geçmesi durumunda türbini durdurmak için tasarlanmıştır. Standartlar TSR değerinin acil hız yöneticisinin aktif olacağı değerin altında TSR değerini minimize etmek amacıyla hız yöneticisi tarafından sağlanan bir başka sistem ise, yük atma rölesi (LSR) dir. Bu sistem hız algılayıcılar ile hız değişimi algılanmadan önce tepki verir.



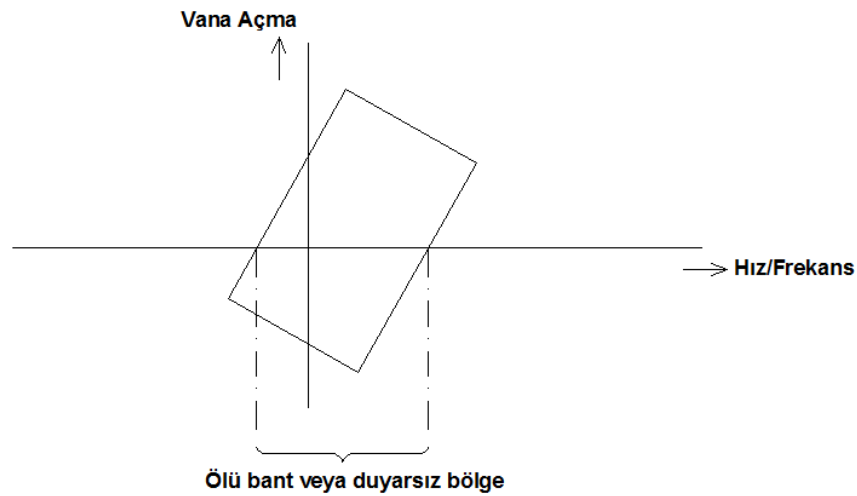
Şekil 5.8: Yük atma durumunda TSR[13].

Büyük güçlü buhar türbinlerinde, yüksek basınç kademesinden çıkan buhar bir kontrol vanası düzeneği üzerinden türbinin orta kademesine gönderilir. Normalde, küçük değişiklikler yüksek basınçtaki kontrol vanası ile regüle edilir. Buhar türbinlerinin ürettiği gücün % 30'u yüksek basınç kademesinde, % 45'i orta basınç kademesinde ve geri kalan % 25'ide alçak basınç kademesinde üretilir. Türbinde büyük yük değişiklikleri olacaksa, orta basınç kontrol vanası da görev yapmak zorundadır. Gerçekte orta basınç kontrol çevrimi TSR'yi önemli ölçüde düşürme yönünde etkilidir.

5.6.5 Hız regülatörün duyarsızlığı veya ölü bant

Hız yöneticisi sisteminin etkinliği hız algılamaya bağlıdır. Hızın algılanmayan dolayısı ile de düzeltilmeyen minimum bir değeri vardır. Karakteristik Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

Bazı durumlarda, kullanım nedeniyle meydana gelen eskimelerden ölü bant aralığı değişebilir. Bu durum frekans regülasyonu için zararlıdır. Kontrol sistemlerinin analizinde, iyi bilinir ki kapalı çevrimde ölü bant veya histeris kararsızlığa ve limit cycle oscillationa sebep olur. Belki de hız yöneticisinde osilasyona sebep olur. Aynı zamanda frekanstaki küçük değişikliklere hız yöneticisi tepki vermez. Bu nedenle ölü bant hız yöneticilerinde bilinçli olarak ayarlanabilir bir özellik olarak verilmektedir.



Şekil 5.9: Ölü bant karakteristiği [13].

5.7 Hız Yöneticisinin Diğer Sistemlerle İlişkisi

5.7.1 Türbin otomasyon paketi

Hız yöneticisi sistemi türbin otomasyon sisteminin bir parçasıdır. Hız yöneticisi, türbine otomatik yol verme ekipmanlarından ve senkronizasyon ünitesinden komut alır. Ayrıca türbin stres değerlendiricisinden de alınan komutlara göre türbin yüklenir.

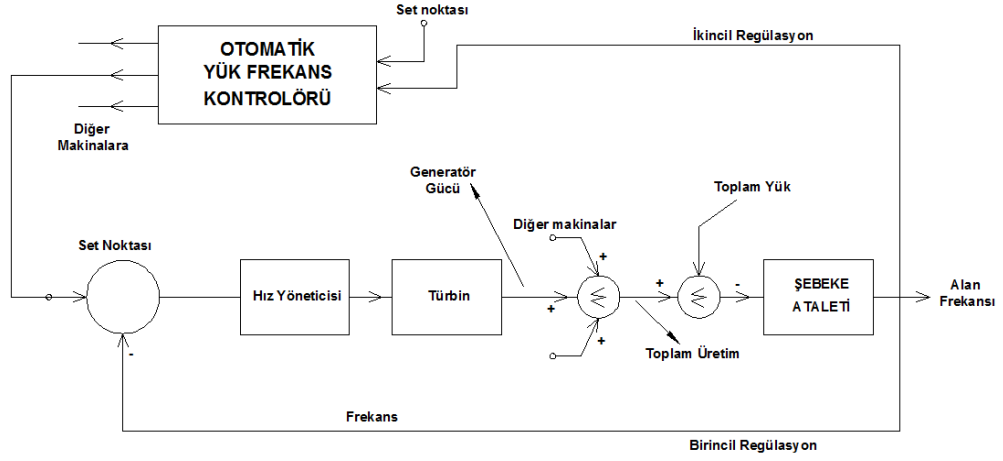
Ayrıca buhar türbini santrallerinde, hız yöneticisi tarafından yapılan regülasyon sonucu buhar basıncında, dome seviyesinde ve buhar sıcaklığında değişiklikler olacaktır; dolayısı ile hız yöneticisi kazan kontrol sistemi ile de ilişkilidir.

5.7.2 Ünite güdümlü kontrol sistemi

Eğer generator çıkış gücünün artırılması yada azaltılması yönünde bir komut oluşturulduğunda, ünite güdümlü kontrol (UCC) sistemi buhar türbinli santrallerde kazan için bir komut üretir. Kazanın zaman sabiti, buhar iletim hatları ve diğer yardımcı ekipmanlardaki gecikmeler dikkate alınarak, ilk komut kazan tarafına gönderilmektedir. Belirli bir zaman gecikmesinden sonra (kazanda buhar üretiminin gerçekleşmesinden sonra) hız yöneticisine çıkış gücünü artırma komutu gider. Bazı santrallerde bu kontrol sistemi master kontrol sistemi diye de adlandırılmaktadır.

5.7.3 Otomatik yük frekans kontrol sistemi

Şebeke frekansının sabit tutulması görevi, otomatik yük frekans kontrolü (ALFG) veya otomatik üretim kontrolü (AGC) sistemlerinin görevidir. Şekil 5.10'da otomatik yük frekans kontrolü şematik olarak gösterilmiştir. Şebeke frekansında meydana gelen sapmanın kompanzasyonu için, öncelikle santraller kendi içlerinde birincil frekans kontrolü denen bloğunu çalıştırlar. Ayrıca yük tevzi merkezlerindeki otomatik yük frekans kontrolörlerinin ürettiği ikincil kontrol işareti ile de ikincil frekans kontrolüne katılırlar [14]. Şekil 5.10'da otomatik yük frekans kontrolü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.10: Otomatik yük frekans kontrol sistemi [13].

6. GAZ TÜRİNİ VE GENERATÖRÜN KONTROLÜ

6.1 Kontrol Sisteminin Görevleri

Gaz türbinleri, elektrik üretimini gerçekleştirebilmek amacıyla aşağıda sıralanan çalışma modlarının her birinde generatörleri tahrik etmek amacıyla kullanılırlar:

- Temel yük
- Ortalama puant yük
- Puant yük
- Yedek üretim kapasitesi

Kontrol sistemi ise aşağıdaki görevleri yerine getirecek şekilde tasarlanılmıştır.

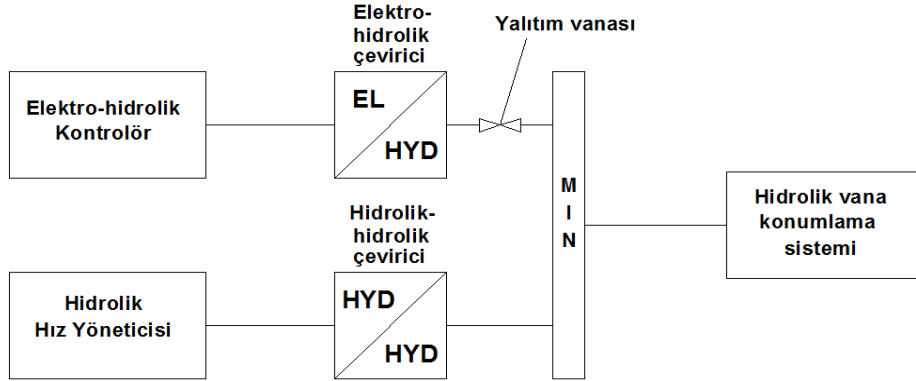
- Yol verme Yakıt İleri Besleme Kontrolü :
Türbini, nominal devrinin %33'ünden senkronizasyon devrine kadar kontrol eder.
- Hız Kontrolü : Türbini, senkronizasyon sırasında ve yük atma durumunda kontrol eder.
- Yük Kontrolü : Müsaade edilebilir yükleme oranlarında elektrik üretimini kontrol eder.
- Sıcaklık Kontrolü : Türbinin egzost gazı sıcaklığını önceden tanımlanan değerde tutacak şekilde elektrik üretimini kontrol eder.
- İkincil yakıt ile türbinin tahrik edilmesi durumunda gerekli kontrol bloklarını içerir.
- Kararlı bir şebeke ile çalışma ve şebekedeki problemler oluşması durumunda ada çalışma modu için gerekli kontrol bloklarını içerir.

6.2 Kontrol Sisteminin Planı

Gaz türbini ve generatör kontrol sistemleri elektrohidroliktir. Bu tasarım şekli elektronik donanımın avantajları ile hidrolik sistemin meziyetlerini bir arada bulundurur. Elektronik sistemler uygulanabilirlik, kompleks fonksiyonların kolayca gerçekleştirilebilmesi ve çok iyi dinamik kontrol performansına sahiptir. Hidrolik sistemler ise büyük hareket ettirme kuvvetlerini doğru bir şekilde kontrol etmeye olanak sağlar.

Gaz türbini ve generatör ihtiyaç duyulması durumunda hidrolik hız yöneticisi vasıtası ile de tek başına kontrol edilebilir. Bu iki kontrol sisteminden birinin aktif olması olabilecek karışıklıklara karşı koruma sağlar. Yalıtım vanası Şekil 6.1’de gösterilmiştir.

Gaz türbini ve generatör gerek yol verme aşamasında ve gerekse devreden çıkartılırken tamamı ile otomatik olan elektrohidrolik kontrol sistemince kontrol edilir.



Şekil 6.1: Türbin kontrol sisteminin planlanması [15].

6.3 Elektrohidrolik Kontrolörce Yol verme

Gaz türbini ve generatör yol verme süresince statik frekans çevircisince ivmelendirilir. Bu süreçte generatör frekans çeviricisi üzerinden beslenen bir motor gibi çalışır. Frekans çeviricisi üzerinden generatörün beslenmesi yaklaşık olarak nominal devrin % 70'ine (2.100 devir) kadar devam eder.

Yaklaşık olarak nominal devrin % 20'sinde (600 devir) seçilecek yol verme yakıt türüne bağlı olarak gaz veya sıvı yakıt stop vanasının açılmasıyla minimum bir

yakıtın akışı sağlanarak tutuşma temin edilir. Gaz türbini ve generatör, nominal devrin % 33'ünden (990 devir) itibaren yol verme yakıt ileri besleme kontrolörü tarafından nominal devrine kadar kontrol edilir. Bu kontrolör gaz yakıt çalışmasında 900 devirde sıvı yakıt çalışmasında ise 1040 devirde devreye girer ve yol verme süresince kontrol vanasına sürekli olarak açma yönünde komut gönderir.

Yol verme kontrolörü hızlandırma esnasında optimum ivme ile türbinin ısı streslerini aşmayacak bir $h=f(t)$ fonksiyonuna sahiptir. Yol verme esnasında her hangi bir sebepten dolayı ivme düşerse, gaz türbininde istenilmeyen yüksek sıcaklıklara ulaşmamak için gerçek hızın bir fonksiyonu olarak türetilmiş sınırlayıcı koruma fonksiyonu etkin olur.

Yükseltmenin gradyeni gaz yakıt (FG) ile çalışmada;

- $n < 1.825$ devir/dak. iken gaz kontrol vanası açma hızı 4.8 mm/dak.
- $n > 1.825$ devir/dak. iken gaz kontrol vanası açma hızı 14.4 mm/dak.

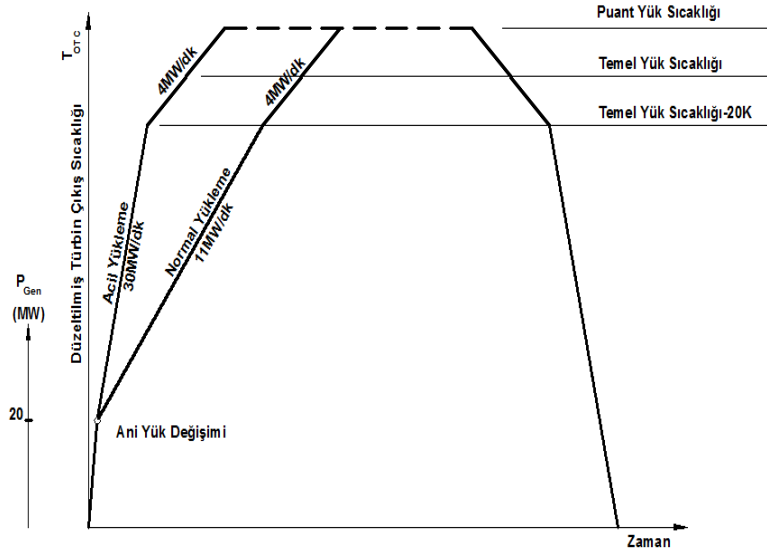
Yükseltmenin gradyeni sıvı yakıt (FO) ile çalışmada;

- $n < 1.750$ devir/dak. iken gaz kontrol vanası açma hızı 3.2 mm/dak.
- $n > 1.750$ devir/dak. iken gaz kontrol vanası açma hızı 9.2 mm/dak.

Gaz türbini generatörü senkronizasyon devrine yaklaştığında kontrol etme görevini hız kontrolörü üstlenir.

Hız kontrolörü senkronizasyon ünitesinden gelen veya manuel olarak verilen hız ayar değerini değiştirme darbeleri ile üniteyi senkronizasyon devrine çıkartır ve o devir sayısında tutar. Hız artırma veya azaltma gradyeni 2.5 Hz/dk'dır. Generatörün şebeke ile senkronize olmasını sağlar. Generatörün şebeke ile senkronizasyonu gerçekleştikten sonra, kesici kapattı bilgisinin gelmesi ile birlikte yük kontrolörü etkili olmaya başlar.

Yük ayarlama kontrolörünce ayarlanan hedef yük değerine istenilen yükleme gradyanı ile ulaşılmaya çalışılır. Şekil 6.2'de gösterildiği gibi, sistemde normal ve acil yükleme olmak üzere iki farklı yükleme seçeneği mevcuttur. Sıcaklık kontrolörü, bütün çalışma modları için yedek kontrolör olarak görev yapar. Temel görevi, gaz türbini ve yardımcılarının izin verilen sıcaklık limitleri içinde çalışmasını sağlamaktır.



Şekil 6.2: Örnek bir gaz türbininin yükleme ve yük atma grafiği [15].

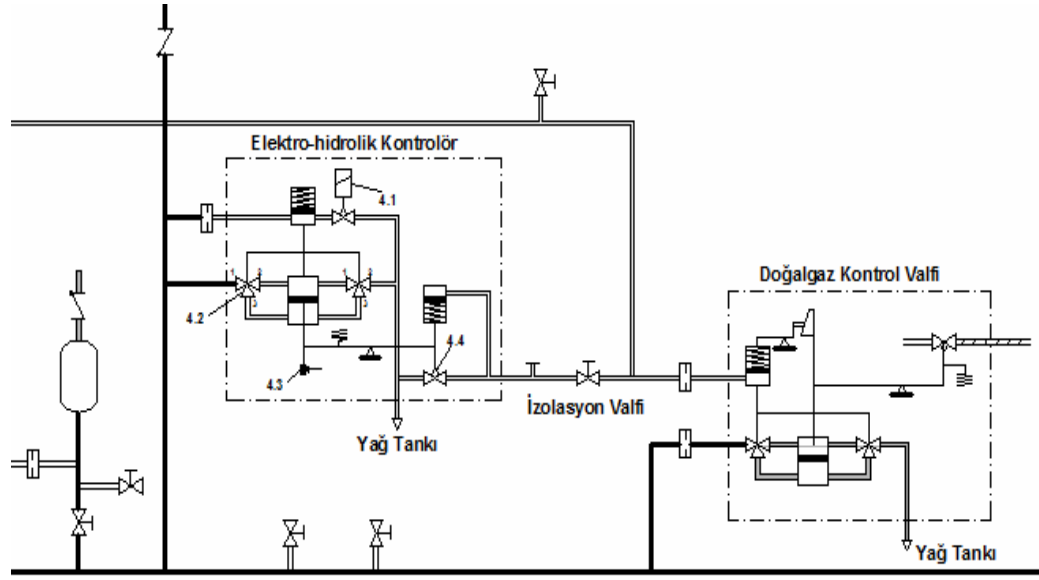
6.4 Elektrohidrolik Çevirici

Elektrohidrolik çevirici (EHC), elektrohidrolik türbin kontrolörü ile kontrol sisteminin hidrolik kısımları arasında arayüz oluşturur. Elektro hidrolik çeviriciye ait blok diyagram Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Diyagramda EHC ile ilgili olarak gösterilen tesisat parçaları ;

- 4.1 Kalıcı Mıknatıslı Pistonlu Bobin Sistemi
- 4.2 Vana
- 4.3 Servo piston
- 4.4 Takipçi piston

dur.

EHC vana açıklık kontrolörünün çıkış sinyali sabit mıknatıslı pistonlu bobin sistemini (4.1) enerjiler. Bu da mekanik olarak bağlı bulunduğu kontrol koluna tesir eder. Bundan dolayı bobin kontrolörün elektriksel sinyalini açıklık mesafesine (lift) çevirir. Vananın (4.2) konumundaki değişiklik servo pistonun (4.3) konumunda değişikliğe sebep olur. Takip eden pistonun (4.4) drenaj edeceği kesit alanı değiştiğinden dolayı sekonder yağ basıncı da değişir.



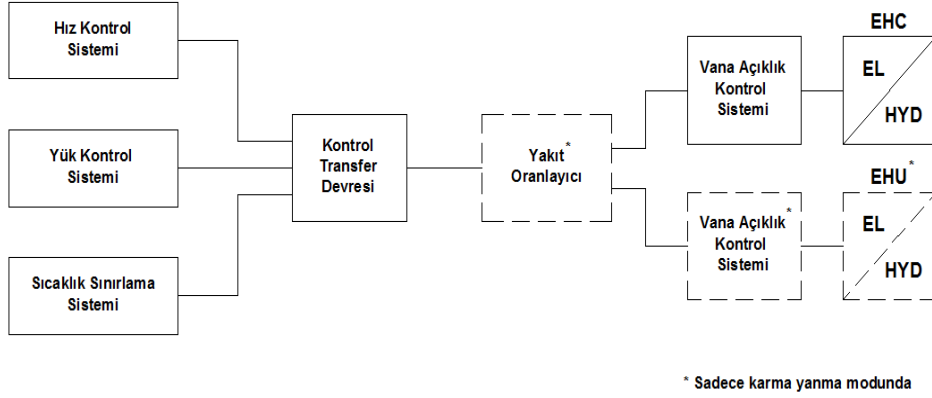
Şekil 6.3 : Elektrohidrolik çeviriciye ait şematik gösterim [15].

Değişen bu sekonder yağ basıncı, yakıt kontrol vanasındaki (2.1) yay tesirli vanaya tesir eder. Buda servo piston vasıtasıyla vanadaki açıklık mesafesini değiştirir. Gerek elektro hidrolik çeviricinin gerekse yakıt kontrol vanasının servo pistondaki değişim miktarı açıklık mesafesi ölçme transduseri ile ölçülür. Ölçülen bu değer EHC vana açıklık kontrolörü ve yakıt kontrol vana açıklık kontrolörünce işlenir.

6.5 Elektrohidrolik Kontrolör

Gaz türbini ve generatörü elektro hidrolik kontrolörü (GTC) Şekil 6.4 ve Şekil 6.5’de gösterilmiş olup, aşağıda sıralanan kontrol devrelerini içermektedir:

- Hız kontrolörü
- Generatör yük ve frekans kontrolörü
- Egzost gazı sıcaklığı sınırlandırma kontrolörü
- Yakıt kontrol vanası açıklık kontrolörü



Şekil 6.4: Elektrohidrolik türbin kontrolörünün blok şeması [15].

Yukarıda sıralanılan kontrol sistemleri bir birlerinden kontrol transfer devreleri vasıtası ile tamamı ile izole edilmiştir.

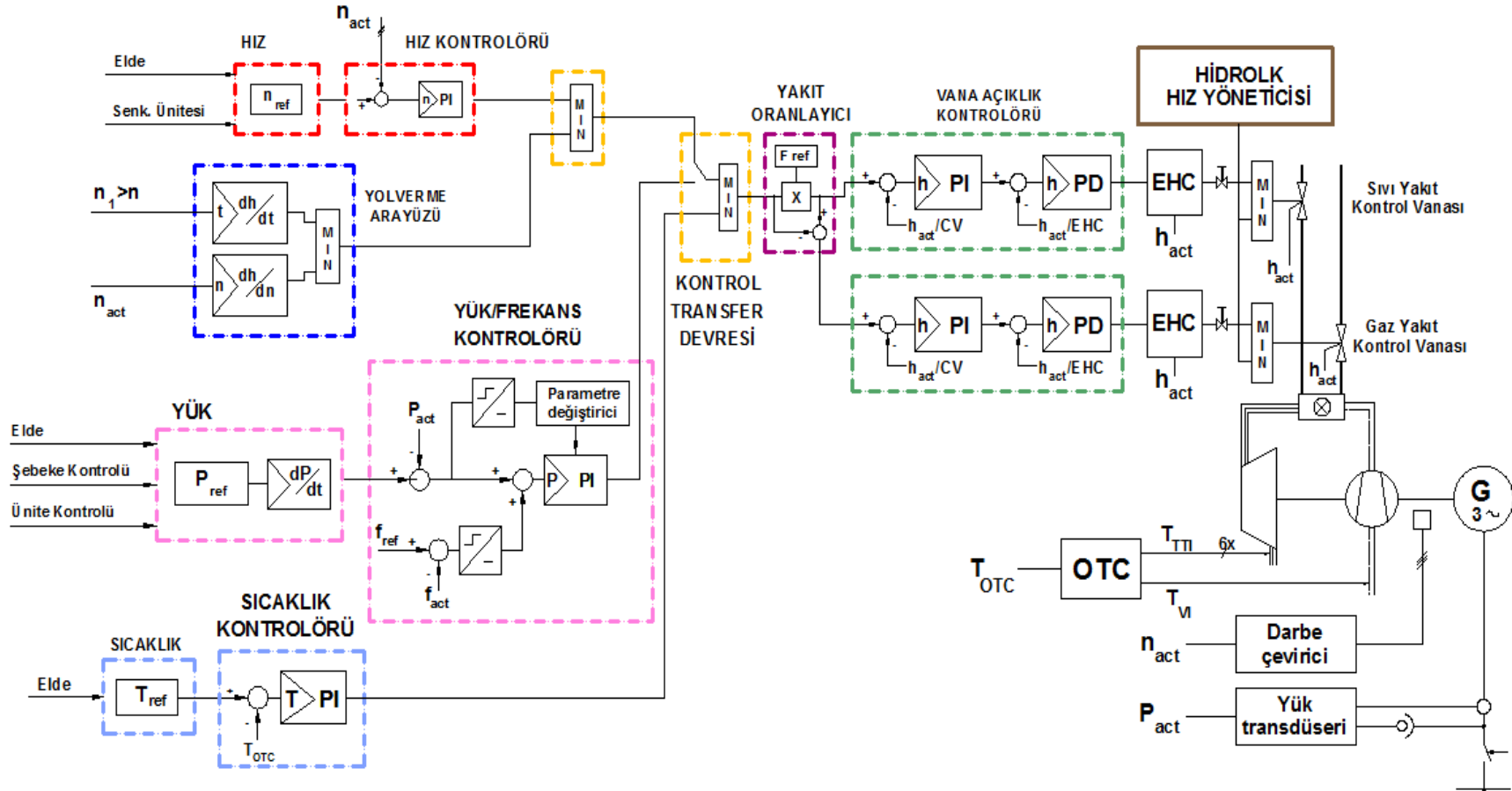
Elektro hidrolik kontrolör analog kontrol devreleri ile yapılmış olup, İSCAMATIC A ve B modüllerini içermektedir. Bu modüllerin tamamı aynı kabin içine yerleştirilmiştir.

6.5.1 Hız kontrol sistemi

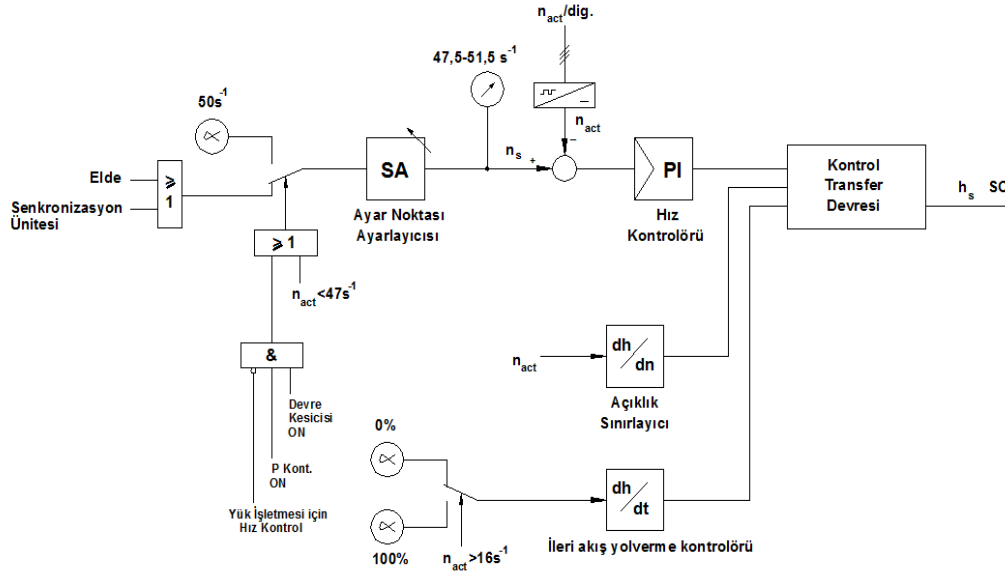
Şekil 6.6'da gösterilen hız kontrol sisteminin görevi, şebeke ile generatörün senkronizasyonunda ve yol vermede kapalı çevrim kontrol gereksinimlerini sağlamaktır. Yük işletmesindeki bu durumda yük kontrolörü sistemi kontrol etmektedir. Hız kontrol sistemi, şebekede meydana gelebilecek dengesizlik ve bozulmalarda (örneğin generatörün üzerinden yükün tamamı ile kalkması durumunda) generatör hızında meydana gelecek artışları bütün koşullar altında mekanik aşırı hız eşik değerinin altında tutmayı garanti eder.

Mekanik aşırı hız eşik değeri % 112 olup 3.360 devir/dak.'ya karşılık gelmektedir. Hız kontrolörü türbin aşırı hız dişlisine meydan bırakmayacak şekilde görevini yerine getirir. Hız kontrol sistemi aşağıda sıralanılan bölümleri kapsamaktadır:

- Hız ayar noktası ayarlayıcısı
- Yakıt kontrol vanası açıklık mesafesi kontrol çevrimi
- Hız sınırlandırma yakıt kontrol vanası açıklık kontrol çevrimi
- Hız Kontrolörü



Şekil 6.5: Elektrohidrolik türbin kontrolörünün blok şemaları [15].



Şekil 6.6: Hız kontrol sistemi [15].

Şekil 6.6’da n_s ile ifade edilen hız ayar değeri hız ayarlayıcısının konumuna bağlı olarak yönetilir. Hız ayar noktası kontrol merkezinde (ana kumanda odası) ve yerel kontrol noktasından değiştirilebileceği gibi GTC kabinindeki hız ayar noktası ayarlayıcısı modülünden de değiştirilebilir. Ayrıca senkronizasyon ünitesinden de giriş olarak hız ayar noktası değiştirilir. Gerek ana kumandadan ve gerekse yerel kontrol noktasında yapılacak ayarlar bir kilitleme düğmesi üzerinden olup, öncelikle kilitleme düğmesinin serbest bırakılması gerekmektedir. Hız ayar noktası nominal devrin + % 3 ve - % 5 aralığında ayarlanabilir. Frekans karşılığı ise 47.5 - 51.5 Hz aralığıdır. Bu aralığın dışında ayarlamak mümkün değildir. Nominal devrin % 95’i aşılmıca senkronizasyon ünitesi hız ayar noktasını şebekenin o anlık frekansına eşdeğer olan noktaya ayarlamaya çalışır.

Gaz türbini ve generatör, nominal devrin % 33’ünden (990 devir/dak.) itibaren yol verme yakıt ileri besleme kontrolörü tarafından nominal devrine kadar kontrol edilir. Bu kontrolör gaz yakıt çalışmasında 900 devir/dak’da sıvı yakıt çalışmasında ise 1040 devir/dak.’da devreye girer ve yol verme süresince kontrol vanasına sürekli açma yönünde komut gönderir.

Yol verme kontrolörü hızlandırma esnasında optimum ivme ile türbinin ısı streslerini aşmayacak bir fonksiyona $h=f(t)$ ’ye sahiptir. Yol verme esnasında her hangi bir sebepten dolayı ivme düşerse, gaz türbininde istenilmeyen yüksek

sıcaklıklara ulaşmamak için gerçek hızın bir fonksiyonu olarak türetilmiş sınırlayıcı koruma fonksiyonu etkin olur.

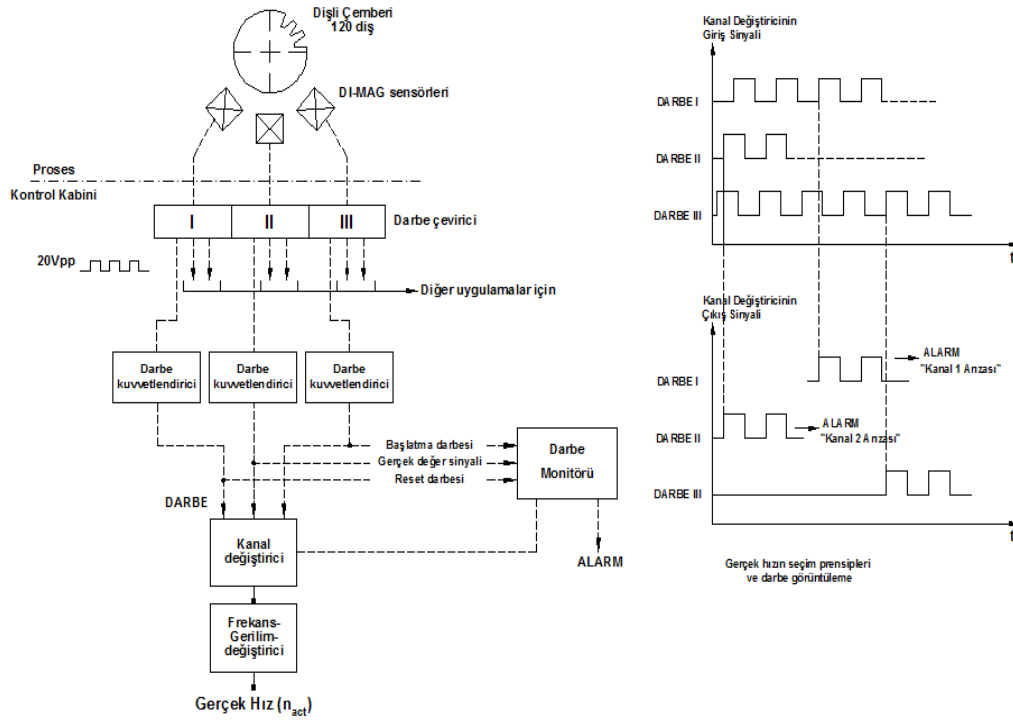
Gaz türbini ve generatöre yol verilirken bir problem olması durumunda veya generatörü motor olarak sürerken daha düşük güç harcayarak çalıştırmaya ihtiyaç duyulması durumunda (örneğin black start durumunda) vana açıklık mesafesi sınırlayıcı kontrolör devreye girer ve $h=f(n)$ fonksiyonu ile yol verilir. Bu kontrolör yol verme süresince düşük ivmelenme olmasına rağmen türbinin ısıl streslere maruz kalmayacağını garanti eder.

Generatör mil hızı dijital olarak Şekil 6.7’de gösterildiği gibi ölçülür. Generatör mili üzerine üzerinde 120 adet diş olan bir demir çerçeve monte edilmiştir. Hız algılayıcı sensörler 3 adet magnetik indüktif prob içermektedir. Bu sensörler demir çerçevedeki dişler ile aralarında çok küçük hava boşluğu kalacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Generatör mili dönmeye başladığında sensör probu çerçevedeki her bir dişli ile karşılaştığı zaman bir darbe işareti üretir. Sensörün çıkış frekansı generatör milinin dönüş hızı ile orantılıdır.

Sensörün çıkış sinyalleri bir darbe çeviriciye gider. Darbe çevirici bu sinyalleri çoklayarak, genliği $20 V_{pp}$ olan kare dalgaya dönüştürür. Oluşturulan bu kare dalga sinyaller, sistem sinyalini oluşturmak üzere elektrohidrolik çeviricideki darbe kuvvetlendiriciye gönderilir. Darbe kuvvetlendiricinin çıkışındaki 3 sinyal bir darbe gözleyici tarafından her hangi bir arıza durumunun tespiti için sürekli gözlenir.

Kare dalga gerilimi, frekans/gerilim dönüştürücüde proses fonksiyonlarında kullanılmak üzere uygun analog gerilim bilgisine dönüştürülür. Hız algılama kanallarından bir tanesinde oluşacak arızanın darbe monitöründe algılanılması durumunda, bu sinyal arızalı sinyal olarak kabul edilip prosesten çıkartılır. Gerçek hızın tespiti geriye kalan diğer iki sensörün temin ettiği bilgi üzerinden oluşturulur. Darbe izleyicinin çıkışından arızalı olan sensöre ait alarm işareti üretilir. Kontrol sistemi hız algılama kanallarından birinde veya ikisinde arıza olsa bile sürekli olarak çalışmasına devam eder.

Hız kontrolörü, PI ile ifade edilen oransal ve entegral karakteristiğe sahiptir. Hız kontrolörü, generatörün yüksüz çalışması veya yük atması durumunda gereksinin duyacağı dinamik gereksinimleri karşılamak üzere PI karakteristikli seçilmiştir.



Şekil 6.7: Generator mil hızının ölçülmesi [15].

Kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(p) = k_p \times \left(1 + \frac{1}{p \times T_n} \right) \quad (6.1)$$

Gaz türbinlerinin her biri için yapılan optimizasyon çalışmaları sonucunda orantısal sabiti ve T_n entegral reset zamanı bulunur. $k_p=10.4$ iken $T_n=3.8$ sn dir. Bu değerler analog kontrol kartı üzerindeki direnç değerlerinin değiştirilmesi ile ayarlanır.

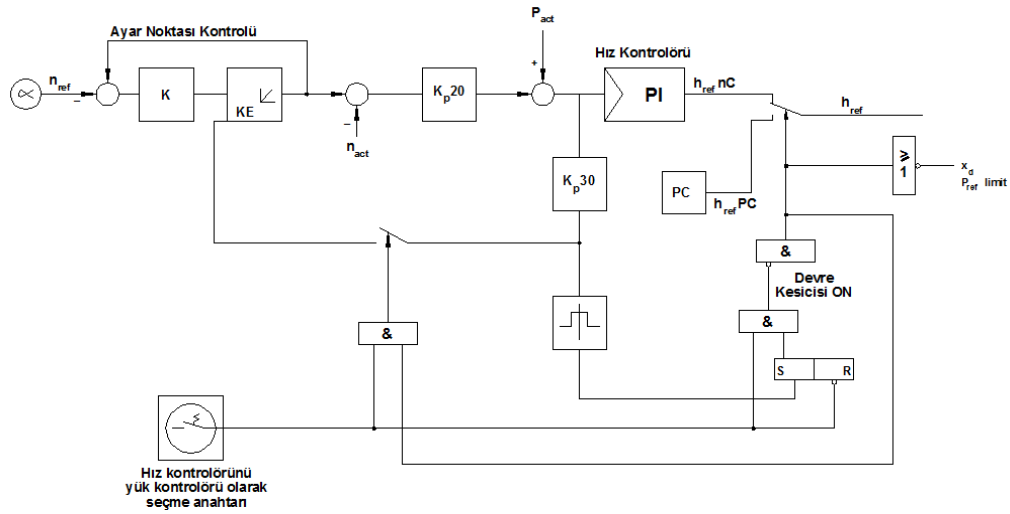
Çift yakıt yakma durumu için tasarlanan yakıt oranlayıcıdan sonra hız kontrolörünün çıkış sinyali kontrol vanası açıklık kontrolörünün giriş sinyalini (h_s) oluşturur. Hız ayarlayıcının çıkış sinyali n_s ile gerçek hız ise n_{act} ile ifade edilmektedir.

Bazı özel çalışma şartlarında, örneğin çökmüş bir sistemin yeniden kaldırılması veya ada çalışmasında hız kontrolörü yük kontrolörü gibi çalışacak şekilde seçilebilir. Bu durumda, hız kontrolörü gaz türbini ve generatörünü çalışma aralığının tamamında kontrol edebilir. Yük çalışmasında hız kontrolörünün seçilmesi kontrol masası üzerindeki bir anahtar yardımı ile yapılır. Hız kontrolörü yük çalışması için anahtar yardımı ile seçildikten sonra, hız kontrolörünün sapması ($X_w=0$) sıfır olacak şekilde dengelenir. Kontrolör orantısal ve entegral karakteristiğe sahip olup kompanzasyonu

gerçek güç tarafından yapılır. Bu çalışma modu Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Hız kontrolörünün kompanzasyonu % 5’dir. Kompanzasyon düşü olarak da adlandırılır. Düşü, yükün 0 dan % 100 çıkması durumunda hız da meydana gelecek düşmeyi ifade etmektedir.

Ada çalışmasındaki bütün ünitelerin hız set değerlerini ayarlayarak, frekansı tekrardan 50 Hz’e getirmek mümkün olacaktır. Bu işlem pratik olarak eğim karakteristiğinin paralel olarak ötelenmesini ifade etmektedir.

Bu çalışma modunda türbin giriş sıcaklığından hızlı değişimlere sebep olur. Bu nedenle türbinin eşdeğer çalışma saatindeki yansımaya dikkat edilmelidir.



Şekil 6.8: Hız kontrolörünün yük kontrolörü olarak kullanılması [15].

6.5.2. Yük kontrol sistemi

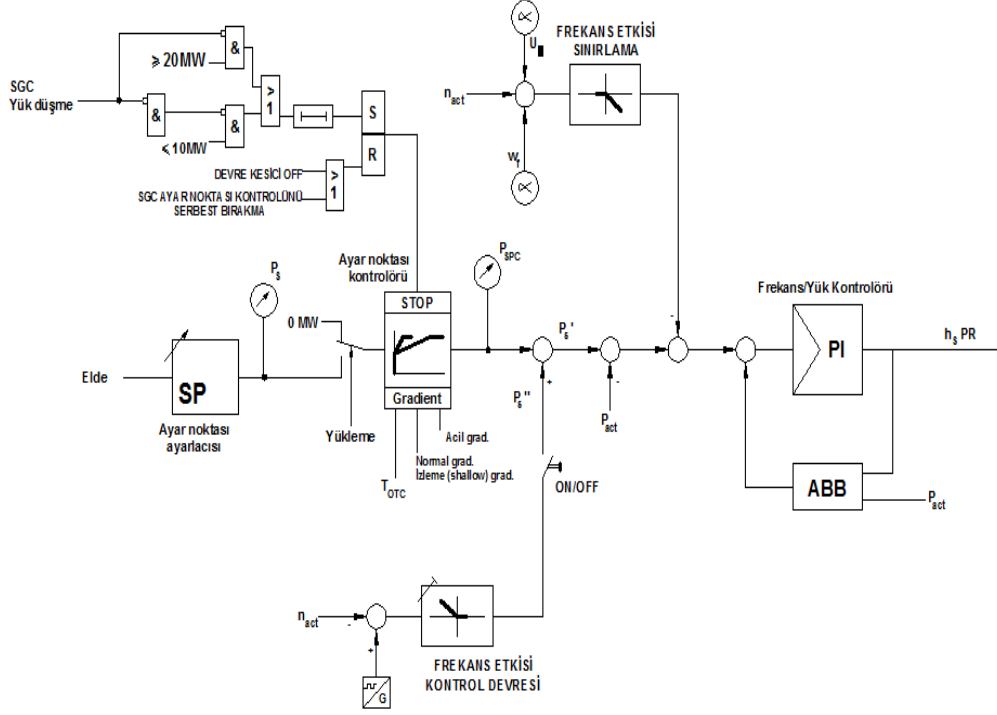
Yük kontrol sistemi generatörün şebeke ile senkronize olmasından sonra üretilebilecek bütün güç aralığında gaz türbini ve generatörün kontrolünü üstlenir.

Şekil 6.9’da verilen yük kontrol sistemi yük ayarlayıcı ve yük ayar kontrolöründen oluşur.

Yük ayar noktası ayarlayıcısının konumuna göre yük set noktası P_s ayarlanılır. Yük ayar noktası ayarlayıcısı santralin farklı noktaları olan ana kumanda, yerel kumanda noktasından ayarlanabileceği gibi GTC kabinindeki yük ayarlayıcı modülü üzerinden de ayarlanılabilir.

Yükün ayarlandığı modül, diğer üst kontrol sistemlerinden gelecek talepler içinde giriş sinyallerine sahiptir. Bu kontrol sistemleri, şebeke kontrolörü, ünite kontrolörü

(kombine çalışma durumunda) ve otomatik voltaj regülatörüdür. Otomatik voltaj regülatörü generatörü aşırı ısınmalara karşı koruma yönünde sinyal üretir. Şebeke kontrolörü ise sekonder frekans kontrolü veya otomatik üretim kontrolü kapsamında sinyal üretir.



Şekil 6.9: Yük kontrol sistemi [15].

Yük ayar noktası P_s yük ayar noktası kontrolörüne giriş işareti olarak verilir. Kontrol istasyonundan seçilebilecek iki farklı yükleme seçeneği mevcuttur. Bunlar normal ve acil yükleme olarak adlandırılırlar. Siemens V 94.2 gaz türbinleri için normal yüklemelerde 11 MW/dak. iken acil yüklemelerde 30 MW/dak.'dır. Yükleme eğrilerine ilişkin grafik Şekil 6.2'de verilmiştir.

Türbin ve generatör yük ayar noktası kontrolörünce müsaade edilebilir termal stresler içinde gaz türbinini tutacak şekilde yüklenilir. İstenilen yükleme eğimi $\frac{dP}{dT}$ kumanda istasyonundan seçilir. Generatör kesicisi açık sinyali olduğu müddetçe normal yükleme modu otomatik olarak seçilir. Ancak özel şebeke koşullarında acil yükleme modunda seçilebilir. Ayrıca gaz türbini ve generatör normal yükleme modunda yüklenirken acil modu da çalıştırılabilir.

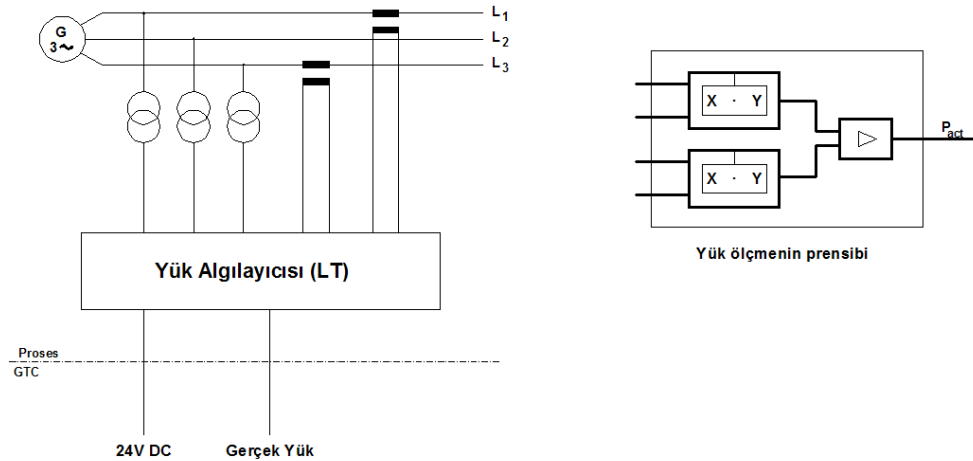
Generatör kesicisi açtığı zaman, yük ayar noktası kontrolörünün çıkışı 0 MW'a ayarlanılır.

Şayet grup kontrol sisteminden türbin ve generatörün servis dışı edileceğine dair bir komut üretilirse yük ayar noktası kontrolörüne yük atma komutu uygulanmış olur. Grup yükü 0 MW'a indiğinde generatör şebekeden ayrılır gaz türbini ve generatör devreden çıkmış olur.

Kumanda odasından yükleme seçeneği seçilmiş ise yük ayar noktası 0 MW dan P_s 'ye yük düşme seçeneği seçilmiş ise de P_s 'den 0 MW'a ayar noktası kontrolörü ayarlanılır.

Gerçek yük değeri yük algılayıcı (LT) vasıtası ile ölçülür. Ölçüm devresi Aron tipi bağlantı içerir. Bağlantı şeması şekil 6.102da verilmiştir. Bu devre elamanları hız yöneticisini tamamlayan ekipmanlar olarak monte edilmektedir.

Yük algılayıcı generatör çıkış gerilim ve akım transformatörlerine bağlıdır. Gerilim ve akım sinyallerinin çarpımı hall-effect çarpıcılar vasıtası ile yapılmıştır. Böylece gerçek gücün ölçülmesinde atık zaman sabitinden kaynaklanan gecikme 10 ms'den daha küçük olmaktadır.



Şekil 6.10: Gerçek yükün ölçülmesi [15].

Yük kontrolörü gerek şebeke ile kararlı çalışma durumu gerekse ada çalışması için gerekli devreleri içermektedir. Yük kontrolörünün giriş sinyali, ayarlanılan güç değeri (P_{spc}) ile ölçülen gerçek güç değerinin (P_{act}) farkından elde edilir. Yük kontrolüne ilişkin blok şema Şekil 6.9'da verilmiştir.

Karalı şebeke çalışması veya ada çalışması durumlarında toplama noktası üzerinde kontrol değişimi frekans karşılaştırıcısı devresi ile birlikte etkili olur. Frekans karşılaştırıcısı devresi sade aşırı frekans durumunda etkili olur. Frekans karşılaştırıcısı devresi orantısal etkisi % 5'dir. Bazı belirgin olaylarda örneğin iletim hatlarının açılması durumunda, frekans karşılaştırıcısı gaz türbini ve generatörün aşırı hıza gitmesine engel olmak için çalışır.

Yük ayar noktası üzerindeki normal frekans dalgalanmalarının etkisi ayarlanabilir ölü bant üzerinden bastırılmıştır. Ölü bandın ilk ayar değeri 100 mHz olarak ayarlanılmıştır. Yük kontrolörü orantısal ve entegral PI karakteristiğe sahiptir. Gaz türbinlerinin yük kontrolörü orantısal katsayısı $K_p=1,42$ iken entegral zaman sabiti $T_n=2.5$ sn dir.

Kararlı bir şebeke ile çalışma şartlarında yük kontrolörünün çıkış değişiminin ortalaması sıfırdır. Şayet kontrolörün değişimi % 10 değerini aşarsa iletim hattında bir problem olduğu varsayılır. Bu %10 değeri ayarlanabilir bir değerdir. Sonuç olarak hız yöneticinin orantısal kazancı, frekans kontrolörüne gelen bir sınırlayıcı sinyal ile ayarlanılır. Şayet bu sınırlayıcı sinyal 6 sn den daha uzun sürerse, yani kontrolör çıkışındaki değişiklik düzeltilmezse, kontrolör kendi diyagonistiğinde durumu ada çalışması olarak algılayacaktır.

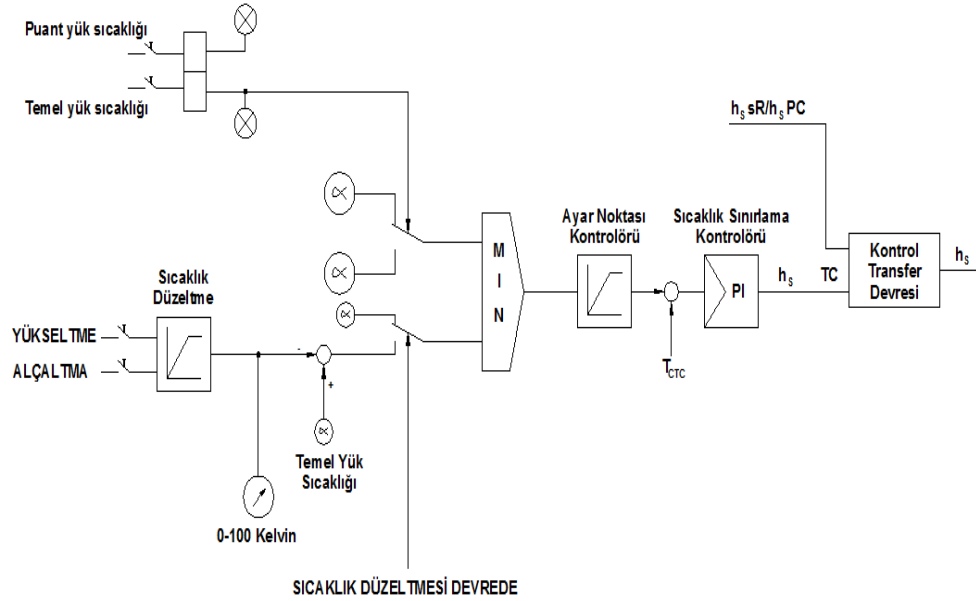
Yük/frekans kontrolörü çıkışı kontrol transfer devresinden sonra vana açıklık mesafesi kontrolörünün h_s giriş sinyalini oluşturur. Çift yakıt ile çalışma durumu söz konusu ise yakıt oranlayıcı bloğu bulunacaktır.

İvmelenme sınırlayıcısı (AL) aktif güç ile kontrol vanasının açıklığı arasındaki ilişkiyi gözetler. Kontrol vanası açıklığı sınırlayıcısı türbin ve generatör için müsaade edilebilir güç kaybı değerine ayarlanılır. Ani olarak yük kalkması durumunda kontrol vanası açıklığı azaltılır ve türbinin ivmelenmesi sınırlandırılır.

6.5.3 Sıcaklık sınırlayıcı kontrol sistemi

Sıcaklık sınırlayıcı sistemi, türbini aşırı yüksek sıcak gazın vereceği zararlardan korumak amacı ile tesis edilmiş yedek kontrolör sistemidir. Sıcaklık kontrol sistemi bir minimum değer mantık kapısı üzerinden kontrol vanası üzerinde etkili olur. Bu minimum değer kapsının girişleri yük/frekans kontrolü ve sıcaklık kontrolüdür. Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi hız kontrolörü senkronizasyondan sonra devre harici olduğundan minimum değer kapısına giriş olarak verilmez. Sıcaklık sınırlayıcısına ait bloklar Şekil 6.11'de gösterilmiştir. Müsaade edilebilir sıcaklık

sınır değeri gerek temel yük gerekse puant yük durumları için GTC de istenilen değere ayarlanılır. Ayarlanılan bu değerler bir gösterge vasıtası ile görülebilir. Genel olarak sıcaklık sınır değeri gaz türbini ve generatöre yol vermeden önce ayarlanılır.



Şekil 6.11: Sıcaklık sınırlama kontrol sistemi [15].

Ancak ihtiyaç duyulması durumunda gaz türbini ve generatör işletmede iken yük/frekans veya sıcaklık kontrolünde çalışılırken de sınır değeri değiştirilebilir. Bütün koşullarda sıcaklık ayar noktası eğimi 15 °C / dak'dır. Sıcaklık kontrolünün etkili olduğu durumda, yük deki değişim yaklaşık olarak 4 MW/dak'dır. Gerçek sıcaklık değeri türbin çıkış sıcaklık değerinin kompresör giriş sıcaklığına göre düzeltilmiş halidir. Sıcaklık düzeltmesine ait prensip şeması Şekil 6.12'de verilmiştir.

Türbin çıkış sıcaklığını ölçmek üzere türbin egzost gazı akış yolu üzerine 8 adet NiCr/Ni çift algılayıcı termokupul yerleştirilmiştir. Bu termokupulların altı tanesinden ölçülen sıcaklık değerleri gerçek sıcaklık değerini bulma fonksiyonuna uygulanır. Kompresör giriş sıcaklığı ise, kompresör hava giriş kasasına yerleştirilen pt100 üzerinden ölçülür.

Termokupullardan 6 tanesinin ortalaması hesaplanıp aşağıdaki formül kullanılarak dan gerçek sıcaklık değeri elde edilir.

$$T_{OTC} = T_{TH} - T_{CI} \times C \quad (6.2)$$

T_{OTC} : Gerçek sıcaklık değeri (düzeltilmiş değer)

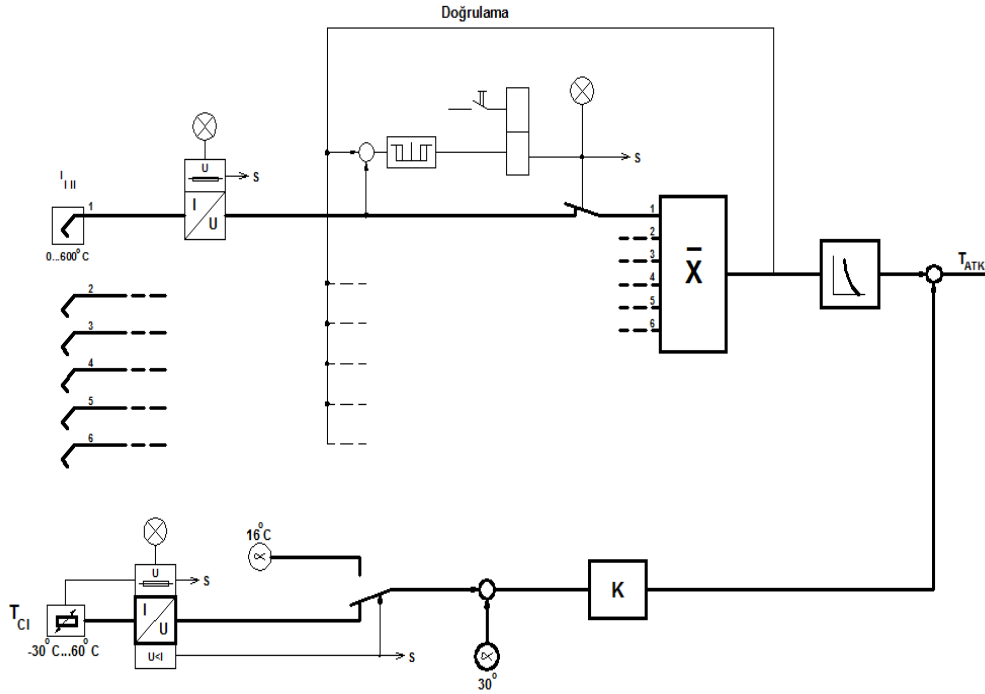
T_{TH} : Türbin çıkış sıcaklığı değeri (ortalama)

T_{CI} : Kompresör giriş sıcaklığı

C: Sabit

Bu altı termokupulun her birinden ölçülen sıcaklık değeri bir karşılaştırma devresinde kontrol edilir. Eğer her hangi birinin ölçülen değeri daha önceden ayarlanılan sapma değerinden daha fazla ortalama değerden sapsa ise, bu termokupuldan ölçülen değer ortalamaya dahil edilmez. Ortalama değer arızasız olanlar arasından elde edilir.

Şayet kompresör giriş havası ölçme sisteminde bir arıza oluşursa giriş hava sıcaklığı 16 °C'ye benzetilir. Gerek egzost gazı ölçüm elemanları gerekse kompresör giriş havası ölçme sistemindeki arızalar grup alarmı olarak oluşur ayrıca elektro hidrolik kontrolörde arıza olarak gösterilir.



Şekil 6.12: Gerçek sıcaklık değerinin elde edilmesi [15].

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, kontrol değişimi ayarlanılan sıcaklık değeri ve ölçülen gerçek sıcaklık değerinden (T_{OTC}) elde edilir. Elde edilen bu değer sıcaklık sınırlayıcı kontrolörün giriş değerini oluşturur.

Sıcaklık sınırlayıcı kontrolörü orantısal ve entegral (PI) karakteristiğe sahiptir. Kontrol transfer devresi tarafından aktif edildiği zaman türbin kontrol vanasını kontrol ederek ayarlanılan sıcaklık değerine türbin egzost gazı sıcaklığını çeker. Kontrolörün transfer fonksiyonu aşağıda verildiği gibidir.

$$F(p) = k_p \times \left(1 + \frac{1}{p \times T_n} \right) \quad (6.3)$$

Gaz türbinlerinin her biri için yapılan optimizasyon çalışmaları sonucu k_p orantısal sabiti ve T_n entegral reset zamanı bulunur. $k_p=1$ iken $T_n=2.7$ sn dir. Bu değerler analog kontrol kartı üzerindeki direnç değerlerinin değiştirilmesi ile ayarlanılır.

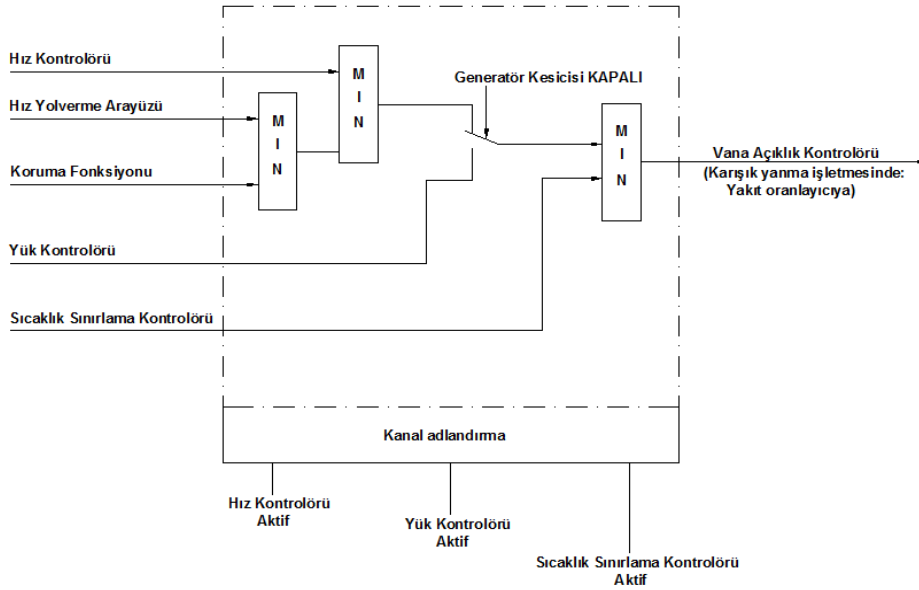
Yakıttaki vanadyum içeriğine bağlı olarak düzeltilmiş sıcaklık değeri elektrohidrolik kontrolördeki özel bir fonksiyonun etkisi ile azaltılır. Akaryakıt içindeki ppm cinsinden ölçülen vanadyum miktarı kontrol sistemine girilir. Girilen bu değer göstergelerde de görülebilir.

Şayet vanadyum içeriği 10 ppm den büyük ise ayarlanılan sıcaklık değeri otomatik olarak temel yük sıcaklık değerine geçer.

6.5.4 Kontrol transfer devresi

Şekil 6.13’de verilen kontrol transfer devresi üç adet minimum değer mantık devresi içermektedir. Gaz türbini ve generatörün yüküne bağlı olarak hız, yük ve sıcaklık kontrolörlerinden hangisinin kontrolü ele alacağını ifade eder.

Bu kontrol transfer devresi ayrıca kontrol çevrimlerinin bir biri ile tamamen yalıtımını da garanti eder. Gerek hız kontrolörü gerekse yol verme yakıt ileri besleme kontrolörünün çıkış sinyalleri bir minimum değer mantık devresi üzerinde etkili olur. Bu giriş sinyallerinden düşük olanı minimum mantık devresinin çıkış sinyalini oluşturur ve bu çıkış sinyali kontrol vanası açıklık kontrolünü kontrol eder. Yol verme süresince hız ayar noktası nominal hız değerine ayarlanılır. Hız kontrolörünün çıkış sinyali yaklaşık olarak % 3 kadar yol verme yakıt ileri besleme kontrolörünün çıkış sinyalinden daha büyük değerde tutulur. Nominal hıza ulaşıncaya kadar hız kontrolörünün çıkış sinyali sabit tutulur ve kontrolü devreye alır. Hız kontrolörünün çıkış sinyali, yüksüz konumda generatörü nominal hız da tutacak şekilde kontrolü sağlar.



Şekil 6.13: Kontrol transfer devresi [15].

Her hangi bir nedenle yol verme esnasından $\frac{dh}{dn}$ gibi koruma fonksiyonları etkili olabilir. Böyle bir durumda koruma fonksiyonu çıkış sinyali yol verme yakıt ileri besleme kontrolörünün çıkış sinyalinden küçük olacaktır. Böylece minimum mantık devresinin çıkış sinyalini koruma fonksiyonu sinyali oluşturacak ve kontrol vanası açıklık sinyalini kontrol edecektir.

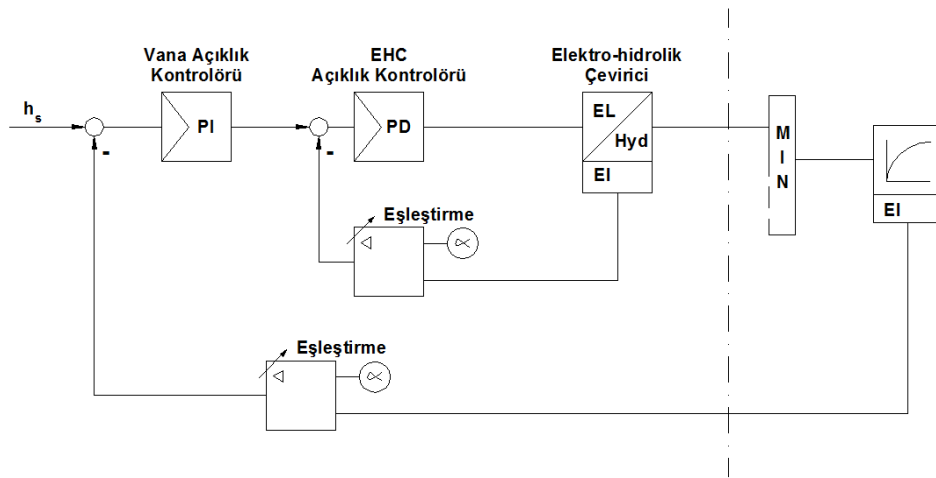
Gaz türbini ve generatörü şebeke ile senkronize olduktan sonra yük kontrolörü aktif olup gaz türbinini ayarlanılan yük değerine kadar yüklemeye başlar. Hız kontrolörü sinyali yük kontrolörü sinyalini sistemde oluşabilecek her hangi bir yüksüz kalma durumuna karşı sürekli takip eder. Sıcaklık kontrolörü ve yük-frekans kontrolörü bir minimum mantık devresinin giriş sinyallerini oluşturmaktadır. Sıcaklık kontrolörü ayar değeri % 1'den daha fazla saparsa bu minimum mantık devresinin çıkışında etkili olur.

Kanal adlandırma fonksiyonu, elektro hidrolik kontrol devresi üzerinde hangi kontrolörün etkili olduğunu gösterir. Hız kontrolörü, yük kontrolörü, yük/frekans kontrolörü, sıcaklık kontrolörü ve yük sınırlama devrelerinden hangisinin etkin olduğunu bildirir.

Yük sınırlama devresi, otomatik voltaj regülatörü üzerindeki reaktif güç sınırlama kontrolörünün etkili olması sonucu generatörü aşırı ısınmalara karşı korumak amacı ile devreye girer. Generatörün aşırı uyarılması sonucunda reaktif güçte meydana gelen artışları karşılamak amacıyla kontrolör etkin olur.

6.5.5 Kontrol vanası açıklık kontrol sistemi

Şekil 6.14'de verildiği gibi Vana açıklık kontrol sistemi hız, yük ve sıcaklık kontrolörlerinin emrindedir. Bu kontrol sistemi, tüm kontrol sisteminin kararlılığını ve dinamik performansını iyileştirir.



Şekil 6.14: Açıklık kontrol sistemi [15].

Kontrol vanası açıklık mesafesi ayar sinyalini kontrol transfer devresi ayarlar. Şayet sistemde aynı anda iki farklı yakıt yakılıyorsa yakıt oranlayıcı kontrol transfer devresinin çıkışını hem gaz yakıt hem de sıvı yakıt kontrol vanasının açıklığını kontrol edecek şekilde paylaşır.

Elektrohidrolik çeviricideki servo pistonun açıklık bilgisi ve yakıt kontrol vanasının açıklık bilgisi diferansiyel transformatör algılayıcısı ile ölçülür. Bu ölçülen bilgiler bir eşleştirme fonksiyonundan sonra ilgili açıklık kontrolörüne iletilir.

Eşleştirme fonksiyonu, gerçek açıklık bilgisi ile orantılı olan diferansiyel transformatör algılayıcı gerilim bilgisini elektro hidrolik kontrolörün gerilim sinyaline çevirir. Bununla birlikte, eşleştirme fonksiyonu kontrol vanası kapalı sinyali olduğu müddetçe kontrol çevriminin kapalı durumda kalmasını garanti eder. Bu durum, kontrol vanasına açma sinyali gittiği zaman aniden veya gecikeli olarak çalışması gibi olumsuzlukların oluşmasına engel olur. Karma yakıt kullanma

durumunda eşleştirme fonksiyonu kontrol vanalarının açıklıklarını ayarlayarak sıvı ve gaz yakıt arasındaki kaloriferik farklılıkları giderir. Kontrol vanalarının açıklıkları 0 ile 100 % arasında kontrol istasyonundan görülür.

Kontrol vanası açıklık kontrolörü orantısal ve entegral karakteristiğe (PI) sahip olup kontrol çevriminin dinamik ve statik performansını iyileştirir. Kontrol vanası açıklık kontrolörünün EHC tarafında olanı kontrol bloğu ise orantısal ve türevsel karakteristiğe (PD) sahiptir.

PD Karakteristik (açıklık kontrolörü EHC) :

$$F(p) = k_p \times \left(\frac{1 + K_p \times T_v \times p}{1 + p \times T_v} \right) \quad (6.4)$$

PI karakteristiği (açıklık kontrolörü CV) :

$$F(p) = k_p \times \left(1 + \frac{1}{p \times T_n} \right) \quad (6.5)$$

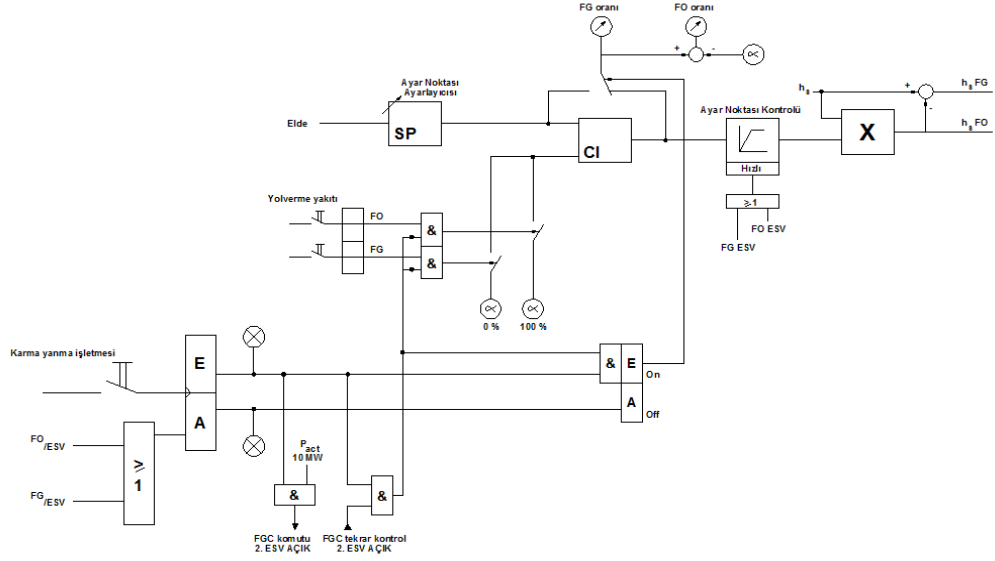
Gaz türbinlerinin her biri için yapılan optimizasyon çalışmaları sonucu k_p orantısal sabiti, T_v türev zamanı ve T_n entegral reset zamanı bulunur. PI Kontrolör için $k_p=1.3$, $T_n=160$ msn iken PD kontrolörün için $k_p=1.5$, $T_v=4.7$ msn dir. Bu değerler analog kontrol kartı üzerindeki direnç değerlerinin değiştirilmesi ile ayarlanılır

6.5.6 Yakıt oranlayıcı

Gaz türbininin iki farklı yakıt türü ile çalışabilmesi için bir birinden bağımsız iki adet vana açıklık kontrol sistemi tasarlanılmıştır. Kontrol transfer devresi çıkışı ile belirlenen açıklık ayar noktası, iki vana kontrol çevrimine yüzdesel olarak paylaştırılır. Her iki kontrol çevrimi bir birinin aynısı olup Şekil 6.15’de verilmiştir.

Gaz türbinlerinin ilk çalıştırmasında yakıt türlerinden yalnızca biri seçilebilir. Yol verme yakıt ileri besleme kontrolörü veya hız kontrolörü tarafından talep edilen açıklık ayar noktası h_s yakıt oranlayıcısı tarafından değiştirilemez.

Şekil 6.16’da gösterildiği gibi ayar noktası ayarlayıcısının konumuna göre sıvı ve gaz yakıt kontrol vanalarının açıklık ayarları yapılır. Ayar noktası, karma yanma işletmesi kontrol istasyonundan seçildikten sonra 0 ile 100 % aralığında ayarlanılabilir.



Şekil 6.15 : Yakıt Oranlayıcısı [15].

Karma yanma seçeneği için, ana kumanda veya GTC kabini üzerinden karma yanma işletmesi seçilmelidir. İlgili seçme tuşuna basıldıktan sonra elektrohidrolik kontrolörden fonksiyonel grup kontrolüne bir sinyal gider. Bu sinyal ile birlikte ikincil yakıt için hazırlıklar başlar bu anlamda ikinci yakıtın acil stop vanasına açma sinyali gider. Hazırlıklar süresince ilgili karma yanma tuşunun göstergesi flash yapar. Acil stop vanası açıldığı andan itibaren de gösterge sürekli yanmaya devam eder. Karma yanmanın oluşa bilmesi için generatör yükünün 10 MW'ın üstünde olması gerekmektedir.

Karma yanma işletmesi seçili iken her hangi bir sebeple acil stop vanası kapalı kalır ise yakıt paylaşırma işlemine son verilir ve kontrolör tarafından diğer yakıt ile %100 hedef güce ulaşılır.

Oranlayıcı, kontrol transfer devresinden gelen h_s açıklık sinyalini h_s FO sıvı yakıt ve h_s FG gaz yakıt sinyallerine paylaşır. Paylaşırma ayar noktası ayarlayıcısının çıkışında yapılır. Buradan çıkan sinyal ayar noktası kontrolöründen geçerek oranlayıcıya gelir.

Ayar noktası ayarlayıcı aracılığı ile sıvı ve gaz yakıt karışımı her hangi bir yük şartlarında değiştirilebilir.

6.5.7 Elektrohıdrolık kontrolör ile hidrolık hız yöneticisinin etkileşimi

GTC ve HG tamamı ile birbirinden ayrı iki kontrol sistemidir. Her ikisi de gaz türbininin yukarıda ifade edilen kontrol işlemlerini bağımsız olarak yapacak yeteneğe sahiptir. Her iki sistemde kontrol vanalarının açıklıklarını ayarlamak için aynı yağ sistemini kullanmaktadır. Bu iki kontrol sistemi ile hidrolık sistem arasındaki ara yüz; GTC sistemi için elektrohıdrolık çevirici(EHC) iken HG sistemi için hidrolık-hıdrolık çeviricidir (HHC).

Şekil 6.1’de gösterildiği gibi elektro hidrolık kontrolör ve hidrolık hız yöneticisi bir düşük değer kapısının girişlerini oluşturmaktadırlar. Dolayısıyla her hangi bir zaman aralığında bu girişlerden düşük değerlikli olanı kontrol görevini görecektir. Ayrıca ihtiyaç durumunda göre bu iki kontrol sisteminden biri aktif edilebilir.

Şayet GTC’nin tüm kontrolü üstlenmesi isteniliyorsa HG’nin ayar noktası %100’e ayarlanılır. Tersi de geçerlidir.

Normal şartlarda kontrol görevi elektrohıdrolık kontrolörde olup hidrolık hız yöneticisi ise yedek olarak olası arıza durumlarda aktif olmak üzere beklemektedir.

6.5.8 Frekans etkisi kontrol devresi

Şebekedeki frekans değişiminin ifadesi üretilen aktif güç ile tüketilen aktif gücün arasındaki farklılıktır. Üretilen ve tüketilen güçler aynı ise frekans da dalgalanmalar görülmez. Şebeke de çeşitli sebeplerden dolayı üretim noktalarının devreden çıkması ile üretim eksikliği dolayısı ile frekans düşüklüğü, yüklerin devreden çıkması ile de üretim fazlalığı dolayısı ile de frekans yükselmesi oluşmaktadır. Şekil 6.16’da verildiği gibi şebeke frekansındaki değişimler ile orantılı olarak generatör çıkış gücünün değişmesi frekans kontrolü olarak adlandırılmaktadır.

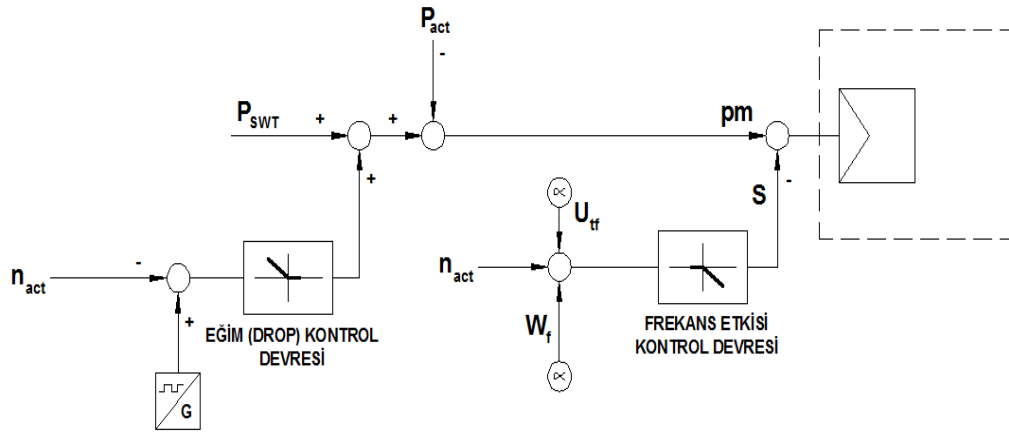
Seçilen frekans yük eğrisine bağlı olarak güç düzeltme sinyalleri oluşturulur. Frekans düşü karakteristikleri 0.5’lik adımlar ile % 2.5’dan % 8’e kadar değiştirilebilir. Bu işlem gaz türbinleri serviste iken de yapılabilir. Örneğin % 5’e ayarlı bir sistemde şebeke frekansındaki % 5’lik değişimi karşılamak için gaz türbininin yük ayar değeri %100 değiştirilmelidir. Şekil 6.17 de düşü karakteristiği verilmiştir. Frekans kontrolüne gaz türbininin ne kadarlık rezerv güç ile katılacağına bağlı olarak ünitenin hız düşü değerinin hangi değere ayarlanacağı aşağıdaki eşitliğe göre hesaplanılır.

$$s.d(\%) = \frac{\frac{\Delta f}{f_{nom}}}{\frac{\Delta p}{P_{nom}}} \times 100 \quad (6.6)$$

Burada,

Δf : Frekansdaki değişim miktarı, Δp : Güçteki değişim miktarı, f_{nom} : Nominal frekans

Ve P_{nom} : Nominal gücüdür.



Şekil 6.16: Frekans etkisi devresi [15].

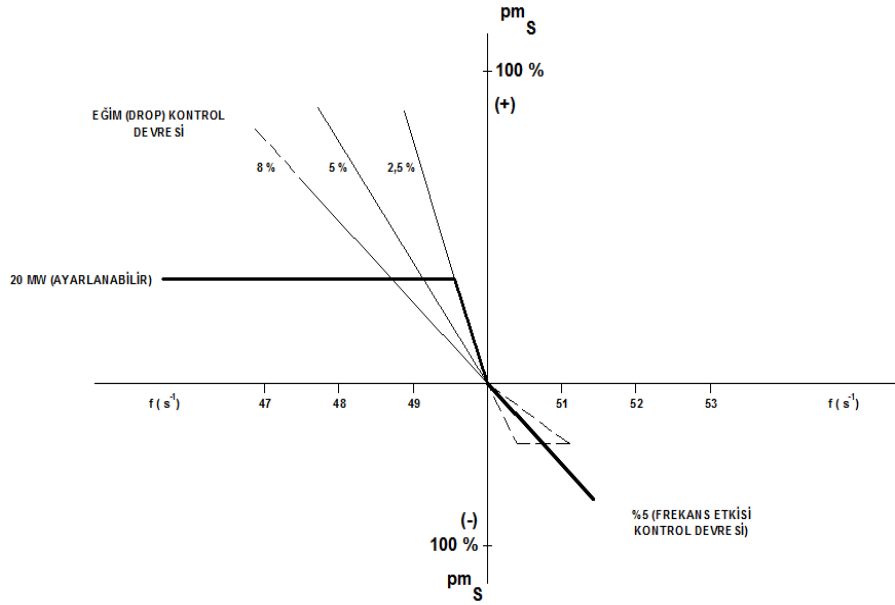
Sistemin cevap verme hassasiyeti şebeke frekansındaki 5 mHz'lik değişimleri algılayacak düzeydedir. Kontrol devresinin frekansı düzeltme etkisi kapasitesi ayarlanabilir olmak ile birlikte fabrika değeri olarak ± 20 MW dır.

Frekans etkisi devresi bir tuş vasıtası ile isteğe bağlı olarak aktif edilebileceği gibi devreden de çıkartılabilir. Frekans kontrolüne katılan gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığında hızlı değişimlerin olacağı bilinmeli ve türbinlerin eş değer çalışma süresine yansımaları hesap edilmelidir.

UCTE Şartları gereği, Şekil 6.18'de frekansda 200 mHz'lik değişim olması durumunda frekans etkisi aktif olan bir ünitenin çıkış gücünün nasıl değişmesi gerektiğine dair grafik verilmiştir [14]. Şekil 6.19'da ise birincil frekans kontrolüne katılan bir ünitenin frekansa bağlı çıkış gücü değişim eğrisi verilmiştir.[1]

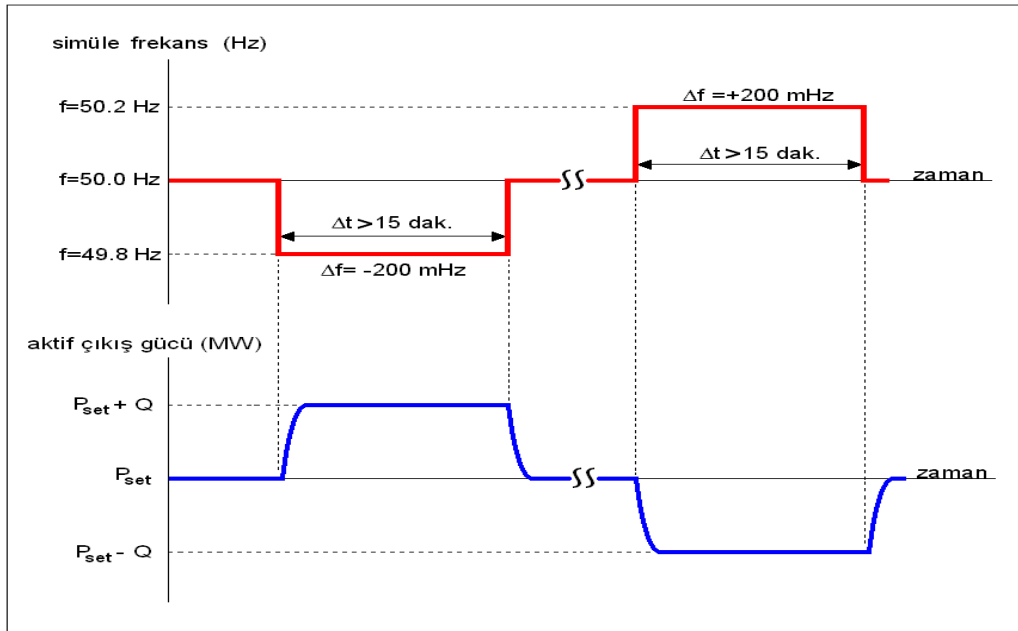
Ülkemizin elektrik iletim sisteminin Avrupa Elektrik İletim Koordinasyon Birliği (UCTE) sistemi ile entegrasyonu hedefleri çerçevesinde 01.07.2009 tarihinden

itibaren yan hizmetler anlaşmaları çerçevesinde üretim merkezlerine birincil frekans kontrolüne katılım zorunluluğu getirilmiştir.



Şekil 6.17: Düşü karakteristiği [15].

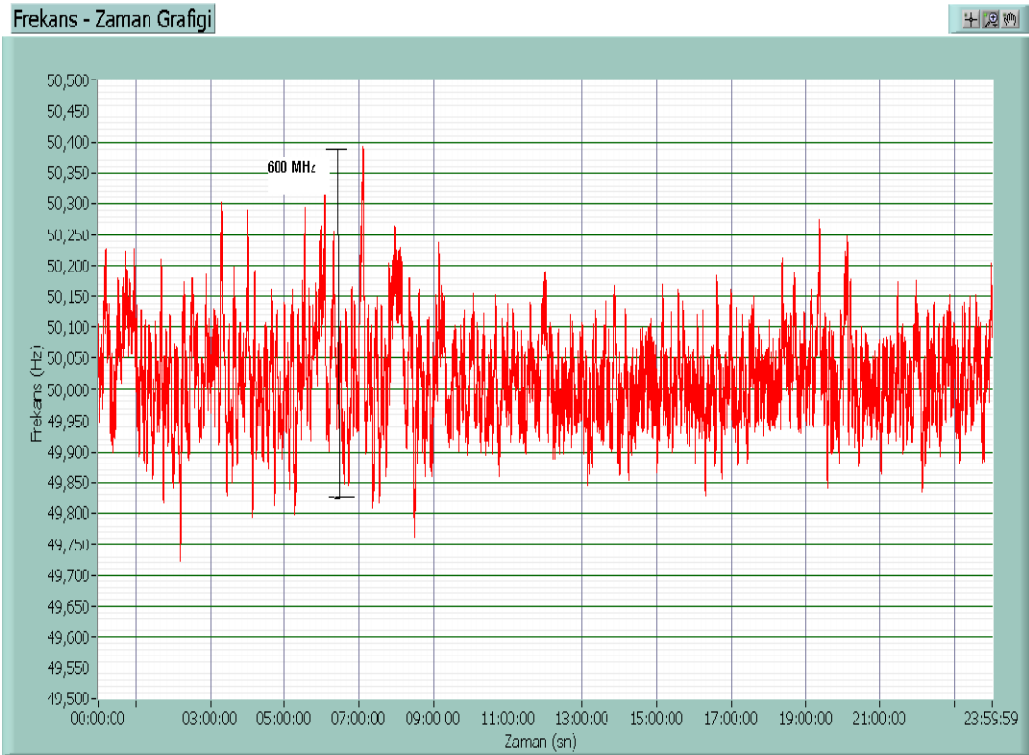
Bu çerçeve de Şekil 6.20 ve şekil 6.21' de Türkiye iletim şebekesinin 01.07.2009 öncesi ve sonrasına ait frekans değişim eğrileri verilmiştir. Grafikler incelendiği zaman şebeke frekansındaki düzleme net olarak görülmektedir [1].



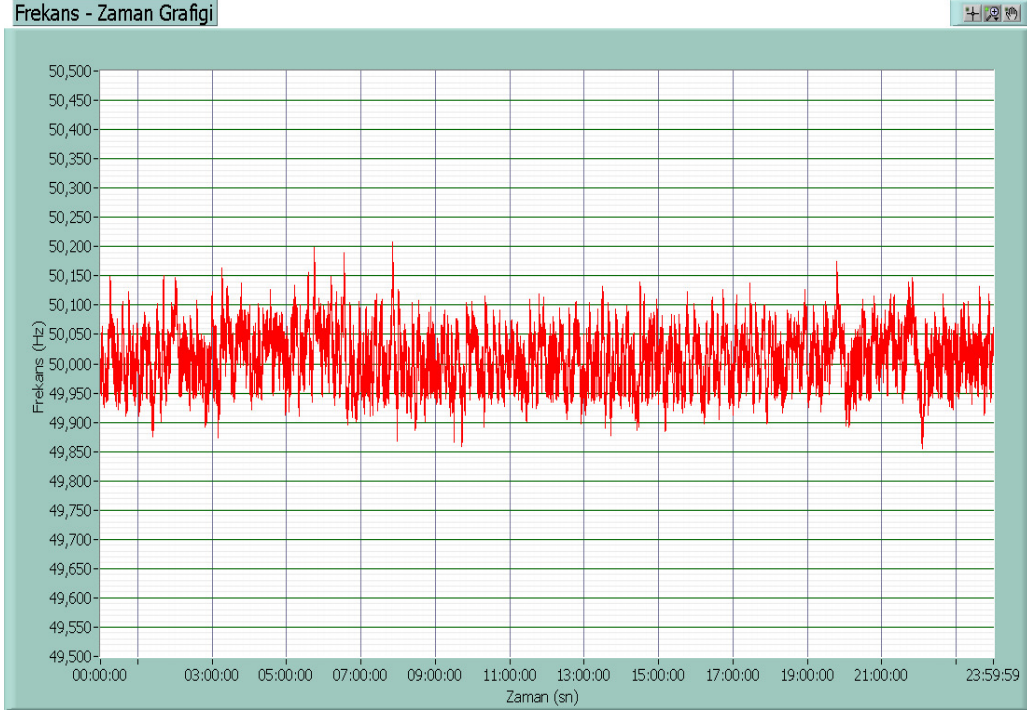
Şekil 6.18: Frekans kontrolüne katılan bir ünite de UCTE şartı [14].



Şekil 6.19: Primer Frekans kontrolüne katılan bir ünitenin çıkış gücü grafiği [1].



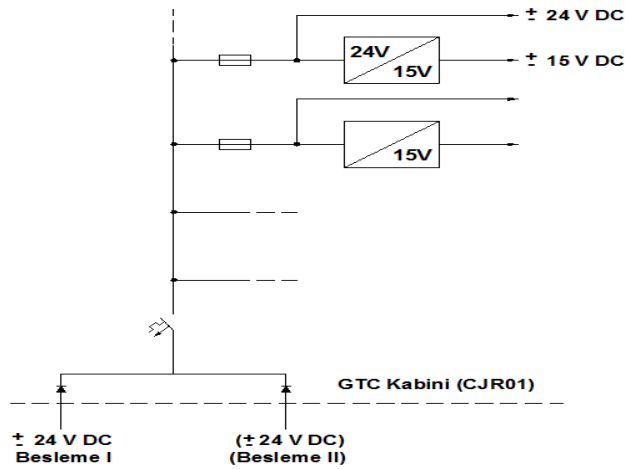
Şekil 6.20 : 28.05.2009 Tarihli Türkiye şebekesi günlük frekans değişim grafiği [1].



Şekil 6.21 : 03.09.2009 Tarihli Türkiye şebekesi günlük frekans değişim grafiği [1].

6.5.9 Kontrol kabinlerinin beslenmesi

Şekil 6.22’de örnek bir kontrol kabini beslemesi gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi iki farklı ± 24 V doğru akım kaynağından kabin beslenir. Bu iki farklı besleme kaynağını bir birinden izole etmek için çıkış noktalarına seri diyot bağlantısı yapılmıştır. Kabin içinde 24 V değeri 15 V değerine dönüştürülmüştür. Buradaki gerilim değerleri röleler vasıtası ile izlenmekte ve oluşan arızalar alarm işareti olarak operatörlere iletilmektedir.



Şekil 6.22 : Kontrol kabinlerinin beslenmesi [15].

7.GAZ TÜRBİNLERİNİN MATEMATİKSEL MODELİNİN VE KONTROL BLOKLARININ İFADE EDİLMESİ

7.1 Giriş

Güç sistemlerinin kararlılığı ile ilgili yapılacak çalışmalarda kullanılmak üzere , gaz türbini ve generatörlerin matematiksel modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, güç sistemlerinin kararlılığı, dağıtım stratejilerinin geliştirilmesi ve beklenmeyen arıza durumunda olacakların keşfedilmesi amaç edinilmiştir. Her bir isteğe vurgu yapacak şekilde matematiksel modelin basitleştirilmesi düşünülmüştür. Ayrıca, çalışma kapsamında alışlagelmiş yakıt sistemi, sıvı ve gaz yakıt çalışma durumları, özel çalışma koşulları olan paralel ve izole çalışma durumları incelenmiş ve entegral regülatörün kullanımından da bahsedilmiştir.

Çalışma blok diyagramlar üzerine kurulmuş ve ayrıca tamamlayıcı denklemler de ifade edilmiştir. Genel olarak sıcaklık büyüklüğü hariç per unit sistem kullanılmıştır. Per unit değerler, yüzdesel ifadelerin onluk tabandaki eşdeğerleridir. Örneğin yüzdelik sistemde 100 tasarım değeri iken, per unit sistemde 1 tasarım değeri olarak adlandırılır.

Tasarım değerlerini temsil etmek üzere; sistem kazançları, katsayılar ve zaman sabitleri bu çalışmaya dahil edilmiştir. Bu katsayılar testler, gerçek saha tecrübeleri ve bir çok farklı montajlardan elde edilen tecrübeler ile doğrulanmaktadır.

Bu çalışma basit çevrim ile sınırlandırılmış olup; ortak tek mil üzerindeki türbin tahrikli generatör dikkate alınmıştır. Kombine çevrim çalışması, nispeten uzun ve kompleks bir çalışma olacaktır.

Bu modellemede mil hızının 0.95-1.07 per unit değer aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Ayrıca, çalışmada ISO şartları olan 15 °C atmosfer sıcaklığı ve 1013 mbar atmosfer basıncı kabulü yapılmıştır. Modellemede gaz türbininin fonksiyonel blok diyagramı ve kontrol bloklarına odaklanılmıştır.

7.2 Basitleştirilmiş Gaz Türbininin Benzetimi ve Kontrol Blokları

Şekil 7.1’de tek milli gaz türbini, kontrol ve yakıt sistemi blokları ile birlikte temsil edilmiştir. Ayrıca, generatör şebekeden izole olarak düşünülmüştür. Aşağıda verilen denklemler ve tanımlamalarla bu modeldeki bloklara açıklık kazandırılmıştır.

Modellemede Kullanılan Blokların Açıklaması:

- Blok 1 : Digital ayar noktasını ifade etmekte olup, generatörün hedef üretim seviyesini belirlemeye yarar. Normal ve acil yükleme olmak üzere iki farklı seçenek söz konusu dur. Şekil 6.2’de yükleme seçenekleri gösterilmiştir.
- Blok 2: Hız Regülatörü Bloğu

$$T(s) = \frac{W(Xs + 1)}{Ys + z} \quad (7.1)$$

W,X,Y,Z : Hız Regülatörü transfer fonksiyonu katsayıları

K_D : Hız Regülatörü Kazancı

s: Laplace operatörü

Düşü hız regülatörü için: $W=K_D$, $X=0$, $Y=0.05$, $Z=1$

Entegral hız regülatörü için : $W=30$, $X=2.5$, $Y=0.1$, $Z=1$

- Blok 3: Yakıt Sınırlama Bloğu

VCE' :Yakıt talep sinyali (per ünit)

$$VCE'_{max} = 1.5$$

$$VCE'_{min} = - 0.1$$

$$VCE'_{nom} = 1$$

- Blok 4: Yakıt Sistemi Bloğu

a , b , c : Yakıt sistemi transfer fonksiyonu katsayıları

K_F : Yakıt sistemi geri besleme katsayısı (sıvı yakıt çalışmasında sıfırdan farklıdır)

Γ_F : Yakıt sistemi zaman sabiti

(a=1, b=0.05, c=1, $\Gamma_F=0.4$, $K_F=0$)

➤ Blok 5: Türbin Egzost Gazı Bloğu

$$F_1 = T_X = T_R - 390 \times (1 - W_f) + 306 \times (1 - n) \quad (7.2)$$

W_f : Yakıt miktarı

n : Mil hızı (per ünit)

T_R : Set edilen limit sıcaklık değeri

T_X : Türbin egzost sıcaklığı

F_1 : Türbin egzost sıcaklığı

➤ Blok 6: Türbin Momenti Bloğu

$$F_2 = 1.3 \times (W_f - 0.23) + 0.5 \times (1 - n) \quad (7.3)$$

F_2 : Türbin momentı

➤ Blok 7: Türbin Dinamik Karakteristikleri

ϵ_{CR} : Yanma reaksiyonu zaman gecikmesi

Γ_{CD} : Kompresör deşarj zaman sabiti

ϵ_{TD} : Türbin ve egzost sistemi zaman gecikmesi

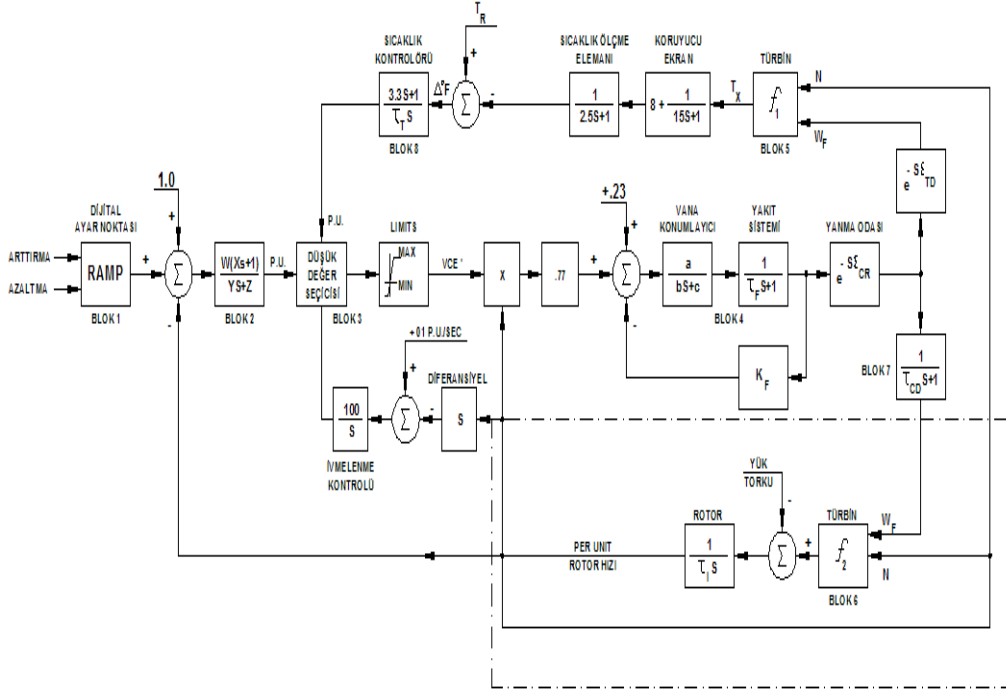
($\epsilon_{CR}=0.01$, $\Gamma_{CD}=0.1$, $\epsilon_{TD}=0.02$)

➤ Blok 8: Sıcaklık Kontrol Bloğu

Γ_T : Sıcaklık kontrolörü entegral oranı

Γ_I : Türbin rotoru zaman sabiti

($\Gamma_T=250$ °C, $\Gamma_I: 18.5$)



Şekil 7.1: Basitleştirilmiş tek milli gaz türbini benzetim blokları [2].

Kontrol sistemi hız kontrolü, sıcaklık kontrolü, ivmelenme kontrolü ve yakıt sınırlayıcıdan oluşmaktadır. Hız regülâtörünün temsili düşü veya entegral kontrolör olarak yapılabilir. Hız regülâtörü, referans hız değerine eklenen dijital ayar değerinden gerçek mil hızının çıkartılması ile elde edilen hız hatası ile çalışır.

Düşü hız regülâtörünün çıkışı doğrudan hız hatası ile orantılıdır. Entegral hız yöneticisinde oransal kontrolörün yanında reset PI kontrolörü de bulunmaktadır ve hız hatası sıfır oluncaya kadar kontrolör devrededir. Entegral kontrolör için, dijital yük ayar noktasının sabit kaldığı ve gaz türbininin ürettiği gücün yükü karşıladığı kabul edilir. Düşü hız regülâtörü ile gaz türbini kısmi yüklerde kontrol edilir.

Dijital ayar noktası, şebeke ile paralel çalışılırken hız regülâtörü olarak da düşü hız regülâtörü seçilmiş ise gaz türbini çıkışını kontrol etmek demektir. Dijital ayar noktası, bir dijital analog çevirici ve lojik kontrollü bir sayıcıya özdeştir. Fonksiyon olarak önceden seçilen eğimde bir rampa işareti üretir. Çalışma modu ve imalatçıya bağlı olarak farklı eğimde rampa üretilebilir. Öyle modeller vardır ki, hızlı yükleme seçenekleri normal yüklemenin 8-10 katı kadardır. Ayrıca, generatör kesicisinin açması durumunda dijital ayar noktası 100.3'e otomatik olarak ayarlanır. Bunun

amacı, generatörün aşırı hızlanmasını önlemek ve gaz türbinini nominal devirde tutup, tekrar senkronize olmasını kısa sürede gerçekleştirmektir.

Sıcaklık kontrolü, çevre sıcaklığından ve yakılan yakıtın karakteristiğinden bağımsız olarak gaz türbininin çıkış sıcaklığının sınırlanması fonksiyonunu içerir. Aslında yapılan iş türbin çıkış sıcaklığını ölçerek türbindeki sıcaklık hakkında fikir sahibi olmaktır. Egzost çıkış gazının sıcaklığını ölçmede koruyucu ekranı olan (radiation shields) ısı elemanları kullanıldığından dolayı ölçüm sisteminin zaman sabitinden kaynaklanan küçük geçici hal hatası oluşur. Normal sistem koşullarında gaz türbininin çıkışı ayarlanan yüklenme eğrisine göre artacaktır ve egzost gazı ölçüm sisteminin zaman sabitinden kaynaklanan geçici hal durumları oluşmayacaktır.

Sistem frekansının düşmesi sonrasında gaz türbini çıkış gücünü hızlı bir şekilde artacaktır. Bu esnada ölçme sisteminin zaman sabitinden dolayı geçici olarak pikler oluşacaktır. Sıcaklık kontrolörünün tasarlanma amacı bu geçici hal durumlarını kompanze etmektir.

İvmelenme kontrolörü, gaz türbinlerine yol verilirken oluşacak termal stresleri karşılayıp iyileştirecek şekilde rotorun ivmelenmesini sınırlamayı sağlar. Bu kontrolörün ikincil görevi ise, generatörün her hangi bir sebepten dolayı şebekeden ayrılması durumunda yakıt akışını kısarak generatörün aşırı hızlanmasını engellemektir. Bu durum, özellikle generatör kesicisinin dışındaki diğer şebeke kesicisinin açması durumunda çok faydalıdır.

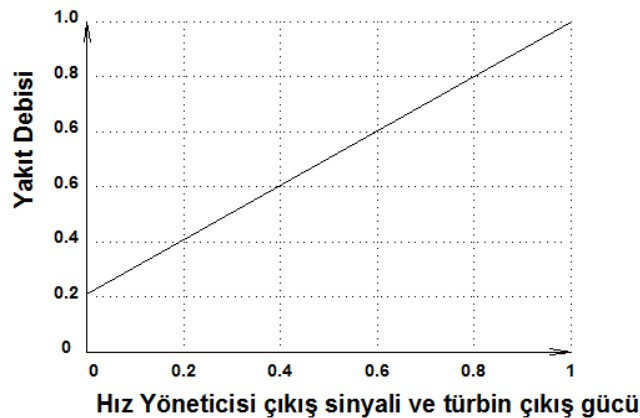
Yukarıda bahsedilen üç kontrolörün çıkışı bir düşük değer seçicisine giriş olarak verilmektedir. Bu düşük değer seçici devresinin çıkışı (VCE') üç giriş değerinden en küçük olanı olacaktır. Bu değer en az yakıt talep sinyalini oluşturacaktır. Bir kontrolörden diğer kontrolöre geçiş darbesiz ve zaman gecikmesiz olarak gerçekleşecektir. Düşük değer seçici devresinin çıkış sinyali bir maksimum ve minimum sınırlayıcı devresinde karşılaştırılacaktır. Bu maksimum ve minimum sınırlayıcılardan maksimum değeri sıcaklık kontrolörü için ilave bir koruma sağlar. Minimum sınırlayıcısı ise dinamik olarak daha büyük önem taşır, çünkü minimum bir eşik değeri vardır ki yanma odasındaki alevin sönmeye karşı gelir. Bu değer toplam momentin %10'una karşı düşecek değerdir.

Gaz türbinlerinin bağlı oldukları şebekeden geçici olarak çekecekleri güç toplam gücün % 5'i ile sınırlandırılmıştır. Ters zaman karakteristikli bir ters yönlü güç akış

rölesi yardımı ile generatör kesicisi devre dışı bırakılır. Burada dikkat edilmesi gereken ters yönlü güç rölesinin bir koruma rölesi olmadığı, sadece gaz türbinini devreden çıkarma prosedürünü başlatan bir devre elemanı olduğudur. Bu röle tamamı ile ayarlanabilir olup, ihtiyaç duyulması durumunda gaz türbinlerinde ters yönde güç akışının sağlanabilir.

Gaz türbini yakıt sistemi, gaz türbinine yakıt temin etmek amacıyla tasarlanmış olup VCE' yakıt talep sinyalinin mil hızı ile çarpımı ile orantılı olarak yakıt talebini oluşturur. Bu durum yakıt sisteminin gerçek çalışma durumuna benzer. Sıvı yakıt temininde kullanılan pompaları rotor mili hızı ile dönerken, gaz yakıt kontrolü iki aşamalı olarak yapılır.

Dinamik bakımdan, gaz türbinleri buhar türbinlerinden çok fazla farklılığa sahiptir. En belirgin olanı, yüksüz durumda kendini nominal devirde tutabilmek için önemli miktarda yakıt gereksinim duymasındır. Bu miktar yaklaşık olarak % 23 dür. Sonuç olarak, hız regülatörünün aktif yakıt kontrol aralığı %16-100 dür. Hız regülatörünün parametrelerinin kullanımına imkan tanımak için buhar ve hidrolik türbinlerde, hız regülatörü aktif yükün % 0-100 aralığında çalışır. Bu çalışma aralığı daha sonra türbinin termodinamiği ile uyumlu olacak şekilde % 23-100 aralığına düzeltilir. Hız regülatörünün çıkış işareti ile yakıt akış miktarı arasındaki ilişki Şekil 7.2'de gösterilmiştir.



Şekil 7.2: Hız regülatörünün çıkış işareti ile yakıt akış miktarı arasındaki ilişki [2].

Daha önce bahsedildiği gibi, yakıt kontrol sistemi birbirine seri bağlı iki vanadan oluşmuştur. İlki hızın fonksiyonu olarak iki vana arasındaki basıncı kontrol eder. İkincisinin ise açıklık sinyali lineer olan bir karakteristiği bulunmaktadır. Sistemin basınç kontrolü ile ilgili olanının cevabı bu tür çalışmalarda basitleştirilebilir. Bunun temel nedeni iki vana arasındaki hacmin küçük olması ve ilk vananın (basınç kontrol vanası) yüksek kazançlı olmasıdır. Bu nedenle sadece gaz sisteminde önemli olan iki zaman sabiti bulunmaktadır. Bunlardan biri gaz kontrol vanasının konumu ile ilgili ve diğeri ise hacimsel zaman sabiti olup yakıt hattındaki gaz dağıtım boruları ile ilgilidir.

Gaz türbini düzgün rotor zaman sabiti dışında dinamik olmayan ve temel olarak lineer bir cihazdır. Yanma reaksiyon süresi ile ilintili küçük bir taşıma gecikmesi (transport delay), kompresör deşarj tepki süresi (time lag) ve yanma odasından da türbine gazın aktarılmasındaki taşıma gecikmesi (transport delay) söz konusudur.

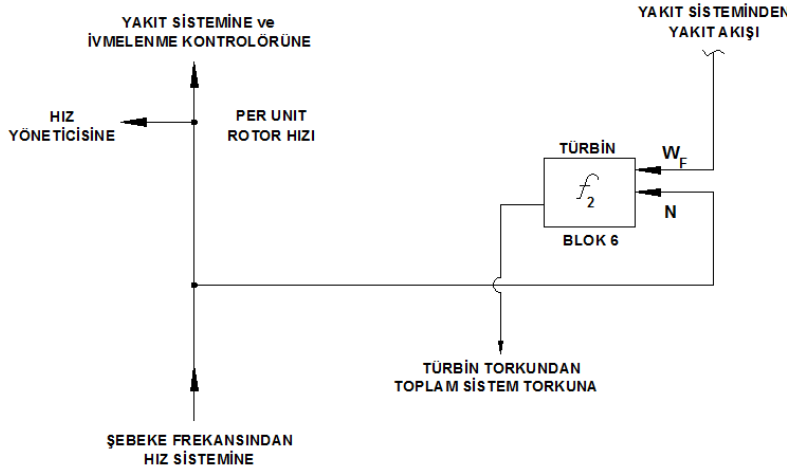
Tek milli gaz türbinlerinde, mil hızının % 95-107 aralığında olması durumunda üretilen moment ve egzost gazı sıcaklığı temelde yakıt debisine bağlı olarak lineer değişir. Moment denklemi % 5 kısmi yük durumunda doğrudur. Belirgin olarak moment denklemi % 100 yükde daha doğru sonuçlar verir. Egzost gazı denklemi kısmi yüklerde daha az doğrudur. Ancak unutulmamalıdır ki, sıcaklık kontrolörü nominal yük ve civarında etkilidir. Ayrıca, genel benzetim yaklaşımında kısmi yüklerdeki doğruluk sapması kolaylıkla ihmal edilebilir. Çizelge 7.1'de örnek bir gaz türbini için karakteristik değerler verilmiştir. Bunlardan büyük güçlü olanları hidrojen soğutmalı olup geri kalanları ise hava soğutmalıdır. Dikkat edilirse generatörün hava veya hidrojen ile soğutulması benzetim açısından sadece rotor zaman sabitini etkiler. Türbin rotor zaman sabiti, türbin nominal yükte yüklü iken türbinin yükünün kalkması durumunda, mil hızın nominal hızın iki katına ulaşma süresi olarak tanımlanır.

Çizelge 7.1: Örnek bir gaz türbini karakteristikleri [2].

Devir Sayısı devir/dak.	Gücü MW	Egzost Sıcaklığı T _R °	Moment Kg-M	Atalet Kg-M ²	Γ ₁ S	Soğutma tipi
3.000	106	522	34.619	20.004	18,5	Hava
3.000	106	522	34.619	20.004	17.1	Hidrojen

7.3 Paralel Çalışma Durumu için Benzetim ve Kontrol Blokları

Birçok sistem çalışmaları birden çok ünitenin paralel çalıştığı durumu ihtiva etmektedir. Şekil 7.1’de verilen konfigürasyonun sağ alt köşesindeki kesik çizgilerle belirtilen kısımda yapılacak değişikliklerle, paralel çalışma durumundaki benzetim modeli elde edilebilir. Yukarıda ifade edilen konulardan frekans ve sistem momenti dışındakilerin tamamı paralel çalışma modeline uygulanabilir. Şekil 7.3’de modelde yapılacak değişiklikler ifade edilmiştir. Bu durumda, türbin generatör rotoruna ait atalet tüm sistemin ataletine eklenmelidir.

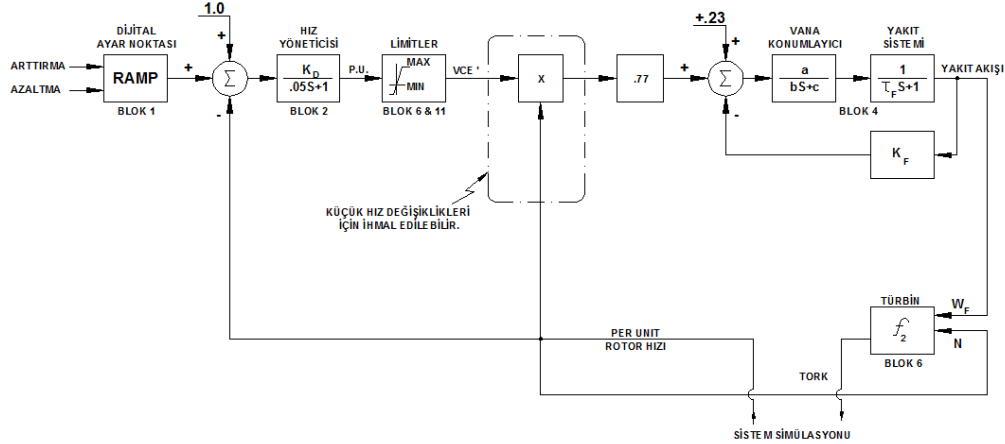


Şekil 7.3: Paralel çalışma için yapılan değişiklikler [2].

7.4 Benzetim Modelinin Basitleştirilmesi

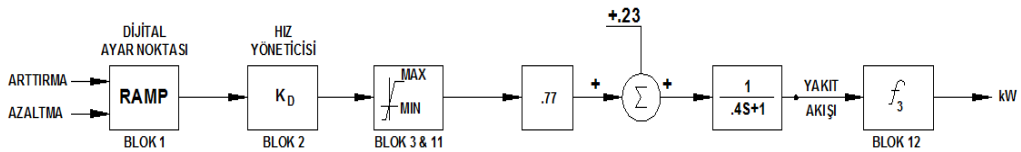
Yukarıda bahsedildiği gibi, model çalışması hızın % 95-107 aralığında değişmesi durumu için tasarlanmıştır. Sistemin çok büyük güçlü bir şebeke ile paralel çalışacağını düşünecek olursak, hızdaki değişim yukarıda ifade edilen aralıktan çok daha küçük olacaktır. Frekansda çok küçük değişikliklerin olacağı kabulünden sonra Şekil 7.1’deki karmaşıklık giderilebilir. Öncelikle, paralel çalışma öngörüldüğü için hız regülatörü yalnızca düşü konfigürasyonuna dönüştürülebilir. Daha sonra, frekans değişimi $\pm \% 1$ ’den büyük olmayacaksa ivmelenme kontrolörü aktif olamayacaktır. Son olarak, mademki gaz türbininin çıkışı digital ayar noktası ayarlayıcı ile kontrol edilecek, sıcaklık kontrolörü tarafından dayatılan limit kontrol devre dışı bırakılabilir. Bu şekilde sıcaklık kontrolörü ve onun ile birlikte minimum değer

kapısı elimine edilebilir. Mademki sıcaklık kontrolörü elimine edildi, gaz türbininin yüklenebileceği maksimum değerin yakıt karşılığı yakıt sınırlayıcıya üst değer olarak atanır. Bu durumda benzetim modeli Şekil 7.4' deki biçimi alır.



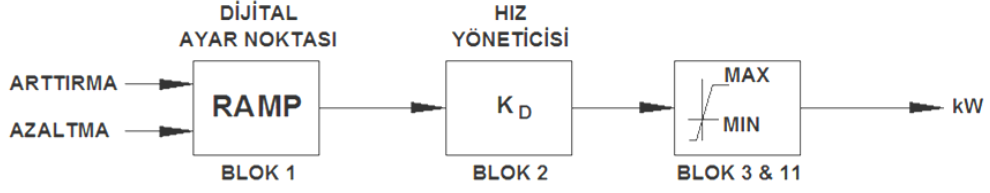
Şekil 7.4: Şebeke ile paralel çalışma durumunda eşdeğer blok yapısı [2].

Şekil 7.4'deki modelden daha ileri düzeyde basitleştirmeleri paralel çalışma durumu için yapmak mümkündür. Eğer şebekenin ataletinin gaz türbininin ataletinden çok büyük olduğu ve ayrıca şebekenin sistem zaman sabitinin çok büyük olacağını düşünecek olursak, modelde kullanılan hız regülatörü ve yakıt kontrol sistemine ait zaman sabitleri ihmal edilebilir. Ayrıca frekans değişiminin çok az olduğunu tekrar düşünecek, olursak yakıt debisi ve dolayısı ile türbin çıkışı doğrudan hız regülatörünün komutunun fonksiyonu olacaktır. İfade edilen değişiklikler Şekil 7.5'de gösterilmiştir.



Şekil 7.5: Küçük zaman sabitlerine sahip blokların iptal edilmesi [2].

En son yapılan analizlerle (sistem zaman sabitinin gaz türbini zaman sabitlerinden çok büyük olması nedeniyle); gaz türbini çıkışının, temel olarak dijital ayarlayıcının konumunun hız regülatörünün kazancıyla çarpımı ile orantılı olduğu sonucuna varılır. Bu durum Şekil 7.6'da gösterilmiştir.



Şekil 7.6: Çok büyük bir şebeke ile çalışmada basitleştirilmiş model [2].

Yapılan son basitleştirmelerle model basit gibi görünse dahi büyük bir sistemde küçük bir gaz türbininin modellenmesi açısından yeterlidir.

Dikkat edilmesi gereken, nasıl bir şebeke ile paralel çalışıldığı ve gaz türbininin karakteristiğidir. Mühendislik yaklaşımı ve ekipmanlar hakkında detaylı bilgi sahibi olmak basitleştirmenin doğruluğunu garanti eder.

8. GAZ TÜRBİNLERİNİN ÇIKIŞ GÜCÜNÜ ETKİLEYEN PARAMETRELERİN İNCELENMESİ VE BENZETİMİ

8.1 Giriş

Gaz Türbinlerinin maksimum çıkış güçleri sistem frekansına ve çevre koşullarına (atmosferik) bağlıdır. Gaz türbinlerinin sıcaklık kontrolü, şebeke frekansına bağlı olarak düşen mil hızı nedeniyle azalan hava debisi ile orantılı olarak yakıt debisini azaltır ve egzost gazı sıcaklığını sınırlar.

Bu çalışmada, gaz türbinlerinin çıkış gücünün şebeke frekansına bağımlılığına ve fiziksel temellere dayalı bir gaz türbini modelini oluşturulması amaçlanılmıştır.

Bu model, anormal frekans değişimi durumlarında güç sistemlerinin dinamik performansının benzetiminde kullanmak için uygun olacaktır.

Bir çok güç sisteminde, toplam üretim içindeki kombine çevrim santrallerinin katkısı her geçen gün hızlı bir şekilde artmaktadır. Büyük güçlü bir üretim grubunun devre dışı olması durumunda, sistem frekansında hızlı bir düşüş meydana gelir. Eğer şebeke yeterli rezerve sahip değilse ve küçük güçlü ise, özellikle gündüz yüklerinde ciddi frekans düşümleri meydana gelir. Anormal sistem frekansı değişimlerini analiz edebilmek için, geride devreye girebilecek ne kadar rezerv yükün olduğunun bilinmesi gerekir.

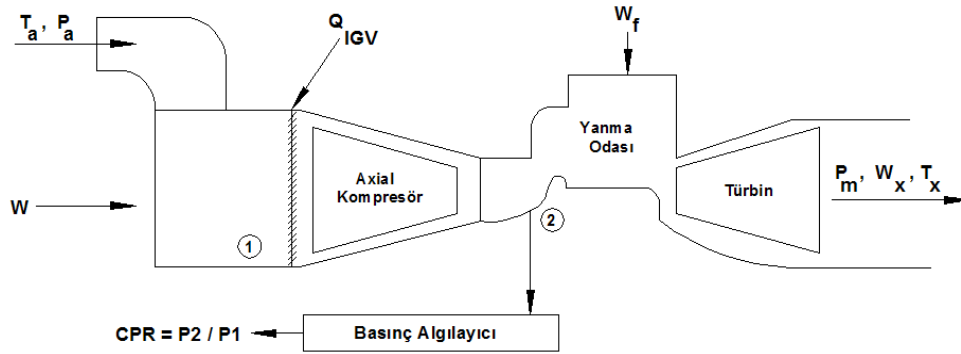
Gaz Türbinleri, kombine çevrimin ürettiği gücün yaklaşık olarak üçte ikisini üretirler. Gaz türbinlerinin maksimum çıkış güçleri mil hızına dolayısıyla sistem frekansına ve çevre koşullarına bağlıdır. Ayrıca bu çalışma maksimum çıkış gücünün frekansa bağımlılığı ile ilgili bir prosedür sunar.

7. Bölümde inceleme konusu olan Rowen'nin Gaz türbinleri ve kontrolüne ilişkin modeli, şebekenin dinamik performansının analizi ile ilgili çalışmalarda kullanılabilir [2]. Rowen'nin hazırladığı model temel bir çalışmadır. Bu model, gaz türbininin sürekli hal çalışmasındaki termodinamik denklemleri, basit zaman gecikmeleri ve konu ile ilgili birkaç kontrolörü içermektedir. Bu kontrolörler sıcaklık kontrolörü, hız regülatörü ve ivmelenme kontrolörüdür. Rowen'in modeli diğer model çalışmaları

için bir başlangıç noktası oluşturmuştur. Ancak Rowen'in bu modeli gaz türbini çıkış gücünün frekansa bağımlılığını incelemek için uygun bir model değildir. Bu çalışmanın amacı, fiziksel prensiplere bağlı olarak bir gaz türbini modeli ortaya koymak ve mil hızı ile çevre koşullarının çıkış gücüne etkisini ortaya koymaktır. Çalışmada Kunitomi, Kurita, Okamoto ve Tada'nın çalışması esas alınmıştır [4]. Ortaya konulacak model, nominal frekansın % 95-105'i arasında geçerli olacak ve ünite yükü de nominal yükünün % 50'sinden daha fazla olacaktır. Bu model gaz türbinin devreye alınması ve devreden çıkartılması süreçlerinde geçerli olmayacaktır.

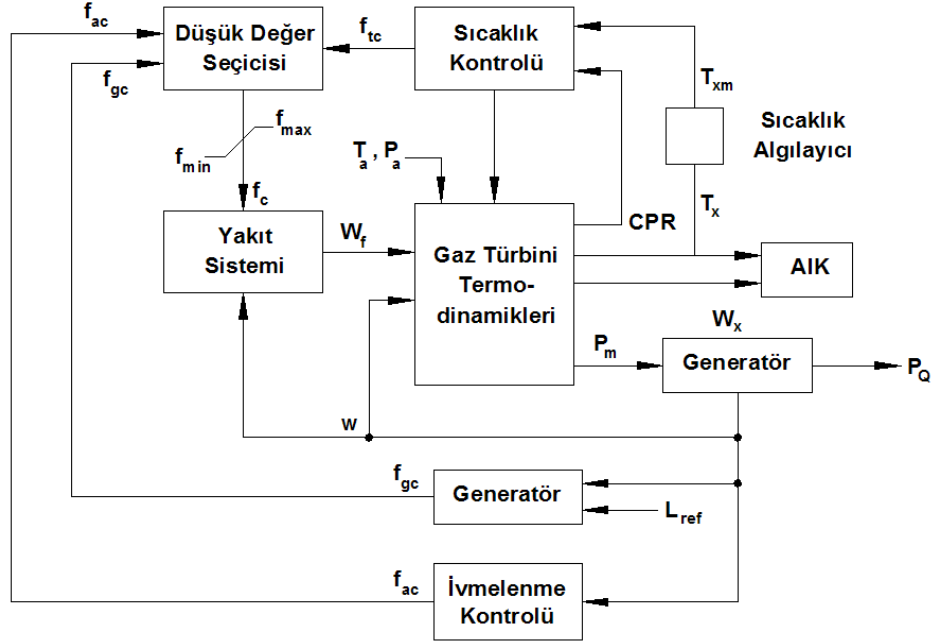
8.2 Gaz Türbini Model Yapısı

Şekil 8.1'de görüldüğü gibi gaz türbini bir aksel kompresör, yanma sistemi ve türbinden oluşur. İlgili giriş değişkenleri yakıt (W_f) ve hava (W_a) debileridir. İlgili çıkış değişkenleri ise, mekanik çıkış gücü (P_m) ile atık ısı kazanına gönderilen atık gazın debisi (W_x) ve sıcaklığı (T_x) dir. Yakıt debisinin hava debisi ile karşılaştırması yapıldığında çok küçük olduğu görülecektir. Dolayısı ile atık ısı kazanına gönderilen atık gazın debisi giriş havası debisine eşittir. Atık ısı kazanına verimli ısı transferi yapılacak şekilde yakıt ve hava debisi ayarlanarak istenilen çıkış gücü elde edilir. Hava debisi kompresörün girişinde bulunan vana (IGV) vasıtasıyla ayarlanabilir. Hava debisi çevre sıcaklığının (T_a), atmosfer basıncının (P_a) ve mil hızının (w) fonksiyonudur.



Şekil 8.1: Gaz türbini ve ilgili değişkenler [4].

Şekil 8.2'de gaz türbini ve onun kontrol blokları ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu modelin yapısı Rowen'in modelinin yapısına benzerdir [2]. Bununla birlikte, gaz türbininin termodinamik karakteristiğine ilişkin formüller, mil hızının çıkış gücüne etkisinin açıkça ortaya çıkarılması için aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.2: Gaz türbini ve kontrol blokları [4].

Hava debisi (W_a) denklemi, $q(T_a, P_a)$ çevresel faktörler olan atmosfer basıncı (P_a) ve atmosfer sıcaklığını (T_a) içermektedir. ($T_{a0}=15$ °C ve $P_{a0}=1$ Atm dir.)

Hava debisi, sıcaklık düzeltmeli hızdan (W_c) dolayı mil hızına (w) bağlıdır. Hava debisi hız faktörü (u) A_0 , A_1 , A_2 parametreleri ile birlikte sıcaklık düzeltmeli hızın (W_c) etkisini yansıtır. Hava debisi hız faktörü ve sıcaklık düzeltmeli hızın ikisi de boyutsuzdur.

Hava debisi, kompresör girişindeki vananın açılma konumunu θ_{IGV} 'yi değiştirerek ayarlanabilir. Açının değiştirilmesinin etkisi sinüs fonksiyonu şeklinde temsil edilebilir.

θ_{MAX} IGV'nin ulaşabileceği maksimum açıklık açısını ifade eder. θ_0 ise IGV'nin geometrisine bağlı bir başlangıç açıklığını ifade eder.

$$W_a = \left[q(T_a, P_a) \times u(\Delta w_c) \times \frac{\sin(\theta_{IGV} - \theta_0)}{\sin(\theta_{MAX} - \theta_0)} \right] \quad (8.1)$$

$$q(T_a, P_a) = \frac{P_a}{P_{a0}} \times \sqrt{\frac{T_{a0}}{T_a}} \quad (8.2)$$

$$u(\Delta w_c) = 1 + A_0 \times \Delta w_c + A_1 \times \Delta w_c^2 + A_2 \times \Delta w_c^3 \quad (8.3)$$

$$w_c = w \times \sqrt{\frac{T_{a0}}{T_a}} \quad (8.4)$$

$$\Delta w_c = w_c - 1 \quad (8.5)$$

$$T_X = T_a + \frac{A_3 \times \frac{P_a}{P_{a0}} + A_4 \times w_f}{w_a} \quad (8.6)$$

$$CPR = (A_5 \times W_a + A_6 \times W_f) \times \frac{P_{a0}}{P_a} + A_7 \quad (8.7)$$

W_a : Hava debisi

W_f : Yakıt debisi

T_X : Türbin egzost sıcaklığı

P_a : Atmosfer basıncı

T_a : Atmosfer sıcaklığını

$T_{a0} = 273 \text{ °C}$ ve $P_{a0} = 1 \text{ Atm}$

w : Mil hızı

w_c : Sıcaklık düzeltmeli mil hızı

u : Hava debisi hız faktörü

$A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$: Sabit katsayılar

Θ_{MAX} : IGV'nin ulaşabileceği maksimum açıklık açısını

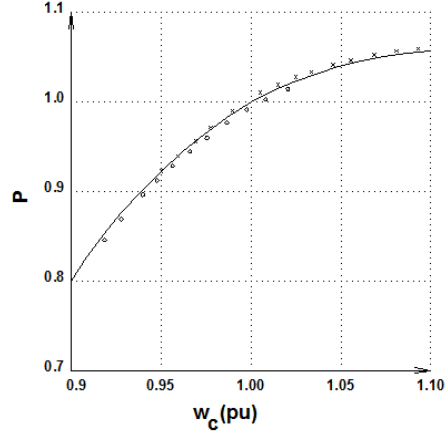
Θ_0 : IGV'nin geometrisine bağlı bir başlangıç açıklığı

CPR: Kompresör basınçlandırma oranı

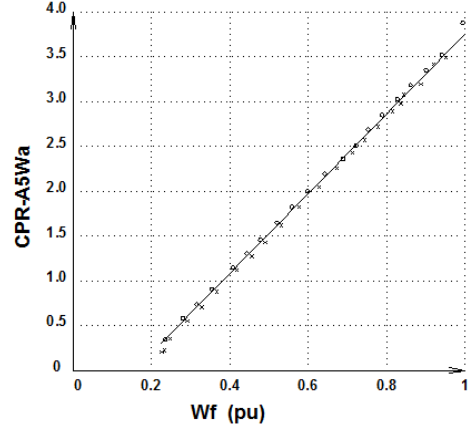
Hava debisi hız faktörü u 'ya ait A_0, A_1 ve A_2 katsayıları, bilinen IGV açılarında ve farklı sıcaklıklardaki hava akış debilerinden çıkartılabilir. Şekil 8.3 sabit Θ_{IGV} açısında, mil hızı 0.95-1.05 pu arasında ve hava sıcaklığı (-5,15,35) aralığında değişirken türbinin termal tasarım değerlerinden $W_a/q(T_a, P_a)$ 'nın W_c 'ye göre değişim grafiği verilmiştir. Bu grafikten yukarıda önerilen denklemin doğru olduğu çıkarımı yapılabilir.

Benzer şekilde Şekil 8.4, Şekil 8.5 ve Şekil 8.6'da verilen grafikler de enerji dengesi ile ilgili denklemleri doğrular. Sıcaklık kontrolörü, egzost gazı sıcaklığına ve CPR'a bağlı olarak hava ve yakıt debisini ayarlar. CPR, kompresör deşarj basıncının giriş hava basıncına oranı olarak tanımlanır. Deşarj basıncı, hava akış miktarını ve gazdaki

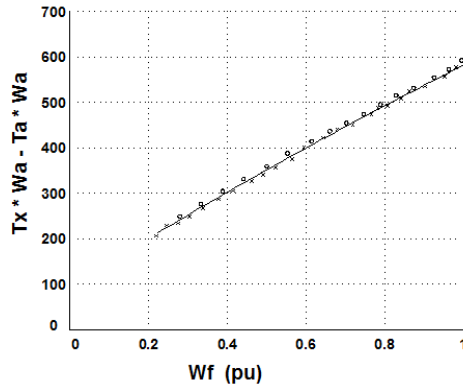
enerjiyi artırarak yükseltilir. Gazdaki enerji W_f yakıt debisi ile orantılıdır. Gaz türbininin model yapısının dışındaki kontrol blokları olan yakıt sistemi, sıcaklık kontrolörü, ivme kontrolörü ve hız yöneticisi Bölüm 7 ve Rowen'in çalışmasında incelendiğinden burada detaylı olarak bahsedilmeyecektir [2].



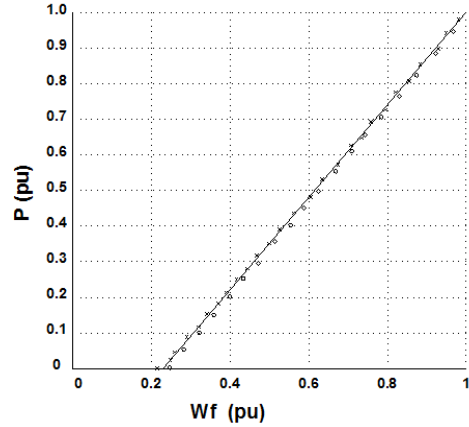
Şekil 8.3: Hava debisi hız faktörü [4].



Şekil 8.4: Kompresör basınçlandırma oranı [4].



Şekil 8.5: Egzost sıcaklığı [4].



Şekil 8.6: Güç çıkışı [4].

8.3 Model Parametrelerinin Belirlenmesi

Yukarıda bahsedilen model gaz türbinlerinin çoğunun modellenmesinde kullanılabilir. Bu model yaklaşımı az sayıda belirlenmesi gereken parametre içermektedir. Bu parametrelerin belirlenmesi için, yükleme testi yapılabilir.

Yükleme testi, nominal mil hızında ve yaygın olan çevre koşullarında yapılır. Test süresince gaz türbini yavaşça yüklenir. Bu yüklemde, yükleme hızı dakikada % 5 mertebelerinde olabilir. Bu yükleme süresince yakıt talep komutu, elektriksel güç çıkışı, IGV servomotor komutu, egzost sıcaklığı ve CPR sürekli kaydedilir. Hava debisi ve atık gaz debisi tipik olarak ölçülemez. Yavaş yükleme hızından dolayı, gaz türbini sürekli hal çalışmasındaymış varsayımı yapılabilir. Bu yükleme hızında kontrol ve proses dinamiklerinin belirgin etkisi yoktur ve gaz türbini sürekli hal çalışmasındaki gibi tepki verir. Sonuç olarak, yakıt debisi yakıt talep komutundan, mekanik güç elektriksel güçten, IGV açısı IGV servomotor komutundan ve egzost sıcaklığı ölçülen egzost sıcaklığından kolaylıkla çıkarılabilir. Mademki yükleme testi hava akış debisi hakkında bilgi vermez. CPR ve egzost gazı sıcaklık denklemlerinden hava debisi çıkartılabilir ve bu şekilde model parametreleri bulunabilir.

Hava akış debisi hız faktörünü tespit edebilmek için, gaz türbini ya nominal frekansın altında yada üstünde çalıştırılmalıdır. Ancak bu pratikte mümkün değildir. Bunun yerine gaz türbinini farklı sıcaklık değerlerinde çalıştırmak pratik bir çözüm olacaktır.

Bu gaz türbini modeli, yakıt sistemi, türbin ve sıcaklık algılayıcılarının dinamik cevap karakteristiklerini temsil etmek için basit zaman gecikmesi blokları içermektedir. Bu dinamik karakteristikleri sembolize eden zaman sabitleri kaydedilmiş cevaplardan olan küçük değişiklikler olarak belirlenir. Örneğin, türbin ve yakıt sisteminin zaman sabitleri, hız yöneticisinin yük referans değeri değiştirilerek belirlenir. Yük referans değeri değiştirilirken yakıt talep sinyali komutu, ana yakıt vanası ve güç çıkışı takip edilir. Bu yükleme testleri yapıp parametreler tespit edilirken üniteleri devreden çıkartarak teçhizata zarar verilmemesine dikkat edilmelidir.

Bir çok sistem çalışmalarında modelin performansı, oldukça küçük olan türbin zaman sabiti ve yakıt sisteminin zaman sabiti yanında yeterince duyarlı değildir. Bu nedenle, türbinin kontrol karakteristiği dinamik cevapta baskın unsurdur. Türbinin zaman sabiti 0,2 s ve yakıt sisteminin de zaman sabiti 0,4 s'dir. Sıcaklık algılayıcısının zaman sabiti geneldir ve üreticiden üreticiye değişiklik göstermez.

8.4 Gaz Türbini ve Kontrol Bloklarının Benzetimi

Bölüm 7’de bahsedilen gaz türbini modeline ait kontrol blokları ve bu bölümün başlangıcında bahsedilen gaz türbini termodinamiğine ait denklemler bir araya getirilerek, MATLAB programında benzetim gerçekleştirilmiştir [16]. Gerçekleştirilen benzetimin blok yapısı Şekil 8.7’de verilmiştir. Şekil 8.7’de görüldüğü gibi, benzetim hız regülatörü, düşük değer seçicisi, yakıt sınırlayıcı, yakıt sistemi, türbin çıkış gücü hesaplayıcısı, egzost gazı sıcaklık hesaplayıcısı, yanma havası hesaplayıcısı ve sıcaklık kontrolü bloklarından oluşmaktadır. Şekil 8.8’de yanma havası hesaplama blok yapısı, Şekil 8.9’da egzost gazı sıcaklık hesaplama blok yapısı ve Şekil 8.10’da ise türbin çıkış gücü hesaplama blok yapısı verilmiştir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen benzetim kullanılarak, değişik atmosferik koşullarda ve farklı şebeke frekansında program çalıştırılıp gaz türbini çıkış gücü incelenmiştir. Bilgisayar programında gaz türbini giriş değişkenleri değiştirilerek çıkışı etkisi incelenmiş ve bununla ilgili grafikler oluşturulmuştur. Sonuç bölümünde grafikler verilecek ve yorumlar yapılacaktır.

Benzetim programı olarak Mathworks Inc’nin MATLAB R2007a, 7.4.0.287 versiyonunun Simulink toolbox’ kullanılmıştır [16]. Benzetim programı parametreleri; benzetim süresi (simulation time) 200 s ve örnekleme süresi (sampling time) 0.2 s olarak ayarlanmıştır. Örnekleme süresi seçiminde, en küçük zaman sabitine sahip olan türbin zaman sabiti baz alınmıştır.

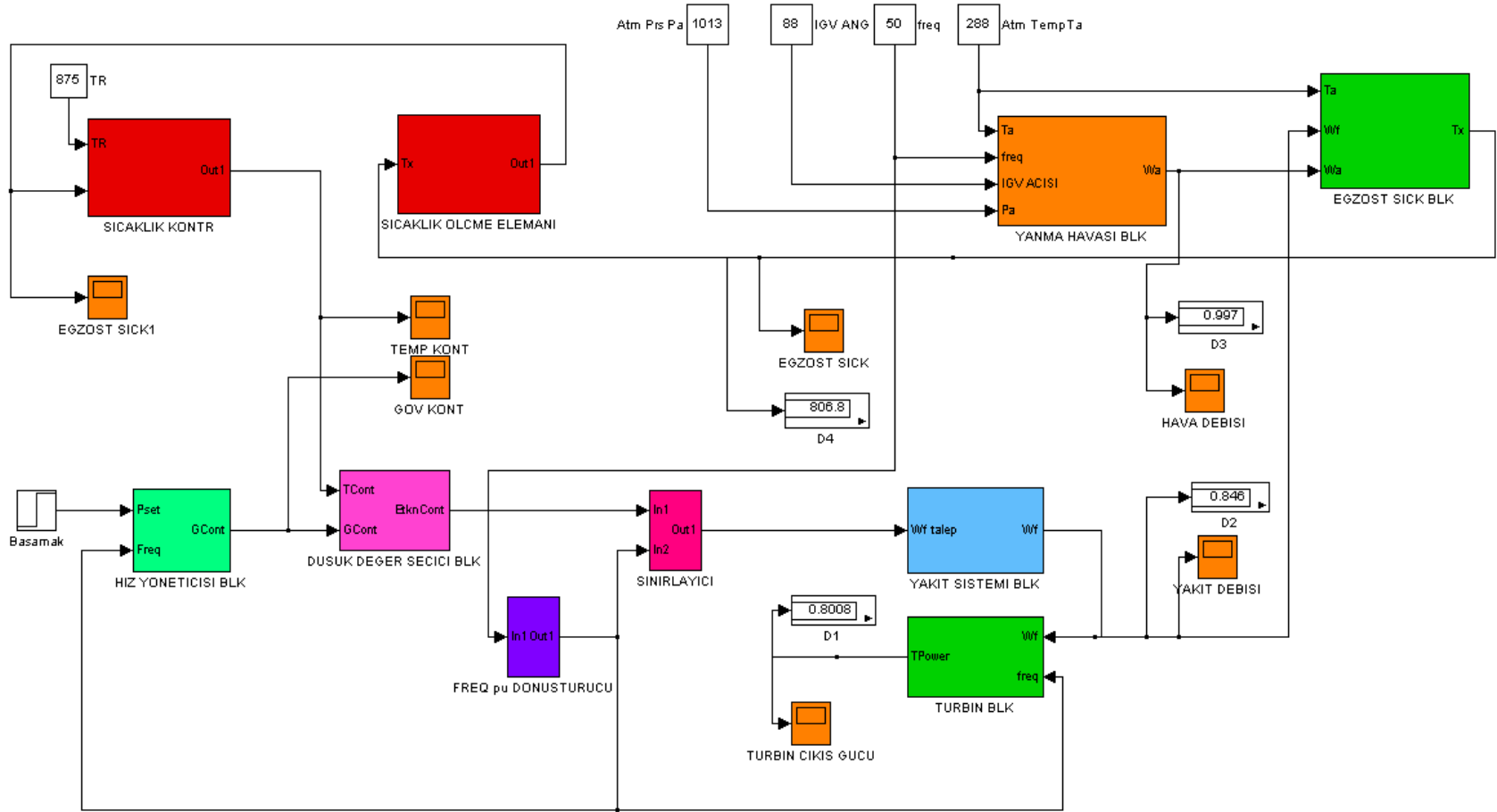
Atmosfer basıncı $P_a = 1013$ mbar, Atmosfer sıcaklığı $T_a = 15$ °C ve şebeke frekansı 50 Hz kabul edilerek, benzetim programına genliği sırası ile 1.25, 1 ve 0.8 pu olan birim darbe fonksiyonu uygulanmış ve çıkışlar kayıt altına alınmıştır. Şekil B.1’de 1.25 pu birim darbe fonksiyonu uygulanması durumunda çıkış gücü ve kontrolör çıkış işaretleri verilmiştir. Şekil B.2’de 1 pu birim darbe fonksiyonu uygulanması durumunda çıkış gücü ve kontrolör çıkış işaretleri verilmiştir. Şekil B.3’de 0.8 pu birim darbe fonksiyonu uygulanması durumunda gaz türbini çıkış gücü ve kontrolör çıkış işaretleri verilmiştir.

Atmosfer basıncının gaz türbini çıkış gücünün değişimine etkisini görebilmek için; $P_a = 1010$ mbar, Atmosfer sıcaklığı $T_a = 15$ °C ve şebeke frekansı 50 Hz kabul edilerek benzetim programına genliği 1 pu olan birim darbe fonksiyonu uygulanmış ve çıkışlar kayıt altına alınmıştır. Şekil B.4’de 1 pu birim darbe fonksiyonu

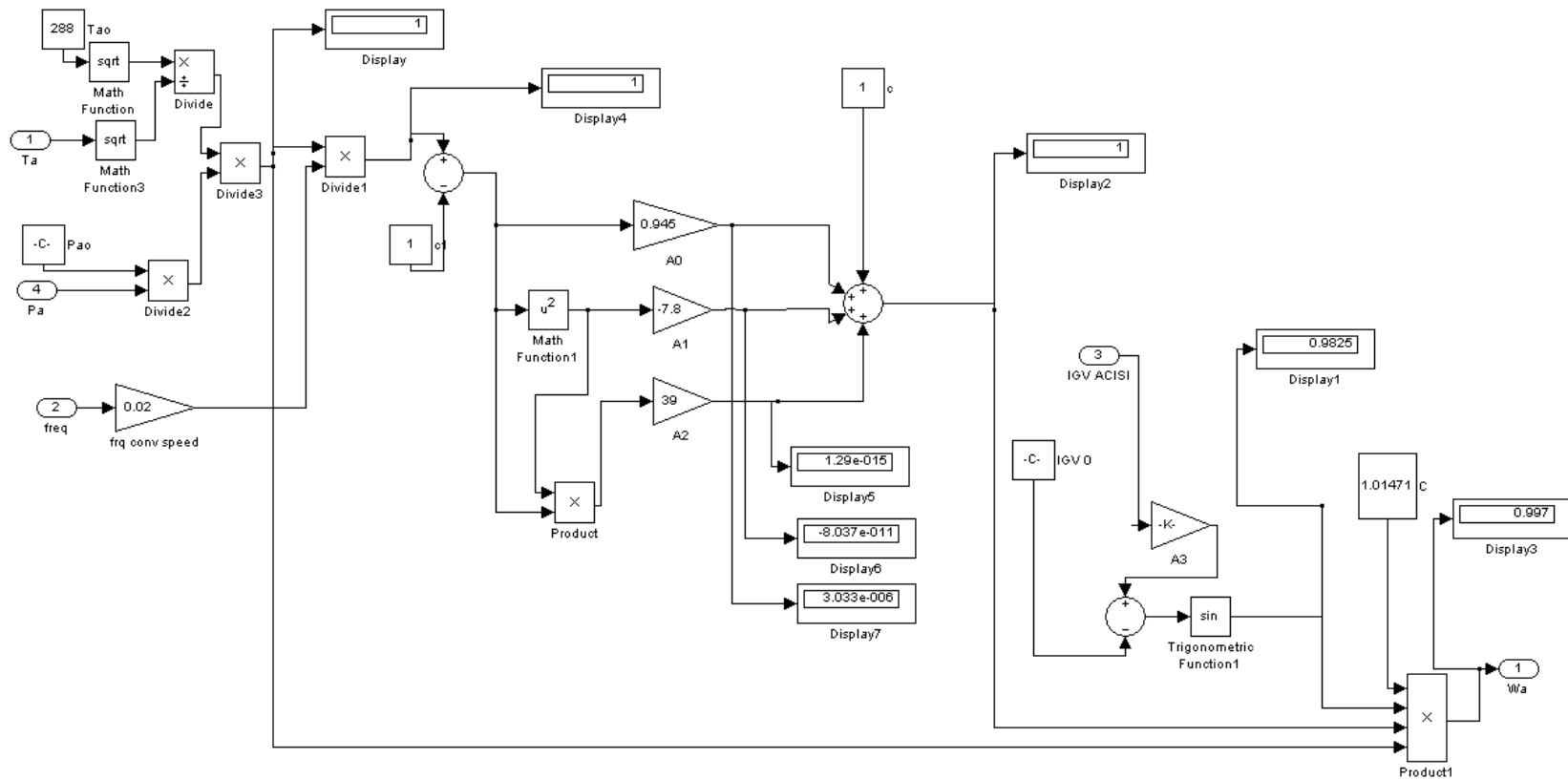
uygulanması durumunda gaz türbini çıkış gücünü atmosfer basıncındaki 3 mbar'lık değişimin nasıl etkilediğine dair çıkış işaretleri verilmiştir.

Atmosfer sıcaklığının gaz türbini çıkış gücünün değişimine etkisini görebilmek için, $P_a=1013$ mbar, atmosfer sıcaklığı $T_a=30$ °C ve şebeke frekansı 50 Hz kabul edilerek benzetim programına genliği 1 pu olan birim darbe fonksiyonu uygulanmış ve çıkışlar kayıt altına alınmıştır. Şekil B.5'de 1 pu birim darbe fonksiyonu uygulanması durumunda gaz türbini çıkış gücünü atmosfer sıcaklığındaki 15 °C'lik değişimin nasıl etkilediğine dair çıkış işaretleri verilmiştir.

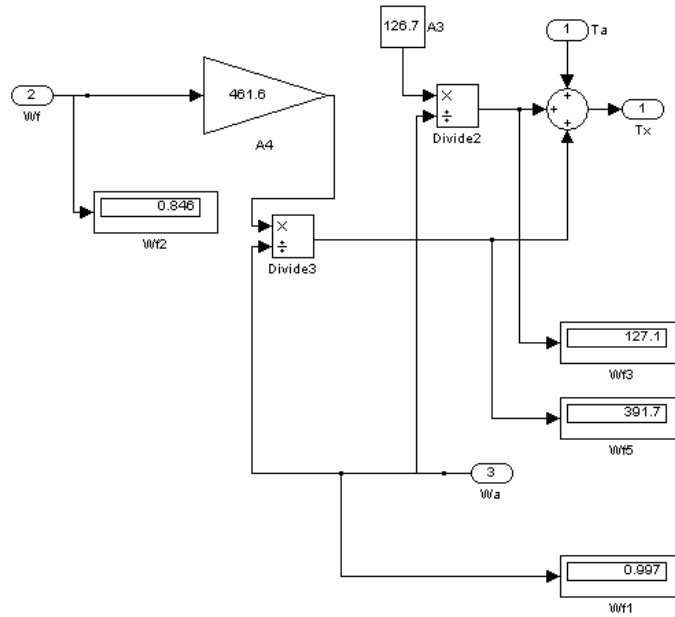
Şebeke frekansındaki değişimin gaz türbini çıkış gücünün değişimine etkisini görebilmek için, $P_a=1013$ mbar, Atmosfer sıcaklığı $T_a=15$ °C ve şebeke frekansı 49 Hz kabul edilerek benzetim programına genliği 1 pu olan birim darbe fonksiyonu uygulanmış ve çıkışlar kayıt altına alınmıştır. Şekil B.6'da 1 pu birim darbe fonksiyonu uygulanması durumunda, gaz türbini çıkış gücünü şebeke frekansındaki 1 Hz'lik düşüşün nasıl etkilediğine dair çıkış işaretleri verilmiştir.



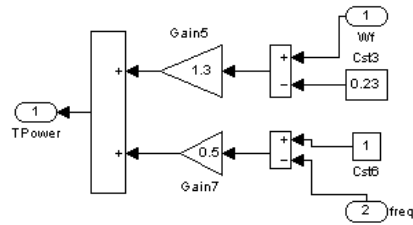
Şekil 8.7: Benzetim programının blok yapısı



Şekil 8.8: Yanma havası hesaplama bloğu



Şekil 8.9: Egzost gazı sıcaklığı hesaplama bloğu



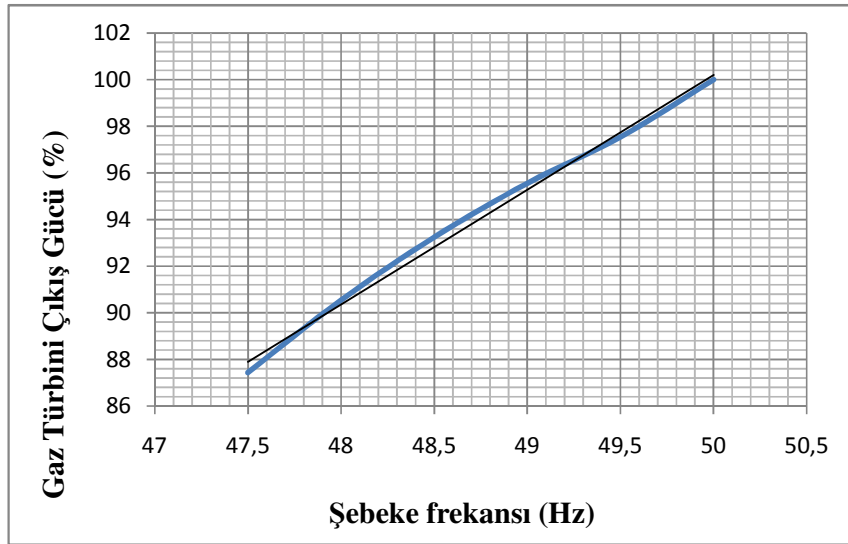
Şekil 8.10: Türbin çıkış gücü hesaplama bloğu

9. BENZETİM SONUÇLARI

Daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi gaz türbini çıkış gücü gerek atmosferik basınç ve sıcaklığa, gerekse şebeke frekansına bağlıdır. Yapılan bilgisayar benzetim programı ile bu bağımlılıkların sahip oldukları fonksiyonlar grafiklerle doğrulanmıştır.

9.1 Çıkış Gücünün Şebeke Frekansına Bağlı olarak Değişimi

Şekil 9.1'de Gaz türbini çıkış gücü 1 pu olarak ayarlanmış, atmosfer basıncı $P_a = 1013$ mbar, atmosfer sıcaklığı $T_a = 15^\circ\text{C}$ ve IGV açıklığı $\Theta_{IGV} = \Theta_{MAX}$ iken şebeke frekansı 0.5 Hz'lik adımlarla küçültülerek gaz türbini çıkış gücü kayıt altına alınmıştır.



Şekil 9.1: Gaz Türbini Çıkış Gücünün Şebeke Frekansına Bağlılığı

Grafikten gaz türbini çıkış gücünün şebeke frekansındaki %1'lik değişime karşın yaklaşık % 2'lik değişim gösterdiği görülmektedir. 20.02.2008 tarihli elektrik piyasası şebeke yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmeliğin 10. maddesi gereği bu durumun meydana getireceği sıkıntıları minimize etmek amacıyla

devreye alınacak yeni gaz türbini santrallerinde şebeke frekansındaki % 1'lik değişime karşın çıkış gücünde maksimum % 1'lik azalmanın olmasına müsaade edilmektedir. Ayrıca, şebeke yönetmeliği ilk 0.5 Hz'lik frekans değişiminde gaz türbini çıkış gücünün değişmemesini de öngörmektedir.

Bu durum, özellikle şebekede büyük güçlü üretim gruplarının devre dışı olması durumunda birincil frekans kontrolüne katılan grupların katılımı gerçekleştirip şebeke frekansını normal duruma getirememesi durumunda sıralı olarak gaz türbini çıkış güçlerinin düşmesine ve birbirlerini tetikleyerek şebekenin çökmesine sebep olabilir. Bu durum, 1996 yılında Malezya'da 5.600 MW'lık üretim kaybı ile şebeke frekansının 1.5 Hz düşmesi sonrasında gaz türbini çıkış güçlerinin azalması sonucunda şebekenin çökmesi şeklinde yaşanmıştır [5].

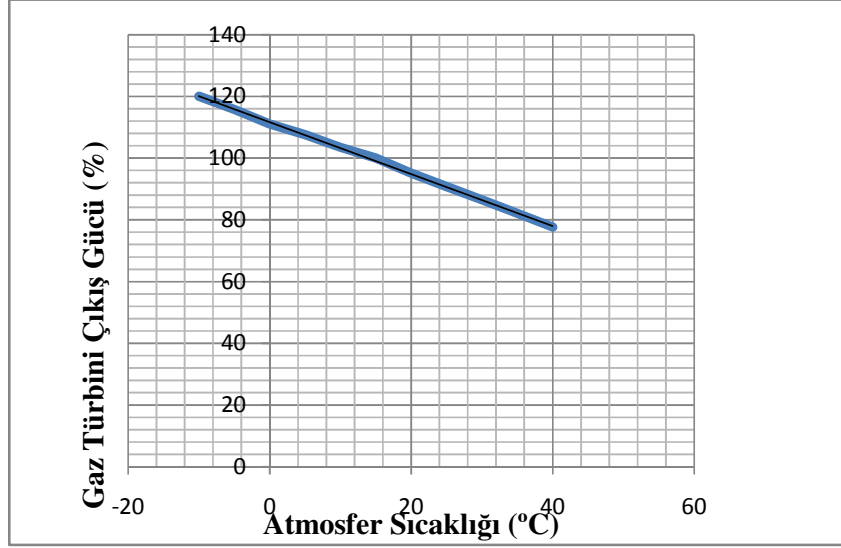
9.2 Çıkış Gücünün Atmosfer Basıncı ve Sıcaklığına Bağlı olarak Değişimi

Şekil 9.2 ve Şekil 9.3'de gaz türbini çıkış gücünün atmosfer sıcaklığı ve basıncına bağlı olarak değişim grafiği verilmiştir. Şekil 9.2'de gaz türbini çıkış gücü 1 pu ayarlanılmış, atmosfer basıncı $P_a = 1013$ mbar, şebeke frekansı 50 Hz ve IGV açıklığı $\Theta_{IGV} = \Theta_{MAX}$ iken atmosfer sıcaklığı 15 °C'den 40 °C ye kadar 5 °C'lik adımlarla değiştirilerek gaz türbini çıkış gücü kayıt altına alınmıştır. Şekil 9.2'de elde edilen grafik incelendiğinde atmosfer sıcaklığındaki 1 °C'lik artmanın gaz türbini çıkış gücü üzerinde % 0,7'lik azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Bu durum, özellikle ülkemizde yaz aylarının sıcak geçmesi nedeniyle gaz türbini çıkış güçlerinden tam olarak faydalanamamıza sebep olmaktadır. Özellikle yaz aylarında puant yükün arttığı saatlerde yeterli rezerv bulunmadığı durumlarda ciddi sorunlara neden olmaktadır. Problemin çözümü için gaz türbini giriş havası soğutma sistemi çözümleri üzerinde düşünülmeli ve ekonomiklik analizleri yapılarak gerekli projeler uygulanmalıdır.

Şekil 9.3'de gaz türbini çıkış gücü 1 pu olarak ayarlanılmış, atmosfer sıcaklığı 15 °C, şebeke frekansı 50 Hz ve IGV açıklığı $\Theta_{IGV} : \Theta_{MAX}$ iken Atmosfer basıncı $P_a = 1013$ mbar'dan 1000 mbar'a kadar 2 mbar 'lık adımlarla değiştirilerek gaz türbini çıkış gücü kayıt altına alınmıştır.

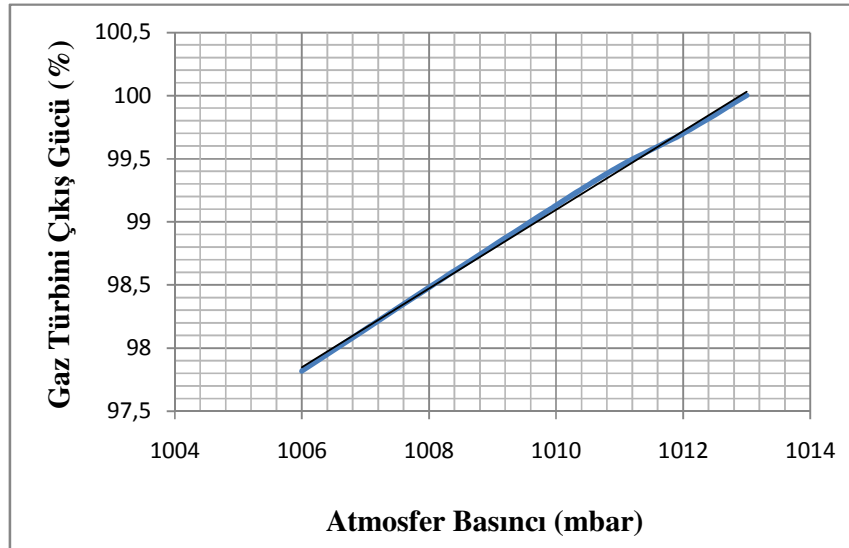
Şekil 9.3'de elde edilen grafik incelendiğinde, atmosfer basıncındaki 1 mbar 'lık düşüşün gaz türbini çıkış gücü üzerinde % 0,3'luk azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Şekil 9.3'de elde edilen grafik incelendiğinde, atmosfer basıncındaki

1 mbar'lık düşüşün gaz türbini çıkış gücü üzerinde % 0,3'luk azalmaya sebep olduğu görülmektedir.



Şekil 9.2: Gaz Türbini Çıkış Gücünün Atmosfer Sıcaklığına Bağımlılığı

Atmosfer sıcaklığı ve basıncının gaz türbinleri çıkış gücü üzerindeki küçültücü etkisi yukarıda basit çevrim için verilmiştir. Kombine çevrim santrali olarak düşünüldüğünde, buhar üretimini de olumsuz etkileyeceği kaçınılmazdır. Bu nedenle, kombine çevrim santrallerinde toplam küçültücü etki yukarıda hesap edilen değerlerden daha büyük olacaktır.



Şekil 9.3 : Gaz Türbini Çıkış Gücünün Atmosfer Basıncına Bağımlılığı

10. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, elektrik üretiminde son yıllarda yaygın olarak kullanılan gaz türbini santrallerinin temel özellikleri incelenmiş, gaz türbini ve kontrol sistemlerinin temel fonksiyonlarını analiz edilerek bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu matematiksel model baz alınıp, MATLAB bilgisayar yazılımının Simulink Toolbox'ı kullanılarak bilgisayar benzetim programı gerçekleştirilmiştir. Benzetim iki farklı model esas alınarak gerçekleştirilmiştir [2,4]. Gaz türbinlerinin çok değişken, karmaşık ve dinamik yapıları, elde edilen matematiksel model kullanılarak bir benzetim programında analiz edilmiştir.

Benzetim programı yardımı ile giriş parametreleri değiştirilerek gaz türbini çıkış gücünü etkileyen parametreler incelenmiştir. Yapılan bilgisayar benzetim programı vasıtası ile atmosferik sıcaklık ve basınca bağlı olarak gaz türbinlerinden elde edilebilecek maksimum çıkış gücünün hesaplanabilmesi ile birlikte saatlik üretim programlarının doğru yapılması mümkün olacaktır.

Bu çalışma ile, aynı zamanda enterkonnekte şebekenin frekans karakteristiğinde meydana gelecek düşme yönündeki değişikliklerin gaz türbinli üretim merkezlerini nasıl etkileyeceğini tespit etmek mümkün olmuştur.

Ülkemiz elektrik iletim sisteminin Avrupa Elektrik İletim Koordinasyon Birliği (UCTE) sistemi ile entegrasyon hedefleri çerçevesinde, üretim merkezlerinin birincil frekans kontrolüne katılmaları 01.07.2009 tarihinde yürürlüğe giren yönetmelik çerçevesinde zorunlu kılınmıştır. Dolayısıyla, birincil frekans kontrolü uygulamasına katılan gaz türbini santrallerinin yükümlülüklerini yerine getirecekleri rezerv yük miktarını her koşulda muhafaza etmeleri gerekmektedir. Saatlik üretim programı belirlenirken gerek atıl rezerv bırakmamaya ve gerekse de yetersiz rezerv bırakarak gaz türbinlerinin sıcaklık kontrolüne geçmesine engel olunmalıdır. Dolayısıyla, sıcaklık ve basınç parametrelerinin küçültücü etkisi bilinmesiyle birincil frekans kontrolüne katılan gaz türbini ünitelerinde rezerv miktarının daha doğru hesaplanması bu çalışma ile mümkün olacaktır.

Yaz aylarında atmosfer sıcaklığının yüksek olduğu düşünülerek, gaz türbinlerinin kurulu gücünden tam olarak faydalanmaya imkan tanıyacak kompresör giriş havası soğutma sistemlerinin geliştirip uygulamalarının yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmanın devamında iki gaz bir buhar türbininden oluşan ve kombine olarak adlandırılan üretim bloğunun matematiksel modelinin oluşturulması, devreye alma ve devreden çıkarma sürecinde de geçerli olacak matematiksel modelin oluşturularak bilgisayar benzetiminin yapılması sonraki çalışma konusu olarak belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

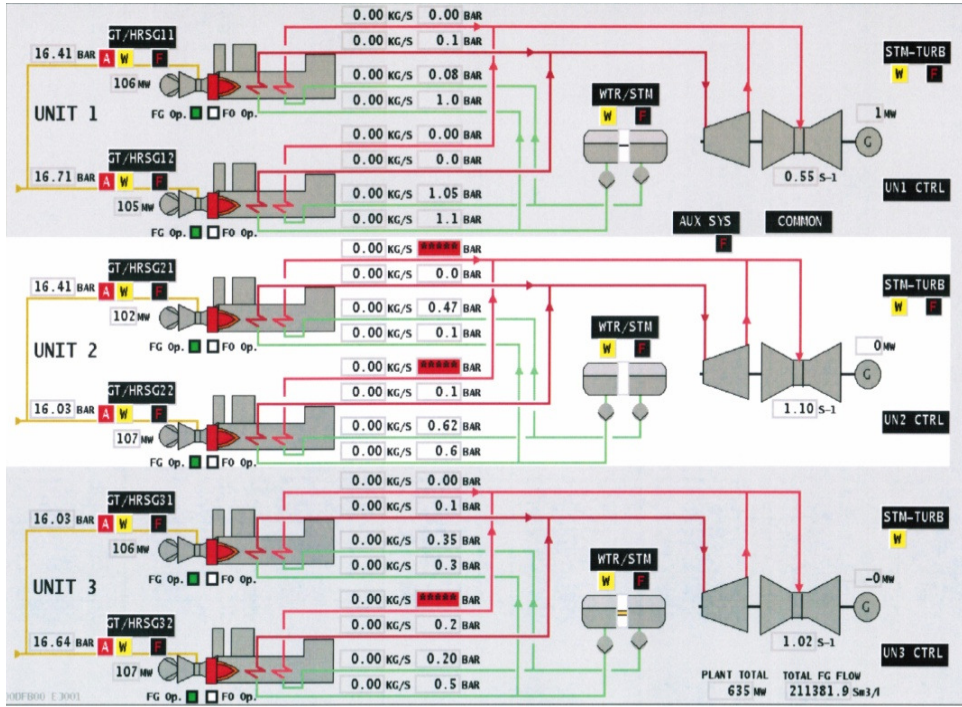
- [1] **Url-1** <<http://www.teias.gov.tr/>>, alındığı tarih 15.11.2009.
- [2] **Rowen W.I.**, 2003: Simplified Mathematical Representations of Heavy-Duty Gas Turbines, *Contributed by the Gas Turbine Division of AMERICAN OF MECHANICAL ENGINEERS for presentation at 28 th International Gas Turbine Conference and Exhibit Phoenix Airzona March 27-31 ,1983, ASME Journal of Engineering for Power, Vol 105, PP 865-869*
- [3] **Rowen W.I.**, 1995: Dynamic Response Characteristic Of Heavy Duty Gas Turbines And Combined Cycle System In Frequency Regulating Duty , *IEE*
- [4] **Kunitomi K., Kurita A., Okamoto H. ve Tada Y.**, 2001: Modeling Frequency Dependency of Gaz Turbine Output , *IEEE / Power Eng. Soc. Winter Meeting , Vol 2 , PP 678-683*
- [5] **Kakimoto N. ve Baba K.**, 2003: Performance of Gas Turbine – Based Plants During Frequency Drops, *IEEE / Power Eng. Soc. Vol 2, PP 1110-1115*
- [6] **Undrill J. ve Garmendia A.**, 2001: Modeling Of Comined Cycle Plants In Grid Simulation Studies, *IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, Vol 2, PP 657-663*
- [7] **YILMAZ O.**, 2006: Participation of CCPP to Power System Ferquency Control Modeling and Aplication, *Middle East Technical University*
- [8] **GIAMPAOLO A.**, 2006: *Gas Turbine Handbook Principles and Practices*, Published by The Fairmont Press. Inc.
- [9] **Url-2** <<http://www.euas.gov.tr/>>, alındığı tarih 10.11.2009.
- [10] **Url-3** <<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-generation/gas-turbines/>> alındığı tarih 20.11.2009.
- [11] **Url-4** <[http:// www.dtm.gov.tr/dtmadmin/upload/EAD/.../dgg.doc](http://www.dtm.gov.tr/dtmadmin/upload/EAD/.../dgg.doc)>, alındığı tarih 20.11.2009.

- [12] **JONES J.B. ve DUGAN R.E. Çeviren ATILGAN H.,** 2003: *Mühendislik Termodinamiği Beta Basım*
- [13] **Url-5**<[http://www.scribd.com/doc/6152992/Steam-Turbine-Governing-Systems - Overview />](http://www.scribd.com/doc/6152992/Steam-Turbine-Governing-Systems-Overview/), alındığı tarih 10.03.2009.
- [14] **UCTE,** 2004: Union for the Coordination of Transmission of Electricity *Operation Handbook,*
- [15] **Kraftwerk Union A.G,** 1990: Ambarlı CCPP System Description and Instruction for Testing and Setting Turbine and Generator Set
- [16] **Url-6** <<http://www.mathworks.com/>>, Mathworks Inc.

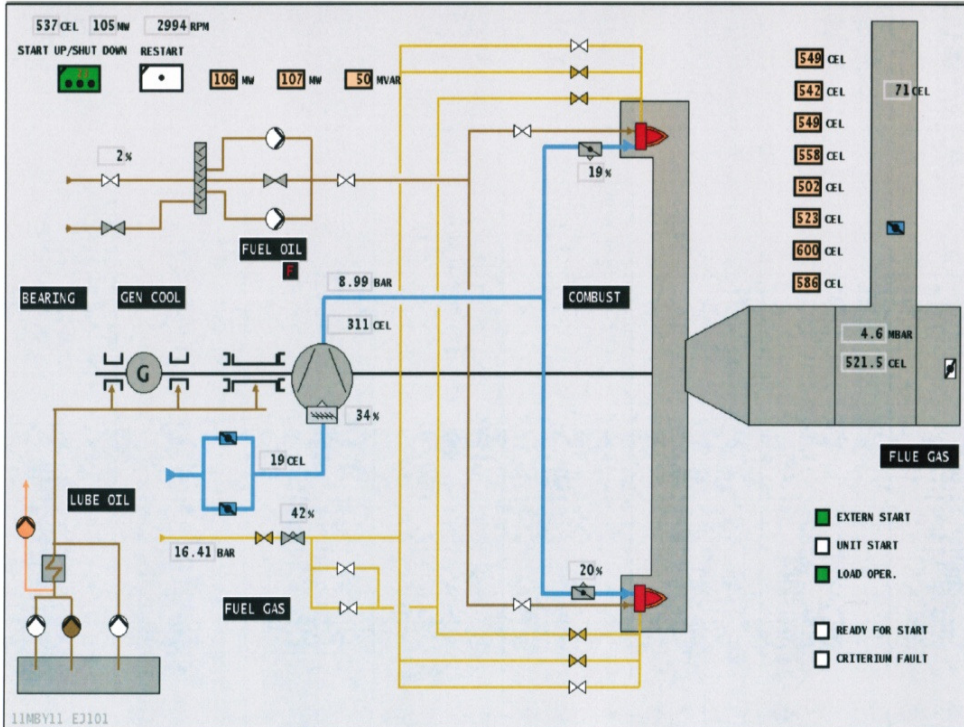
EKLER

EK A: Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali Genel Prensip Şemaları

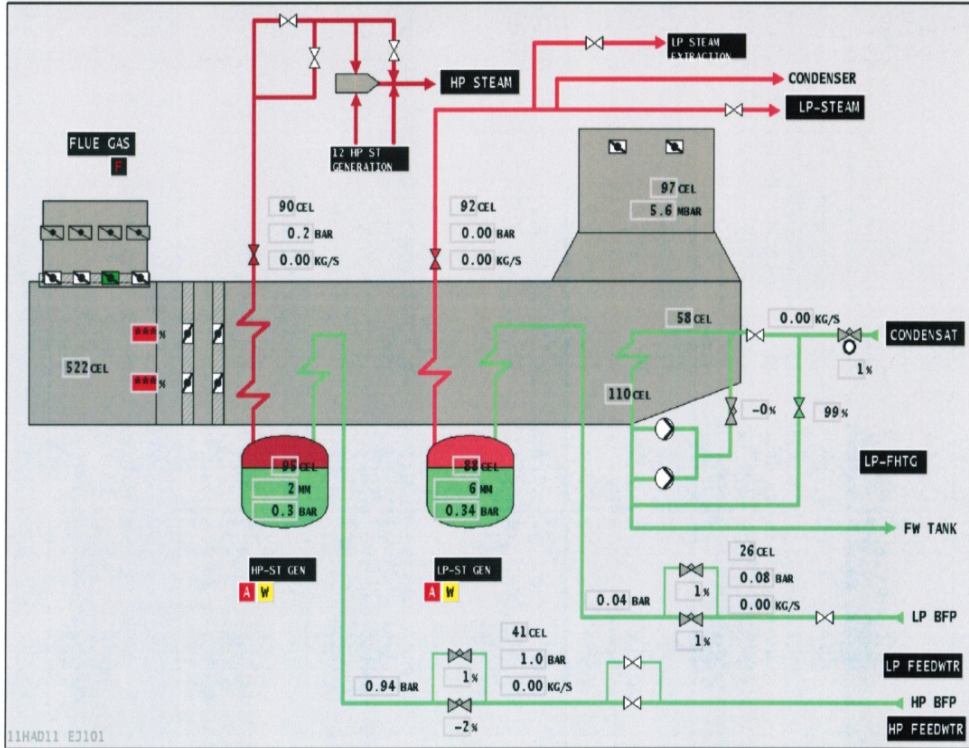
EK B : Gaz Türbini Egzost Sıcaklığı ve Çıkış Gücü Benzetim Çıktıları



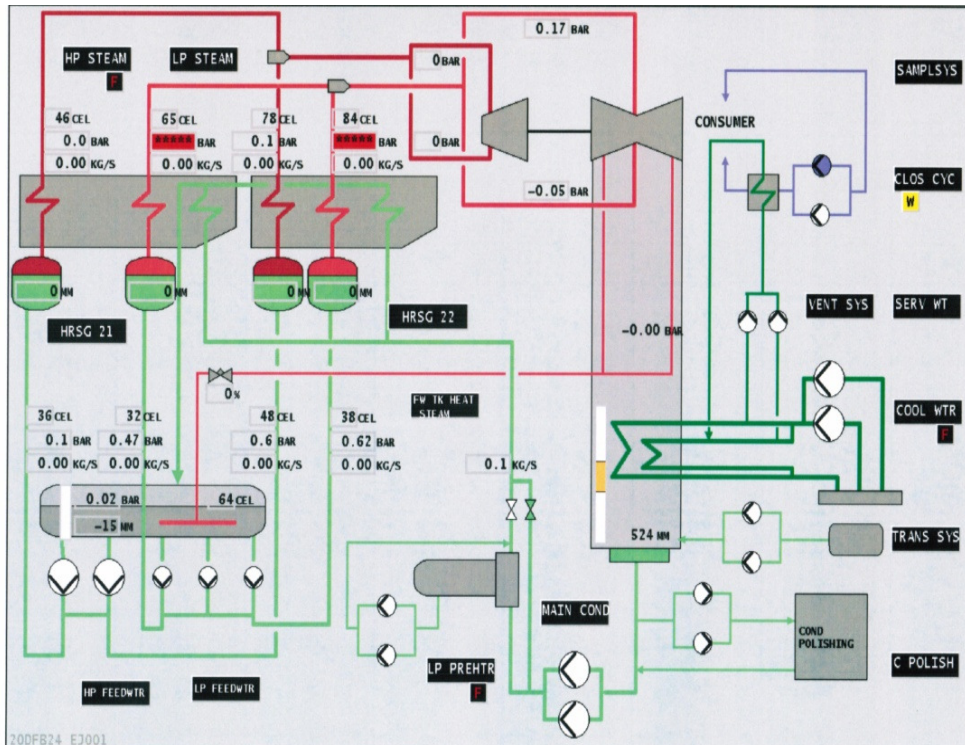
Şekil A.1: DGKÇ Santrali Genel Prensi Şeması



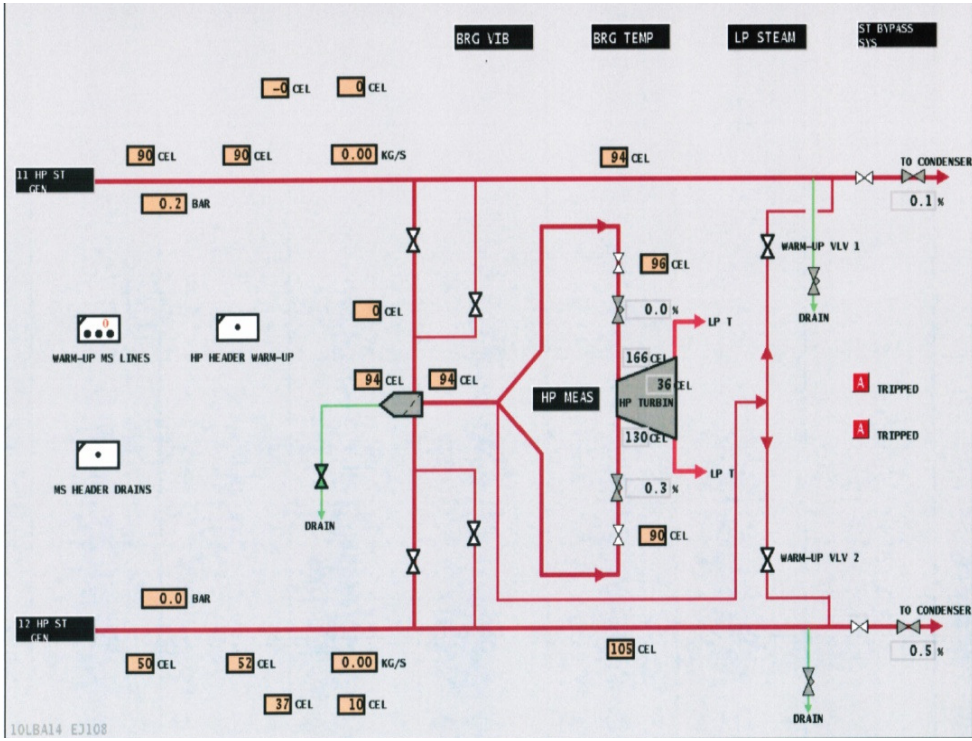
Şekil A.2: Gaz Türbinleri Genel Prensi Şeması



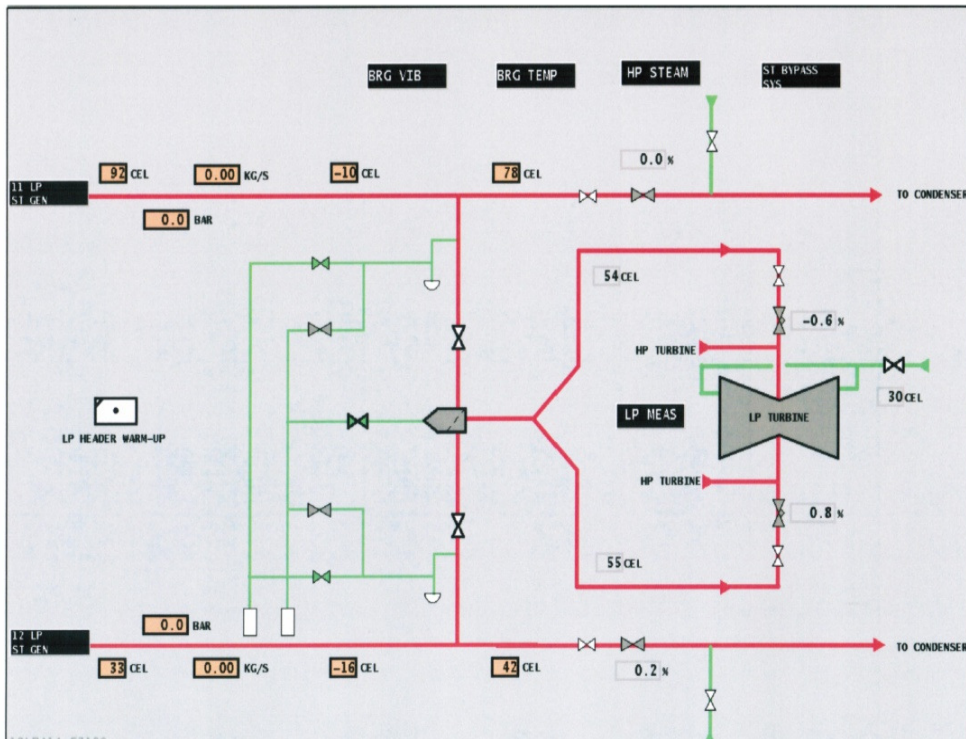
Şekil A.3: Atık Isı Kazanı Prensi Şeması



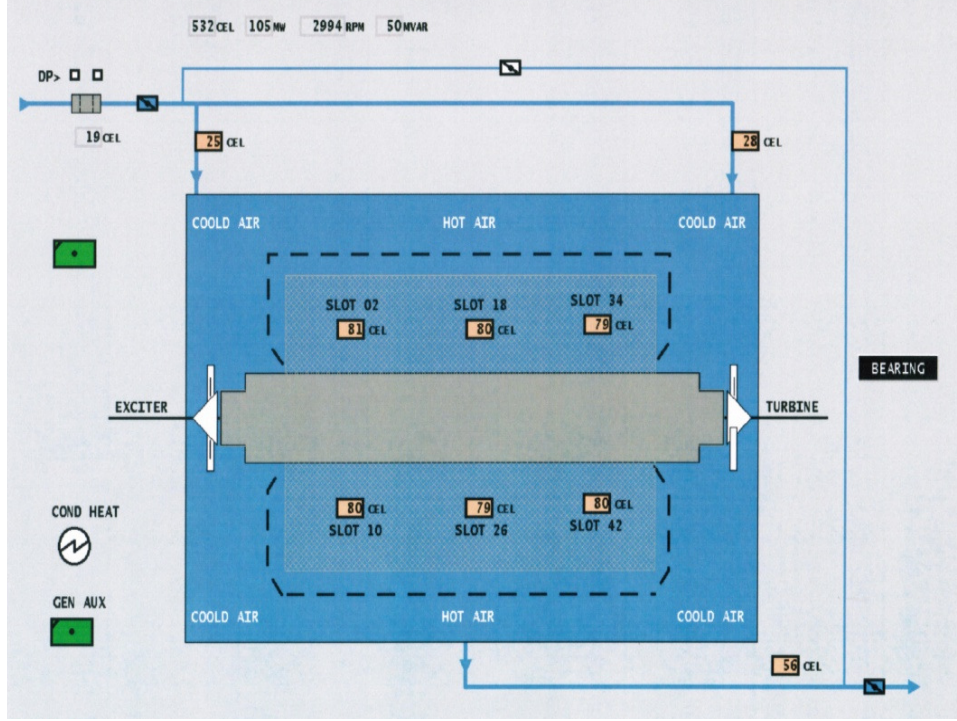
Şekil A.4: Atık Isı Kazanı Prensi Şeması



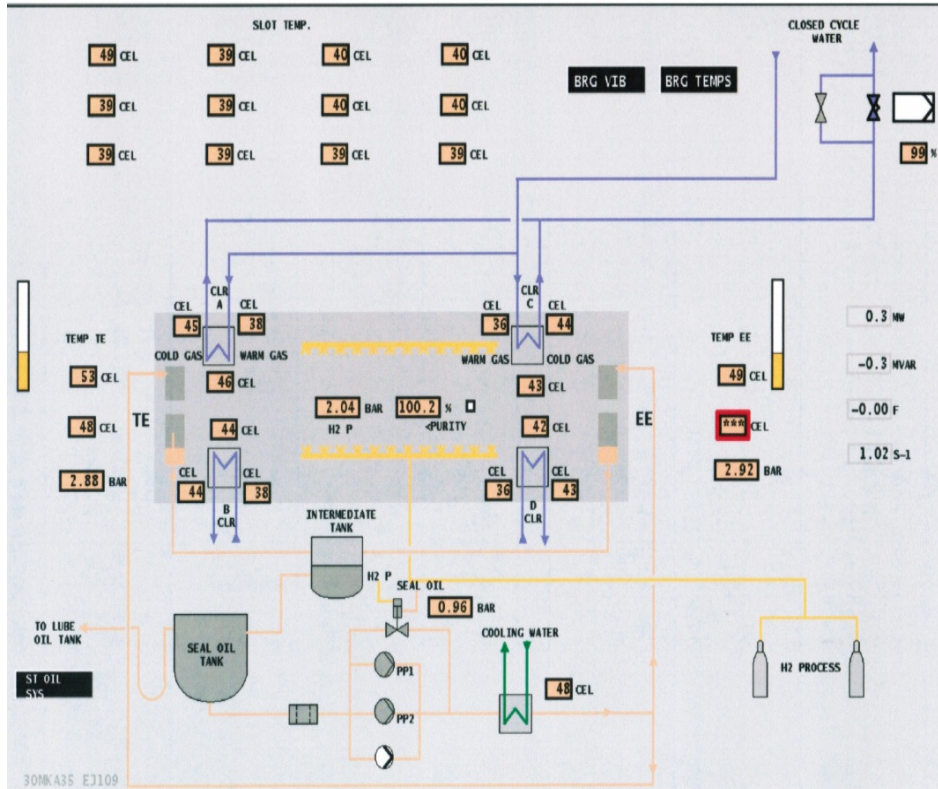
Şekil A.5: Buhar Türbini Genel Prensip Şeması



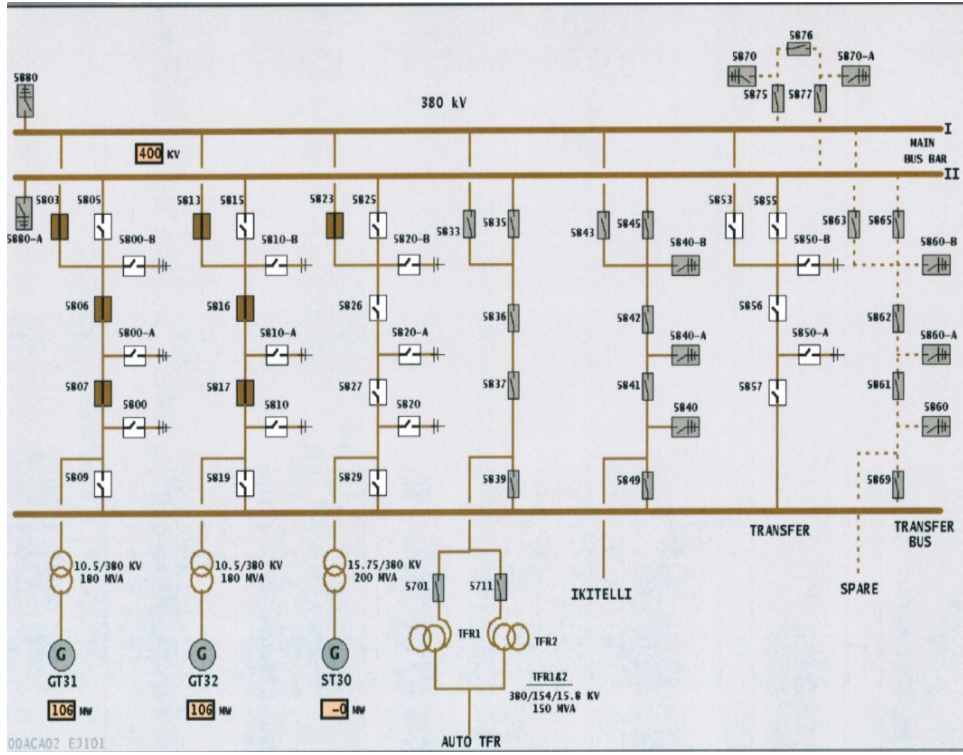
Şekil A.6: Buhar Türbini Genel Prensip Şeması



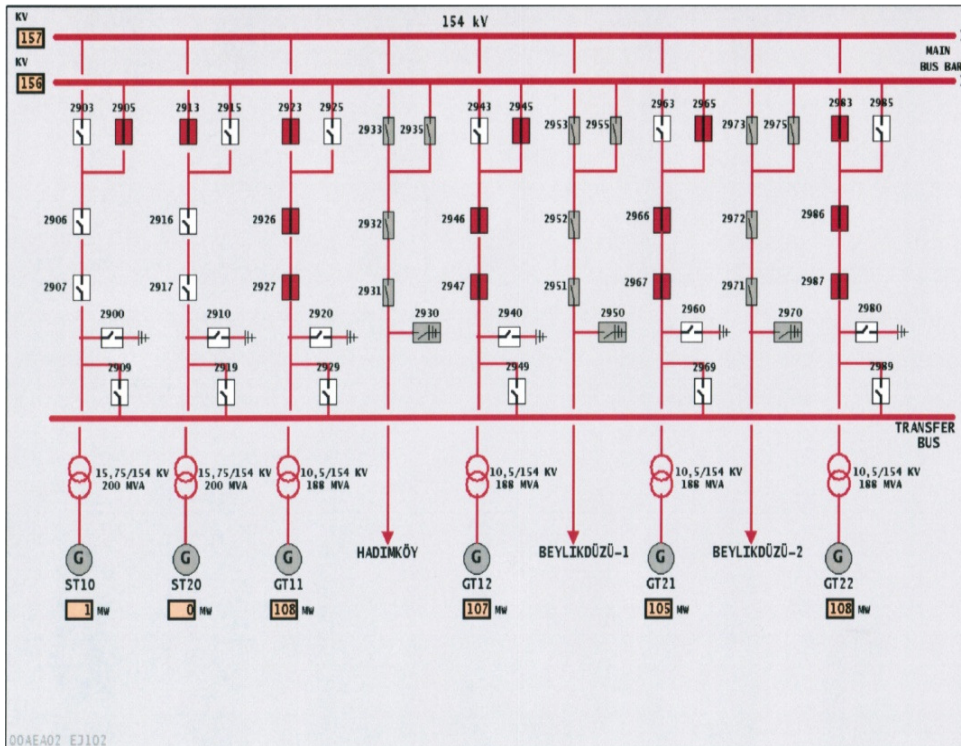
Şekil A.7: Hava Soğutmalı Generator Prensi Şeması



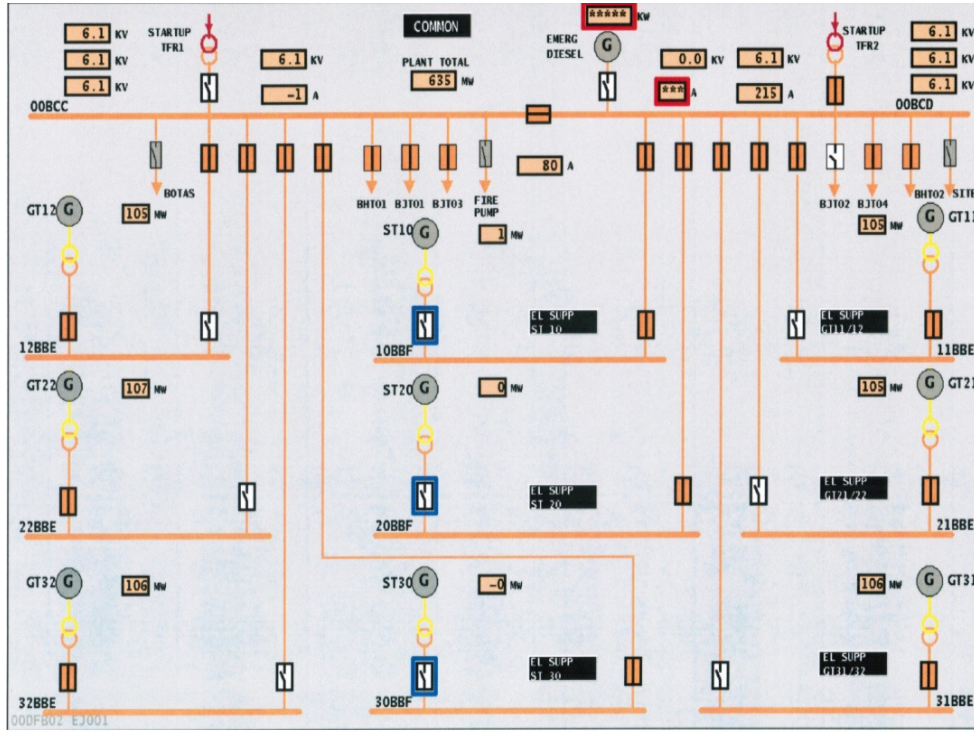
Şekil A.8: Hidrojen Soğutmalı Generator Prensi Şeması



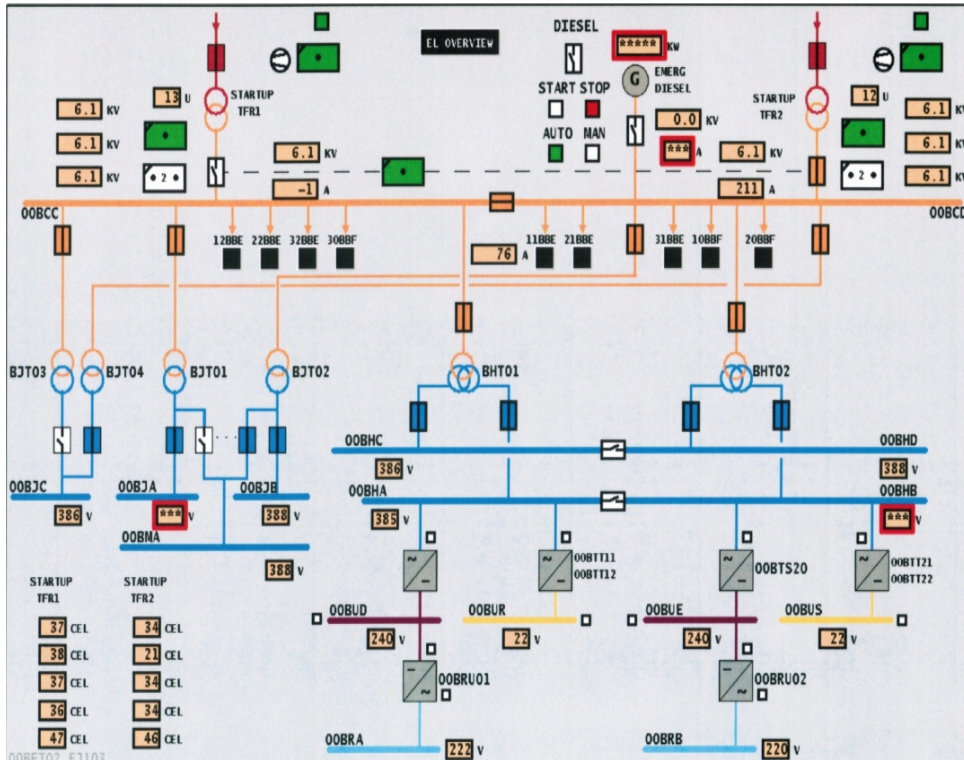
Şekil A.9: 380 kV Bara Sistemi Prensi Şeması



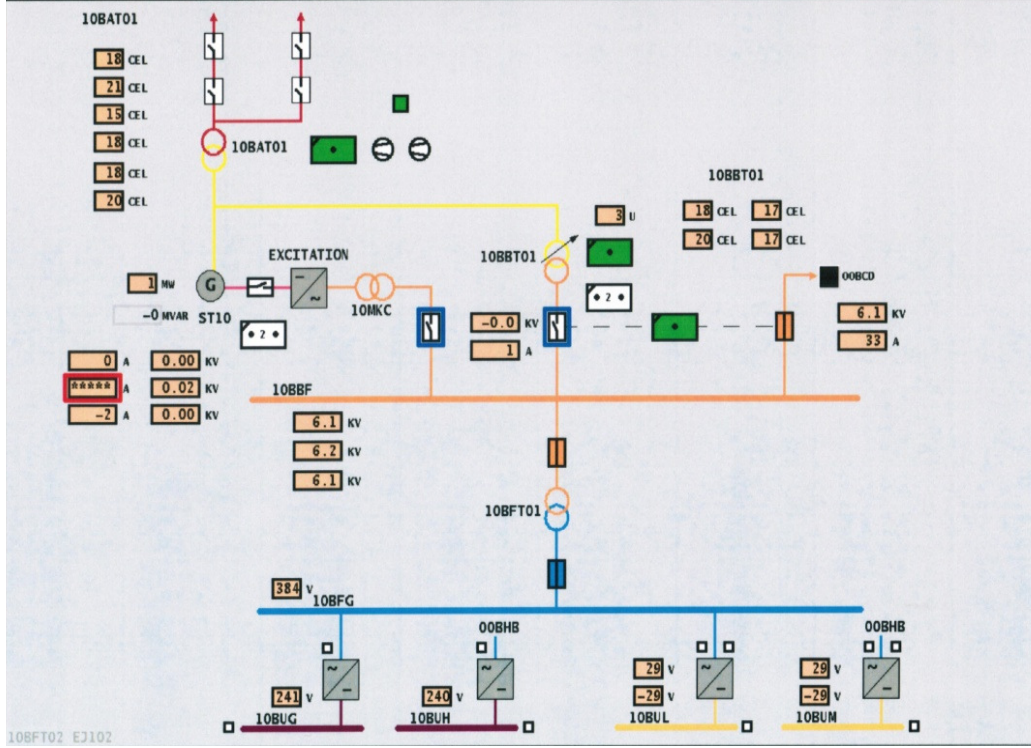
Şekil A.10: 154 kV Bara Sistemi Prensi Şeması



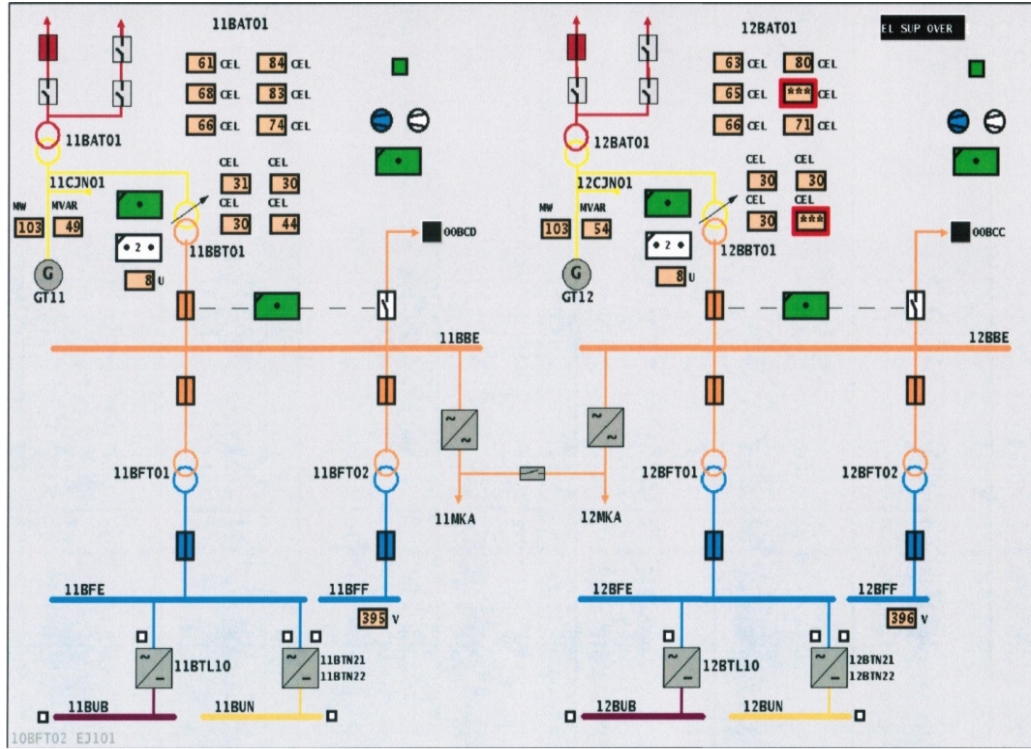
Şekil A.11: 6 kV Bara Sistemi Prensi Şeması



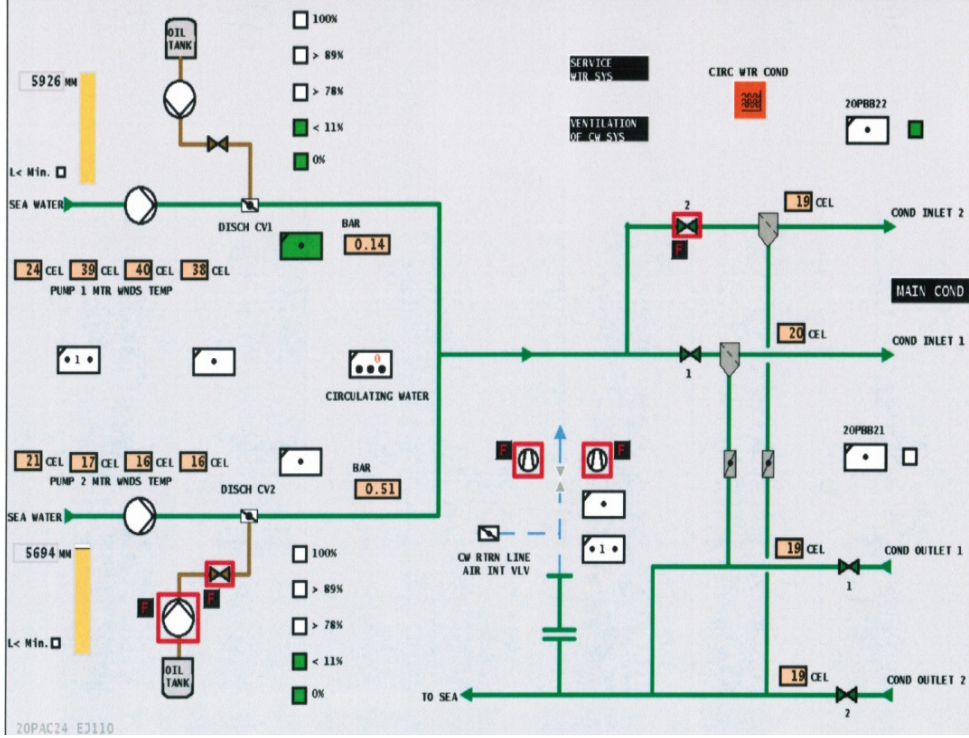
Şekil A.12: 6 kV-0.4 kV Bara Sistemi Prensi Şeması



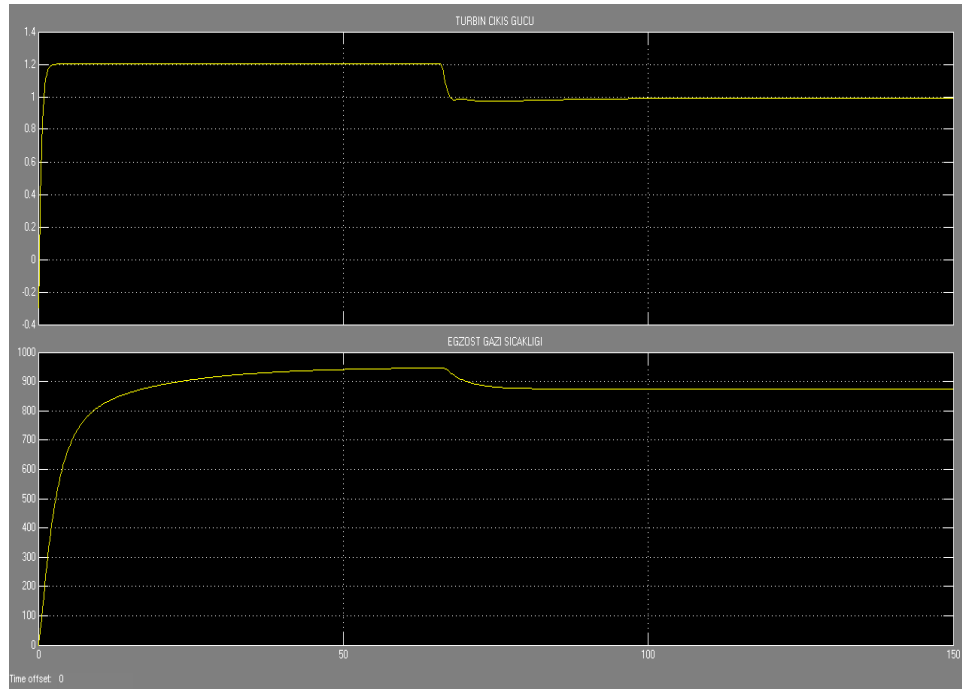
Şekil A.13: Buhar Türbini İç İhtiyaç Elektrik Prensip Şeması



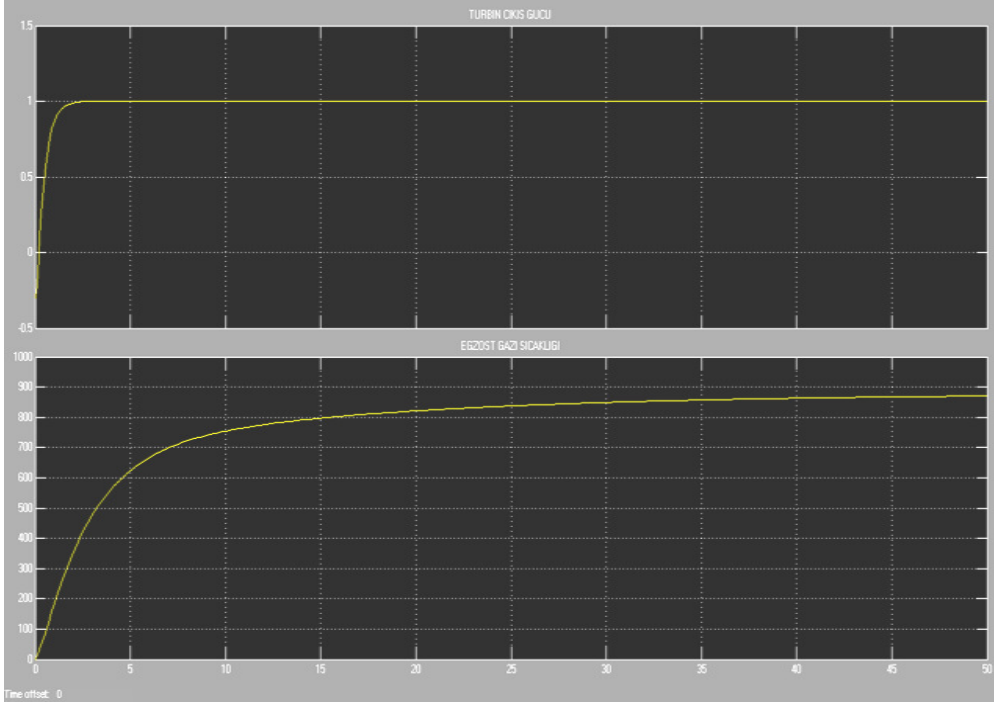
Şekil A.14: Gaz Türbini İç İhtiyaç Elektrik Prensip Şeması



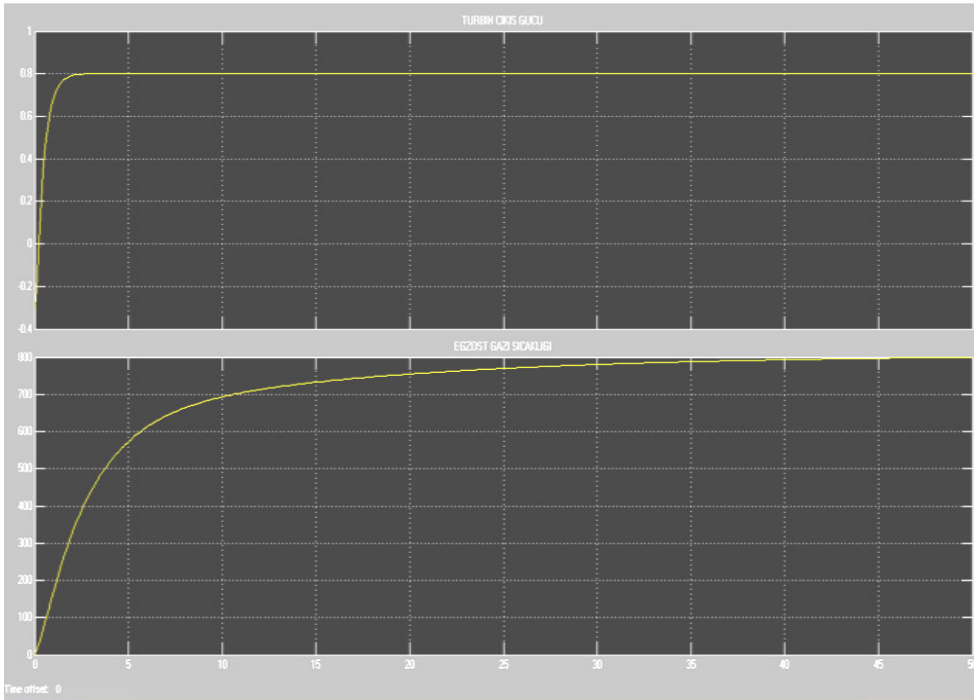
Şekil A.15: Soğutma Suyu Sistemi Prensi Şeması



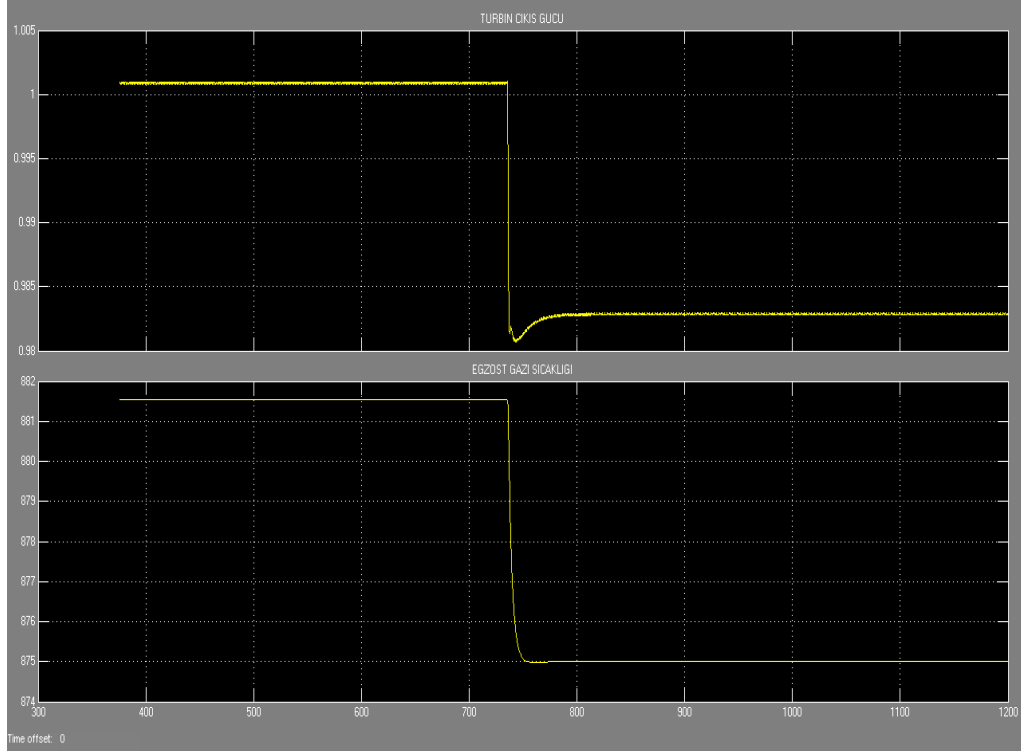
Şekil B.1: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı



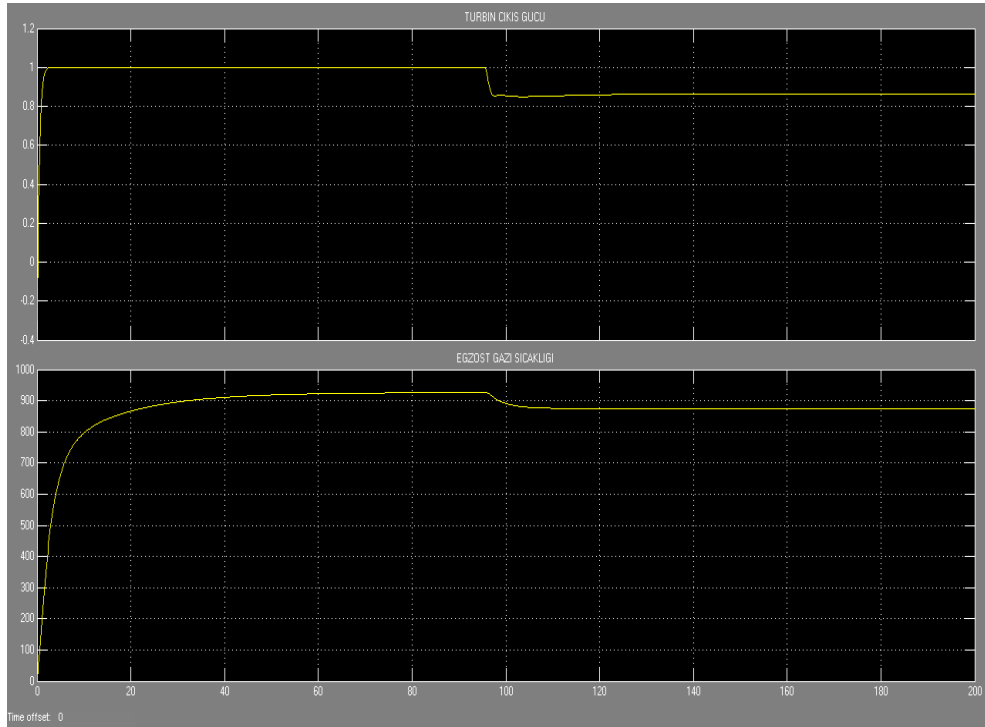
Şekil B.2: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı



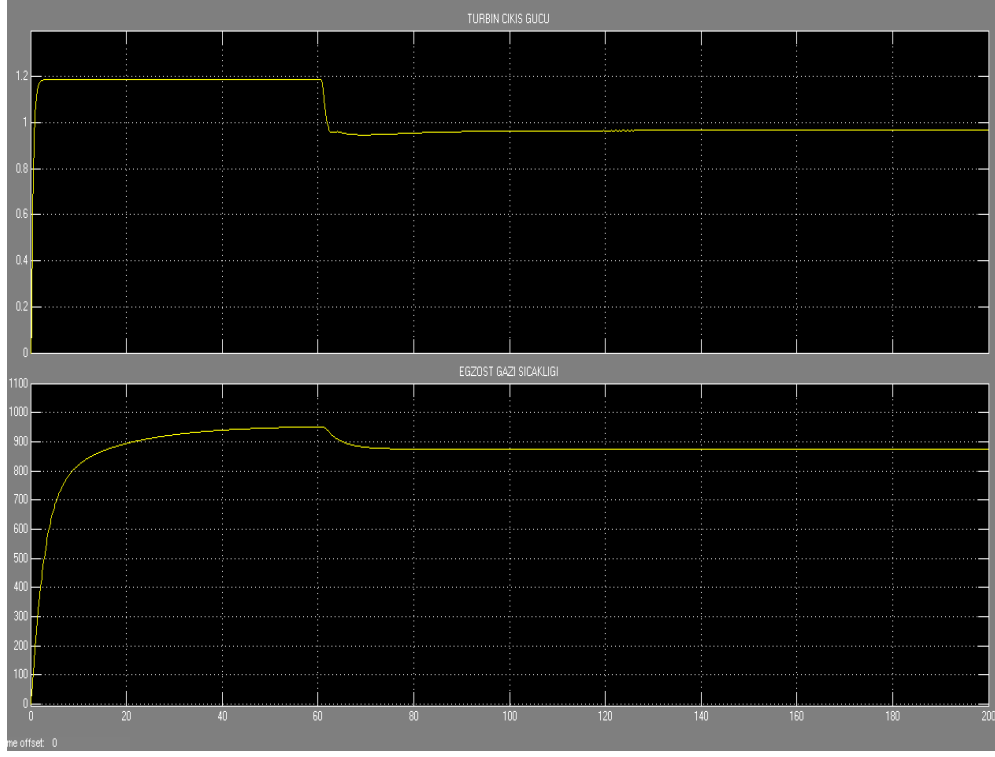
Şekil B.3: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı



Şekil B.4: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı



Şekil B.5: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı



Şekil B.6: Türbin Çıkış Gücü ve Egzost Sıcaklığı Benzetim Çıktısı

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Birol ÇİFTKAYA
Doğum Yeri ve Tarihi: Bitlis 16.01.1971
Adres: Ambarlı Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali Pk:47
Avcılar/İstanbul
Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi