

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SU TÜRİNİ HIZ REGÜLATÖRLERİ İÇİN MODEL REFERANSLI
UYARLAMALI DENETİM EKLENTİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Doğın GEZER

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU

ARALIK 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 121517101 numaralı Doktora Öğrencisi **Doğan GEZER** 'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**SU TÜRBİNİ HIZ REGÜLATÖRLERİ İÇİN MODEL REFERANSLI UYARLAMALI DENETİM EKLENTİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**” başlıklı tezi **27.12.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Yiğit TAŞCIOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Yücel ERCAN**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. Selin ARADAĞ ÇELEBİOĞLU.....
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Bülent ÖZER
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Emre TURGUT
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Doğan Gezer

ÖZET

Doktora Tezi

SU TÜRBİNİ HIZ REGÜLATÖRLERİ İÇİN MODEL REFERANSLI UYARLANABİLİR DENETİM EKLENTİLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Doğan Gezer

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışmanlar: Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taşcıoğlu, Dr. Kutay Çelebioğlu

Tarih: Aralık 2018

Hidroelektrik santraller dünyada yenilenebilir kaynaklı elektrik enerjisi üretiminde önemli bir yere sahiptir. Dünya genelinde toplam kurulu santral gücünün yaklaşık % 20'sini hidroelektrik santraller oluşturmaktadır. Türkiye'de ise bu oran biraz daha yüksektir ve hidroelektrik santraller kurulu gücün % 32'sini oluşturur. Dakikalar içinde devreye alınabilmesi ve elektrik şebekesinde meydana gelen arz-talep dengesizliklerine saniyeler içinde tepki verebilmesi sebebiyle hidroelektrik santraller termik ve nükleer santrallerin baz yükü beslemesinin aksine pik yükü besler ve rezerv tutan santraller olarak kullanılır. Özellikle kesikli bir üretim profiline sahip rüzgar ve güneş enerjisi santrallerinin elektrik şebekesindeki varlığı arttıkça, bu santrallerin istenildiğinde sağlayamayacağı arz ihtiyacı, elektrik şebekesinin sağlıklı işletimi için hidroelektrik ve doğalgaz santralleri ile doldurulur. Hidroelektrik santrallerde yer alan hız regülatörleri türbin çarkına giren su miktarını regüle ederek, şebeke senkronizasyonu için türbin hızını, paralel işletmede ise aktif güç çıkışını ayarlar. Hız regülatörünün, ünitenin hızlı bir şekilde devreye alınması ve şebeke senkronizasyonu sonrası kararlı elektrik üretimi için hız regülatörlerinin doğru

çalışması gereklidir. Şebekede meydana gelen üretim ve tüketim arasındaki farkın bir sonucu olan şebeke frekansındaki sapmaları belirli sınırlar dahilinde tutmak için kullanılan en hızlı frekans kontrol yöntemi primer frekans kontrolüdür. Primer frekans kontrolü hız regülatörlerinin frekans sapmalarına verdiği otomatik tepki ile sağlanmaktadır.

Göl ve kuyuksuyundaki su seviye değişimleri, santraldeki diğer ünitelerin çalışması gibi bozucu etkilerin varlığında anma değerlerine göre ayarlanan hız regülatörü kontrolcüsü düşük performans gösterir. Bu performans düşüklüğü ise ünitenin şebeke senkronizasyon süresinin uzamasına, verilen hedef aktif çıkış gücü değerini kararlı bir şekilde muhafaza edememesine veya primer frekans kontrolüne istenen şekilde katkı sağlayamamasına neden olur. Bu tip bozucu etkilerin hız regülatörü performansını etkilemesinin tespit edilmesi ve bu etkinin olumsuz sonuçlarının düzeltilmesi için uyarlamalı kontrol yöntemleri uygulanabilir. Ünitenin değişen santral koşullarına karşı kendini hızlı bir şekilde uyarlaması ve istenen performansı göstermesi için hız regülatörünün hız ve aktif güç çıkışı kontrollerine uyarlamalı eklentiler geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Uyarlamalı kontrol eklentilerinin geliştirilmesi için doğrusal olmayan hidroelektrik santral modeli iki farklı santral için karakteristik değerleri kullanılarak simülasyon ortamında oluşturulmuştur. Oluşturulan dinamik modeller saha testler yapılarak doğrulanmıştır. Ayrıca istenen performansın işlendiği referans modeller hız kontrolü ve primer frekans kontrolü için kurulmuştur. Geliştirilen uyarlamalı kontrol eklentileri önce simülasyon ortamında uygulanmıştır. Ardından yazılım döngülü simülasyon ortamında gerçek kontrolcü kodu ile eklentiler test edilmiştir. Nihayetinde saha testleri yapılarak geliştirilen eklentilerin saha koşullarındaki işlevselliği ve performansı değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucu geliştirilen uyarlamalı eklentilerin klasik PI kontrolcünün bozucu etkiler varlığında düşen performansını referans modele uygun şekilde düzelttiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Su türbini hız regülatörü, Model referanslı uyarlamalı kontrol, Primer frekans kontrolü, Şebeke senkronizasyonu

ABSTRACT

Doctor of Philosophy

MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL ADD-ONS FOR HYDRO TURBINE SPEED GOVERNORS

Doğan Gezer

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisors: Asst. Prof. Üyesi Yiğit Taşcioğlu, Dr. Kutay Çelebioğlu

Date: December 2018

Hydroelectric power plants have an important place in electricity generation through renewable resources in the world. Hydroelectric power plants account for about 20% of the total installed capacity of the power plants throughout the world. Also in Turkey, this rate is slightly higher and hydroelectric power plants constitute 32% of the total installed power. Due to the fact that the hydroelectric power plants could be activated in minutes and could react in seconds to supply-demand imbalances occurring in the electricity grid, hydroelectric power plants feed the peak load and are used as reserve-supplying plants in contrast to the base load supplied by the thermal and nuclear power plants. As the presence of wind and solar power plants with an intermittent generation profile increases in the electricity grid, the generation need that these type of power plants could not supply is satisfied by the hydroelectric and natural gas power plants for the reliable operation of the electricity grid. Speed regulators in hydroelectric power plants regulate the amount of water entering the turbine runner and adjust the turbine speed for network synchronization and active power output in parallel operation. The speed regulators must be operated correctly

for the rapid start-up of the unit and for the stable generation of the electricity after mains synchronization. Primary frequency control is the fastest frequency control method in order to keep the network frequency deviations within the certain limits which is a result of the difference between the generation and consumption occurring in the network. Primary frequency control is provided by the automatic response to frequency deviations via the speed governors.

The speed governor controller, which is tuned according to the rated values, shows poor performance in the presence of the disturbing effects such as the water level changes in the reservoir and tailwater, the operation of other units in the plant. This low performance causes the unit to prolong the network synchronization time, fail to maintain the given target active output power rating in a stable manner or to contribute to the primary frequency control in the desired way. Adaptive control methods could be applied to determine the effects of such disturbing effects on speed regulator performance and to correct the negative results of this effect. It is aimed to develop adaptive add-ons for the speed and active power output controls of the speed regulator in order to adapt the unit rapidly to changing power plant conditions and to perform the desired performance.

In order to develop the adaptive control add-ons, a non-linear hydroelectric power plant model is established in the simulation platform using the characteristic values for two different power plants. The dynamic models are validated through the field tests. In addition, reference models for which the desired performance is processed are formed for the speed control and primary frequency control. The developed adaptive control add-ons are first applied in simulation environment. Then the add-ons are tested in the software-in-the-loop simulation environment with the actual controller code. Finally, field tests are performed and the functionality and performance of the add-ons under field conditions are evaluated. It has been observed that the adaptive add-ons developed in this study have corrected the poor performance of the classical PI controller in the presence of disturbing effects in accordance with the reference model.

Keywords: Hydroelectric speed governor, Model reference adaptive control, Primary frequency control, Network synchronization

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli katkılarıyla beni yönlendiren Sayın Dr. Öğr. Üyesi Yiğit Taőcioęlu ve Sayın Dr. Kutay Çelebioğlu'na, tarafıma sağladığı araştırma bursu ile doktora programımı yürüttüğüm TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, bilgi ve deneyimlerimin temel kaynağı olan işyerim TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi'ne, bu süreç boyunca tecrübelerinden faydalandığım Sayın Dr. Cem Őahin, Yük. Müh. Erkan Koç ve kıymetli proje arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalıőmam süresince desteğini esirgemeyen eőim Derya Hanım ve yol alma motivasyonum çocuklarım Alptuğ ve Gökçe'ye teőekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
KISALTMALAR	xiv
SEMBOL LİSTESİ	xv
RESİM LİSTESİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Hedefler	5
1.2 Özgün Değer	6
1.3 Yöntem	6
1.4 Tezin Yapısı	8
2. HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN KONTROLÜ	11
2.1 Hız Regülatörlerinin Tarihsel Gelişimi	11
2.2 Hız Regülatörü Kontrol Modları	17
2.2.1 Primer Frekans Kontrolü Etkili Aktif Güç Kontrolü	17
2.2.2 Hız Kontrolü	21
2.2.3 Ayar Kanat Açıklığı Kontrolü	22
2.3 Hız Regülatörü Testleri ve İlgili Standartlar	23
3. MODELLEME VE SİMÜLASYON	25
3.1 Literatür Özeti	25
3.2 Hidroelektrik Santralin Doğrusal Olmayan Modeli	28
3.2.1 Enerji Tüneli	29
3.2.2 Denge Bacası	31
3.2.3 Cebri Boru	33
3.2.4 Türbin	34
3.2.5 Servo Silindir ve Ayar Kanat Açıklığı	36
3.2.6 Generatör	37
3.2.7 İkaz Sistemi	38
3.2.8 Elektrik Şebekesi & Yük Dinamiği	38
3.3 Hidroelektrik Santralin Doğrusal Modeli	39
3.4 Yazılım Döngülü (Software-in-the-loop) Simülasyon Ortamı	41
4. GÜÇ SANTRALLERİNDE ADAPTİF KONTROL	47
4.1 Literatür Özeti	47
4.1.1 Adaptif kontrol	47
4.1.2 Model referanslı adaptif kontrol	49
4.1.3 Kazanç ayarlama	50

4.2 PID Kontrolcü.....	51
4.3 Adaptif Kontrolcü Seçimi.....	52
4.4 Önerilen Model Referanslı Adaptif Kontrol Eklentisi	58
4.5 Kazanç Ayarlama	60
4.6 Model Referanslı Adaptif Kontrol Referans Modelleri.....	61
4.6.1 Primer frekans kontrolü referans modeli.....	61
4.6.2 Türbin hızı referans modeli	63
5. PFK ETKİLİ AKTİF GÜÇ KONTROLÜ İÇİN MRAK EKLENTİSİ	65
5.1 Seyhan I HES Proje Bilgisi	65
5.2 Model Doğrulama Çalışmaları	66
5.3 Adaptif Kontrolcü Tasarımı.....	70
5.4 Simülasyonlar	73
5.4.1 Net düşüde yaşanan değişim	73
5.4.2 Türbin veriminde düşüş.....	75
6. SENKRONİZASYON ÖNCESİ HIZ KONTROLÜ İÇİN MRAK EKLENTİSİ.....	77
6.1 Gezende HES Proje Bilgisi.....	77
6.2 Model Doğrulama Çalışmaları	78
6.3 Adaptif Kontrolcü Tasarımı.....	80
6.4 Simülasyonlar ve Saha Testleri	83
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	101

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Dünyadaki hidroelektrik santral kurulu gücü (GW) [1].	2
Şekil 1.2 : Türkiye'deki santrallerin kurulu güç dağılımı [2].	2
Şekil 1.3 : Tez yöntemi.	7
Şekil 2.1 : Uçan top kontrolü [5].	11
Şekil 2.2 : Elektrohidrolik hız regülatörü çalışma şeması.	13
Şekil 2.3 : Dijital hız regülatörü çalışma şeması.	14
Şekil 2.4 : Frekans kontrol yöntemleri [4].	17
Şekil 2.5 : Frekans sapması sonrası devreye giren yöntemler [4].	18
Şekil 2.6 : Farklı kalıcı hız düşümü değerlerine göre ünite aktif güç çıkışındaki değişim.	19
Şekil 2.7 : Primer frekans kontrolü etkili aktif güç kontrol modu.	20
Şekil 2.8 : Şebeke senkronizasyonu öncesi hız kontrolü.	21
Şekil 2.9 : İzole-ada koşullarında hız kontrolü.	21
Şekil 2.10 : Açıklık kontrolü.	22
Şekil 3.1 : HES genel yerleşim.	28
Şekil 3.2 : HES bileşenleri arası etkileşim.	29
Şekil 3.3 : Lineer olmayan HES modeli.	30
Şekil 3.4 : Türbin kazancı katsayısının belirlenmesi.	35
Şekil 3.5 : Yazılım döngülü simülasyon ortamı.	42
Şekil 3.6 : Simülasyon ortamı içindeki OPC sunucu yapılandırma ayarları.	43
Şekil 3.7 : Yazılım döngülü simülasyon ortamında PID ayarlaması.	45
Şekil 4.1 : Adaptif kontrol genel gösterimi.	53
Şekil 4.2 : Model referanslı adaptif kontrol şematik gösterimi.	55
Şekil 4.3 : Önerilen model referanslı adaptif kontrol eklentisi.	59
Şekil 4.4 : Kazanç ayarlama şematik gösterimi.	60
Şekil 4.5 : İstenen PFK rezerv sağlama profili.	62
Şekil 4.6 : İstenen türbin hızı profili.	63
Şekil 5.1 : Seyhan I HES üstten görünüm.	65
Şekil 5.2 : Seyhan I HES saha ölçümleri ile HES modelinin doğrulanması a) ünitenin başlatılması b) ünitenin durdurulması c) ünitenin yük alması.	68
Şekil 5.3 : PFK etkili aktif güç kontrolü için referans model ile santral davranışı.	70
Şekil 5.4 : Primer frekans kontrolü etkili model referanslı adaptif kontrol blok şeması.	71
Şekil 5.5 : Aktif güç çıkışı döngüsü root locus.	72
Şekil 5.6 : Net düşünün 0.9 olduğu durumda primer frekans kontrolü simülasyonları.	73
Şekil 5.7 : Net düşünün 0.9 olduğu durumda farklı Γ değerleri için θ değerindeki değişim a) $\Gamma < \Gamma_{kritik}$ (b) $\Gamma > \Gamma_{kritik}$	75

Şekil 5.8 : Anma net düşü değerinde düşük türbin verimi ile ilgili simülasyonlar. ...	76
Şekil 6.1 : Gezende HES üstten görünüm.	77
Şekil 6.2 : Gezende HES saha ölçümleri ile HES modelinin doğrulanması a) ünitenin başlatılması b) ünitenin durdurulması.	79
Şekil 6.3 : Gezende HES türbin hız kontrolcüsü.	80
Şekil 6.4 : Gezende HES kazanç ayarlama eklentili türbin hız kontrolcüsü.	81
Şekil 6.5 : Gezende HES model referanslı adaptif kontrolcü eklentili türbin hız kontrolcüsü.	82
Şekil 6.6 : Kontrolcülerin performans karşılaştırması a) simülasyon ($H_g = 0.9$ pu, $N = 1$), b) saha ölçümleri ($H_g = 0.95$ pu, $N = 1$).	84
Şekil 6.7 : Model referanslı adaptif kontrolcü için saha test sonuçları ($H_g = 0.95$ pu, $N = 1$) a) $\Gamma = 0.2$, b) $\Gamma = 0.5$	85



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yayınların model içeriğine göre sınıflandırılması.....	26
Çizelge 3.2 : Simülasyon ortamı ve kod geliştirme ortamı arasındaki sinyaller.....	44
Çizelge 4.1 : Gezende HES türbin hızı referans modelinin bölge tanımları.....	64
Çizelge 5.1 : Seyhan I HES karakteristik değerleri.....	66
Çizelge 5.2 : Model referanslı adaptif kontrolcü katkısı.....	74
Çizelge 6.1 : Gezende HES karakteristik değerleri.....	78
Çizelge 6.2 : Gezende HES kazanç ayarlama parametreleri.....	82

KISALTMALAR

HES	: Hidroelektrik santral
MRAK	: Model referanslı adaptif kontrol
PFK	: Primer frekans kontrolü



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur. Birimi yazılmamış semboller, ilgili büyüklüklerin anma değerlerine göre normalize edilmiştir.

Simgeler Açıklama

A_p	Cebri boru kesit alanı (m^2)
A_s	Denge bacası kesit alanı (m^2)
A_t	Enerji tüneli bölümlerinin kesit alanı (m^2)
C_s	Denge bacası depolama süresi (s)
e	Adaptif kontrol takip hatası
E_{kon}	PID kontrolcüye giren hata değeri
E_q	Generatör iç gerilimi
f	Gerçek şebeke frekansı
g	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
G	Ayar kanat açıklığı
G_{fl}	Tam yükte ayar kanat açıklığı
G_{nl}	Yüksüz konumda ayar kanat açıklığı
G_p	Santralin transfer fonksiyonu
G_{set}	Ayar kanat açıklığı hedef değeri
GD^2	Generatör atalet momenti ($ton.m^2$)
H	Atalet sabiti (s)
H_0	Anma net düşü (m)
H_{0s}	Denge bacası anma su seviyesi (m)
H_{fp}	Cebri borudaki sürtünmeden dolayı oluşan düşü kaybı
H_{ft}	Enerji tünelindeki sürtünmeden dolayı oluşan düşü kaybı
H_r	Göl su seviyesi
H_s	Denge bacası su seviyesi
H_{tur}	Türbin girişi su seviyesi
H_w	Yürüyen dalga etkisi ile oluşan düşü
J	Adaptif kontrol ceza fonksiyonu
k	Adaptif kontrol için bilinmeyen değişken
k_o	Adaptif kontrol için değeri bilinen değişken
K_p	PI kontrolcü oransal değişkeni
K_{tur}	Türbin kazancı

l_t	Enerji tüneli bölümlerinin uzunluğu (m)
l_p	Cebri boru uzunluğu (m)
M_f	Generatör ortak endüktans
n	Türbin hızı (d/d)
P	Gerçek aktif çıkış gücü
P_m	Mekanik çıkış gücü
P_{model}	Referans model çıkışı
R	Kalıcı hız düşümü
Q_0	Anma debi değeri (m^3/s)
r_f	Alan devresi direnci
S	Anma görünür güç (kVA)
t_{PFC}	Referans model zaman sabiti
t_s	Servo silindir zaman sabiti (s)
t_{wp}	Cebri boru su başlama zamanı (s)
t_{wt}	Enerji tüneli su başlama zamanı (s)
T_e	Elektromanyetik tork
T_i	PI kontrolcü integral zamanı
T_m	Mekanik tork
u	Adaptif kontrol santral giriş değeri
u'	PID kontrolcü çıkış değeri
U_0	Türbinden geçen suyun anma hızı
U_c	Kontrolcüye verilen hedef değer
U_{nl}	Yüksüz konumda türbinden geçen suyun hızı
U_{tur}	Yük altında konumda türbinden geçen suyun hızı
U_{wp}	Cebri borudan geçen suyun hızı
U_{wt}	Enerji tüneline geçen suyun hızı
V_s	Elektrik şebekesi bara gerilimi
V_f	Ana alan gerilimi
ω	Türbin hızı
ω_d	Referans model türbin hızı
ω_s	Denge bacası nedeniyle ortaya çıkan kütle salınımı doğal frekansı (rad/s)
X_d	Generatör d-ekseni reaktansı
X_e	Bara empedansı
Y_m	Referans model çıkışı
Y_p	Santral gerçek çıkış değeri
δ	Bara gerilimi ve generatör iç gerilimi arasındaki açı
γ	Adaptif kontrol için kullanılan pozitif bir katsayı
Γ	Adaptif kontrol öğrenme oranı
Θ	Adaptif kontrolcü çıkış değeri
ρ	Suyun yoğunluğu (kg/m^3)



RESİM LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Resim 2.1 : Örnek elektrohidrolik hız regülatörü.	12
Resim 2.2 : Örnek analog hız regülatörü kontrolcüsü.....	13
Resim 2.3 : Örnek digital hız regülatörü.	14
Resim 2.4 : Örnek hidrolik hız regülatörü.....	16



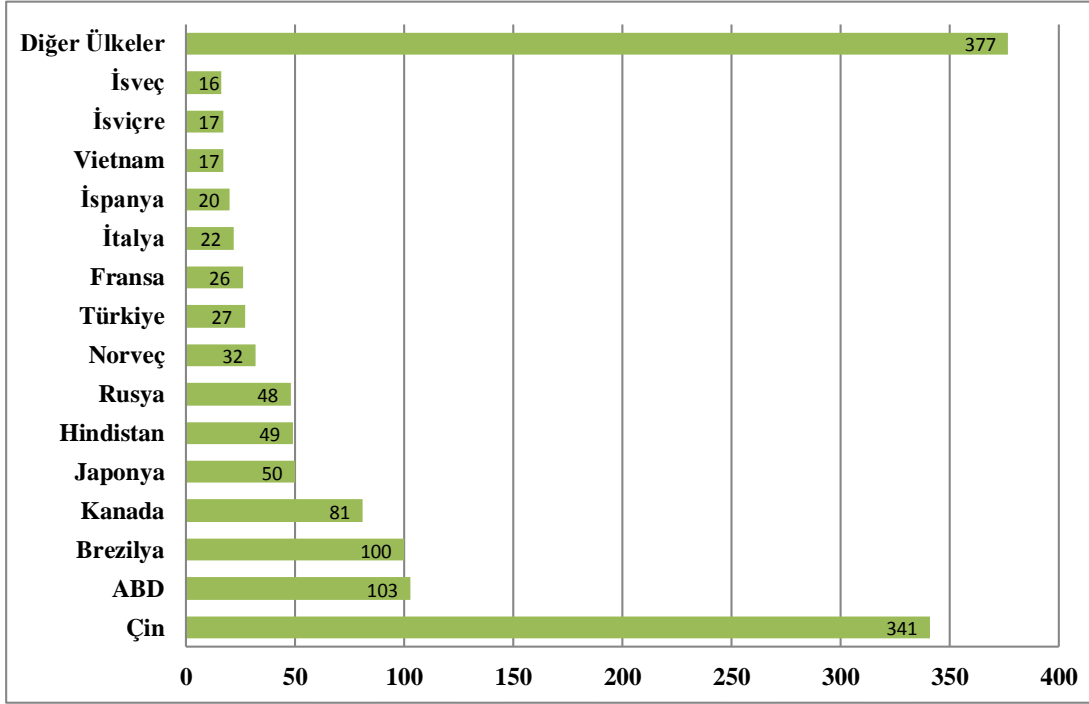
1. GİRİŞ

Doğal yaşam döngüsünde nehirlerde potansiyel enerji kazanan sudan enerji elde etmek için suyun, bir su yolu marifetiyle (enerji tüneli, denge bacası, cebri boru ve giriş vanası) sudaki potansiyel enerjinin mekanik enerjiye dönüştürüleceği su türbinine (ayar kanatları ve çark) girişi sağlanır. Bir şaft üzerinden generatöre aktarılan mekanik enerji elektromanyetik etkileşim sonucu elektrik enerjisine dönüştürülür. Bağlı yüklere ulaştırılması için çıkış gerilimi ana güç transformatörü ile yükseltilerek iletim kayıpları azaltılır ve generatöre bağlı yüklerin beslenmesi sağlanır. Bir yük doğrudan bir ya da birden fazla generatör tarafından (izole veya ada mod) beslenebileceği gibi generatörler ve yüklerden oluşan bağlaşımlı (interconnected) bir şebeke üstünden de beslenebilir. Bahsedilen birincil sistemlerin çalışması için bir hidroelektrik santralinde (HES) soğutma suyu, yatak yağlama, iç ihtiyaç besleme gibi yardımcı sistemlere ek olarak santral kumanda, koruma ve senkronizasyon, ikaz ve hız regülatörü gibi kontrol sistemleri de yer alır.

Depolama kapasitesine göre HES'ler rezervuarlı veya nehir tipi olmak üzere ikiye ayrılır. Rezervuarlı HES'ler yapay baraj gölüne sahiptir. Bu tip HES'lerde mevsimler arası yağış farklılıkları fazla yağış olduğunda suyun depolanması veya az yağış olduğunda depolanan suyun elektrik üretiminde kullanılması yoluyla regüle edilir. Nehir tipi HES'lerde ise su nehirden doğrudan su yolu ile türbine alınır ya da çok küçük bir havuz (ülkemizdeki özellikle Karadeniz Bölgesindeki HES'lerde olduğu gibi) suyun 0.5-1 saat depolanması için kullanılır. Rezervuarlı HES'lerde baraj gölü için yapılan kamulaştırma ve yer değişimleri maliyet teşkil ederken, nehir tipi HES'lerde depolama kapasitesi az olduğu ya da olmadığı için pik zamanlarda frekans kontrolü için kullanılmaları mümkün değildir.

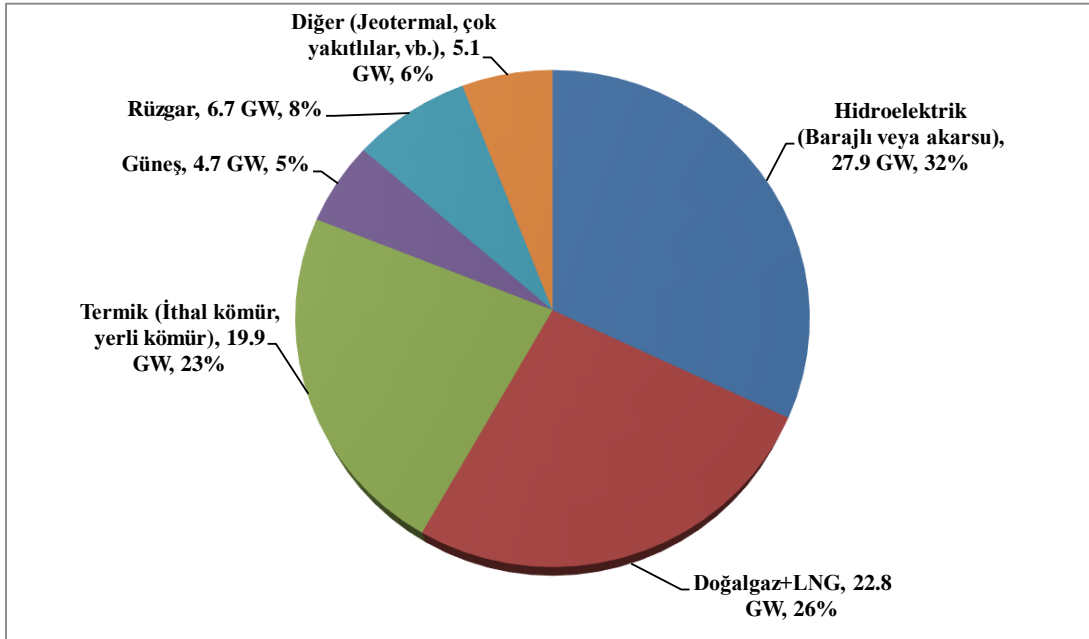
Dünya genelinde hidroelektrik santral kurulu güçleri Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Dünyadaki 1300 GW'ı aşan kurulu gücün 341 GW'ı Çin'dedir. İkinci sırada 103

GW ile ABD yer alırken Türkiye 27 GW kurulu gücü ile dokuzuncu sırada yer alır. Türkiye dünyadaki hidroelektrik santral kurulu gücünün % 2'sine sahiptir.



Şekil 1.1 : Dünyadaki hidroelektrik santral kurulu gücü (GW) [1].

Türkiye'deki santrallerin kurulu güç olarak dağılımını Şekil 1.2'de gösterilmektedir. Barajlı ve akarsu üzerine kurulu hidroelektrik santrallerin toplam kurulu gücü 27.9 GW'tır. Hidroelektrik santraller toplam kurulu gücün % 32'sini oluşturmaktadır.



Şekil 1.2 : Türkiye'deki santrallerin kurulu güç dağılımı [2].

Elektrik şebekesi açısından bakıldığında HES'lerin sistemdeki yeri termik ve nükleer santrallerden karşılanan baz yüke ek olarak pik yükü karşılamaktır. Bunun sebebi termik ve nükleer santrallerin yükte meydana gelebilecek değişimlere hızlı tepki verememesi, diğer yandan doğalgaz santralleri ile birlikte HES'lerin yük değişimlerine hızlı tepki verebilmeleridir. Günümüzde rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklardan elde edilen elektrik enerjisi öngörülmesi zor bir üretim profili izlemektedir. Bu nedenle günümüz teknolojisi ile büyük miktarlarda depolanamayan elektrik enerjisinin arz ve talep dengesinin sağlanması adına HES'lerin rolü hayatidir. Arz talep dengesinin bir göstergesi olan şebeke frekansının anma değerinde (Türkiye ve Avrupa'da 50 Hz, ABD'de 60 Hz) tutulması, yani frekans kontrolü için özellikle HES'ler yaygın olarak kullanılmaktadır [3].

Hidroelektrik santrallerdeki hız regülatörleri, şebeke senkronizasyonu için türbin hızını ve şebeke işletimi için aktif güç çıkışını ayarlar. Elektrik şebekesi bağlantısı öncesinde ayar kanatları ile yapılan her türlü türbine giren su regülasyonu etkisi, türbin hızında görülmektedir. Şebeke senkronizasyonu sonrasında bağlaşımlı (enterkonnekte) sisteme ünitenin bağlanması ile senkron makinenin yapısı gereği şebekeye bağlı olan tüm santraller aynı elektriki frekans ile döner. İlgili üniteye senkron makinenin kutup çifti sayısına göre ünitelerin türbin hızları farklılık gösterebilir; (örneğin: Keban HES'te 18 kutup çifti vardır ve 50 Hz'lik şebeke frekansı 166.5 d/d'lık türbin hızına denk gelmektedir, Gezende HES'te 9 kutup çifti vardır ve 50 Hz'lik şebeke frekansı 333.33 d/d'lık türbin hızına denk gelmektedir.) ancak elektriksiz olarak hepsi şebeke frekansına uygun gerilim endüklemektedir. Büyük bir şebekeye bağlanan ünitenin ayar kanatlarını açarak türbine daha fazla su girmesini sağlaması artık kendisini aktif güç artışı olarak göstermektedir. Büyük bir şebekede frekans değişimi, arz ve talep arasındaki genel dengesizlik sonucu ortaya çıkar. Sadece izole-ada modunda ünitenin aktif güç artışı şebekedeki santral ve yükün azlığı nedeniyle şebeke frekansında oynamaya neden olabilir. Ünitenin şebeke bağlanmasından sonra türbine giren su miktarının değiştirilmesinin frekansa etkisi, ünitenin bağlandığı şebekenin büyüklüğü ile ilgilidir.

Enerji santrallerinin çoğu, gün öncesi piyasasında üretim taahhütleri sunmaktadır. Her bir santralin günlük üretimi, santralin taahhüt edilen üretim hedef noktalarını takip edip etmediğini kontrol etmek için saat çözünürlüğünde denetlenir. Enerji

santralinin üretimi, bir tolerans bandı içinde taahhüt edilen değerin altında kalıyorsa veya bu değeri aşıyorsa, sistem operatörü bu santralin neden olduğu dengesizlikleri tespit eder; santralin makul bir gerekçesi yoksa, enerji santraline ceza uygular. Bu durum, enerji santrallerinde, operatör tarafından verilen aktif güç hedef noktasının ve gerçek aktif güç bilgisinin hız regülatörü kontrol döngülerinde kullanıldığı modların etkin hale getirilmesini zorunlu kılar.

Ayrıca, arz ve talep arasındaki dengesizlikler nedeniyle oluşan şebeke frekansındaki sapmaları durdurmak için orta-büyük ölçekli enerji santrallerinin, Primer Frekans Kontrolüne (PFK) katkıda bulunması beklenmektedir [4]. Şebeke frekansını izin verilen sınırlar içinde tutmak, güç kalitesi için öncelikli bir şarttır. PFK gereksinimlerini karşılamak için, orta-büyük ölçekli enerji santrallerinin geçerli kontrol modlarına primer frekans etkisi eklemeleri gerekmektedir. Hız regülatörlerinin, frekans sapmasının işaretine bağlı olarak ünitenin aktif güç çıkışını artırması/azaltması beklenmektedir, örneğin arz fazlalığı veya talep düşüklüğü anlamındaki, şebeke frekansında meydana gelen bir artış, hız regülatörlerinin otomatik olarak harekete geçerek aktif gücü azaltmasına neden olacaktır. Buna benzer şekilde frekans tepkisine katkıda bulunan diğer üretim üniteleri bulunduğundan, her ünite, gerekli yükün bir kısmını daimi hız düşüşü değerine göre alır. PFK uygulamalarına dair kontrol ve koordinasyonu iletim sistem operatörü yapmaktadır. Ülkemizde iletim sistem operatörü Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ)'dir.

Hız regülatörü kontrol cihazının parametreleri genel olarak anma düşü ve tek ünite çalışması gibi anma çalışma koşullarında ayarlanır. Hız regülatörünün üniteyi anma hızında kararlı bir şekilde tutmaya çalıştığı senkronizasyon öncesi hız kontrolü ele alındığında, rezervuardaki ve/veya kuyruk suyundaki su seviyesi değişimleri ve cebri boruyu paylaşan diğer aktif ünitelerin varlığı, bahsedilen anma değer parametre ayarlarını geçersiz kılan yaygın bozucu etkilerdir. Bu tip bozucu etkiler hız kontrolü esnasında ciddi hatalara neden olabilir ve hız regülatörlerinin senkronizasyon performansını azaltabilir. Şebeke senkronizasyonundaki gecikme, santralin saat başına işlenen gün öncesi piyasa hedeflerine ulaşmasını engellemekle kalmaz, aynı zamanda aktif güç üretmeksizin suyun boşa türbinlenmesine neden olur.

Buna ek olarak, hız regülatörünün gerçek aktif çıkış gücü geribeslemesi kullanarak operatör tarafından verilen aktif güç hedef değerini takip ettiği aktif güç kontrolü

incelendiğinde, senkronizasyon öncesi hız kontrolüne benzer bir şekilde, rezervardaki ve kuyruk suyu seviyelerindeki değişiklikler ve özellikle de su yolu ve hidrolik sistemlerdeki yıpranma yaygın bozucu etkilerdendir. Bu bozucu etkiler klasik kontrolcüler tarafından kontrol edilen hız regülatörlerinin performansını azaltabilir, çünkü kontrolcü parametre ayarları genellikle yeni kurulan ekipmanla ideal koşullar için yapılır. Örneğin, diğer ünitelere bağlı olarak kuyruk suyu seviyesinde bir artış olması durumunda, özellikle düşük düşülü HES'ler için, net düşü azalır. Bu, hedef aktif güce ulaşmak için harcanacak zamanı artırır ve bu durumun bir sonucu olarak, klasik kontrolcü daha büyük bir hata toplar ve aşım gerçekleşir.

Yaygın uygulamada klasik kontrol yaklaşımlarına sahip olan kontrolcünün, bu ve benzer bozucu etkiye sahip değişimler karşısında istenen şekilde performans göstermesi için adaptif kontrol uygulanabilir bir çözümdür. Bu çalışmada, kontrolcünün değişen santral koşullarına hızla adapte olması için hız regülatörünün hız ve aktif güç kontrol döngülerine adaptif kontrolcüler eklenmesi irdelenmiştir. Model Referanslı Adaptif Kontrol (MRAK) bir referans modelinin tepkisi ile tanımlanan istenen davranışa göre uyarlamayı yapar. Kazanç ayarlama (KA) ise yardımcı bir ölçüm sistemi üzerinden, düşü ölçümü veya çalışan diğer ünitelerin sayısı, vb., alınan bilginin değerlendirilmesine göre kontrolcü parametrelerinin ayarlanmasıdır. İki adaptif kontrol yönteminde de hedeflenen katkı, söz konusu bozucu etkilerin varlığında kontrolcünün istenen performansını korumaktır.

1.1 Hedefler

Bu doktora tezinde, hidroelektrik santrallerde meydana gelen düşü değişimleri, hidrolik ekipmanda yıpranma, vb. bozucu etkilere karşı hız regülatörünün senkronizasyon öncesi hız ve senkronizasyon sonrası aktif güç kontrol modlarında istenen performansını sürdürebilmesini sağlamak amacıyla kendi kendisini otomatik olarak ayarlayan adaptif kontrol yaklaşımları geliştirmek hedeflenmiştir. Bu ana hedefi gerçekleştirmek için aşağıdaki yardımcı hedeflere ulaşılmıştır:

- Bir hidroelektrik santralin lineer ve lineer olmayan matematiksel modelinin oluşturulması, oluşturulan santral modellerinin saha testleri yapılarak doğrulanması
- Yazılım döngülü simülasyon ortamı geliştirilmesi

- Hız regülatörlerinde kullanılan hız kontrol ve aktif güç kontrol döngülerine model referanslı ve kazanç ayarlamalı adaptif kontrolcüler geliştirilmesi
- Model referanslı adaptif kontrolcü tasarımı için referans modellerin oluşturulması
- Geliştirilen kontrol sistemlerinin birbiri ve adaptif olmayan kontrol sistemleri ile karşılaştırılması

1.2 Özgün Değer

Bu çalışmanın başlıca özgün değeri, dış bozucu etkiler varlığında hız regülatörü kontrolcüsü primer frekans kontrolü veya hız kontrolü yaparken, hız regülatörünün istenen davranış modeline uygun şekilde davranış değiştirmesinin sağlanmasıdır. Yapılan literatür araştırması ve yazarın saha tecrübelerine göre, bu çalışmadan önce model referanslı adaptif kontrol yaklaşımı primer frekans kontrolü ve hız kontrol için herhangi bir uygulamada kullanılmamış ve ilgili bir makale yayınlanmamıştır.

Yapılan çalışmanın bir bölümü, 2018 yılında “Measurement and Control” adlı dergide yayınlanmıştır.

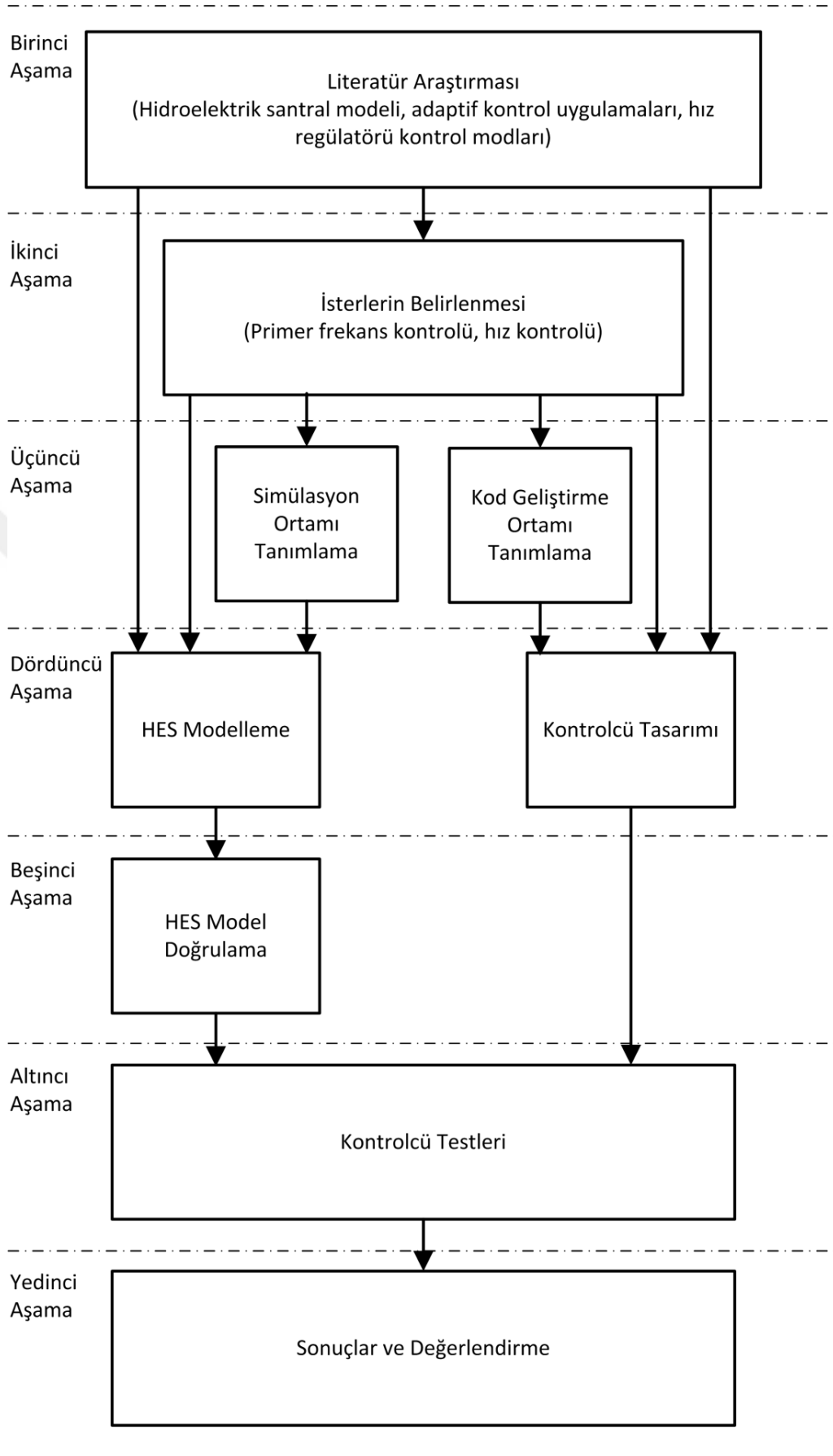
Buna ek olarak, yapılan çalışma gerçek santral ortamında uygulanmış ve elde edilen çıktılar ile simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. Akademide geliştirilen bu tip bir çalışmanın, üretim yapılan bir santralde test edilmesi, yapılan çalışmanın ileride ticari ürün haline gelebilmesi açısından önemlidir.

1.3 Yöntem

Şekil 1.3, bu çalışma boyunca takip edilen yöntemi oluşturan yedi aşama ve bu aşamaların birbirleri ile ilişkisini göstermektedir.

Birinci aşamada hidroelektrik santral modeli, santrallerdeki adaptif kontrol uygulamaları, hız regülatörü uygulamalarına dair geniş çaplı bir literatür araştırması yapılmıştır. Bu adımın çıktıları ikinci ve dördüncü adımda kullanılmıştır.

İkinci aşamada hedeflenen uygulamayı kapsayan ve niteleyen isterler belirlenmiştir. Elektrik şebekesi yardımcı hizmetlerinden primer frekans kontrolü ve türbin hız kontrolüne ile ilgili ulaşılmak istenen hedefler ve alınmak istenen sonuçlar belirlenmiştir. Bu adımın çıktıları üçüncü ve dördüncü basamaklarda kullanılmıştır.



Şekil 1.3 : Tez yöntemi.

Üçüncü aşamada simülasyon ortamı ve kod geliştirme ortamı ikinci adımda belirlenen istelere göre tanımlanmıştır. Yazılım döngülü simülasyon ortamı oluşturulabilmesi için simülasyon ortamı ve kod geliştirme ortamının birbiri ile etkileşimine önem verilmiştir.

Dördüncü basamakta bir önceki aşamanın simülasyon ortamı ile ilgili çıktıları ve ilk iki aşamanın çıktıları modelleme çalışmaları için kullanılmıştır. Benzer bir şekilde, kod geliştirme ortamı kontrolcü tasarımı için literatür taraması ve isterlerin belirlenmesi aşamalarının çıktıları ile kullanılmıştır.

Beşinci adımda oluşturulan santral modelleri saha testleri ile toplanan verilerle karşılaştırılarak model doğrulama çalışmaları tamamlanmıştır. Doğrulan santral modelleri Seyhan I HES ve Gezende HES kontrolcü testlerinde kullanılmıştır.

Altıncı basamakta doğrulan santral modeli ve geliştirilen kontrol yaklaşımları ile simülasyon ortamında kontrolcü testleri yapılmıştır. Ardından sahada gerçek santral ortamında geliştirilen kontrol yaklaşımı test edilmiştir.

Son aşama olarak yedinci aşamada ise elde edilen sonuçlar çalışma başında ortaya konan hedeflerle karşılaştırılmış ve değerlendirilmesi yapılmıştır.

1.4 Tezin Yapısı

Bu tez çalışması aşağıda açıklanan altı ana bölümden oluşmaktadır:

Bölüm 1 tez çalışmasına dair tanıtım ve giriş bilgisi ile tezin özgün değeri, takip edilen yöntem ve tez yapısını içermektedir.

Bölüm 2’de hidroelektrik santrallerin hız regülatörü üzerinden kontrolü üzerine yoğunlaşmıştır. Hız regülatörlerinin tarihsel gelişimi mekanik, elektrohidrolik, analog ve dijital hız regülatörleri açıklanarak anlatılmıştır. Ardından hız regülatörü kontrol modları hız kontrolü, PFK etkili aktif güç kontrolü ve ayar kanat açıklığı kontrolü olarak açıklanmıştır. Bölümün sonunda ise hız regülatörü devreye alma çalışmaları esnasında yapılan testler ve bu testlerin kaynağını oluşturan teknik standartlardan bahsedilmiştir.

Bölüm 3’te ilk önce bir hidroelektrik santralin lineer ve lineer olmayan matematiksel modellerinin oluşturulması konusunda literatür özeti sunulmaktadır. Ardından lineer

olmayan hidroelektrik santral modelinin oluşturulması için türbin, cebri boru, generatör, vb. alt sistemlerin fiziksel tanımları, işlevleri ve diferansiyel eşitlikleri verilmiştir. Doğrusal santral modeli oluşturulması ile ilgili eşitlikler bir sonraki alt bölümde anlatılmıştır. Yazılım döngülü simülasyon ortamını oluşturan Matlab/Simulink-OPC Sunucu-Simatic Manager yazılımları ve test düzeneğinin ayrıntıları bölümün sonunda yer almaktadır.

Bölüm 4'te güç santrallerinde kullanılan adaptif kontrol yöntemlerine dair literatür özeti verilmiştir. Ardından hidroelektrik santrallerde yaygın bir şekilde kullanılan PID kontrolcü açıklanmıştır. Kullanılacak adaptif kontrolcü için açık-çevrim, doğrudan ve dolaylı adaptif kontrol arasından yapılan seçimin temelleri ve gerekçelerinin açıklanmasının ardından model referanslı adaptif kontrol, kazanç ayarlama ve model referanslı adaptif kontrol için kullanılan referans modellere dair bilgi sunulmuştur.

Bölüm 5'te primer frekans kontrolü etkili aktif güç kontrolü için model referanslı adaptif kontrolcünün geliştirildiği Seyhan I HES'e ait proje bilgisi verilmiştir. Seyhan I HES için oluşturulan lineer olmayan santral modelinin temel aldığı varsayımlar ve ayrıntılar sıralanmıştır. Model doğrulama çalışmalarının ardından Seyhan I HES için geliştirilen adaptif kontrolcünün tasarım ayrıntıları açıklanmıştır. Seyhan I HES için yapılan simülasyonlar, lineer model ile yapılan kararlılık analizi ve bulunan sonuçların anlatımı ile bölüm sonlandırılmıştır.

Bölüm 6'da ise senkronizasyon öncesi hız kontrolünün için kazanç ayarlamalı ve model referanslı adaptif kontrolcü geliştirilen Gezende HES'e dair santral bilgisi başlangıçta sunulmuştur. Gezende HES lineer olmayan santral modelinin varsayımları ve temellerinin sıralanmasının ardından Gezende HES santral modelinin doğrulama çalışmaları anlatılmıştır. Gezende HES için geliştirilen adaptif kontrolcünün ayrıntıları sunulmuştur. Gezende HES için yapılan simülasyonlar ve santralde saha testleri bölüm sonunda verilmiştir.

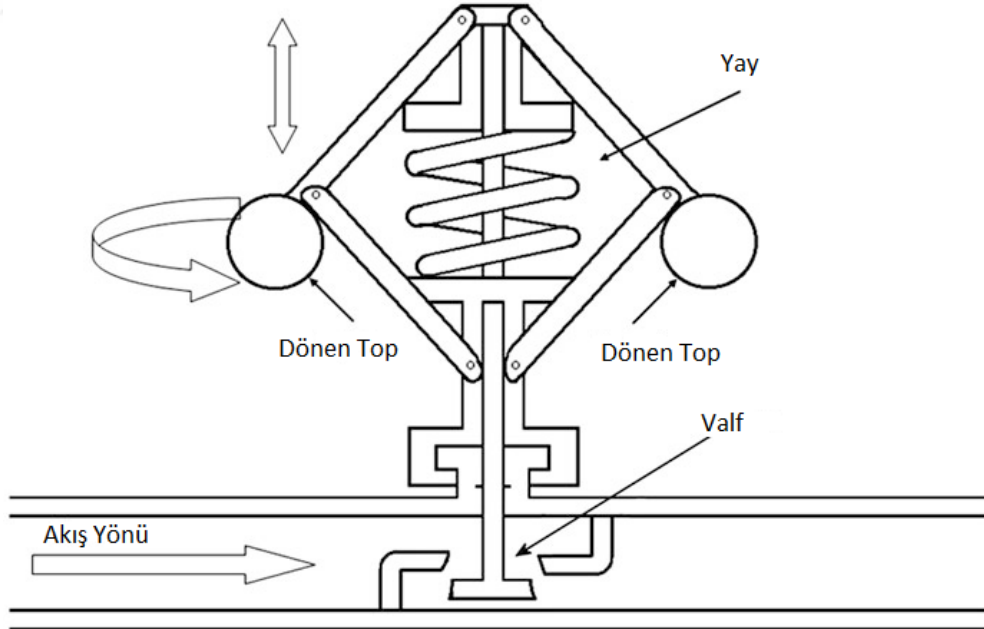
Bölüm 7'de ise genel sonuçlar, çıkarımlar ve muhtemel gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.



2. HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN KONTROLÜ

2.1 Hız Regülatörlerinin Tarihsel Gelişimi

Şekil 2.1’de gösterilen uçan top (flyball) mekanizması (Watt regülatörü veya merkezkaç hız regülatörü) 1800’lü yılların ortasından itibaren hidrolik türbinlerin kontrolü için kullanılmaya başlanmıştır. Uçan topların dönme hızı türbin hızı ile orantılıdır. Bu tip kontrolde ünitenin hızı arttıkça uçan topu oluşturan ağırlık merkezci kuvveti sağlayacak seviyeye kadar yukarıya doğru kalkar. Bu yukarı yönlü hareket merkezi pistonu yukarı kaldırmakta ve bu şekilde çarka giren suyu kısımaktadır. Bu şekilde hız regülasyonu gerçekleşmektedir. Uçan top mekanizması yükteki değişikliğin doğrudan türbin hızında görüleceği izole moddaki çalışma için uygundur.

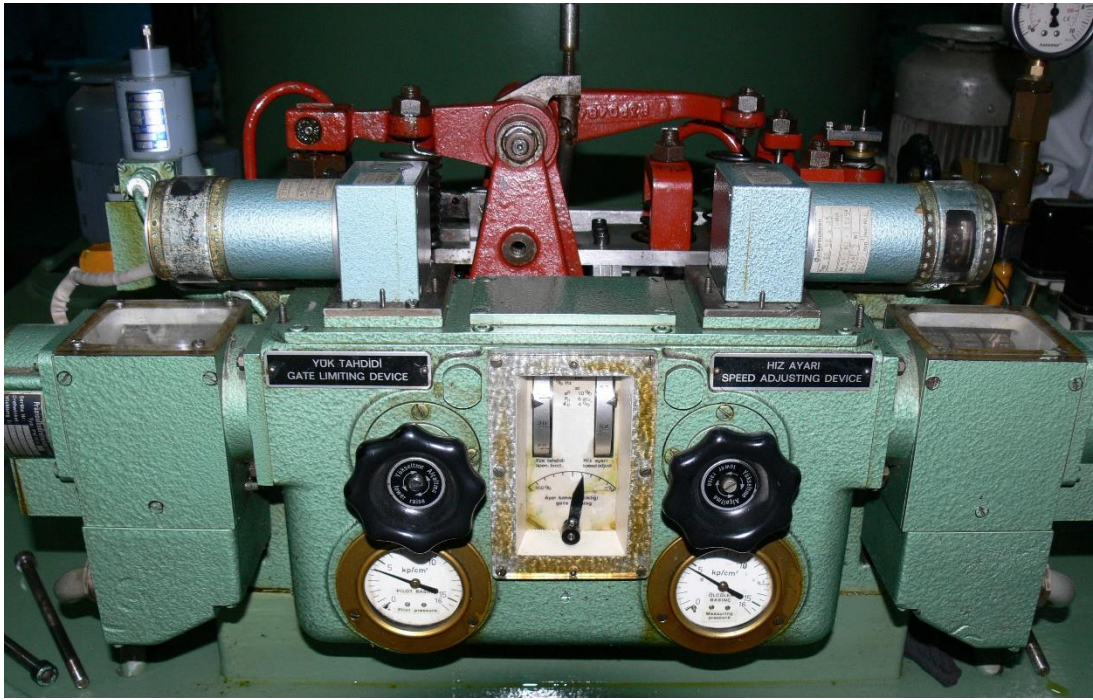


Şekil 2.1 : Uçan top kontrolü [5].

Günümüzde normal şebeke çalışması esnasında türbin hızı ve frekans neredeyse sabit kaldığı için yük değişimi için bu tip bir hız regülatörü kullanılamaz. Buna ek olarak, bu tip bir mekanizma oransal kontrol yaptığı için, kalıcı durumdaki hataların

giderilmesi için kullanılamaz. Herhangi bir yük değişiminde, bir başka deyişle türbin hızı değişiminde, anma hızına dönüş sistemin dinamikleri sebebiyle yavaş olmaktadır.

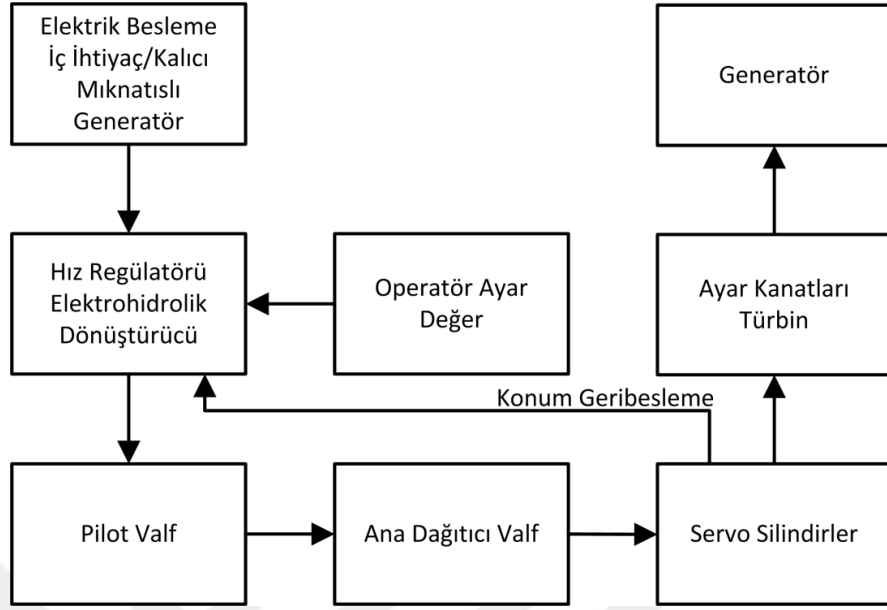
Mekanik hız regülatörleri uçan top mekanizmasının bir türevidir. Uçan top mekanizmasından farkı ise dış kaynaklı bir kuvvet ile desteklenen bir eyleyici bulundurmasıdır. Önceleri türbinden desteklenen eyleyici daha sonra hidrolik yağlı sistemlerle desteklenmeye başlanmıştır. Servomekanizmaların geliştirilmesiyle birlikte, ayar kanatları, mekanik hız regülatörü ve daha sonra elektrohidrolik hız regülatörleri (Resim 2.1) ile kontrol edilmiştir.



Resim 2.1 : Örnek elektrohidrolik hız regülatörü.

Elektrohidrolik hız regülatörünün çalışma şekli Şekil 2.2’de gösterilmiştir. Beslemesi genel olarak türbin şaftına bağlı kalıcı mıknatıslı generatör tarafından sağlanan ve bu sayede türbin döndüğü sürece enerjili olacağı garanti altına alınan elektrohidrolik dönüştürücü konum geri beslemesi ve operatör tarafından verilen hedef değere göre pilot valf üzerinden ana dağıtıcı valfi kontrol eder. Elektrohidrolik dönüştürücünün tek başına kapasitesi servo silindir içine gönderilen basınçlı yağı regüle etmeye yetmeyeceği için araya bir pilot valf konmuştur. Ana dağıtıcı valfin ilettiği hidrolik güç sayesinde servo silindirler hareket ettirilir. Servo silindirlerin hareketi ayar

kanatlarının konumunu değiştirir. Bu değişim trbın içine giren suyun miktarını ayarlar. Hidrolik enerjinin kaynağı basınçlı yağ sistemidir.



şekil 2.2 : Elektrohidrolik hız regülatörü çalışma şeması.

Elektrohidrolik dönüştürücülü hız regülatörlerinde kontrolcü olarak devre kartları (printed circuit board-PCB) kullanılmaktadır. Resim 2.2'de bir rneği gösterilen bu tip kontrolcüde yer alan kartlar bir pano içinde yuvalarına takılı olarak çalışmaktadır. Analog kontrolcüde her bir işlev için hız ölçüm kartı gibi bir kart bulunur. Kontrolcde PID kontrolcü işlevleri bulunur. Kontrolcünün üzerinde yer alan butonlar vasıtası ile bu parametreler geniş bir ölçekte ayarlanabilir.

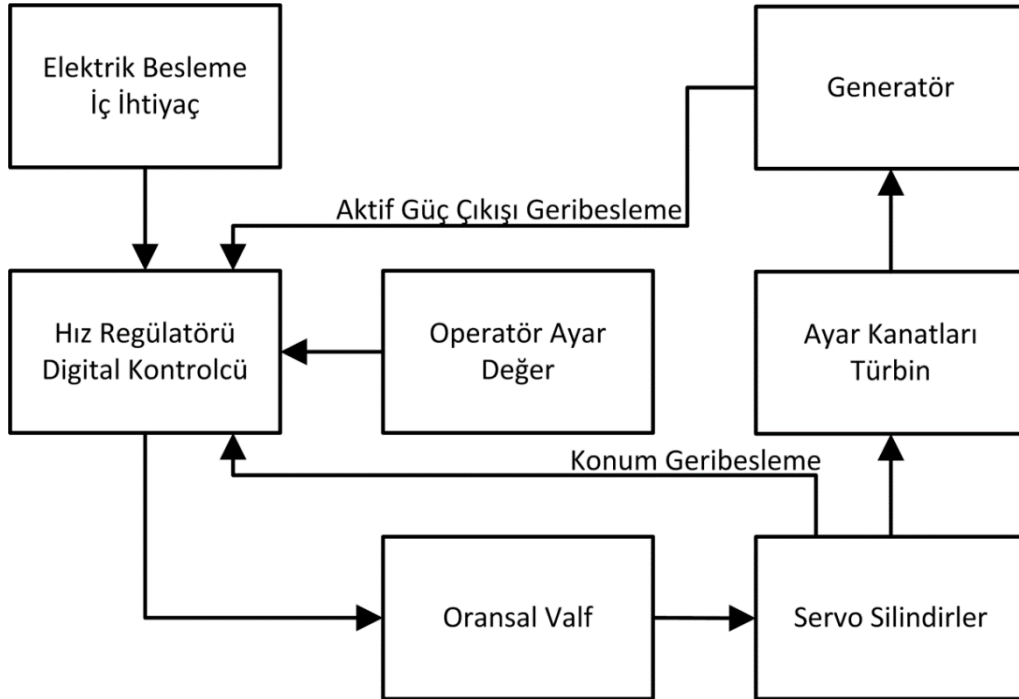


Resim 2.2 : rnek analog hız regülatörü kontrolcüsü.



Resim 2.3 : Örnek digital hız regülatörü.

Hız regülatörleri için güncel uygulama digital tip hız regülatörlerdir (Resim 2.3). Genellikle raf ürünü olan programlanabilir kontrolcü, giriş-çıkış sinyal modülleri, enerji analizörleri, yüksek frekanslı sayıcı gibi modüller digital hız regülatöründe yer alır. Bu tip hız regülatörlerinde klasik PI kontrolcü ve bazı durumlarda modern kontrol yaklaşımları bulunur [6].



Şekil 2.3 : Digital hız regülatörü çalışma şeması.

Digital tip hız regülatörünün çalışma şeması Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Bu sistemin elektrohidrolik dönüştürücülü hız regülatöründen farkı, kontrolcünün doğrudan oransal valfi ve servo silindire giden basınçlı yağı kontrol etmesidir. Digital hız regülatörlerinin hesap ve işlem kapasitesi analog kartlı hız regülatörlerine nazaran çok daha fazladır. Yedekli kaynaklarla iç ihtiyaç sistemi üzerinden DC beslenen hız regülatörü operatörden hedef değer ve servo silindirlerden konum geri beslemesini alır. Digital kontrolcü bu geri beslemelere ek olarak aktif güç çıkışı ve türbin hızını da geri besleme olarak alır. Bu sayede digital kontrolcü ile açıklık kontrolünün yanı sıra aktif güç kontrolü yapmak mümkün olmaktadır. Digital kontrolcü analog çıkış sinyalleri vasıtasıyla oransal valfi kontrol eder. Oransal valfin yönlendirdiği basınçlı yağ servo silindirlerin açma veya kapama odalarını doldurarak pistonun, dolayısıyla ayar kanatlarının hareket etmesini sağlamaktadır.

Digital kontrolcüde bulunan kontrol yaklaşımları incelendiğinde klasik kontrol tarafında genel olarak PI kontrolcünün kararlılık analizleri ve parametrelerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [7]-[12]. Modern kontrol çalışmaları açısından bakılınca lineer olmayan, optimal ve gürbüz (robust) kontrolcü geliştirme çabaları olduğu görülmektedir. Kendi kendini ayarlayan (self-tuning) güç sistemi kararlılık sağlayıcı (power system stabilizer) bir sistem kuadratik performans endeksi ile tasarlanmıştır [13]. Bir HES ünitesindeki hız regülatörü performansının eniyilenmesi için genetik algoritma kullanılmıştır [14]. Hız regülatörü tasarımında sinir ağı kullanılarak PI parametrelerinin belirlenmesi [15]'te sağlanmıştır. Bu yöntem [16], [17]'te izole bir güç sistemi için uygulanmıştır. Frekans tepkisi üzerinden hidrolik türbinlerin gürbüz kontrolü [18]'da yapılmıştır. Modern kontrol yaklaşımları bulunmasına karşın, piyasadaki hız regülatörlerinin çoğunda PI kontrolcü bulunmaktadır.

Resim 2.4'te gösterilen hız regülatörünün hidrolik ekipmanı, hidrolik güç ünitesinde yer alır. Bu bölümün amacı ayar kanatlarının hareketi için servo silindirlere iletilmesi gereken hidrolik gücün motor-pompalar yardımıyla oluşturulması ve herhangi bir elektrik kesintisi esnasında hidrolik gücün kesilmemesi için hidrolik akümülatörler yardımıyla depolanmasıdır. Günümüzde hidrolik güç ünitesi için 100-160 bar arası basınç mertebeleri kullanılarak hidrolik ekipmanların boyutları küçültülmüştür. Daha önceki yıllarda üretilen hidrolik hız regülatörlerinde işletme basıncı mertebesi 40-60 bar arasındadır.



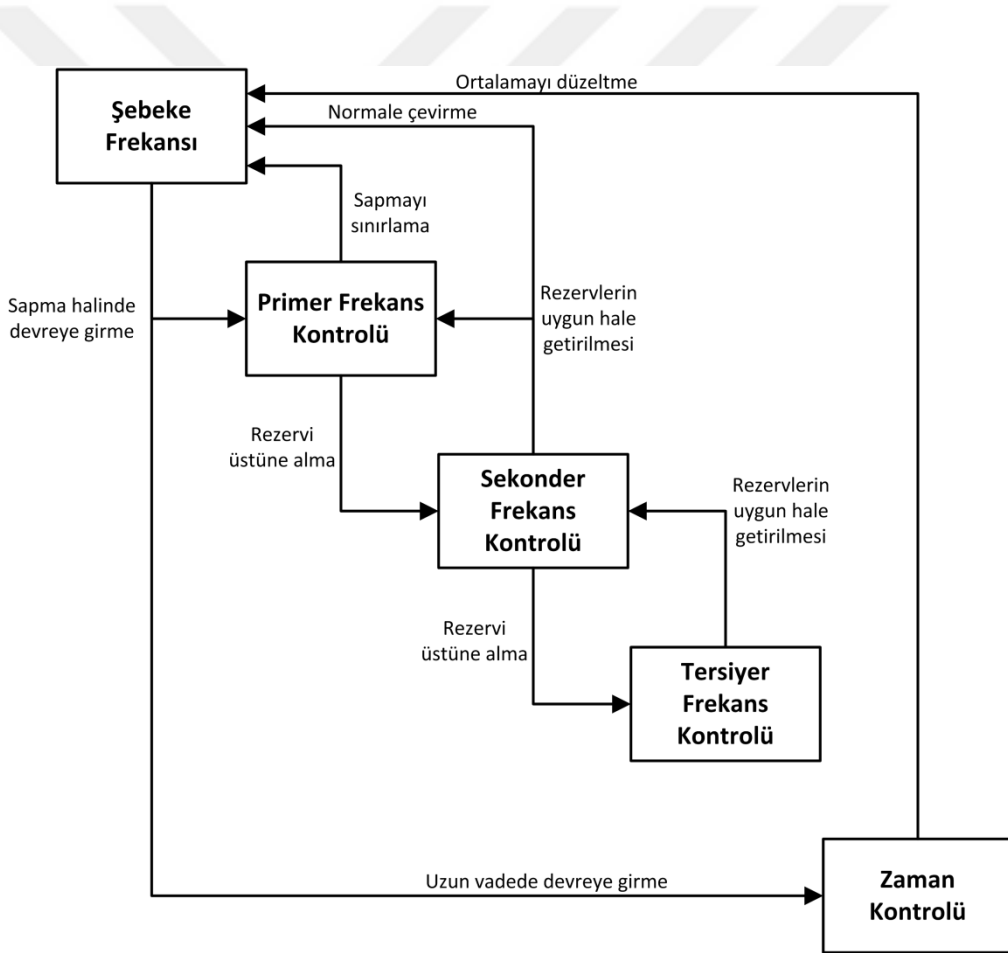
Resim 2.4 : Örnek hidrolik hız regülatörü.

Hız regülatörlerinde iç ihtiyaç beslemesinin kesilmesi durumunda ayar kanatlarının güvenli bir şekilde kapatılması beklenir. İç ihtiyaç sisteminde motor-pompaların beslemesi için AC güç çekilir. AC beslemenin kaybedilmesi durumunda ihtiyaç duyulan hidrolik basınç için hidrolik akümülatörler kullanılır. Motorların devre dışı olması durumunda hidrolik akümülatörlerde depolanan hidrolik enerji kullanılarak ayar kanatlarının kapanması sağlanır. Kontrol gerilim olarak kullanılan DC gerilimin iç ihtiyaç sistemindeki kaynağı elektrikli akülerdir. AC beslemenin kesintiye uğraması işletme şartlarında karşılaşılabilen bir durumken, DC beslemenin kesilmesi kablo kesintisi veya elektrikli akülerin boşalması gibi ciddi bir soruna işaret eder. Kontrol geriliminin kaybı durumunda kontrolcüler ve valflerin beslemesi kaybolmuş olur. Bu durumda hidrolik hız regülatöründe yer alan solenoid valfler DC besleme kesildiğinde ayar kanatlarının kapanmasını sağlar.

2.2 Hız Regülatörü Kontrol Modları

2.2.1 Primer Frekans Kontrolü Etkili Aktif Güç Kontrolü

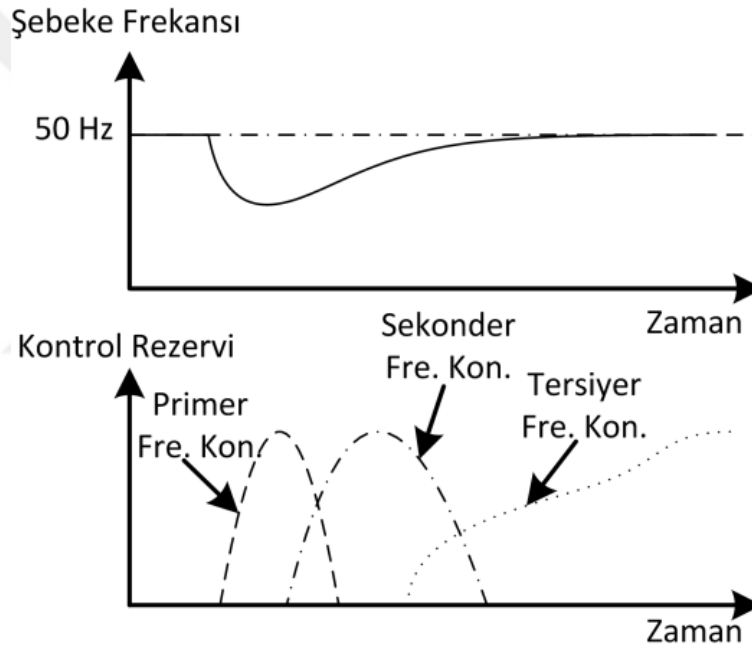
İzole, ada veya bağlaşımlı (enterkonnekte) elektrik şebekelerinde üretilen gücün anlık olarak tüketilmesi gerekmektedir. Sistemin sürekli olarak takip edilip, arz-talep dengesinin kurulması zorunludur. Üretim kaybı (örneğin bir santralin ya da ünitenin arıza sonucu devreden çıkması ya da tüketimin hızlı bir şekilde artması (örneğin bir ark ocağının devreye girmesi) durumunda sistemin dengede tutulabilmesi için iletim sistemi operatörleri tarafından frekansta oluşacak sapmaları durdurmak ve sistem frekansını tekrar anma değerine ulaştırmak için Şekil 2.4'te gösterilen frekans kontrol yöntemleri tanımlanmıştır [4].



Şekil 2.4 : Frekans kontrol yöntemleri [4].

Bir frekans sapması sonrası devreye giren frekans kontrol yöntemlerinin sırasının gösterildiği Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, bu kontrol yöntemlerinden en hızlı bir şekilde etkin olanı, ünitelerde bulunan hız regülatörleri tarafından otomatik bir

şekilde meydana gelen frekans sapmasını durdurmak için kullanılan primer frekans kontrolüdür. Primer frekans kontrolünün saniyeler mertebesinde devreye girmesi sonucu sapması durdurulan şebeke frekansının tekrar anma değerine getirilmesi için dakikalar içinde etkinleştirilen sekonder frekans kontrolü kullanılır. Sekonder frekans kontrolü ile arz-talep arasındaki dengesizlik rezerv ünitelerin devreye alınması veya çıkarılması sonucu ortadan kaldırılır. Eldeki rezervin kullanılması nedeniyle tekrar ihtiyaç duyulması durumuna karşın tersiyer frekans kontrolü ile sekonder frekans kontrolüne katılabilecek rezerv ünite kapasitesi artırılır. Son frekans kontrol yöntemi olan zaman kontrolü ise gerçek zaman ile şebeke senkron zamanının karşılaştırılması ve daha önce bahsedilen üç frekans kontrol yönteminin bir performans ölçütü olarak değerlendirilmesi için kullanılır.

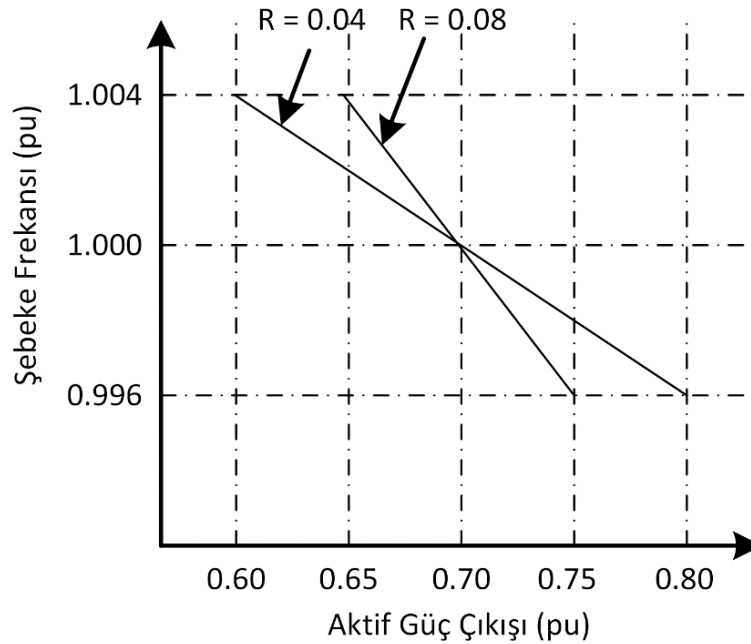


Şekil 2.5 : Frekans sapması sonrası devreye giren yöntemler [4].

Primer frekans kontrolü şebekedeki üretim-tüketim arasındaki dengesizliklerin giderilmesi için devreye giren en hızlı kontrol hareketidir. Ünite tarafından tutulan primer frekans rezervinin tamamının otuz saniye içinde sağlanması ve onbeş dakika boyunca kararlı bir şekilde devam ettirilmesi beklenmektedir. Primer frekans kontrolüne katılan tüm üniteler, şebeke frekansındaki sapmanın işaretine göre otomatik olarak aktif güç çıkışını artırır ya da azaltır. Sağlanan aktif güç çıkışının miktarı, primer frekans kontrolüne katılan tüm ünitelerin şebeke frekans sapmasına olan katkılarının koordine edildiği seçili kalıcı hız düşümü değerine göre şekillenir [4], [19], [20].

Şekil 2.6’da farklı kalıcı hız düşümü değerlerine sahip ünitelerin aynı frekans sapmasında aktif güç çıkış değerlerinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Şebeke frekansı değeri anma şebeke frekansına (50 Hz) bölünerek normalize edilerek per unit (pu) yazılmıştır. Benzer şekilde aktif güç çıkış değeri kontrol uygulanan ünitenin anma aktif güç çıkışına bölünerek per unit olarak normalize edilmiştir. Primer frekans kontrolü katkısı için sağlanan aktif güç çıkışındaki değişim miktarı (ΔP), frekans sapmasının büyüklüğü (Δf) ve kalıcı hız düşümü değeri (R) ile orantılıdır. Kalıcı hız düşümü bir ünitenin şebeke frekansında gerçekleşen bir sapma karşısında ne kadar katkı sağlayacağını belirler. Örneğin şebeke frekansında meydana gelen 200 mHz’lik bir düşüş, 0.04 kalıcı hız düşümü değerine sahip bir ünitenin aktif güç çıkışında 0.1 birimlik bir değişime neden olmaktadır. Frekans sapması, kalıcı hız düşümü ve aktif güç çıkışındaki değişim arasındaki ilişki Eşitlik 2.1’de verilmiştir.

$$\Delta f = R \Delta P \quad (2.1)$$

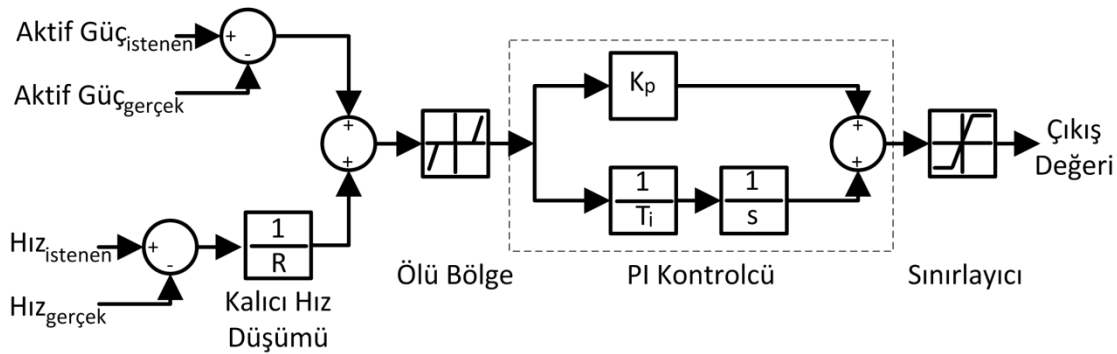


Şekil 2.6 : Farklı kalıcı hız düşümü değerlerine göre ünite aktif güç çıkışındaki değişim.

Talep tarafı ile karşılaştırıldığında, primer frekans kontrolü genellikle santraller tarafından uygulanmaktadır. Bu kontrol yöntemi hız regülatörlerinin kontrolcülerinin içine gömülmektedir. Son dönemdeki bu konu ile ilgili çalışmalar rüzgar enerji

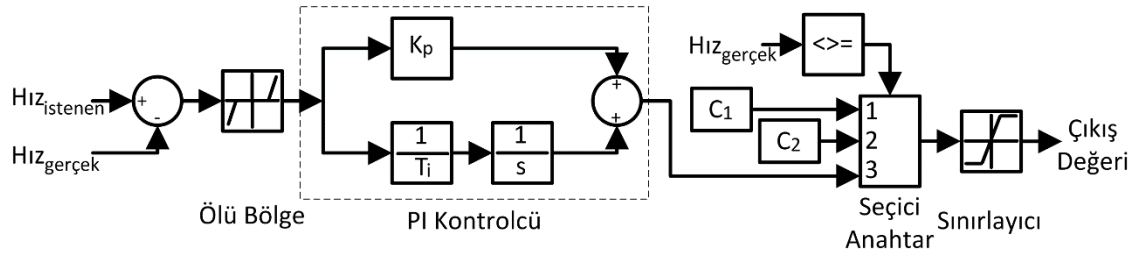
santralleri ve dağıtık üretim üzerine yoğunlaşmıştır. [21] nolu çalışmada, rüzgar enerji santrallerinin sayısının ve kapasitesinin artması durumunda frekans değeri aşırı düştüğünde aktif güç desteği için devreye girmesi planlanan volan sistemlerin primer frekans kontrolü için kullanılması değerlendirilmiştir. Bulanık mantık temelli algoritmaların çift yönlü aktif güç akışını sistem frekansı ve frekans değişim oranına göre kontrolü incelenmiştir. [22] nolu çalışmada yüksek gerilimli DC şebekeye bağlı göreceli küçük AC şebekeler için primer frekans kontrolü uygunluğu araştırılmıştır. [23] nolu çalışmada rüzgar enerji santrallerindeki rotorların atalet kaynaklarının farklı kontrol yaklaşımları ile değerlendirilmesi incelenmiştir. HES'lerdeki primer frekans kontrolü araştırmaları genellikle denge bacalı/denge bacasız HES modellerinin frekans tepkisi, basamak tepkisi ve hedef değer değişimi testlerindeki performansı üzerine yoğunlaşmıştır.

Primer frekans kontrolü genellikle aktif güç çalışma moduna entegre edilir. Şekil 2.7'de gösterilen ve hız regülatörü kontrolcü içinde çalıştırılan bu mod sayesinde belli bir aktif güç çıkışı ayarlamak için kullanılan hız regülatörünün, şebeke frekansında meydana gelen değişikliklere belli bir kalıcı hız düşümü (permanent speed droop) değerine göre tepki vermesi sağlanır. Hız regülatörü aktif güç kontrol döngüsünde, aktif güç ve hıza ait gerçek değerlerle istenen değerler bulunmaktadır. Hız sinyalinde ölü bölge işletmesi devrede ise ayarlanan ölü bölge değerine göre değerlendirilen hız hatası kalıcı hız düşümüne bölünerek aktif güç hata değerine eklenir ve bu hata değeri bir PI kontrolcüye girer. Ölü bölge şebeke frekansındaki sapmaların dikkate alınacağı eşik değerleri belirler. Bu kontrolcünün çıkış değeri, yük sınırlayıcı tarafından oluşturulan maksimum değer ile karşılaştırılarak EHR çıkışını oluşturur. EHR çıkış değeri, Şekil 3.2'de gösterilen ve servo silindir ile ayar kanatlarına giden G_{set} değerini oluşturmaktadır.



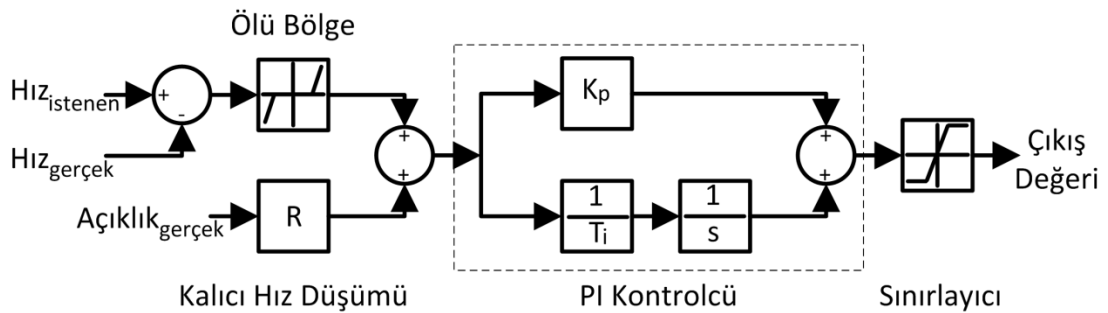
Şekil 2.7 : Primer frekans kontrolü etkili aktif güç kontrol modu.

2.2.2 Hız Kontrolü



Şekil 2.8 : Şebeke senkronizasyonu öncesi hız kontrolü.

Hız regülatörü tarafından gerçekleştirilen hız kontrolü iki farklı uygulama için kullanılır: senkronizasyon öncesi hız kontrolü ve izole-ada modunda şebeke frekansı kontrolü. İlk kullanımında, hız kontrolü ünite devreye alınırken senkronizasyon öncesi türbin hızının şebeke senkron hızına ulaştırılması ve sabitlenmesi için etkinleştirilir. Senkronizasyon öncesi hız kontrolü, Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Gerçek hız değeri önceden tanımlı eşik değerleri ile karşılaştırılarak açık çevrim veya kapalı çevrim kontrol bir seçici anahtar vasıtasıyla seçilir. Ünite başlatılmak istendiğinde C_1 sabiti ile ünite türbin hızı belli bir hıza kadar getirilir. Ardından C_2 sabiti kullanılarak ünite türbin hızı anma hızının 0.9-0.95’ine oturtulmaya çalışılır. Bunun ardından ise kapalı çevrim kontrole geçilerek ünite türbin hızının anma değerine oturması sağlanır. PI kontrolcüde kullanılan oransal kazanç ve integral zaman sabiti değerleri primer frekans kontrolü etkili aktif güç kontrolündeki katsayılarından farklı olmak zorundadır, çünkü şebeke senkronizasyonu henüz yapılmadığı için senkron generatörün mekanik ataleti de türbin hızını etkilemektedir. Şekil 2.8 ve Şekil 2.9’da sınırlayıcı sonrası oluşturulan EHR çıkış değeri, Şekil 3.2’de gösterilen ve servo silindir ile ayar kanatlarına giden G_{set} değerini oluşturmaktadır.

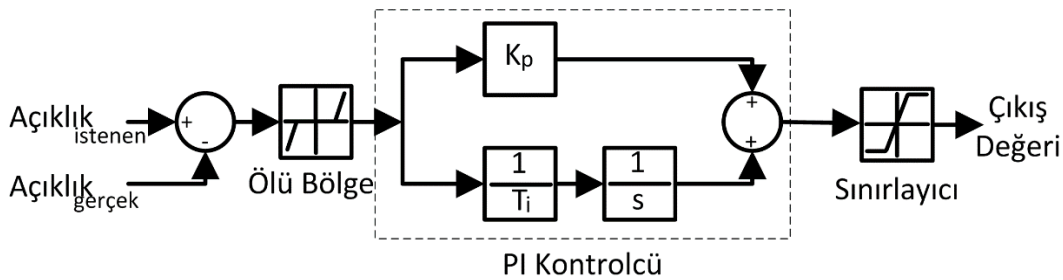


Şekil 2.9 : İzole-ada koşullarında hız kontrolü.

Hız kontrolünün kullanıldığı ikinci uygulama ise izole (tek bir ünitenin yükü beslediği işletme hali) ve ada (az sayıda ünitenin yükü beslediği işletme hali) koşullarında şebeke frekansını tutması için hız regülatörünün hız kontrolüne otomatik olarak geçmesi ya da tercihli bir şekilde geçirilmesi durumudur. İzole veya ada modu bağlantı kurulan bir şebeke olmadığını ya da oluşturulan şebekenin çok küçük bir şebeke olduğunu tanımlar. Bu yüzden üretim veya tüketimde yaşanan küçük değişiklikler kendisini frekans sapması olarak gösterir. Bağlısımlı (enterkonnekte) şebekede ise üniteye ya da yükte yaşanan değişikliklerin etkisi başka ünite veya yükte yaşanan ters değişikliklerle ortadan kaldırılır. Bu sayede şebeke ne kadar büyükse şebeke frekansındaki sapma o kadar küçük olacaktır. Şekil 2.9'da gösterilen izole-ada modu için oluşturulan hız kontrolünde istenen hızda meydana gelen bir sapma olması durumunda hız regülatörü bu sapmayı ayar kanatlarındaki açıklığı değiştirerek gidermeye çalışır. Ayar kanat açıklığı kontrol döngüsüne kalıcı hız düşümü üzerinden katılır. Bu modda aktif güç çıkışı yerine ayar kanat açıklığı kullanılmasının sebebi, izole veya ada modunda aktif güç çıkışında meydana gelecek dalgalanmaların kontrol döngüsüne dahil edilmek istenmemesidir.

2.2.3 Ayar Kanat Açıklığı Kontrolü

Ayar kanat açıklığı kontrolü, türbin girişinde herhangi bir nedenden dolayı basınç dalgalanması olması durumunda hız regülatörünün aktif güç regülasyonu yapamaması nedeniyle kullanılır. Ayar kanat açıklığı kontrol modu etkinken, hız regülatörü ayar kanat açıklığını operatör tarafından verilen hedef değerde sabit tutar. Bu arada düşüdeki azalma nedeniyle ortaya çıkan aktif güç azalması dikkate alınmaz. Önceki kontrol modlarında şebekedeki değişimler veya hidrolik dalgalanmalar nedeniyle hız regülatörü ayar kanat açıklığını regüle ederek hedef değeri yakalamaya çalışırken, bu kontrol modunda hedef ayar kanat açıklığını sağlamaya çalışır. Bu durum ünitenin stabil ve salınımsız çalışmasını sağlar.



Şekil 2.10 : Açıklık kontrolü.

Şekil 2.10’da gösterilen açıklık kontrolü modunda istenen açıklık ve mevcut açıklık arasındaki fark bir PI kontrolcüden geçerek oransal vanaya hedef değer olarak gitmektedir. Sınırlayıcı sonrası oluşturulan EHR çıkış değeri, Şekil 3.2’de gösterilen ve servo silindir ile ayar kanatlarına giden G_{set} değerini oluşturmaktadır.

2.3 Hız Regülatörü Testleri ve İlgili Standartlar

Hız regülatörlerinin saha kurulumlarının ardından yapılan test çalışmaları genel olarak üç bölüme ayrılır:

1- Kuru Testler

Kuru testler türbinden su geçişi ve şebeke bağlantısı olmadığı durumda yapılan testleri kapsar. Bu testler hız regülatörü sistemine ait bağlantılar tamamlandıktan sonra yapılan sinyal testleri ile başlar. Sinyal testlerinin tamamlanmasının ardından hidrolik güç ünitesinin basınçlandırılması ve servo silindirlerin hareket ettirilerek ayar kanatlarının boşa açılması ve kapatılması ile tamamlanır. Servo silindir hareketinin hem normal çalışma koşullarında hem de acil kapama koşullarında test edilmesi çok önemlidir. Hidrolik güç ünitesinde yer alan kısma valflerinin kontrolü ve ayarı kuru testlerde yapılması gereken en önemli testlerdir.

2- Yüksüz Testler

Yüksüz testler türbinden suyun geçirildiği ancak şebeke bağlantısının yapılmadığı testleri kapsar. Ayar kanatları ufak artırımlarla açılarak türbinin ilk kez dönmesinin sağlanması, hız ölçüm sisteminin doğru çalışmasının kontrol edilmesi, türbin hızının anma hızına kadar çıkarılması ve anma hızında kararlı bir şekilde çalışmasının gözlemlenmesi, anma hızında çalışırken acil kapama testlerinin yapılması yüksüz testlere dahildir.

3- Yükle Yapılan Testler

Yükle yapılan testler, türbinden suyun geçtiği ve ünitenin şebekeye bağlı olarak yapılan testleri kapsar. Ünitenin şebekeye bağlı olması türbin hızının şebeke hızında sabit kalmasını sağlar. Yüksüz testler ile anma hızına ulaşması test edilen ünite senkronizasyon sistemi vasıtası ile ünite kesicisi kapatılarak şebekeye bağlanır. Ünitenin yük olarak anma aktif güç değerinin % 25, %

50, % 75 ve % 100'üne ulaşması test edilir. Her bir kademede kararlı çalışma görüldüğü zaman acil kapama yaptırılır. Yük atma testleri de denilen bu testler esnasında türbin hızı, test yapılan türbin tipi, özgül hızı ve çalışma noktasına bağlı olarak anma hızının 1.6 katına kadar çıkabilir. Yük atma testleri esnasında, hız regülatörünün ayar kanatlarını kapatma hızı cebri borudaki geçici rejim basınç dalgalanmasının büyüklüğünü ve dönen parçaların gördüğü aşırı hızın miktarını belirler. Bu sebeple bu testler kademe kademe yapılması önemlidir. Diğer yandan yük alma testleri esnasında hız regülatörü kontrolcüsünün parametrelerinin ince ayar çalışmaları yapılır.

Üstte bahsedilen testlerin ve hız regülatörüne dair terminolojinin tanımlandığı standartlar aşağıda özetlenmiştir:

- ASME-PTC 29-2005 Speed-Governing Systems for Hydraulic Turbine-Generator Units

Bu standartta testlerin tanımı, testler için nasıl hazırlık yapılacağı, ölçüm yöntemleri ve araçları, performans ve işletme testlerinin işlenmesi ve raporlanmasına dair bilgiler yer almaktadır.

- IEC 61362:2012 Guide to Specification of Hydraulic Turbine Governing Systems

Bu standartta hız regülatörü kontrol yaklaşımları, hız regülatörü bileşenleri, performans ölçütleri, özellikle PID kontrolcülere ilişkin uygulamalar, acil ve hızlı kapama esasları, vb. bilgiler bulunmaktadır.

- IEEE 1207 IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units

Bu standartta hız regülatörü işlevleri ve terminolojisi, bir hız regülatörünü oluşturan bileşenler, ekipman ve performans isterleri, fabrika kabul ve saha kabul testleri, üretici tarafından sağlanması beklenen bilgi ve veri, vb. içerik yer almaktadır.

- IEC 60308 – Hydraulic Turbine – Testing of Control Systems

Bu standart özellikle hız regülatörü testlerine yoğunlaşmıştır. Hız regülatörüne dair tanım ve terimler listelendikten sonra hız regülatörünü oluşturan alt sistemler açıklanmıştır.

3. MODELLEME VE SİMÜLASYON

3.1 Literatür Özeti

Hidroelektrik santral modelleri lineer olanlar ve lineer olmayanlar şeklinde iki ana gruba bölünebilir. Lineer modeller küçük sinyal analizi kullanılarak bir çalışma noktası üzerinde çalışmak için kullanılır. Lineer modellerin yetersiz olduğu durumlarda, başlangıçtan yük atmaya kadar çeşitli işletim senaryolarını simule etmek için lineer modellerin yetersiz kalmasında dolayı lineer olmayan modeller kullanılır. [25]-[29] nolu çalışmalarda lineer modeller aktif güç çıkışına odaklanan çalışmalar için kullanılmıştır. [25] nolu çalışmada sadeleştirilmiş bir lineer model ile bulanık mantık kontrolcü ile PI kontrolcü performansı karşılaştırılmıştır. Sadeleştirilmiş model kullanılması ve kolay uygulama önerilen uygulamanın getirisi olarak verilirken, saha testi ve model doğrulama yapılmamıştır. [26] nolu çalışmada kontrol ve otomasyon sistemi ile etkileşimi olan veri toplama kartlı bir deneysel düzenek kurulmuştur. Aşım ve oturma zamanı göz önüne alınarak PI kontrolcü ve kazanç ayarlamalı kontrolü lineer hidroelektrik santral modeli kullanılarak karşılaştırılmıştır. Herhangi bir saha testi veya doğrulama çalışması yapılmamıştır. [27] nolu çalışmada senkron generatör, türbin ve servo silindir içeren hidroelektrik santral lineer modeli kullanılarak PI kontrolcü ve sinir ağları kontrolcüsü performansları karşılaştırılmıştır. Lineer türbin modelinin yanında, [28] nolu çalışmada denge bacası olmayan ve inelastik su yoluna sahip hız regülatörü sistemleri açıklanmıştır. [29] nolu çalışma su yolunda elastikiyet göz önüne alınarak oluşturulan lineer bir model ile yük atma esnasında mekanik hız regülatörlerine göre geliştirilmiş regülasyon değerlerine sahip bir lead-lag hız regülatörü önermektedir. Lineer olmayan modeller arasında, [30] nolu çalışmada izole mod çalışması incelemesi için lineer olmayan model kullanılmıştır. Bu çalışmada saha testi veya model doğrulaması yapılmamıştır. [31] nolu çalışmada, doğrulaması yapılmayan lineer olmayan modele anma gücündeki bir başlangıç koşulu varsayımı ile çoklu modellenmiş adaptif kontrol yaklaşımı

geliştirilmiştir. Kaskat şekilde kurulu bulunan yedi adet HES'in verimli bir şekilde kontrolü için eşgüdümlü kontrol yaklaşımı [32] nolu çalışmada tanımlanmıştır. Bu çalışmada üretim, su hareketi ve kuyruksuyu karakteristikleri modellenmiştir. [33] nolu çalışmada denge bacasındaki kesit daralması etkisinin araştırılması için HES hidrolik modeli kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda hız regülatörü kararlılığının kesit daralması varlığında iyileştiği görülmüştür. [34] nolu çalışmada açıl momentum korunumu gözetilerek alternatif bir hidrolik türbin modeli tanımlanmıştır. Francis türbinlerdeki güç salınımlarının çözülmesi için hidrolik, elektrikli ve kontrol yaklaşımlarının incelenmesi için yüksek dereceli HES modeli [35] nolu çalışmada kurulmuştur. [36] nolu çalışmada vorteks varlığı algılaması için gözlem sistemi modeli oluşturulmuştur. Bir simülasyon aracı geliştirmek amacıyla, [37] nolu çalışmada yüksek düşülü, uzun cebri borulu ve Francis türbinli bir HES modeli hazırlanmıştır. [38] nolu çalışmada lineer olmayan bir santral modeli oluşturulması için farklı yük seviyelerini temsil eden modeller birleştirilmiştir. Kaplan türbin için inelastik suyolu ve denge bacası olmayan Kaplan türbinli bir HES için lineer olmayan model [39] nolu çalışmadan geliştirilmiştir.

Çizelge 3.1 : Yayınların model içeriğine göre sınıflandırılması.

Denge Bacalı	Denge Bacasız	Elastik Cebri Boru	İnelastik Cebri Boru	Ortak Cebri Boru Etkisi	Lineer	Lineer Olmayan
[5], [33], [35],[37] [40],[42]	[5],[25] [26],[27] [28],[29] [30],[31] [34],[38] [39],[40] [41],[42] [43],[44] [46]	[5],[29] [34],[35] [40],[42] [43],[44]	[5],[25] [26],[27] [28],[30] [31],[33] [37],[38] [39],[40] [41],[42] [46]	[5], [40]	[5] [25] [26] [27] [28] [29] [40] [41] [42] [46]	[5], [30] [31],[33] [34],[35] [37],[38] [39],[40] [41],[42] [43],[44]

Literatürde bazı yayınlarda lineer ve lineer olmayan modeller birlikte bulunmaktadır. [40] nolu yayında denge bacalı ve inelastik suyollu ile elastik suyollu lineer olmayan model, lineer model ve ortak cebri boru etkisi içeren modeller açıklanmıştır. [41] nolu çalışmada saha test prosedürleri ile birlikte inelastik suyollu lineer olmayan model ve lineer modeller anlatılmıştır. [5] ve [42] nolu çalışmalarda model çeşitlerinin tamamı anlatılmıştır; buna ek olarak, [5] nolu çalışmada ortak cebri boru modeli yer almaktadır. Parametre belirleme çalışmaları için bazı modellerin

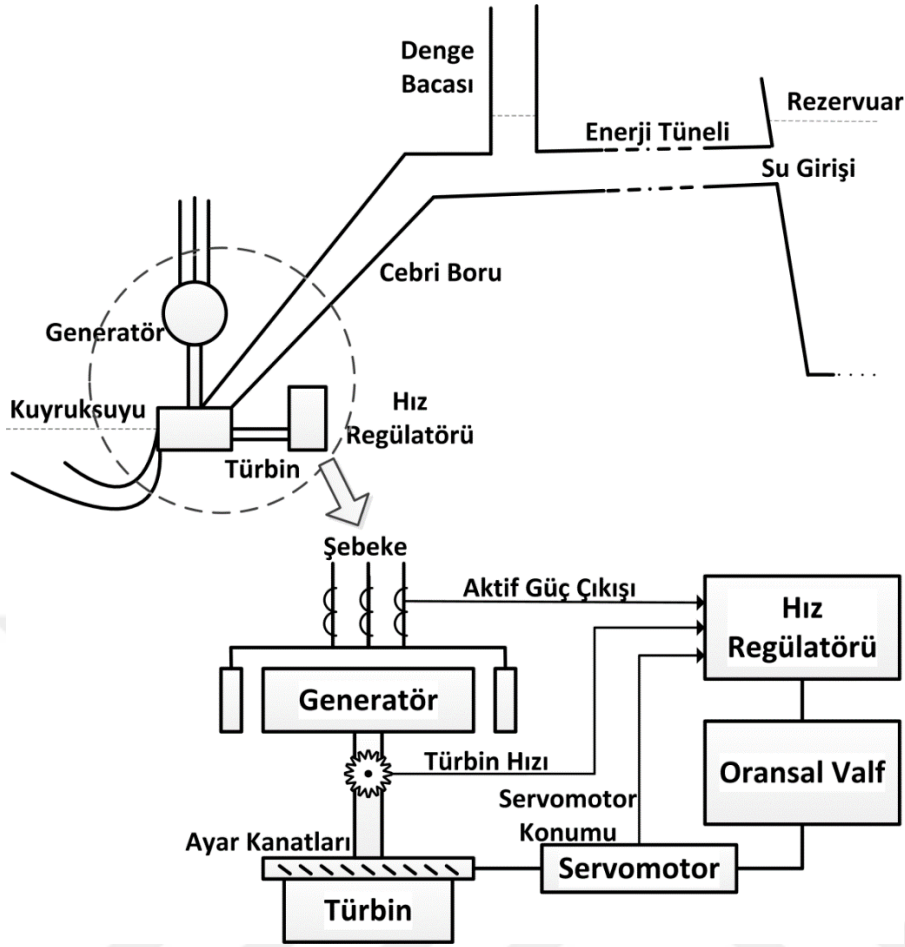
kullanıldığı yayınlar mevcuttur. [43] nolu çalışmada parametre belirlenmesi için saha verileri çeşitli santrallerden toplanan Pelton türbinli HES modelleri anlatılmaktadır. Bilinmeyen parametrelerin belirlenmesi için parametre belirleme yöntemlerinde çözümlenmek üzere üç farklı santrale ait parametre setine sahip HES modeli [44] nolu çalışmada oluşturulmuştur. [45] nolu çalışmada sahadan toplanan veri ile senkron generatörün parametrelerinin belirlenmesi için modele dayanan bir yazılım geliştirilmiştir. [46] nolu çalışmada gri-kutu (grey-box) sistem belirleme çalışmaları için inelastik suyu denge bacası olmayan bir HES modeli kurulmuştur.

Çizelge 3.1'de literatür araştırmasında anlatılan yayınların sınıflandırması yapılmıştır. Çalışmaların çoğunda denge bacası modellenmesi yapılmadığı görülmektedir. Ortak cebri boru etkisi ise nadiren dikkate alınmaktadır.

Hız regülatörü tasarımı ve geliştirilmesinde lineer ve lineer olmayan HES matematiksel modelleri kullanılabilir. Hız regülatöründeki kontrol parametreleri geleneksel olarak lineer modeller kullanılarak belirlenir. Lineer model kullanımı yük alma/atmada ve türbin hızında meydana gelen değişimler küçük olduğunda uygundur. Genel bir kural olarak, yük alma/atmadaki % 10'dan küçük değişimler ile türbin hızındaki % 1'den küçük değişimlerin modellenmesi için lineer modeller kullanılır [47].

Buna ek olarak, izole mod çalışma (sistemde başka bir generatör yokken), ada modu çalışma (sistemde birkaç tane generatör varken), yük alma, yük atma, ünitenin devreye alınması veya devreden çıkarılması esnasında yapılan türbin hız ayarlaması sırasında, ünite aktif güç çıkışı veya türbin hızında kayda değer değişiklikler meydana gelir. Bu yüzden hız regülatörü ve ilgili sistemlerin lineer olmayan modeller kullanılarak simüle edilmesi gerekmektedir. Lineer olmayan HES modelleri suyun sıkıştırılabilirliği etkisini de içerir. Bu etkinin bir yansıması olarak yük atma esnasında cebri boruda hidrolik basınç salınımları ve ilerleyen dalga (propagating wave) oluşur [48].

Diğer yandan çeşitli çalışma modlarında kontrolcünün kararlılık analizleri lineer santral modeli kullanılarak yapılmaktadır. Bu sebeple bu çalışmada hem lineer olmayan model hem de lineer model anlatımı yapılacaktır.



Şekil 3.1 : HES genel yerleşim.

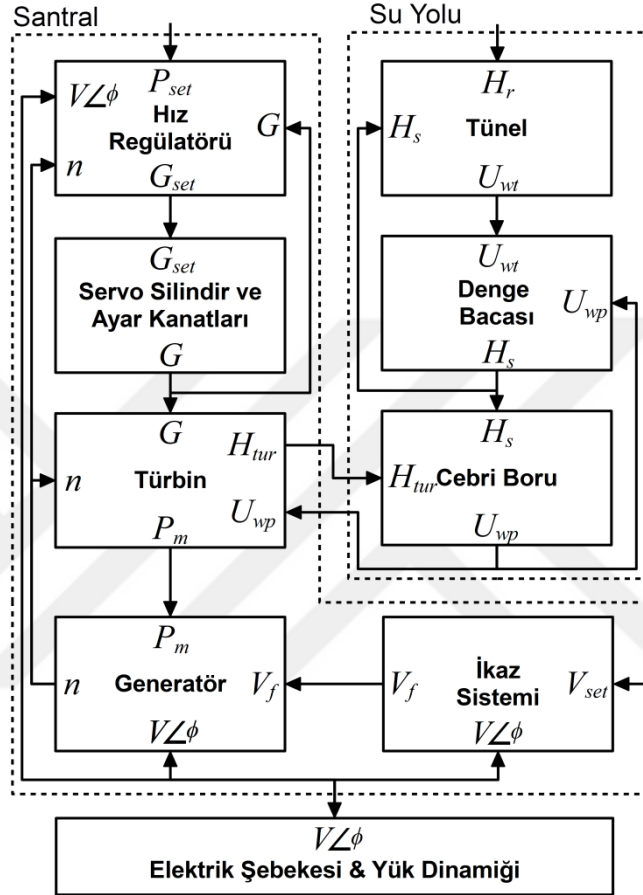
3.2 Hidroelektrik Santralin Doğrusal Olmayan Modeli

Bu bölümde oluşturulan genel HES modeli ünitenin devreye alınmasından yük atmaya, yüksüz çalışmadan tam yükte çalışmaya, durağan halden kaçma (run-away, ambalman) hızına çıkmaya kadar bütün muhtemel çalışma şartlarını kapsar. Şekil 3.1 HES genel yerleşimini göstermektedir. Su yolu elemanları olan enerji tüneli, denge bacası ve cebri boruya ek olarak hız regülatörü, servo silindir, ayar kanatları, türbin, generatör ve şebeke bileşenleri modellenmektedir. HES modeli içindeki bileşenlerin birbiri ile etkileşimi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Takip eden bölümlerde Francis tip türbine sahip lineer olmayan bir HES modeline ait denklemlerin ayrıntıları yer almaktadır. Bu denklemler ve açıklamaları ilgili kaynaklardan alınmıştır [5], [40], [48]-[50].

Aşağıda ayrıntıları anlatılan bütüncül santral modelinin ünitenin durağan halden aşırı hız durumuna kadarki türbin hızını ve yüksüz halden tam yük haline aktif güç çıkışını kapsayan lineer olmayan HES modeli Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Bu modelde

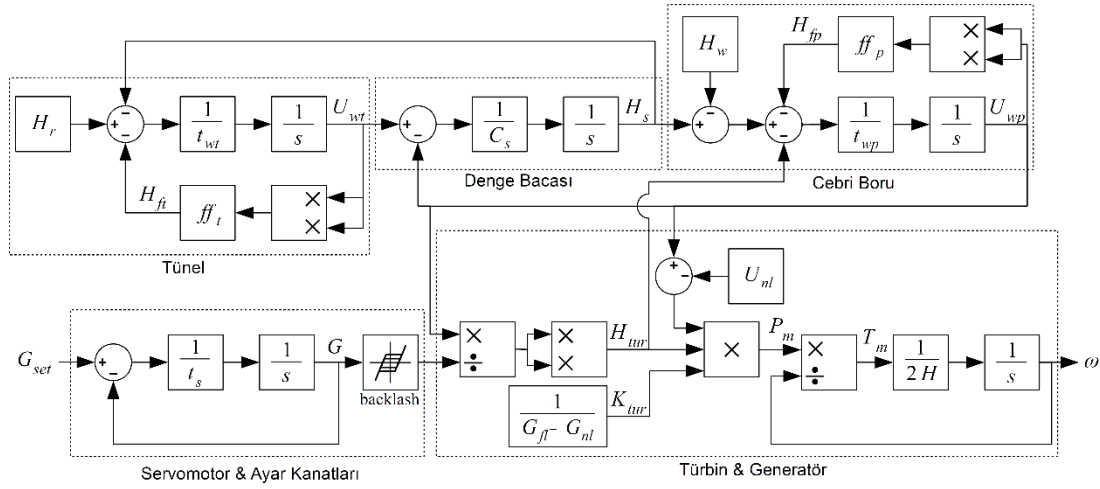
yük, ikaz sistemi, generatör alt sistemlerine yer verilmemiştir. Çünkü bu çalışmada şebeke ile ilgili bir çalışma yapılmamıştır. Ayrıca generatör ve ikaz sistemi zaman sabitleri, hız regülatörü zaman sabitlerine nazaran çok kısa olduğu için generatörün elektriksel tarafı ve ikaz sisteminde gerçekleşen geçici rejim değişiklikleri hız regülatörü çalışmaları için önem arz etmemektedir.



Şekil 3.2 : HES bileşenleri arası etkileşim.

3.2.1 Enerji Tüneli

Enerji tüneli rezervuardan veya su kaynağından düşük basınçlı bir şekilde denge bacasına su iletimi için kullanılır. Enerji tüneli ihtiyaç duyulan santrallere inşa edilir; örneğin Gezende HES'te 8 km uzunluğunda olan enerji tüneli Seyhan I HES'te bulunmamaktadır. Enerji tünelinden geçen suyun hızındaki değişim oranı, enerji tünelindeki net su seviyesi ve su başlama zamanı ile ilişkilidir.



Şekil 3.3 : Lineer olmayan HES modeli.

Enerji tünelineki sürtünme kayıpları (H_{ft}), ve enerji tüneli sürtünme katsayısı (f_t) ile orantılıdır. Enerji tünelineki sürtünme ilişkisi lineer olmayan bir ilişkidir. Enerji tünelineki sürtünme kayıpları Eşitlik 3.1 ile hesaplanır:

$$H_{ft} = f_t U_{wt}^2 \quad (3.1)$$

Enerji tünelineki suyun katı bir kütle olarak düşünüldüğü varsayımı ile Newton'un ikinci hareket yasasına göre su parçacığının hızı ile su seviyesi ilişkilendirilebilir. Su kütlelerine etki eden kuvvet Eşitlik 3.2'de gösterilmiştir.

$$\rho l_t A_t \frac{d\Delta U_{wt}}{dt} = -(H_r - H_s - H_{ft}) \rho g A_t \quad (3.2)$$

Eşitlik 3.2'de ρ su yoğunluğu, l_t enerji tüneli uzunluğu, A_t enerji tüneli kesit alanı, U_{wt} enerji tüneline geçen suyun hızı, H_r göl su seviyesi, H_s denge bacası su seviyesi, H_{ft} enerji tünelineki sürtünmeden dolayı oluşan düşü kaybını ve g yerçekimi ivmesini ifade etmektedir. Bu sembollere ek olarak Eşitlik 3.3'te geçen H_0 anma net düşü değerini ve U_0 ise türbinden geçen suyun anma hızıdır.

Eşitlik 3.2'nin her iki tarafı $\rho A_t g H_0 U_0$ 'ye bölünerek normalize edildiğindeki hali Eşitlik 3.3'te verilmiştir:

$$\frac{l_t U_0}{H_0 g} \frac{dU_{wt}}{dt} = -(H_r - H_s - H_{ft}) \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.4'te verilen su başlama zamanı (su atalet zaman sabiti) suyun anma su seviyesinde kapalı bir boru içinde durağan halden anma hızına ulaşması için geçen süreyi ifade eder.

$$t_{wt} = \frac{l_t U_0}{H_0 g} \quad (3.4)$$

Enerji tüneli gibi parçalı yapılar için su başlama zamanı Eşitlik 3.5'teki gibi bulunur.

$$t_{wt} = \frac{U_0}{H_0 g} \sum l_t \quad (3.5)$$

Özetle, enerji tünelindeki net su seviyesi rezervuar su seviyesinden, denge bacası su seviyesi ile enerji tünelindeki akıştan dolayı ortaya çıkan sürtünme kayıplarının çıkarılması ile bulunur. Denge bacasındaki su seviyesinin artması enerji tünelindeki suyun yavaşlamasına neden olur. Enerji tüneline geçen suyun hızındaki değişim oranı Eşitlik 3.6 ile hesaplanır:

$$\frac{dU_{wt}}{dt} = -\frac{(H_r - H_s - H_{ft})}{t_{wt}} \quad (3.6)$$

3.2.2 Denge Bacası

Geçici hidrolik rejimler ve basınç değişikliklerinin etkisinin azaltılması cebri borunun zarar görmemesi için önemlidir. Bunun için ayar kanatlarının kapatılma hızı düşürülebilir. Ayar kanatları ne kadar yavaş kapatılırsa cebri borudaki su basınç değişimi o kadar az olur. Ancak, ünitenin şebeke ile bağlantısının kopması durumunda, türbine giren mekanik gücün kinetik ve elektrikli güç yerine sadece kinetik güce dönüştürülmesi ile türbinin aşırı hıza veya kaçma hızına ulaşması söz konusu olur. Bu yüzden ayar kanatlarının cebri boruda su darbesi oluşturmayacak kadar yavaş ancak türbinin aşırı hıza gitmesini engelleyecek kadar hızlı kapatılması

önemlidir. Bu durum ayar kanatlarının yavaş bir şekilde kapatılmasına izin vermemektedir.

Diğer bir yöntem ise türbinin su girişine yine elektriki şebeke ile bağlantının kopması durumunda devreye girecek alternatif bir su yolu açmaktır. Basınç boşaltma valfi (pressure relief valve) adı verilen bu düzende ise ünite trip ettiğinde ayar kanatlarının kapatılma hızına olabildiğince yakın bir şekilde basınç boşaltma valfi açılarak cebri borudaki suyun hızının değişmemesi ve türbine giren suyun azaltılarak türbinin aşırı hıza gitmesi engellenir. Göreceli küçük ünitelerde ve uzun cebri borulu sistemlerde basınç boşaltma valfi ekleme yöntemi kullanılır.

Bu konudaki en yaygın yöntem ise bir denge bacası kurulmasıdır. Genellikle enerji tüneli ile cebri boru arasına (bazı nadir örneklerde cebri boru ile türbin arasına) kurulan denge bacası, suyun içinden geçebileceği bir depolama kapasitesi oluşturur. Türbine giren su akışını kararlı hale getiren denge bacasındaki su seviyesi ayar kanat açıklığında meydana gelen değişimlere göre geçici rejimde yükselip alçalar. Örneğin, ayar kanat açıklığının azaltıldığı durumda cebri borudaki suyun hızı bir anda düşmeyeceği için denge bacasındaki suyun seviyesi artar ve bu şekilde cebri boru içinde meydana gelecek basınç dalgalanmalarının enerji tüneline geçişi engellenmiş olur.

Denge bacası, cebri boruda meydana gelebilecek basınç değişimlerini sönmölemek için enerji tüneli ile cebri boru arasına veya cebri boru ile türbin girişi arasına kurulan ek rezervuar olarak düşünülebilir. Küçük ölçekli santrallerde uygulaması pek görülmez. Cebri borudaki akış ani bir şekilde kesildiğinde veya yük azaltıldığında denge bacasındaki su seviyesi yükselir, diğer yandan yük artırıldığında ise denge bacasındaki su seviyesi geçici rejimde azalarak ihtiyaç duyulan suyu sağlar. Denge bacasındaki su seviyesi (H_s), enerji tünelinden gelen suyun hızı (U_{wt}) ile cebri boruya giden suyun hızı (U_{wp}) arasındaki farkın toplamının denge bacası depolama süresi (C_s) orantılı olarak değişir. Denge bacasındaki su seviyesi Eşitlik 3.7 ile gösterilmiştir:

$$H_s = \frac{1}{C_s} \cdot \int (U_{wt} - U_{wp}) \cdot dt \quad (3.7)$$

Denge bacası depolama süresi (C_s), anma su seviyesi (H_{0s}) ile denge bacasının kesit alanının (A_s) çarpımının anma debi değerine (Q_0) bölünmesi ile bulunur. Denge bacası depolama süresi Eşitlik 3.8 ile bulunur:

$$C_s = \frac{A_s H_{0s}}{Q_0} \quad (3.8)$$

3.2.3 Cebri Boru

Cebri boru türbine su taşıyan yüksek basınçlı kapalı kanaldır. Enerji tüneline gelen suyu yine varsa giriş vanası üzerinden türbine taşır. Genel olarak çelikten inşa edilir. Cebri boru içindeki dinamik değişiklikler türbin girişindeki su seviyesini değiştirdiği için ünitenin aktif güç çıkışında değişikliğe neden olur. Bu dinamik değişikliklerin kaynağı: su ataleti, suyun sıkıştırılabilirliği ve cebri boru iç yüzeyi elastisitesidir. Suyun ataleti ayar kanatlarında meydana gelen açıklık değişimlerini arkadan takip ederek suyun hızında değişikliğe neden olur. Ayar kanatları açıldığında cebri borudaki su, ataleti nedeniyle ayar kanatlarındaki yeni açıklık seviyesine uygun su hızına bir anda ulaşamaz. Hatta anlık basınç düşüşü nedeniyle, su akışı kendini yeni koşullara uyumlandırana kadar su hızı düşer. Su hızının azalması ise geçici rejimde aktif güç çıkışında azalmaya neden olur. Bir başka deyişle, ayar kanatlarının hızlı bir şekilde artırılması beklenenin tam tersi bir şekilde geçici rejimde aktif güç çıkışının azalmasına yol açar. Bu nedenle hidroelektrik santraller anlık şebeke ihtiyaçları için kullanılamaz çünkü beklenenin tam tersi yönde bir tepki oluşturur.

Su akışında meydana gelen ani değişimlerin yol açacağı diğer bir etki ise su darbesi olarak adlandırılan ve sudaki basınç ve akışta meydana gelen ilerleyen dalga etkisidir. Özellikle cebri boru uzunluğunun büyük olduğu santrallerde ayar kanatlarının tasarım değerinden hızlı açılması veya kapatılması sonucu oluşan yüksek genlikli su darbesi cebri boruda artı veya eksi yönde basınç dalgaları oluşturarak cebri borunun zarar görmesine neden olabilir.

Cebri boru içinden geçen suyun hızındaki değişim oranı ($\frac{dU_{wp}}{dt}$), denge bacasındaki su seviyesi (H_s), türbin girişindeki su seviyesi (H_{tur}), cebri borudaki sürtünmeden dolayı oluşan seviye kaybı (H_{fp}) ve orta-uzun mertebedeki cebri borularda su akışındaki ani değişimler sonucu ortaya çıkan ilerleyen dalga etkisi (H_w) farkının

cebri boru su başlama zamanına (t_{wp}) bölünmesi ile bulunur. Ayar kanatlarının kapatılması ile türbin giriş seviyesinin artırılması sonucu cebri boru içindeki suyun hızı cebri boru su başlama zamanı ile orantılı bir şekilde azalır. Bu ilişki Eşitlik 3.9'da verilmiştir:

$$\frac{dU_{wp}}{dt} = - \frac{H_s - H_{tur} - H_{fp} - H_w}{t_{wp}} \quad (3.9)$$

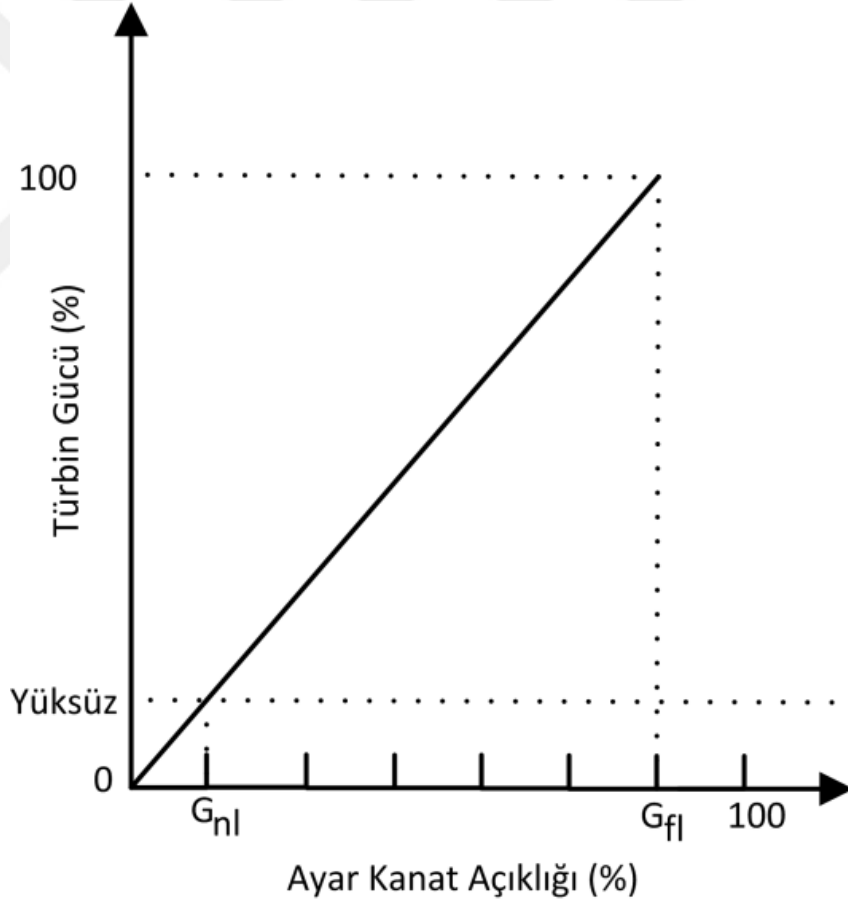
Cebri borudaki sürtünmeden dolayı oluşan seviye kaybı Eşitlik 3.1'in cebri boruya uyarlanması ile bulunur. Cebri borudaki sürtünmeden dolayı oluşan seviye kaybı ilişkisi lineer olmayan bir ilişkidir. Benzer şekilde cebri boru su başlama zamanı Eşitlik 3.4'ün cebri boru parametrelerine göre hesaplanması sonucu bulunmaktadır.

3.2.4 Türbin

Su türbini cebri boru üzerinden gelen suyun türbin çarkının kanatlarına ayar kanatları ile yönlendirilerek sudaki kinetik enerjinin dönel mekanik enerjiye çevrilmesini sağlayan dönel bir makinedir. İtki (örneğin Pelton tip türbin) ve tepki (Francis ve Kaplan tip türbinler) türbini olmak üzere iki ana tipi bulunmaktadır. İtki türbinlerinde sabitlenmiş bir ya da birden fazla iğne yer almaktadır. İğnenin kesit alanının değiştirilmesi ile çarka doğru giden su jetinin debisi ayarlanır. Dönen çarkın kepçelerine değen su içindeki kinetik enerjinin çoğunu kaybetmektedir. İğneden çıkan su jeti hava ile temas eder ve atmosferik basınç görür. Bu yüzden itki tip türbinlerde statik su basıncı atmosfer basıncına eşittir. Yüksek düşü ve düşük debili uygulamalar için itki türbinleri % 90 civarındaki verimi için tercih edilmektedir. Pelton tip türbinlerin hız regülatörleri aktif güç ve hız kontrol çalışma modlarında aktif güç ve türbin hız bilgisini geri besleme olarak kullanır. Hız regülatörlerinin kontrol ettiği değişken ise iğne açıklığıdır. Tepki türbinlerinde ise itki türbinlerinin aksine çarkın tamamı eş basınç görür ve su içindedir. Bu nedenle tepki türbinleri aynı anda daha çok suyun çarka ulaşmasına olanak sağlar. Eğer ana su akış yönü, kısmen veya tamamen türbin dönüş düzleminde ise bu tip türbinlere radyal akışlı türbinler denir. Francis tip türbinler radyal akışlı türbinlerine örnek olarak verilebilir. Francis tip türbinlerde hız regülatörü ayar kanat açıklığını ayarlayarak ilgili çalışma modlarında işletme sağlar. Diğer yandan ana su akışı dönme eksenine paralel ise bu tip türbinlere aksel akışlı türbinler denir. Kaplan ve Propeller tip türbinler aksel

akışlı türbinlere örnek olarak verilebilir. Kaplan tip türbinlerde hız regülatörü ayar kanatlarının açıklığına ek olarak çark açısını da kontrol eder. Hız regülatörleri arasında sadece Kaplan tip türbinlerdeki hız regülatörlerinin performansının verime etkisi vardır. Kullanılacak su türbini, santralin kurulması planlanan düşü ve debi değerlerine göre belirlenir. Yüksek düşü, düşük debili uygulamalarda Pelton tip, düşük düşü, yüksek debili uygulamalarda Kaplan, ortalama düşü, ortalama debi değerlerinde ise Francis tip türbinler tercih edilmektedir [5], [42]. Bu tez kapsamında modellenmesi ve model doğrulaması yapılan türbinler Francis tip türbinlerdir.

Francis tip türbinlerde su ana giriş vanasını geçtikten sonra salyangoz adı verilen ve kesit alanı çevrelediği çarka giren suyun hız şiddetini sabit tutacak şekilde kademeli olarak daraltılan bir su yolundan geçer. Çarkın her zaman su içinde olmasını sağlamak için emme borusunun uç tarafı kuyruksuyu tarafında su altında bırakılır.



Şekil 3.4 : Türbin kazancı katsayısının belirlenmesi.

Türbinin mekanik güç çıkışı (P_m), türbin kazancı (K_{tur}), türbin girişi su seviyesi (H_{tur}) ve türbinden geçen suyun net hızı ($U_{tur} - U_{nl}$) ile orantılıdır. Bir ünitenin yüksüz hali aktif güç çıkışının sıfır olduğu ancak türbin hızının anma değerinde

kararlı bir şekilde tutulduğu halidir. Türbinden geçen suyun hızından türbin anma hızında yüksüz haldeyken ortaya çıkan su hızı çıkartılarak, türbinin dönmesi esnasında ortaya çıkan kayıpların türbin mekanik güç çıkışına etkisi Eşitlik 3.10'daki gibi hesaba katılır. Şebeke senkronizasyonu öncesi hız kontrolünün modellenebilmesi için mekanik tork (T_m) ve dönel hız (ω) ile türbin mekanik güç çıkışı arasındaki ilişki Eşitlik 3.10'da elde edilmiştir.

$$P_m = K_{tur} H_{tur} (U_{tur} - U_{nl}) = T_m \omega \quad (3.10)$$

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi etkin olarak türbinin mekanik güç çıkışı verebilmesi için türbinden geçen suyun en az boşta dönme hızına ulaşması gerekmektedir. Diğer yandan türbin mekanik güç çıkışının tam değere ulaşarak tam yük ile boşta dönme ayar kanat açıklığının yüksüz ve tam yük değerine ölçeklenebilmesi için, tam yükteki ayar kanat açıklığı (G_{fl}) ve boşta dönme esnasındaki ayar kanat açıklığı (G_{nl}) dikkate alınarak Eşitlik 3.11'de elde edilen türbin kazancı (K_{tur}) adı verilen katsayının kullanılmasına ihtiyaç vardır.

$$K_{tur} = \frac{1}{G_{fl} - G_{nl}} \quad (3.11)$$

Cebri borudan geçen suyun hızı ile türbinden geçen suyun hızı kalıcı rejimde birbirine eşittir. Türbinden geçen suyun hızının (U_{tur}), ayar kanat açıklığı (G) ve türbin su seviyesinin (H_{tur}) kare kökü ile ilişkisi Eşitlik 3.12'de verilmiştir.

$$U_{tur} = U_{wp} = G\sqrt{H_{tur}} \quad (3.12)$$

3.2.5 Servo Silindir ve Ayar Kanat Açıklığı

Türbine giren su miktarını regüle eden sistemin adı hız regülatörü sistemidir. Hız regülatörü bir kontrol sistemi, hidrolik güç ünitesi, servo silindirlere oluşur. Salyangozdan çarka giriş esnasında su hız regülatörü tarafından kontrol edilen ayar kanatlarından geçer. Ayar kanatları mafsal ve biyel kolları ile regülasyon çemberine bağlıdır. Bir çubuk yardımı ile regülasyon çemberine bağlanan servo silindirlerin hareketi ayar kanatlarına iletilir. Hız regülatörü kontrolcüsü hidrolik güç ünitesinde

yer alan çeşitli valfleri (oransal valf, solenoid valfler, vb.) kontrol ederek ayar kanatları üzerinden türbine giren su miktarını ayarlar. Bu sistemin modellenmesi için Eşitlik 3.13 kullanılır. Ayar kanat açıklığındaki değişim oranı $(\frac{dG}{dt})$, hız regülatörü kontrolcüsü tarafından oluşturulan ayar kanat açıklığı hedef değeri (G_{set}) ile mevcut ayar kanat açıklığı (G) arasındaki farkın, hidrolik güç ünitesi, servo silindir ve ayar kanatları arasında basınçlı hidrolik yağın iletilmesi sırasında ortaya çıkan gecikme zamanına (t_s) bölümü ile orantılıdır:

$$\frac{dG}{dt} = \frac{1}{t_s} (G_{set} - G) \quad (3.13)$$

3.2.6 Generatör

Generatör mekanik modellemesi ünite de acil durdurmalarda oluşacak aşırı hız durumunun gözlemlenmesi açısından gereklidir. Generatörün mekanik hızındaki değişim oranının $(\frac{d\omega}{dt})$, mekanik tork (T_m) ile elektromanyetik tork (T_e) farkı ve atalet sabiti (H) ile ilişkisi Eşitlik 3.14'te gösterilmiştir. Şebeke bağlantısı kesildiği zaman elektromekanik tork sıfırlanacağı için mekanik torkun varlığı kendisini hız artışı olarak gösterir:

$$T_m - T_e = 2H \frac{d\omega}{dt} \quad (3.14)$$

Atalet sabitinin değeri, generatör atalet momenti (GD^2) (flywheel effect) ile ilişkilidir [50]. Generatöre ait atalet momenti değeri generatör üreticisi tarafından ton. m² cinsinden generatör bilgileri arasında verilir. Atalet sabitinin bulunması için Eşitlik 3.15 kullanılmaktadır:

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{60}\right)^2 \frac{GD^2 n^2}{S} \quad (3.15)$$

Generatörün kalıcı rejimdeki elektriki modeli için [51]'de sıralanan sadeleştirmeler göz önüne alınır. Generatörün elektriki güç çıkışı (P_e), generatör iç gerilim şiddeti ($|E_q|$) ile elektrik şebekesi bara gerilimi şiddetinin ($|V_s|$), iki değer arasındaki yük

açısının (δ) sinüsü ile çarpılması ve bu çarpımın generatör iç reaktansı (X_d) ve bara empedansı (X_e) toplamına bölümü ile Eşitlik 3.16'da gösterildiği gibi bulunur:

$$P_e = \frac{|E_q| |V_s|}{X_d + X_e} \sin \delta \quad (3.16)$$

Generatör iç gerilimi (E_q) ise generatör mekanik hızı (n), rotor ile stator arasındaki ortak endüktans (M_f), ikaz gerilimi (V_f) ve ikaz devresi direnci (r_f) Eşitlik 3.17'de gösterildiği gibi orantılıdır:

$$E_q = \frac{n M_f V_f}{r_f} \quad (3.17)$$

3.2.7 İkaz Sistemi

İkaz sistemi bir ikazlayıcı ve otomatik gerilim regülatöründen oluşur. Bu sistem generatöre uyarım gerilimi sağlamak için kullanılır. [52]-[54] kaynaklarda ayrıntılı ikaz sistemi modelleri bulunabilir. Bu çalışmada ikaz sistemi modelinin kullanılmama nedeni, ikaz sistemi zaman sabitlerinin hidrolik zaman sabitlerine göre çok kısa olmasıdır. Bu nedenle çalışmanın odağındaki hız regülatöründe meydana gelecek herhangi bir hadise incelenirken, ikaz sistemindeki dinamik değişiklikler çoktan tamamlanmış olacaktır.

3.2.8 Elektrik Şebekesi & Yük Dinamiği

Güç sistemi kararlılık sağlayıcı, otomatik üretim kontrolü gibi şebeke genelini ilgilendiren sistem çalışmaları için elektrik şebekesinin ayrıntıları [55]'te verilen şekilde dinamik modellenmesi gerekmektedir.

Yükler genel olarak statik ve dinamik yükler olarak ikiye ayrılır. Statik yüklerin aktif ve reaktif güçleri gerilim ve frekansın anlık değerlerine göre değişir. Diğer yandan dinamik yükler daha önceki koşullardan da etkilenir. Statik yükler sabit empedanslı, sabit akım ve sabit güçlü tipte olabilir. Genellikle, elektrik şebekesindeki yük profili modelleme ayrıntıları [56]'da verilen bu tip yüklerin bir karışımıdır.

3.3 Hidroelektrik Santralin Doğrusal Modeli

Hidroelektrik santral lineer modeli türbin hızı ve aktif güç çıkışında meydana gelebilecek küçük değişikliklerin modellenmesi amacıyla kullanılır. Daha önceki bölümlerde ayar kanat açıklığı ile türbin mekanik gücünü ilişkilendiren Eşitlik 3.9, Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.12'nin doğrusallaştırılması sonucu birinci dereceden bir transfer fonksiyonu elde edilir.

Eşitlik 3.10 türbin mekanik güç çıkışının türbin kazancı, türbin su seviyesi ve türbinden geçen suyun hızı ile ilişkisini göstermektedir. Bu eşitlik bir çalışma noktasında küçük değişimler için Eşitlik 3.18 şeklinde yazılabilir:

$$\Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial H_{tur}} \Delta H_{tur} + \frac{\partial P_m}{\partial U_{tur}} \Delta U_{tur} \quad (3.18)$$

İlgili türevler Eşitlik 3.18'de yerine yazıldığı ve eşitlik normalize edildiği zaman, Eşitlik 3.19 elde edilir. Eşitlik 3.19'da türbin mekanik güç çıkışı (P_m), türbin girişi su seviyesi (H_{tur}) ve türbine giren suyun hızındaki (U_{tur}) küçük değişikliklerin ilişkisi gösterilmiştir:

$$\Delta P_m = \Delta H_{tur} + \Delta U_{tur} \quad (3.19)$$

Buna ek olarak, Eşitlik 3.12 türbine giren suyun hızını ayar kanat açıklığı ve türbin su seviyesi ile ilişkilendirmektedir. Bu eşitlik bir çalışma noktasındaki küçük değişimler için Eşitlik 3.20 halini alır:

$$\Delta U_{tur} = \frac{\partial U_{tur}}{\partial H_{tur}} \Delta H_{tur} + \frac{\partial U_{tur}}{\partial G} \Delta G \quad (3.20)$$

İlgili türevler yerine konunca ve eşitlik normalize edilince Eşitlik 3.21 elde edilir:

$$\Delta U_{tur} = \frac{1}{2} \Delta H_{tur} + \Delta G \quad (3.21)$$

Eşitlik 3.21'deki ΔU_{tur} ifadesi Eşitlik 3.19'daki ΔU_{tur} yerine yazıldığı zaman türbin mekanik güç çıkışını (P_m) türbin su seviyesi (H_{tur}) ve ayar kanat açıklığı (G) ile ilişkilendiren Eşitlik 3.22 elde edilir:

$$\Delta P_m = \frac{3}{2} \Delta H_{tur} + \Delta G \quad (3.22)$$

Benzer şekilde Eşitlik 3.21'deki ΔH_{tur} ifadesi Eşitlik 3.19'daki ΔH_{tur} yerine yazıldığı zaman türbin mekanik güç çıkışı ile türbine giren suyun hızı ve ayar kanat açıklığını ilişkilendiren Eşitlik 3.23 elde edilir.

$$\Delta P_m = 3\Delta U_{tur} - 2\Delta G \quad (3.23)$$

Türbinden geçen suyun hızı ile türbin girişi su seviyesini cebri boru su başlama zamanı (t_{wp}) ile ilişkilendiren Eşitlik 3.9, Eşitlik 3.21 kullanılarak yeniden düzenlendiğinde Eşitlik 3.24 elde edilir:

$$t_{wp} \frac{dU_{wp}}{dt} = 2(\Delta G - \Delta U_{tur}) \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.24'ün türev kısmı Laplace operatörü ile değiştirilip, eşitlik yeniden düzenlendiğinde Eşitlik 3.25 elde edilir:

$$\Delta U_{tur} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2}t_{wp} s} \Delta G \quad (3.25)$$

Eşitlik 3.25'teki ΔU_{tur} yerine Eşitlik 3.23'teki ilişki yazıldığı zaman ayar kanat açıklığı ile türbin mekanik güç çıkışı arasındaki ilişkiyi niteleyen Eşitlik 3.26 elde edilir:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{1 - t_{wp} s}{1 + \frac{1}{2}t_{wp} s} \quad (3.26)$$

Hazırlanan lineer hidroelektrik santral modeline denge bacasının oluşturduğu hidrolik dalgalanmalar ile denge bacası, cebri boru ve türbin arasındaki hidrolik etkileşiminin eklenmesi için Eşitlik 3.26’da verilen türbin mekanik güç çıkışı ayar kanat ilişkisine Eşitlik 3.27’de verilen denge bacasının doğal frekans (ω_s) etkisi dahil edilmelidir. Bu değer yer çekimi ivmesi (g), cebri boru kesit alanı (A_p) ile denge bacası kesit alanı (A_s) ve cebri boru uzunluğu (l_p) ile orantılıdır:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{gA_p}{l_p A_s}} \quad (3.27)$$

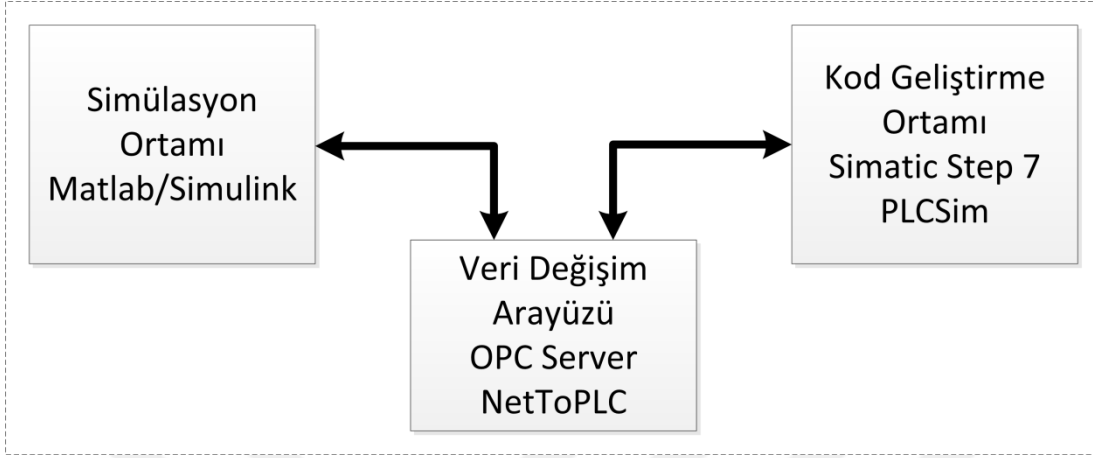
Cebri boru-denge bacası ikilisinin ortaya çıkardığı türbin mekanik güç çıkışı (P_m) ve ayar kanat açıklığı (G) arasındaki ikinci-dereceden dinamik davranış Eşitlik 3.28’de verilmiştir:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta G} = \frac{s^2 - \omega_s^2 t_{wp} s + \omega_s^2}{s^2 + \frac{1}{2} \omega_s^2 t_{wp} s + \omega_s^2} \quad (3.28)$$

3.4 Yazılım Döngülü (Software-in-the-loop) Simülasyon Ortamı

Gerçek zamanlı simülasyon araştırma ve tasarım çalışmaları için üzerinde çalışılan konunun tam bir saha uygulamasına dönüşmesinden önce isterleri karşıladığının ve saha uygulamasında herhangi bir tehlike ya da açık oluşturmayacağını test edilmesi için kullanılır. Gerçek zamanlı simülasyon için üç tipte ortam kullanılabilir. Bunlardan ilki hızlı kontrol prototipi olarak adlandırılır ve gerçek bir santrale bağlı bir prototip kontrolcü üzerinden bağlantı yapılır. Kontrolcü bir simülasyon ortamında geliştirildiği için hata bulma ve esneklik özellikleri bakımından fayda sağlar. Diğer bir gerçek zamanlı simülasyon ortamı ise donanım döngülü (hardware-in-the-loop) simülasyon ortamıdır. Donanım döngülü simülasyon ortamında kontrolcü, gerçek bir santral yerine gerçek zamanlı bir simülatöre fiziksel bağlantılar üzerinden bağlanır. Bu tip simülasyon ortamı hızlı kontrol prototipine göre daha esnektir çünkü gerçek bir santral ihtiyacı yoktur. Diğer yandan gerçek zamanlı simülasyon ortamında dinamik modellemenin mümkün olduğunca gerçek santrale benzer özellikler göstermesi başarılı bir test için elzemdir. Üçüncü tip simülasyon ortamı olan yazılım

döngülü (software-in-the-loop) simülasyon ortamı ise donanım döngülü simülasyon ortamının giriş çıkış sinyalleri, bir başka deyişle fiziksel bir bağlantı kullanılmayan halidir.



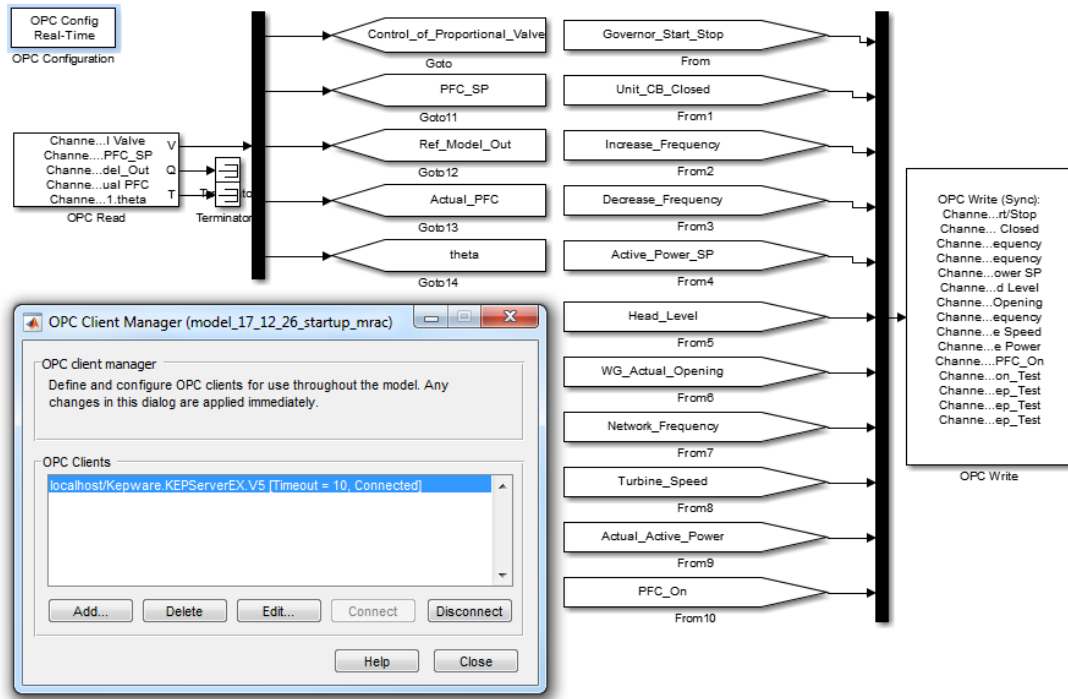
Şekil 3.5 : Yazılım döngülü simülasyon ortamı.

Yazılım döngülü simülasyon, yazılan ve derlenen bir kodun matematiksel modelli bir simülasyon ortamına entegre edilmesi ile oluşturulur. Bu sayede, özellikle geliştirme aşamasında donanım ve saha kurulumuna ihtiyaç duymadan tasarımı yapılan ve koda dökülen kontrol yaklaşımları test edilebilir. Bu simülasyon ortamının bir diğer getirisi ise kontrolcü ortamının saha ile aynı olması sebebiyle doğrudan kontrolcü içindeki kodun test edilebilmesidir.

Şekil 3.5'te gösterildiği üzere yazılım döngülü simülasyon ortamı, üç ana bileşenden oluşmaktadır. İlk bileşen kontrol yaklaşımlarının kod haline getirildiği kod geliştirme ortamıdır. Bu ortamda kullanılan kontrolcüye özel (bu tez kapsamındaki çalışmalarda Siemens S7-300 serisi kontrolcü kullanılmıştır.) kod geliştirme programı (Simatic Step 7) ve bu kod geliştirme programında saha ile ilgili veya hafıza alanındaki değişkenleri değiştirmek için kullanılan iç simülasyon programı (PLCSim) bulunmaktadır.

Kod geliştirme ortamına bir hidroelektrik santralinin hız regülatörünün başlatma, durdurma sıralamaları, aktif güç kontrolü, hız kontrolü ve açıklık kontrolü çalışma modları kodlanmıştır. Normalde santral ile etkileşiminin sağlanması için kullanılan dijital ve analog giriş çıkış sinyaller ile ölçü transformatörlerinden gelen gerilim ve akım sinyalleri yazılım döngülü simülasyon ortamında hafıza alanları kullanılarak elde edilmiştir. Veri değişim arayüzü, kod geliştirme ortamı ile simülasyon ortamı arasındaki veri alışverişini sağlamaktadır. Veri akışı için endüstriyel kontrolcüler için

standart bir şekilde geliştirilen OPC Sunucu ve kod geliştirme ortamının iç simülasyon programının OPC Sunucu ile haberleşmesini sağlayan NetToPLC programı kullanılmıştır. Son bileşen olan simülasyon ortamını ise dinamik modelin çalıştırıldığı Matlab/Simulink oluşturmaktadır. Üstte bahsedilen hidroelektrik santralin lineer olmayan modelinde yer alan denklemler Matlab/Simulink ortamında bloklarla kurulmuştur.



Şekil 3.6 : Simülasyon ortamı içindeki OPC sunucu yapılandırma ayarları.

Şekil 3.6’da simülasyon ortamının veri değişim arayüzü ile bağlantısının yapıldığı ekran görülmektedir. Kontrolcünün primer frekans kontrolü, senkronizasyon öncesi hız kontrolü, aktif güç kontrolü gibi işlevleri yerine getirebilmesi için ihtiyaç duyduğu sinyallerin alışverişi yapılmaktadır. OPC istemci yapılandırma aracındaki ayarlamalar sayesinde bağlantı yapılacak OPC sunucunun ve yapılan simülasyonun gerçek zamanlı olması sağlanmıştır. Çizelge 3.2’de simülasyon ortamı ve kod geliştirme ortamı arasında veri değişim arayüzü üzerinden transferi gerçekleştirilen sinyaller listelenmiştir.

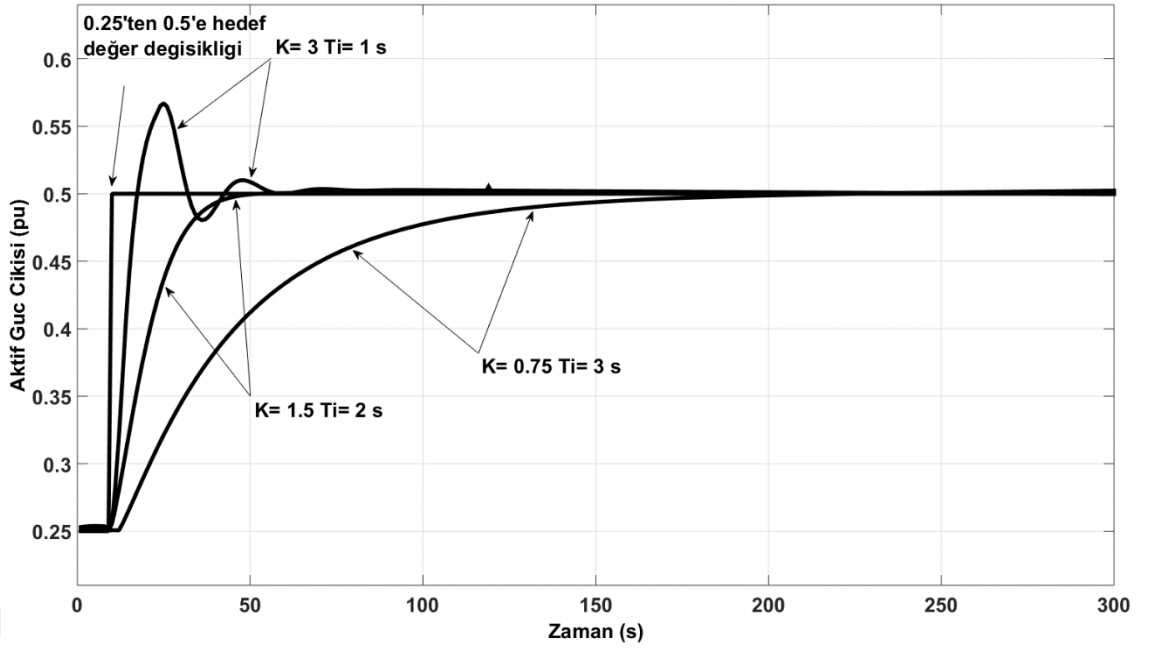
Bu sinyallerden ilki hız regülatörünün devreye girerek önce türbin hızını regüle etmesini sağlayan Hız Regülatörü Başla/Dur Komutu’dur. İkinci sinyal kullanılarak hız regülatörü kontrolcüsüne şebeke senkronizasyonunun yapıldığı iletilmiş olur.

Üçüncü ve dördüncü sinyal ise şebeke senkronizasyonu öncesi operatör ve otomatik senkronizasyon cihazından gelen artırma ve azaltma komutlarını göstermektedir. Hız regülatörü kontrolcüsüne şebeke bağlantısı kurulduktan sonra verilen hedef aktif güç değeri beşinci sırada bulunmaktadır. Göl tarafı su seviyesinin hız regülatörü kontrolcüsüne iletildiği sinyal ise altıncı sıradadır. Hız regülatörü tarafından kontrol edilen ayar kanatlarının santral ortamındaki açıklığı bir geri bildirim sinyali olarak yedinci sırada yer almaktadır. Primer frekans kontrolü için temel teşkil eden şebeke frekans bilgisi sekizinci sinyal olarak hız regülatörüne iletilmektedir. Senkronizasyon öncesi hız regülatörü kontrolcüsü tarafından regüle edilen türbin hızı bilgisi dokuzuncu sinyal olarak yer almaktadır. Beşinci sinyal ile kontrolcü tarafından alınan hedef değere göre regüle edilen aktif gücün gerçek değeri onuncu sinyal olarak iletilmiştir. Primer frekans kontrolü ile ilgili döngü eklentisinin kullanılması için bu kontrolün etkin olduğunun bildirildiği sinyal onbirinci sırada yer almaktadır. Onikinci sırada yer alan sinyal ise kontrolcü tarafından ayar kanatlarının açıklığını değiştirmek için kullanılan oransal valf kontrol sinyalidir. Onüç, ondört, onbeş ve onaltıncı sinyaller kod geliştirme ortamından gözlem amaçlı toplanan sinyallerdir.

Çizelge 3.2 : Simülasyon ortamı ve kod geliştirme ortamı arasındaki sinyaller.

Sıra	Sinyal Adı	Tipi	Kaynak	Hedef
1	Hız Regülatörü Başla/Durdur Komutu	Dijital	SO*	KGO**
2	Ünite Kesicisi Kapalı	Dijital	SO	KGO
3	Frekans Artır	Dijital	SO	KGO
4	Frekans Azalt	Dijital	SO	KGO
5	Aktif Güç Hedef Değer	Analog	SO	KGO
6	Göl Seviyesi	Analog	SO	KGO
7	Ayar Kanat Açıklığı	Analog	SO	KGO
8	Şebeke Frekansı	Analog	SO	KGO
9	Türbin Hızı	Analog	SO	KGO
10	Gerçek Aktif Güç Çıkışı	Analog	SO	KGO
11	Primer Frekans Kontrolü Etkin	Dijital	SO	KGO
12	Oransal Valf Kontrol Sinyali	Analog	KGO	SO
13	Primer Frekans Kontrolü İç Hedef Değeri	Analog	KGO	SO
14	Referans Model Çıkışı	Analog	KGO	SO
15	Primer Frekans Kontrolü Gerçek Değeri	Analog	KGO	SO
16	Θ Değeri	Analog	KGO	SO

*Simülasyon Ortamı, ** Kod Geliştirme Ortamı



Şekil 3.7 : Yazılım döngülü simülasyon ortamında PID ayarlaması.

Şekil 3.7’de yazılım döngülü simülasyon ortamı kullanılarak yapılan PI kontrolcü parametre ayar çalışması örneği gösterilmiştir. Aktif güç çıkışı değeri testi yapılan ünitenin anma aktif güç çıkışına bölünerek per unit olarak normalize edilmiştir. Kod geliştirme ortamında çalışan PI kontrolcünün kazanç (K) ve integral zaman sabiti (T_i) değerleri değiştirilerek aynı basamak değer değişimi için aktif güç çıkışında meydana gelen değişiklik gözlemlenmiştir. Kontrolcünün çıkışı olan oransal valf kontrol sinyali veri değişim arayüzü üzerinden simülasyon ortamına verilmiştir. Oransal valf kontrol sinyali simülasyon ortamındaki ayar kanat açıklığını değiştirir. Ayar kanatlarındaki değişim ise hidrolik sistemin dinamiğine bağlı olarak türbine giren su miktarını belirler. Türbine giren su miktarı ve rezervuar seviyesi, aktif güç çıkışını değiştirmektedir. Aktif güç hedef değeri 0.25’ten 0.5’e değiştirildiğinde çeşitli K ve T_i değerleri için kontrolcü performansları araştırılmıştır.



4. GÜÇ SANTRALLERİNDE ADAPTİF KONTROL

4.1 Literatür Özeti

4.1.1 Adaptif kontrol

Adaptif kontrol yaklaşımları güç sistemleri uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Hidroelektrik uygulamalarına odaklanıldığında, [25] nolu yayında HES türbin kontrolü için bulanık ve klasik PI kontrolcülerin karşılaştırıldığı görülür. Kazanç ayarlama ve klasik PI kontrol yaklaşımları [26] nolu çalışmada karşılaştırılmıştır. [27] nolu çalışmada sinir ağı minimum olmayan fazın (non minimum phase) iyileştirilmesi için kullanılmıştır. [30] nolu çalışmada bulanık mantık adaptif kontrol yaklaşımı uygulanmıştır. Kazanç ayarlama ve Smith tahminci çoklu model adaptif kontrol [31] nolu çalışmada çalışılmıştır. [38] nolu çalışmada ise çoklu modellenmiş adaptif kontrol yaklaşımı açıklanmış ve klasik kontrol ile bu yaklaşımın performansı karşılaştırılmıştır. [57] nolu çalışma ölçülemeyen ayar kanat açıklığı, debi ve yük değişimi olduğunda HES’lerde adaptif frekans kontrolü önermektedir. Değişen santral parametrelerine karşın genetik algoritmaya dayanan adaptif kontrol yaklaşımı [58] nolu çalışmada sunulmuştur. Hızlı hız regülatörü tepkisi ve kararlılığın sağlanması amacıyla [59] nolu çalışmada adaptif çift türevli tasarım yapılmıştır. Küçük bir HES için asenkron motor kontrolünde kullanılması amacıyla adaptif sinir ağına tabanlı elektronik yük kontrolcüsü [60] nolu çalışmada geliştirilmiştir. Salınım algılama için adaptif filtreli çevrimiçi parametre tanımlama ve PI kontrolcü ayarlaması [61] nolu çalışmada önerilmiştir. Küçük HES’lerde izole-ada modlarında ortaya çıkması muhtemel sorunların önlenmesi için adaptif bir tahmin algoritması [62] nolu çalışmada geliştirilmiştir. Adaptif kontrol tabanlı bir gözlem sisteminin hidrolik ekipman ve türbinde arıza algılaması [63] nolu çalışmada anlatılmıştır.

Diğer tip santrallere bakıldığında, adaptif kontrolün termik rüzgar ve güneş santralleri gibi geniş ölçekte kullanıldığı görülür. Termik santraller için, [64] nolu

çalışmada, adaptif kontrolün durumu araştırılmıştır. [65] nolu çalışmada, 300 MW'lık bir kazandaki aşırı ısıtılmış buharın sıcaklık kontrorlünün yapılması için sinir ağı adaptif kontrol tasarımı yapılmıştır. Rüzgar santrallerinde ise adaptif kontrollü batarya depolama sistemleri, yardımcı hizmetlerin sağlanması için kullanımı [66] nolu çalışmada gösterilmiştir. Rüzgar santralının dinamik performansının modellenmesi için adaptif parametre tahmini [67] nolu çalışmada uygulanmıştır. [68] nolu çalışmada, rüzgar santrallerindeki gerilim kontrolü ihtiyacı için adaptif reaktif güç kontrol yaklaşımı önerilmiştir. [69] nolu çalışmada STATCOM sistemli bir rüzgar santralinde eniyi kontrol yaklaşımının bulunması için adaptif kontrol kullanılmıştır. Güneş santralleri için ise [70]-[73] nolu çalışmalar yapılmıştır. [70] nolu çalışmada enerji üretim tahmini için sinir ağı adaptif kontrolcü kullanılmıştır. Adaptif bir kontrol yaklaşımı ile şebekeye bağlı güneş santrallerinin arıza durumundaki gerilim sağlama yetenekleri [71] nolu çalışmada iyileştirilmiştir. [72] nolu çalışmada, farklı çalışma noktaları göz önüne alınarak bir güneş enerjisi santrali için dolaylı adaptif kontrolcü önerilmiştir. [73] nolu çalışmada, model referanslı adaptif kontrolcü azami güç çalışma noktasının bulunması için kullanılmıştır. [74] nolu çalışma, zamanla değişen parametrelere karşı sistem performansını kararlı halde tutmak için yakıt hücrelerinin adaptif kontrol ile kontrol edildiği karma (hibrid) santraller için bir örnektir. [75] nolu çalışmada, karma santrallerde kararlılık ve performans isterlerini karşılamak için üç farklı gürbüz (robust) kontrolcü tasarlanmıştır.

Güç sistemleri alanındaki diğer adaptif uygulamalar, güç sistemi kararlılık sağlayıcısı, senkron generatör kontrolü ve elektrohidrolik eyleyicileri kapsamaktadır. [76] nolu çalışmada genel bir santralde aktif güçteki salınımın azaltılması için adaptif sinir ağı güç sistemi kararlılık sağlayıcısı tarafından kontrol edilen senkron generatör, hız regülatörü ve ikaz sistemi anlatılmıştır. Güç sistemi kararlılık sağlayıcısı için geliştirilen model referanslı adaptif kontrolcü [77] nolu çalışmada ayrıntılandırılmıştır. [78] nolu çalışmada modelleme, çözümleme, tasarım ve simülasyon için kullanılacak genel bir santral simülasyon aracı açıklanmıştır. Bir tasarım aracı olarak, bu çalışmada adaptif kontrol kullanılmıştır. [79] nolu çalışmada Lyapunov geçici kararlılık çözümlemesine göre sinir ağları tabanlı iki adaptif kontrolcü karşılaştırılmıştır. Adaptif kontrol yöntemi ile kontrol edilen elektrohidrolik servo sistem test düzeneği [80] nolu çalışmada önerilmiştir. [81] nolu

çalışmada hidrolik eyleyicili robot kol adaptif gürbüz kontrolcü tarafından kontrol edilmiştir.

4.1.2 Model referanslı adaptif kontrol

[82] nolu çalışmada, Lyapunov tabanlı model referanslı adaptif kontrolcü, kendi kendini ayarlayan (self-tuning) bir kontrolcü ve sinir ağı kontrolcü ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmanın bir sonucu olarak, model referanslı adaptif kontrolcünün sadece gürültülü ortam haricinde gayet iyi bir performansı olduğu sonucu verilmiştir. Güç sistemlerindeki model referanslı adaptif kontrol uygulamalarına bakıldığında, çoğu uygulamanın güç sistemi kararlılık sağlayıcısında olduğu görülmektedir. Önceki bölümlerde [65] nolu çalışmada model referanslı adaptif kontrolcünün güç sistemi kararlılık sağlayıcısı için geliştirildiği belirtilmişti. [83] nolu çalışma, santral parametre değişim durumlarına karşın santrallerin istenen şekilde çalışmasını sağlamak için model referanslı adaptif kontrolcülü bir güç sistemi kararlılık sağlayıcısı tanımlamaktadır. [84] nolu çalışmada, istenen performans değerlerine göre şekillenen eşgüdümlü hedef değerler, bir model referanslı kontrolcü tarafından santrallerin hız regülatörü ve ikaz sistemlerine gönderilmektedir. [85] nolu çalışmada doğrudan model referanslı bir kontrolcü birçok santralin bağlı olduğu bir şebekede güç sistemi kararlılık sağlayıcısını kontrol etmektedir. Model referanslı adaptif kontrolcü ile çok daha az hesaplama kapasitesine ihtiyaç duyulduğu sonuç olarak [86] nolu çalışmada verilmiştir. Güneş enerjisi santrallerinde azami güç çalışma noktasının bulunması için model referanslı adaptif kontrolcü kullanıldığı [73] nolu çalışmada belirtilmiştir. [87] nolu çalışmada, sıcaklık, çalışma noktası ve ekipman yaşlanması sonucu değerleri değiştiği için evirici ve şebeke arasında eş direnç ve reaktans tahmini amacıyla aktif ve reaktif güç kontrolünde model referanslı adaptif kontrol uygulanmıştır. [88] nolu çalışmada elektrolitik kapasitörün kapasitans değeri model referanslı adaptif kontrolcü ile tahmin edilmektedir. Model referanslı adaptif kontrolcü tabanlı oluşturulan lineer olmayan bir kontrol yaklaşımı ile güneş enerjisi santrali [89] nolu çalışmada kontrol edilmektedir. HES'lerde model referanslı adaptif kontrol su basıncının bulunması için [90] nolu çalışmada kullanılmıştır. Karma santral uygulama örneği olarak, [91] nolu çalışma sunulabilir. Bu çalışmada karma (rüzgar + dizel) enerji santralinin kontrolcü performansı model referanslı adaptif kontrolcü ile iyileştirilmiştir. [92] nolu çalışmada, lineer olmayan

bir servo sistemde ikinci dereceden bir referans model, bulanık mantık tabanlı kontrolcünün öğrenme algoritmasında kullanılmıştır.

4.1.3 Kazanç ayarlama

Değişen santral parametrelerinin oluşturduğu bozucu etkileri gidermek amacıyla, diğer adaptif kontrol yöntemlerine benzer şekilde kazanç ayarlama yöntemi güç sistemi alanında kendisine yer bulmaktadır. HES alanında, [26] nolu çalışmada kazanç ayarlı bir kontrolcü donanım döngülü bir simülasyon düzeneğinde kullanılmıştır. Kazanç ayarlama tabanlı çoklu model kontrol yaklaşımı [31] nolu çalışmada açıklanmıştır. [93] nolu çalışmada ayar kanatlarında su kaçağı sorunu bulunan bir ünitenin şebeke senkronizasyon performansının iyileştirilmesi için kazanç ayarlama tabanlı adaptif bir kontrolcü ile kelebek vana açıklığı değiştirilmiştir.

Diğer tip santrallerdeki uygulamalar ise [94] - [106] nolu çalışmalarda sıralanmıştır. Termik santrallerdeki bir uygulama olarak, [94] nolu çalışmada ünite devreye alma hız performansının iyileştirilmesi için gaz türbini bulanık mantık kazanç ayarlama algoritma ile kontrol edilmiştir. Rüzgar enerji santrallerinde ise [95] nolu çalışmada pitch açısı kazanç ayarlamalı bir PI kontrolcü ile kontrol edilmiştir. Lineer parametre değişkenli bir sistem olarak modellenen değişken hızlı bir rüzgar enerji santrali için kazanç ayarlamalı bir kontrol yöntemi, [96] nolu çalışmada önerilmiştir. Güneş enerjisi santrallerine bakıldığında, [97] nolu çalışmada santralin geçici rejim kararlılığının sağlanması amacıyla PID kontrolcünde bulanık kazanç ayarlamalı bir yöntem önerilmiştir. [98] nolu çalışmada güneş enerjisi santrallerinde sahadaki mevcut bozucu etkilere karşı kazanç ayarlama tabanlı bir kestirimci kontrol yaklaşımı değerlendirilmiştir. [99] nolu çalışmada kazanç ayarlamalı bir yöntem ile güneş enerjisi santralinin kontrolü yapılmıştır. Şebekeye bağlı eviricinin kontrolcüsünün şebeke empedansını çözümlemesi için kazanç ayarlama tabanlı bir yöntem kararlılık hedefi ile [100] nolu çalışmada gösterilmiştir.

Sistem genelini ilgilendiren çalışmalarda kazanç ayarlama yöntemi otomatik üretim kontrolü, güç sistemi kararlılık sağlayıcısı, yüksek gerilim DC şebeke kontrolü ve dağıtım şebekelerinde kullanılmıştır. [101] nolu çalışmada arz-talep dengesinin sağlanması amacıyla otomatik üretim kontrolü için genetik algoritma tabanlı adaptif kazanç ayarlama yöntemi önerilmiştir. [102] nolu çalışmada rastgele değişen aktif ve

reaktif güç değerleri atanarak kendi güç sistemi kararlılık sağlayıcı sistemi ile değerlendirilen santraller, lineer zaman değişken sistem olarak modellenen genel güç sistemi için kazanç ayarlama yöntemi kullanılmıştır. İki bölgele bağlantılı bir şebekede güç sistemi kararlılık sağlayıcısı olarak adaptif bulanık kazanç ayarlama kontrolcü [103] nolu çalışmada tasarlanmıştır. Şebekede meydana gelen salınımların söndürülmesi için kazanç ayarlama temelli diğer bir güç sistemi kararlılık sağlayıcı sistem [104] nolu çalışmada açıklanmıştır. [105] nolu çalışmada yüksek gerilim DC sistemi, sistemin geçici rejim performansının doğrultucu performansına bağlı olduğunu göz önüne alarak kazanç ayarlamalı otomatik yapılandırma ile kontrol edilmiştir. [106] nolu çalışmada dağıtım şebekelerinde orta gerilim seviyesinde dağıtık üretim varlığında gerilim profilinin iyileştirilmesi için kazanç ayarlama tabanlı kestirimci bir kontrolcü kullanılmıştır.

4.2 PID Kontrolcü

Diğer endüstriyel kontrol uygulamalarında olduğu gibi hidroelektrik santrallerde yapılan kontrol uygulamalarında PID kontrolcü sıklıkla kullanılır. Modern dijital kontrolcülerde uygulanabilmesinin yanı sıra PID kontrolcü mekanik ve analog sistemlerde dahi uygulanabilmektedir. Modern kontrolcülerde yapılandırma programı üzerinden birçok ek özelliğini etkinleştirebilmek ve ayarlamak mümkündür.

PID kontrolcünün oransal bileşeni Eşitlik 4.1’de gösterildiği gibi oransal kazanç değeri (K_p) ile kontrolcü giriş hata değerinin ($e_{kon}(t)$) çarpımından elde edilir. Oransal kazanç katsayısının etkin olduğu bölge hedef değer ile gerçek değer arasındaki farkın basamak şeklinde artış gördüğü, bir başka ifade ile hedef değer basamak şeklinde artırıldığı bölgedir.

$$u'(t) = K_p e_{kon}(t) \quad (4.1)$$

PID kontrolcünün integral bileşeni Eşitlik 4.2’de gösterildiği şekilde elde edilir.

$$u'(t) = \int \frac{1}{T_i} e_{kon}(t) dt \quad (4.2)$$

Kontrolcü giriş hata değeri integral katsayısı oranında toplanır. PID kontrolcünün integral bileşeni sayesinde kalıcı hatanın sıfırlanması sağlanır. İntegral bileşeni birikimli bir yapıda olduğu için kontrolcüye giren hata değeri sıfırlansa dahi kontrolcünün çıkış değeri integral bileşeni olarak kalır. Diğer yandan integral bileşeni salınımları artırır.

İhtiyaç duyulması halinde salınımların azaltılması için Eşitlik 4.3'te verilen PID kontrolcü türev bileşeni kullanılabilir. Türev bileşenin değeri, kontrolcüye giriş hata değerinin türev katsayısı ile çarpılması sonucu elde edilir. Oransal bileşene benzer şekilde türev bileşenin kontrolcüye giren hata miktarı sıfırlandığında herhangi bir etkisi yoktur.

$$u'(t) = K_d \frac{de_{kon}(t)}{dt} \quad (4.3)$$

Şebeke senkronizasyonu sonrası aktif güç kontrolünde aktif güç bilgisi üzerinde ölçü transformatörleri, hidrolik basınç değişimi, vibrasyon veya kavitasyon kaynaklı gürültü oluştuğu için PID kontrolcünün türev bileşeni kullanılmamaktadır.

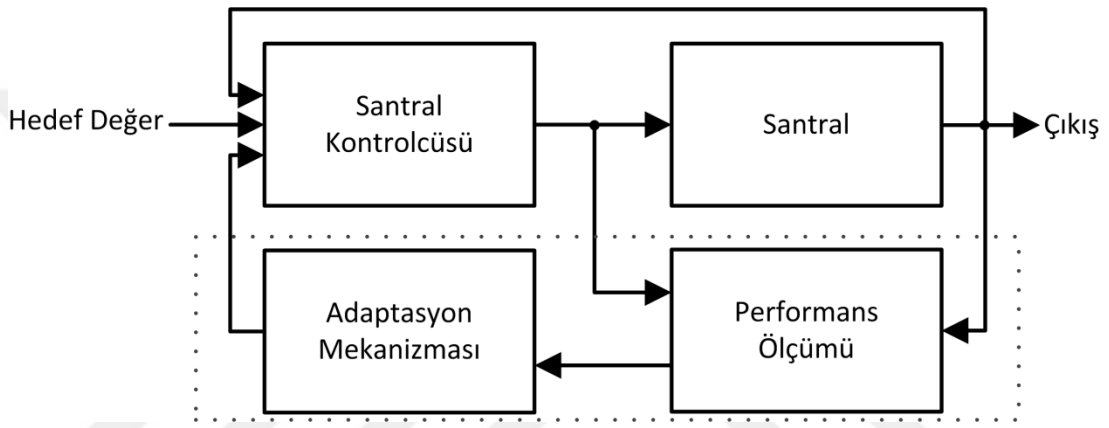
Modern kontrolcüler dijital tipte olduğu için, bu kontrolcüler içinde çalışan PID döngüleri dijitaldir. Bu sebeple dijital kontrolcülerde örnekleme zamanı ön plana çıkmaktadır. Örnekleme döngüsü uzunluğunun mümkün oldukça kısa olması gerekir. Döngü süresinin uzunluğu ise kullanılan kontrolcünün işlem kapasitesi ile ilgilidir. Hız regülatörü kontrolcüsünde çalışan PID bloğu sabit bir örnekleme süresine ihtiyaç duyduğu için, 50 ms.'de bir düzenli çağırılan bir organizasyon bloğu kullanılmıştır.

4.3 Adaptif Kontrolcü Seçimi

Adaptif kontrol istenen performansın elde edilmesi için kontrolcü parametrelerinin otomatik bir şekilde gerçek zamanlı olarak ayarlanmasını içeren teknikleri kapsar. Bu yaklaşım özellikle sabit veya yavaş değişen karmaşık sistemi parametreleri söz konusu olduğunda etkin olmaktadır [107], [108].

Şekil 4.1'de gösterilen adaptif kontrol genel yapısı santral kontrolcüsü, adaptasyon mekanizması, santral ve performans ölçümü için kullanılan bölümden oluşur. Adaptif kontrol belli bir performans hedefini giriş, çıkış, ara ölçüm veya bilinen bozucu etkiler vasıtası ile ölçer. Ölçülen performans ölçümü ile tanımlanan performansın

karşılaştırılması sonucu, adaptasyon mekanizması santral kontrolcüsünün parametrelerini uyarlar veya tanımlanan performans hedefine ulaşılması için ek bir kontrol yaklaşımı sağlar. Santral kontrolcüsü santral için kendisine iletilen hedef değere göre santrale kontrolcü ayarlarının şekillendirdiği kontrolcü çıkış değerini gönderir. Santral kontrolcüsünün çıkış olarak gönderdiği sinyal santral çıkışını değiştirir. Adaptasyon mekanizması ise tanımlanan performans ölçümü ile ölçülen performans arasındaki farkı hesaba katarak santral kontrolcüsünün parametrelerini değiştirir veya kontrol döngüsüne eklenti oluşturur.



Şekil 4.1 : Adaptif kontrol genel gösterimi.

Temel bir adaptif kontrol yaklaşımı olan açık-çevrim adaptif kontrol yaklaşımında santral parametrelerine ve işletme şartlarına çevreden gelen bozucu etkilere karşı istenen santral davranışının elde edilebilmesi için daha önce tecrübe edilen bilgi ve karar verme yeteneği ile kontrolcü parametrelerinin değiştirilmesini sağlar. Adaptif kontrol yöntemleri arasında en hızlı olanıdır ancak açık-çevrim bir yöntem olduğu için göz önüne alınan bozucu etkilerden farklı bir etki ile karşılaşıldığında bu yöntemin etkisi olmayacaktır. Kazanç ayarlama yöntemi, açık-çevrim adaptif kontrol örnek olarak verilebilir.

Diğer bir temel adaptif kontrol yaklaşımı ise doğrudan adaptif kontroldür. Performans ölçümü adaptif kontrol için önemli bir işlemdir ve bazı durumlarda santralin dinamik özellikleri kullanılarak performans ölçütü tanımlanabilir. Bir başka deyişle, santral dinamik modelinin oluşturulabildiği durumlarda performans ölçüm sistemi hedeflenen sistem davranışını modelden elde edebilir. Bu durumda ancak koşullarında santral modelinin oluşturduğu hedeflenen performans ile gerçek

performans arasında fark olmayacaktır. Diğer yandan, herhangi bir bozucu etki karşısında performans ölçümü hedeflenen performans ile gerçek performans arasındaki farkı adaptasyon mekanizmasına yansıtacaktır. Doğrudan adaptif kontrol yaklaşımı için model referanslı adaptif kontrolcü örnek olarak verilebilir. Bu tip adaptif kontrol yöntemindeki en büyük sınırlama hedeflenen santral davranışını yansıtacak santral dinamik modelinin yeterli hassasiyette oluşturulabilmesidir.

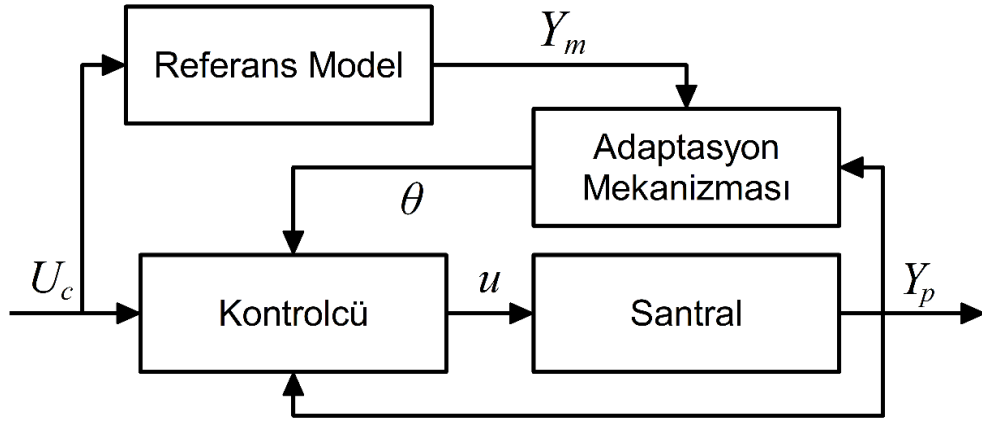
Dolaylı adaptif kontrol yaklaşımı, kontrolcü tarafından ulaşılabilen giriş çıkış sinyalleri ile santral modeli çevrimiçi bir şekilde elde edilebildiği durumlarda kullanılabilir. Bu yöntemin dolaylı olmasının nedeni ise kontrolcü parametrelerini uyumlandırılmasının iki aşamalı bir yöntem ile gerçekleştirilmesidir. Bu aşamaların ilki santral modeline ait parametrelerin çevrimiçi bir şekilde elde edilmesi, ikinci aşaması ise çevrimiçi oluşturulan model kullanılarak kontrolcü parametrelerinin uyumlandırılmasıdır. Doğrudan adaptif kontrol yönteminde her bir örneklemede veya döngüde yeniden santral modeli parametrelerini belirlemek yerine santral parametre değişim sıklığına göre model yenileme sıklığını azaltan ve bu işlemi kolaylaştıran yöntemler vardır.

Açık çevrim kontrol ile diğer adaptif uygulamalar birleştirilerek büyük değişikliklere açık-çevrim adaptif kontrol ile cevap verilmesi, ardından diğer adaptif uygulamalar ile hassas ayar yapılarak hedeflenen performansa ulaşılması sağlanabilir.

Hidroelektrik santrali özelinde adaptif uygulamalar incelendiğinde, açık-çevrim adaptif kontrolün santralde yer alan göl seviyesi ölçümü, debi ölçümü, vb. yardımcı sistemler vasıtası ile yapılabilmesinin mümkün olduğu değerlendirilmektedir. Diğer yandan doğrudan adaptif kontrol için santral modeli santrale özel parametreler dikkate alınarak kontrolcü içine gömülebilir ve bu şekilde hedeflenen performans için ölçüt oluşturacak referans model elde edilebilir. Dolaylı adaptif kontrolde ise kontrolcünün çevrimiçi bir şekilde santral modelini oluşturmaya çalışması, kontrolü döngü zamanını ciddi biçimde artıracığı için hız regülatörünün sağlıklı çalışmasına engel olma riski vardır. Bu nedenle hidroelektrik santrallerde yapılacak uygulamalar için açık-çevrim ve doğrudan adaptif kontrol yöntemlerinin uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Doğrudan adaptif kontrol yaklaşımında performans ölçümünün yapılması işi referans model kullanılarak gerçekleştirilir. Model referanslı adaptif kontrolde, dinamik bir

model üzerinden istenen sistem davranışı elde edilir. Bu yöntem güç sistemi alanında santral modelinin davranışına göre üretim kaynaklarının performansının iyileştirilmesi için kullanılmaktadır. Şekil 4.2’de model referanslı adaptif kontrol yaklaşımının şematik hali gösterilmiştir. Santral kontrolcüsü kontrolcüye verilen hedef değeri (U_c) alır. Kontrolcü çıkışı (u) referans model ve adaptasyon mekanizmasının çıkışının (Θ) kontrolcü çıkışı ile birlikte işleme konduğu eklenti kısmına girer. Hedeflenen santral davranışının modellendiği referans modelin çıkışı olan (Y_m) ile kontrol edilen gerçek santral çıkış değeri (Y_p) adaptasyon mekanizmasına girerek öğrenme oranı doğrultusunda adaptasyon mekanizmasının çıkış değerini oluşturur. Bu değer eklenti kısmında santral kontrolcüsünün çıkış değerini değiştirerek santral çıkışının hedeflenen davranışa ulaşmasını sağlar.



Şekil 4.2 : Model referanslı adaptif kontrol şematik gösterimi.

Aşağıda anlatılan referans modellenli adaptif kontrol yaklaşımı, santral modelinde tek bir bilinmeyen olması halinde uygulanmaktadır. Referans model, hedef değeri (U_c) giriş değeri olarak alır ve Eşitlik 4.4’teki ilişki ile referans model çıkışını (Y_m) üretir.

$$\frac{Y_m(t)}{U_c} = \frac{b_m}{s + a} \quad (4.4)$$

Benzer şekilde, kontrol edilen gerçek santral çıkış değeri (Y_p) ile kontrolcü çıkışı (u) arasındaki ilişki Eşitlik 4.5’te verilmiştir.

$$\frac{Y_p(t)}{u(t)} = \frac{b}{s + a} \quad (4.5)$$

Kontrol kuralı Eşitlik 4.6'daki verilmiştir.

$$u = U_c \theta \quad (4.6)$$

Bu haliyle $\theta = \frac{b_m}{b}$ seçimi ile referans model ile santral çıkışını eşitlemek mümkündür ancak b değişeni bilinmediği veya zamanla değiştiği için θ değerini güncellemek gerekmektedir. Adaptasyon mekanizması içinde yer alan güncelleme kuralı (update law) için iki farklı seçenek vardır: MIT kuralı ve Lyapunov yaklaşımı. MIT kuralı transfer fonksiyonunu baz alan bir kontrol yaklaşımı getirirken, Lyapunov kuralı ise durum-uzay modeline dayanır. Lyapunov yaklaşımında kararlılık ön plandadır. Lyapunov yaklaşımı kapalı-çevrim bir sistem olacağını garanti etmektedir. Lyapunov denklemleri kullanılarak yapılan tasarımın zayıf noktası ise güncelleme kuralını oluşturacak Lyapunov fonksiyonunu bulmak için herhangi bir sistematik yol bulunmayışıdır. Bu nedenlerle tez çalışması esnasında MIT kuralı tercih edilmiştir.

Aşağıdaki tanımlanan tasarım yöntemi, yaklaşık duyarlılık işlevlerinin hesaplanması için kullanılan gradyan yöntemi üzerine kuruludur. Model referanslı adaptif kontrol için kullanılan MIT kuralı, MIT Enstrümantasyon Laboratuvarında geliştirildiği için bu adı almıştır [109].

Referans modelin çıkışı (Y_m) olan istenen santral davranışı ile santralin gerçek çıkışı (Y_p) arasındaki farka takip hatası (e) adı verilir. Bu fark adaptasyon mekanizması içinde hesaplanır. Eşitlik 4.7'de gösterildiği gibi takip hatası bilinen ve bilinmeyen sabitler ve santral transfer fonksiyonu cinsinden ifade edilebilir.

$$e = Y_p(t) - Y_m(t) = Y_m(t) \left(\frac{b}{b_m} \theta - 1 \right) \quad (4.7)$$

Eğer b sabiti biliniyor olsaydı, adaptif kontrol yaklaşımının nihai hedefi olan santral çıkışı ile referans model çıkışını eşitleyebilmek için $\theta = \frac{b}{b_m}$ eşitliği kullanılır ve sıfır takip hatası elde edilirdi. Ancak b sabiti bilinmediği ya da zamanla değişen bir sabit olduğu için adaptasyon mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Adaptasyon

mekanizması referans model tarafından oluşturulan istenen santral davranışının kontrolcü tarafından takip edilmesini sağlar.

Takip hatası sıfır olduğu zaman istenen davranış ile santral gerçek davranışı eşitlenmiş olur. Bu yüzden takip hatasının en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Bu sebeple adaptasyon mekanizmasında oluşturulan ve santral kontrolcüsünü eklenti üzerinden etkileyen θ değeri devamlı bir şekilde takip hatası değerini azaltacak şekilde güncellenmelidir. Eşitlik 4.8’de verilen ceza fonksiyonunun (J) (kayıp işlevi, maliyet işlevi olarak da bilinir) azaltılarak sıfıra değerine ulaştırılması için ceza fonksiyonunun Eşitlik 4.9’da verilen türevinin negatif olması gerekmektedir.

$$J(t, \theta) = |e(t, \theta)|^2 \quad (4.8)$$

$$\frac{d}{dt}J(t, \theta) = \frac{\partial}{\partial t}J + \frac{\partial}{\partial \theta}J \frac{\partial}{\partial t}\theta < 0 \quad (4.9)$$

Ceza fonksiyonundaki değişimin θ değerindeki değişimle orantılı olduğu kabul edilir. Bu sebeple, Eşitlik 4.10’da verilen θ değerinin türevinin değeri, Eşitlik 4.9’da verilen ceza fonksiyonunun türevine denktir [110]. Eşitlik 4.7’deki $\frac{\partial}{\partial \theta}e$ bileşenine sistemin hassasiyet türevi adı verilir. Eşitlik 4.10 adaptif kontrolcünün güncelleme kuralıdır.

$$\frac{d}{dt}\theta = -\gamma \frac{\partial}{\partial \theta}J = -\gamma \left[2e \frac{\partial}{\partial \theta}e \right] \quad (4.10)$$

Eşitlik 4.7 kullanılarak takip hatasının θ değerine göre kısmi türevi Eşitlik 4.11’de yazılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial \theta}e = \frac{\partial}{\partial \theta} \left[Y_m(t) \left(\frac{k}{k_0} \theta - 1 \right) \right] = \frac{b}{b_m} Y_m(t) \quad (4.11)$$

Eşitlik 4.11’deki kısmi türev ifadesi Eşitlik 4.10’daki yerine konulursa, θ değerinin takip hatasını minimize edecek şekilde güncellenmesi için ihtiyaç duyulan Eşitlik 4.12 elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\theta = -\Gamma Y_m(t)e(t, \theta) \quad (4.12)$$

Adaptasyon mekanizmasının çıkışını değiştirme oranı öğrenme oranına (Γ) bağlıdır. Öğrenme oranı ilişkisi Eşitlik 4.13'te verilmiştir.

$$\Gamma = \gamma \frac{b_m}{b} \quad (4.13)$$

Eşitlik 4.9'un integral halinde yazılmış hali Eşitlik 4.14'te verilmiştir.

$$\theta = -\Gamma \int [Y_m(t)e(t, \theta)dt] \quad (4.14)$$

Adaptasyon mekanizması içinde referans model çıkışı ve referans model çıkışı ile gerçek değer arasındaki farkın çarpımının integrali alınmaktadır. Bu toplam öğrenme oranı ile çarpılarak adaptasyon mekanizması çıkışı elde edilmektedir.

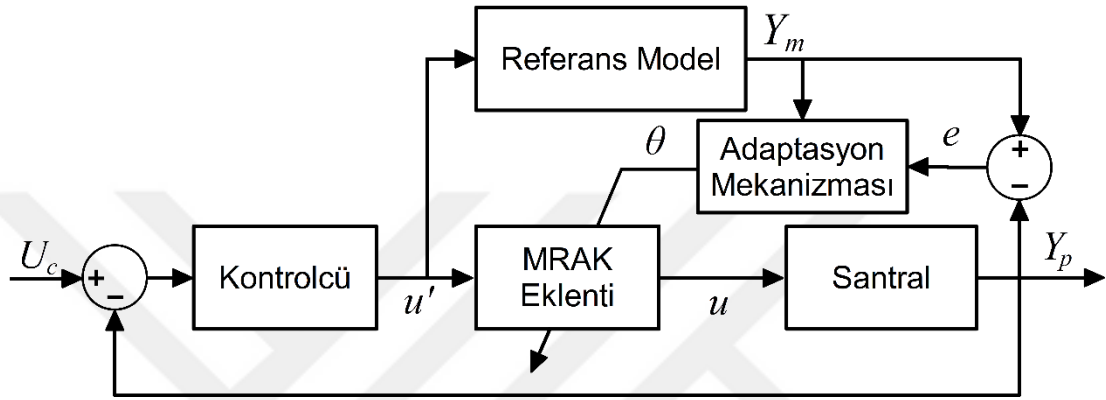
4.4 Önerilen Model Referanslı Adaptif Kontrol Eklentisi

Hız regülatörü içinde çalışan PI kontrolcüsü ile bir ünitenin aktif güç kontrolü veya hız kontrolü gerçekleştirilmektedir. Seçilen adaptif kontrol yönteminin hız regülatöründeki mevcut kontrol yapısını değiştirmemesi için model referanslı adaptif kontrol yaklaşımının bir eklenti olarak uygulanması uygun bulunmuştur. Önerilen model referanslı adaptif kontrol eklentisi Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Bu eklentinin Şekil 4.2'den farkı, hız veya aktif güç kontrolü için kullanılan PI kontrolcünün kullanılmaya devam etmesi ve adaptif katkıyı belirleyen θ değerinin PI kontrolcü çıkışını değiştirmesidir. Önerilen eklentinin bir diğer farkı ise referans model girişinin doğrudan hedef değerini (U_c) giriş değeri olarak almak yerine kontrolcü tarafından işlenen değeri giriş değeri almasıdır. Bu sayede adaptif kontrolcü yardımcı bir eklenti haline getirilmiştir. Ayrıca, referans model seçiminde kontrolcü işlemleri ile esneklik sağlanmıştır.

Önerilen model referanslı adaptif eklentili kontrolcüde iki farklı döngü yer almaktadır. Bunlar adaptif eklenti olmasa bile kapalı çevrim kontrolün geribesleme aldığı iç döngü ve eklentinin kontrolcü çıkışını belirlenen performans ölçütlerine

göre değiştirildiği dış dögüdür. Bu yaklaşımda kapalı çevrim kontrolde tek bir değiştirilebilir parametre (Θ) göz önüne alınmıştır. Referans model çıkışı (Y_m) ile hedef değer girişi (u') arasındaki ilişki Eşitlik 4.15'te verilmiştir. Burada k_o bilinen bir sabittir ve G_{plant} santralin transfer fonksiyonudur.

$$\frac{Y_m(t)}{u'(t)} = k_o G_{plant} \quad (4.15)$$



Şekil 4.3 : Önerilen model referanslı adaptif kontrol eklentisi.

Benzer bir şekilde, santral çıkış değeri (Y_p) ile santral giriş değeri (u) arasında Eşitlik 4.16'daki gibi bir ilişki vardır. Burada santralin iç dinamikleri tam olarak bilinmediği için, k bilinen bir sabit değildir:

$$\frac{Y_p(t)}{u(t)} = k G_{plant} \quad (4.16)$$

Eklentinin kontrol ilişkisi Eşitlik 4.17'de verilmiştir.

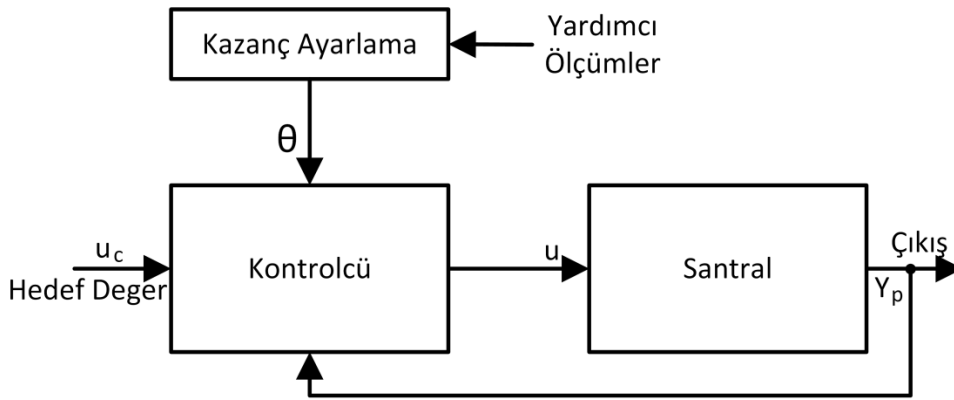
$$u = \theta u' \quad (4.17)$$

Adaptasyon mekanizması çıkışı (θ) için Eşitlik 4.18'deki ilişki üsteki bölümde anlatılan yöntemle benzer bir yaklaşımla elde edilmektedir.

$$\theta = -\Gamma \int [Y_m(t)e(t, \theta)dt] \quad (4.18)$$

4.5 Kazanç Ayarlama

İşletme koşullarındaki değişimin santral dinamiğinde nasıl bir değişikliğe yol açtığı bazı durumlarda bilinebilir. Bu durumda işletme koşullarındaki değişiklik gözlemlenerek kontrolcü parametrelerinin değiştirilmesi düşünülebilir. Kazanç ayarlama genel olarak bir karşılaştırma listesi üzerinden yapılan ve değişen koşullara karşı uygulanan adaptif bir kontrol yöntemidir. Kontrolcü içinde bulunduğu çalışma koşullarına değerlendirerek liste üzerinden mevcut duruma denk gelen değerleri seçer. Bu şekilde, kontrolcü birçok çalışma noktasını kapsayan geniş bir çalışma aralığında işlevini görebilir. Kazanç ayarlama kontrolcü parametrelerinin değişimi açık-çevrim şeklinde yapıldığı için, bu tip bir kontrol yaklaşımının adaptif sayılıp sayılmayacağı tartışılabilir. Diğer taraftan kazanç ayarlama yöntemi değişen santral parametrelerinin bozucu etkisine karşı kullanılabilen etkili bir kontrol yöntemidir.



Şekil 4.4 : Kazanç ayarlama şematik gösterimi.

Şekil 4.4 kazanç ayarlama yönteminin şematik bir gösterimini içermektedir. Bu yöntem için bazı yardımcı ölçümler, örneğin su seviye ölçümü, diğer ünitelerin kesici durumları, vb. gerekmektedir. Kazanç ayarlayıcı bu ölçümlerden faydalanarak kontrolcü için gerekli parametreleri belirler. Her bir çalışma noktası ya da aralığı için, parametreler çevrimdışı bir şekilde önceden tanımlanmış olmalıdır. Değişen bir koşul olduğunda, performans isterlerini karşılamak için kontrolcü kazanç ayarlayıcı modülden ilgili parametreleri çeker. Bu tip bir kontrol yöntemi ile çalışma boyunca karşılaşılabilecek bütün çalışma noktaları kapsanmış olur. Bu yöntem değişen koşullara karşı hızlı tepki verilmesini sağlar; ancak, kazanç ayarlama parametreleri çevrimdışı belirlendiği için zamanla bu parametrelerin yeniden ayarlanması

gerekebilir. Eğer çalışma noktası ya da aralığı sayısı fazla ise, bu yöntemin çalışması için o kadar çok tasarım ve kurulum çabası gerekecektir [111]. Kazanç ayarlama yönteminde temel bir sorun uygun değişkenlerin bulunmasıdır. Bu normalde kontrol edilen santrale dair edinilen önceki tecrübe ile bulunur. Uygun değişkenler bulunduğu zaman, yeterli sayıda işletme koşulu için kontrolcü parametreleri hesaplanır veya bulunur. Bu şekilde santral kontrolcüsü her bir işletme koşulu için ayarlanmış olur. Bu yöntemin en büyük zaafı, açık-çevrim bir yöntem olmasıdır. Değişkenin doğru ayarlanıp ayarlanmadığının anlaşılmasını sağlayacak herhangi bir geri besleme yöntemi yoktur. Bu yüzden her bir işletme koşulunda saha koşullarında belirlenen kontrolcü değişkenleri test edilmelidir. Diğer yandan değişen işletme koşullarına çok hızlı tepki verebilmesi kazanç ayarlama yöntemini etkin kılar.

Eşitlik 4.19’da parçalı sabit kontrolcü kazancı (C) tek bir değişkenin değerine göre değişmesi gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} C &= C_1 \text{ için } v_1 < v < v_2, \\ C &= C_2 \text{ için } v_2 < v < v_3, \\ C &= C_3 \text{ için } v_3 < v < v_4, \end{aligned} \quad (4.19)$$

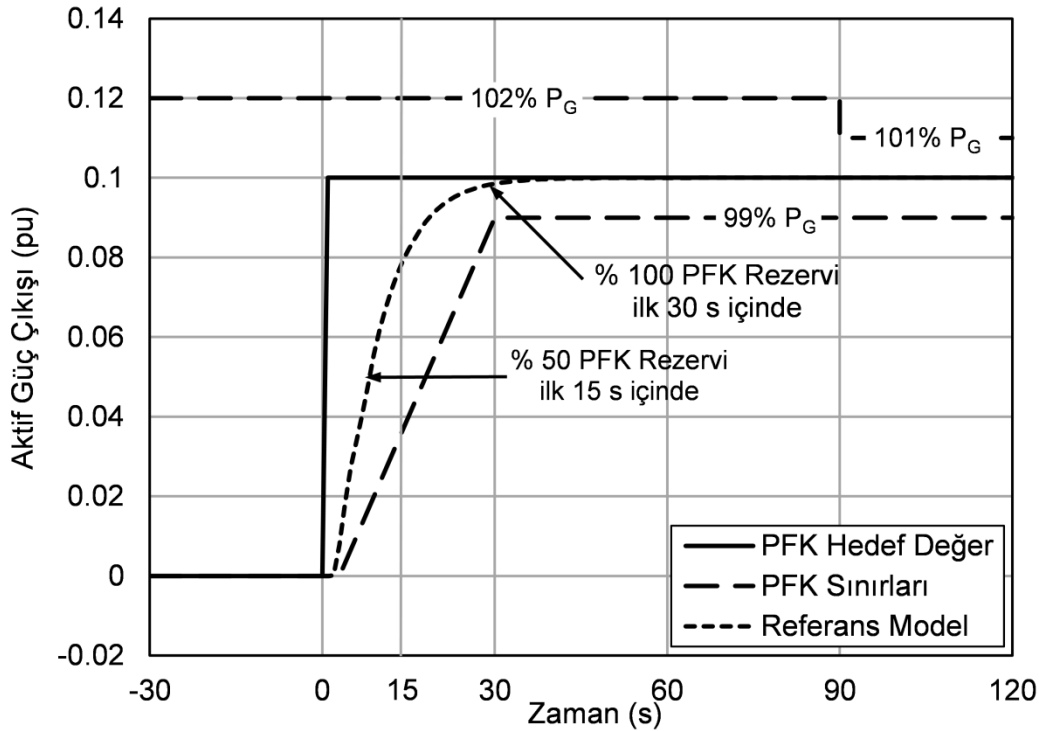
4.6 Model Referanslı Adaptif Kontrol Referans Modelleri

4.6.1 Primer frekans kontrolü referans modeli

Elektrik üretimi ile elektrik tüketimi arasındaki dengesizlik kendisini şebeke frekansında sapma olarak gösterir. Şebeke frekansının anma değerinde ($f_{\text{şebeke}} = 50$ Hz) dengede olduğu bir zamanda üretimin artması veya tüketimin azalması sonucu şebeke frekansında artış meydana gelir. Benzer bir şekilde üretimin düşmesi veya tüketimin artması şebeke frekansının azalmasına neden olmaktadır. Bu dengesizliğin giderilmesi amacıyla farklı zaman sabitlerine sahip olan ve birbirini tamamlayan dört farklı frekans kontrolü mevcuttur. Bunlar primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü, tersiyer frekans kontrolü ve zaman kontrolüdür. Bu kontrol yöntemleri arasında otomatik bir şekilde başlaması ve ünitelerdeki hız regülatörleri tarafından yapılması beklenen primer frekans kontrolüne, şebeke yönetmeliğine göre orta-büyük ünitelerin katkı sağlaması zorunludur. Türkiye’de EPDK tarafından

yayınlanan Şebeke Yönetmeliğine [112] göre bir frekans sapması sonrası, PFK rezervinin % 50'si ilk 15 saniye içinde, PFK rezervinin tamamının ise frekans değişikliğini takip eden ilk 30 saniye içinde sağlanması gerekmektedir.

Hidroelektrik santraller için 4 saniyeye kadar katkı sağlama gecikme toleransı vardır. Şebeke Yönetmeliğine göre tanımlanan beklenen primer frekans rezervi sağlama profili Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Aktif güç çıkışı değeri primer frekans kontrolü yapan ünitenin anma aktif güç çıkışına bölünerek per unit olarak normalize edilmiştir. Negatif yönde bir frekans sapması oluştuğunda (örneğin: frekans 49.8 Hz olduğunda, bu durum üretimin tüketimi karşılayamadığını göstermektedir), 90 saniye boyunca sağlanan PFK tepkisinin ünitenin anma gücünün % 2'sine kadar sapması kabul edilmektedir. 90 saniye sonrasında ise bu değer % 1'e düşmektedir.



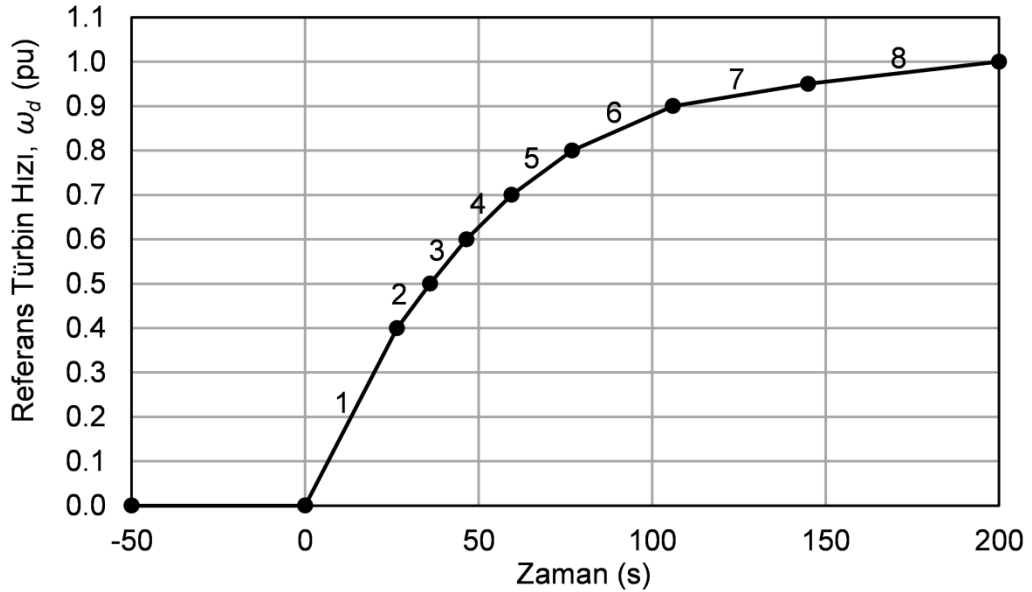
Şekil 4.5 : İstenen PFK rezerv sağlama profili.

Model referanslı adaptif kontrolcü için primer frekans etkili aktif güç kontrol modunda kullanılmak üzere referans model elde etmek amacıyla birinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile primer frekans kontrolü için talep edilen profilin referans modeli oluşturulmaktadır. Eşitlik 4.20'de gösterilen referans model çıkışı ile referans model girişi (u') arasındaki ilişkinin gösterdiği istenen PFK tepkisi, t_{PFC} değerinin 6 saniye olarak belirlenmesi yoluyla elde edilmektedir.

$$\frac{Y_m}{u'} = \frac{1}{t_{PFCS} + 1} \quad (4.20)$$

Kalıcı hız düşümü değeri her ülkedeki iletim sistemi operatörü tarafından her bir santralin özel koşulları dikkate alınarak belirlenir. Bu değer iletim sistemine bağlı olan ve primer frekans kontrolüne katkı sağlayan her bir ünitenin üzerine alacağı rezerv payını belirlemektedir. Herhangi bir frekans sapması durumunda ilgili üniteye hız regülatörlerinin kalıcı hız düşümü değerine göre otomatik bir şekilde yük alır veya yük atar. Buradaki merkezi koordinasyon sayesinde hız regülatörlerinin bahsedilen otomatik hareketi elektrik şebekesinde herhangi bir kararsız durum oluşturmaz; aksine bu katkı güç kalitesinin sağlanması açısından belirli büyüklükteki santraller için zorunlu tutulur.

4.6.2 Türbin hızı referans modeli



Şekil 4.6 : İstenen türbin hızı profili.

Senkronizasyon öncesi hız kontrolünün model referanslı adaptif kontrol yaklaşımı ile yapılabilmesi için türbin hızı için referans model oluşturulması gerekmektedir. Aktif güç kontrolü için oluşturulan referans modelin aksine senkronizasyon öncesi türbin hızı için oluşturulacak referans model isterleri herhangi bir yönetmelik tarafından tanımlanmamaktadır. Bu sebeple aktif güç kontrolü için kullanılan birinci dereceden transfer fonksiyonu yoluyla referans model tanımlama yöntemi yerine, bu kontrol yaklaşımının uygulandığı her üniteye tanımlanabilecek şekilde parçalı bir türbin hızı

referans modelinin oluşturulması uygun bulunmuştur. Bu sayede model tanımlarken üniteye özel esneklik sağlanabileceği değerlendirilmiştir. Şekil 4.6’da gösterilen istenen türbin hızı profili 8 ayrı bölgeye ayrılmıştır. Referans türbin hızı değeri adaptif kontrolcünün uygulandığı ünitenin anma türbin hızı değerine bölünerek per unit olarak normalize edilmiştir. Bu bölgeler genel olarak 0.1 birimlik türbin hızının eğimini tanımlarken, ilk bölge 0.4 birimlik bir bölgeyi, son iki bölge ise 0.05 birimlik bölgeleri tanımlamaktadır. Ünite durağan halden boşa dönme haline geçerken ilk 0.4 birimlik türbin hızını kapsayan bölge çok hızlı bir şekilde geçildiği için ilk bölge bu şekilde büyük seçilmiştir. Diğer yandan senkronizasyon öncesi 0.9 ve 0.95 ile başlayan son bölgelerin geçilme hızı neredeyse 0.1 birimlik bölgelerle aynıdır. Bu bölgelerin eğimleri senkronizasyon tarzına göre ve senkron generatörün ikazlanmasının türbin hızına etkisine göre değişmektedir. Üstte anlatılan 8 bölgeye ait başlangıç ve bitiş noktaları ile bölgelerin tanımlandığı denklemler Gezende HES için hazırlanmış ve Çizelge 4.1’de listelenmiştir.

Çizelge 4.1 : Gezende HES türbin hızı referans modelinin bölge tanımları.

Bölge	ω_{start} (pu)	ω_{end} (pu)	Eşitlik
1	0	0.4	$\omega_d = 0.0150t$
2	0.4	0.5	$\omega_d = 0.0100t + 0.4$
3	0.5	0.6	$\omega_d = 0.0100t + 0.5$
4	0.6	0.7	$\omega_d = 0.0070t + 0.6$
5	0.7	0.8	$\omega_d = 0.0060t + 0.7$
6	0.8	0.9	$\omega_d = 0.0030t + 0.8$
7	0.9	0.95	$\omega_d = 0.0012t + 0.9$
8	0.95	1	$\omega_d = 0.0010t + 0.95$

Bölgelerin etkinleştirilmesi için türbin hızının girdiği bölgenin başlangıç noktası referans alınmaktadır. Türbin hızı ilgili bölgeye girdiği anda zaman sayıcı devreye girerek gerçek türbin hızının o bölgede kaldığı süreyi hesaplar. Bu hesabın anlık sonucu olan t değişkeni, referans modeldeki eğim denkleminde kullanılır. Diğer yandan tabloda eğim denkleminde t değişkeni ile çarpılan katsayılar saha testlerinde ilgili bölgenin istenen davranışı sergilemesi için ayarlanır.

5. PFK ETKİLİ AKTİF GÜÇ KONTROLÜ İÇİN MRAK EKLENTİSİ

5.1 Seyhan I HES Proje Bilgisi



Şekil 5.1 : Seyhan I HES üstten görünüm.

Şekil 5.1’de gösterilen Seyhan I HES Türkiye’nin güneyinde Adana ili sınırları içinde yer almaktadır. İlk iki ünitesi 1956, son ünitesi ise 1964 yılında devreye alınmıştır. Üç adet düşey Francis üniteli bu santralin toplam kurulu gücü 60 MW’tır. 66 kV’luk bir şalt sahası üzerinden elektrik şebekesine bağlanmaktadır. 63 km²’lik bir göl alanına sahip olan Seyhan I HES’e ait karakteristik değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Baraj gölünden alınan su tek bir cebri boru ile santral girişindeki her bir ünite için bir adet kurulan denge bacalarının girişine kadar gelmektedir. Burada üç farklı üç boru ile denge bacalarına giren su ardından ana giriş vanasından sonra ayar kanatlarına ulaşmaktadır. 32 metrelik anma net düşü değerine sahip olan Seyhan I HES anma ünite debisi 77 m³/s’dir.

Çizelge 5.1 : Seyhan I HES karakteristik değerleri.

Parametre	Değer	Birim
Anma Net Düşü	32	m
Anma Akış Oranı	77	m ³ /s
Denge Bacası Depolama Süresi	124.8	s
Denge Bacası Ortalama Kesit Alanı	310	m ²
Cebri Boru Uzunluğu	81.7	m
Cebri Boru Kesit Alanı	21.63	m ²
Cebri Boru Sürtünme Sabiti	0.05	-
Yüksüz Konum Ayar Kanat Açıklığı	11	%
Tam Yükte Ayar Kanat Açıklığı	85	%
Servo Silindir Zaman Sabiti	0.5	s
Ayar Kanatları Gecikmesi	0.5	s
Generatör Atalet Momenti	3320	ton.m ²
Türbin Anma Hızı	125	d/d
Anma Görünür Güç	22.5	MVA
Generatör Ataleti Zaman Sabiti	3.14	s

5.2 Model Doğrulama Çalışmaları

Seyhan I HES'e özel matematiksel model oluşturulurken üçüncü bölümde anlatılan hidroelektrik santral lineer olmayan santral modeli geliştirme denklemleri kullanılmıştır. Bu çalışmalar esnasında aşağıdaki varsayımlar ve modelleme ilkelerinden faydalanılmıştır:

1- Modellenen santral kısa-orta uzunlukta bir cebri boruya sahiptir. Bu yüzden ilerleyen dalga etkisi göz önüne alınmamıştır. Bu santralin suyolunda enerji tüneli yoktur. Santralde denge bacası mevcuttur.

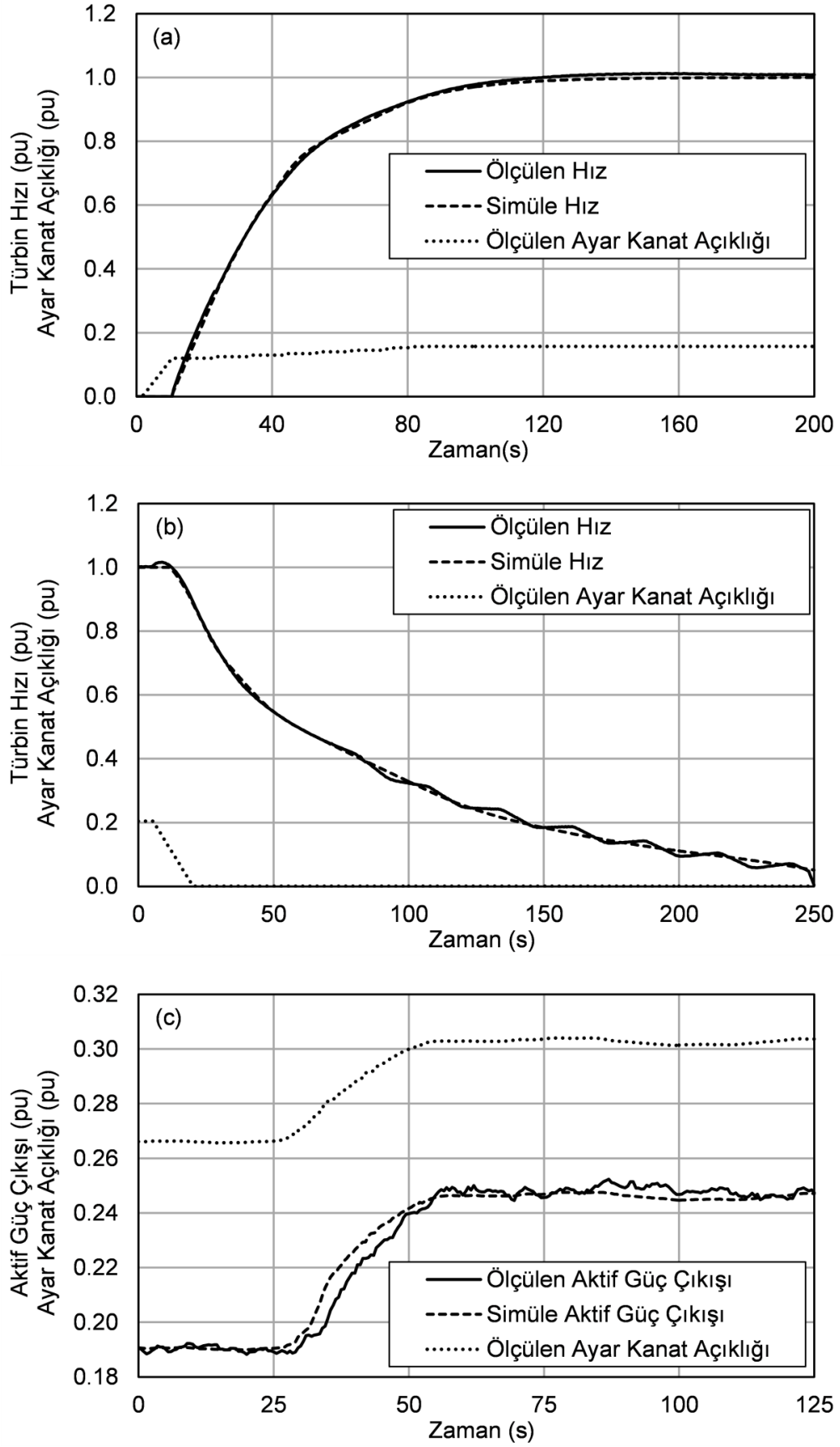
2- Generatör içindeki elektromanyetik etkileşimler, hız regülatörü tepkilerinden çok daha hızlı olduğu için generatöre dair elektromanyetik etkileşimler göz önüne alınmamıştır. Yapılan modelleme çalışmasında asıl amaç hız regülatörü kontrol davranışlarının incelenmesi ve geliştirilmesidir. Diğer yandan, şebeke bağlantısı öncesi türbin hızının ayarlanması esnasında, generatöre ait mekanik başlama zamanı türbin hızının değişiminde etkindir. Bu yüzden hız regülatörünün türbin hızı regülasyon performansı için generatörün mekanik başlama zamanının göz önüne alınması elzemdir. Ayrıca, yük atma esnasında ortaya çıkan türbin hızının yükseleceği değer, ünitenin dönel ataleti tarafından sınırlandırılmaktadır. Türbinin dönel atalet momenti, generatörün toplam atalet momentinin % 5'i kadardır [49]. Bunun anlamı dönel atalet momentinin, baskın olarak generatör karakteristikleri

tarafından belirlenmesidir. Bu sebeple hesaplamalarda generatörün dönel atalet momenti dikkate alınmıştır.

3- Şebeke ve yük modellemesi hız regülatörünün izole ve ada modundaki performansını değerlendirmek için gereklidir. Bu çalışma koşullarında küçük bir yük ya da üretim değişikliği elektriksel frekansta kendisini büyük değişiklikler olarak gösterir. Bağlaşımlı şebeke çalışma (interconnected mode of operation) performansını değerlendirilmesi için şebeke frekansı sabit tutulur [113]. Primer Frekans Kontrolü testleri için ihtiyaç duyulan şebeke frekans sapmaları, simule şebeke frekansının üzerine basamak değişiklikler yapılarak oluşturulur.

Seyhan I HES'e özel oluşturulan hidroelektrik santral modelinin doğrulanması için simülasyon ortamında yapılan testlerden ve saha testlerinde alınan sinyaller karşılaştırılmıştır. Seyhan I HES'e ait karakteristik değerler kullanılarak hidroelektrik santral lineer olmayan modeli için ihtiyaç duyulan parametreler elde edilmiştir. Doğrulama için sahadan toplanan ayar kanat açıklığı bilgisi Matlab/Simulink'te oluşturulan matematiksel modele girdi (simin) olarak verilmiştir. Saha testlerine benzer düşü değeri kullanılarak hidroelektrik santral modelinden elden edilen türbin hızı ve aktif güç çıkışı bilgileri çıktı (simout) olarak kaydedilerek daha önce sahadan toplanan türbin hızı ve aktif güç çıkışı bilgileri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2'de benzetim sonuçları ve saha testleri sonucu elde edilen bilgilerin karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu şekillerdeki türbin hızı, aktif çıkış gücü ve ayar kanat açıklığı değerleri Seyhan I HES'teki ilgili anma değerlerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir. Bu testler esnasında Şekil 5.2-a'da hız regülatöründe senkronizasyon öncesi hız kontrolü, Şekil 5.2-b'de açıklık kontrolü, Şekil 5.2-c'de ise aktif güç kontrolü etkindir.

Şekil 5.2-a'da gösterilen ünitenin başlatılması esnasındaki türbin hızını kapsayan benzetim sonuçları ve saha testleri arasında saha testlerinden toplanan ayar kanat açıklık değerleri için büyük oranda örtüşme görülmektedir. Üniteye "Başlat" komutu verilmesi ile hız regülatörü ayar kanatları yüksüz konuma kadar açarak türbin hızının belli bir seviyeye ulaşması için beklemiştir. Ayar kanatlarının açılması ile türbine giren suyun oluşturduğu tork, türbin statik sürtünme torkunu yeninceye kadar türbin hızı sıfırda kalmaya devam etmiştir.



Şekil 5.2 : Seyhan I HES saha ölçümleri ile HES modelinin doğrulanması a) ünitenin başlatılması b) ünitenin durdurulması c) ünitenin yük alması.

Türbin hızı için önceden tanımlanan eşik değerine ulaşılnca hız regülatörü türbin hızını anma değerine oturtmak için regülyasyona başlamıştır. Türbin hızı anma değerine ulaştığında hız regülatörü aktif güç modunda çalışmak için ünitenin şebekeye kesici kapatılarak bağlanmasını beklemektedir. Bu işlev ünite senkronizasyon sistemi tarafından şebekeye bağlanma şartlarının oluşması kontrol edilerek, hız regülatörü ve ikaz sistemine sinyal gönderilmesi ve şartlar tamamlandığı zaman ise ünite kesicisinin kapatılması şeklinde olmaktadır. Seyhan I HES'te otomatik senkronizasyon sistemi veya operatör tarafından oluşturulan kesici kapatma komutu senkronizasyon kontrol cihazından geçirilerek ünite kesicisine gönderilmektedir.

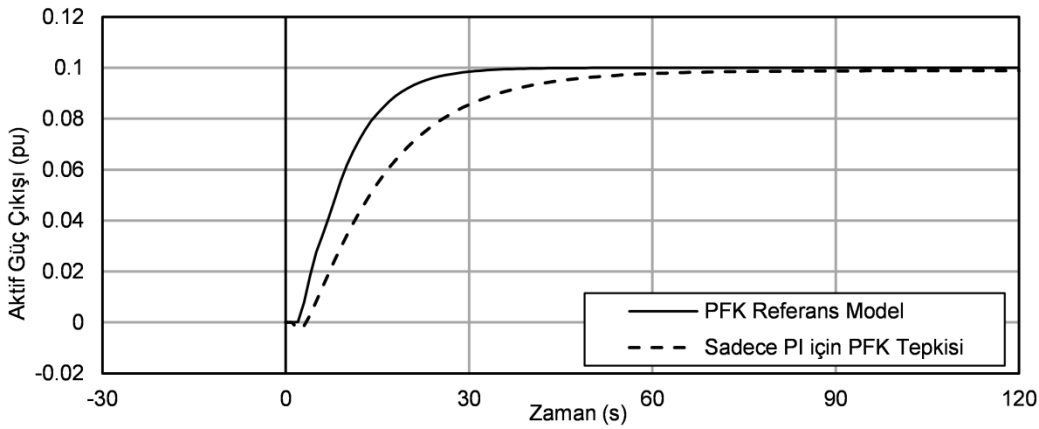
Ünitenin durdurulması için öncelikle ünitenin şebeke ile bağlantısının kesilmesi gerekmektedir. Bunun için ise ünitenin aktif güç çıkışı ve reaktif güç değerlerinin sıfıra yakın hale getirilir. Bu işlem Seyhan I HES'te operatör tarafından hız regülatörüne sıfıra yakın bir aktif güç çıkış hedef değeri ve ikaz sistemine ise sıfır reaktif güç hedef değeri verilmesi ile uygulanır. Aktif güç çıkışının ve reaktif gücün sıfıra yakın bir hale gelmesiyle santral operatörü ünite kesicisini elle açmaktadır. Ardından santral operatörü tarafından verilen "Dur" komutu ile hız regülatörü ayar kanatlarını tam kapatır. Bu kapatma sonrası türbin hızı mekanik başlama sabiti ile orantılı bir şekilde azalmaya başlar. Şekil 5.2-b'de görüldüğü gibi ayar kanatlarının kapatılması sonucu benzetim ve saha testlerinde birbiri ile örtüşen bir şekilde türbin hızı sıfır olmaktadır. Genellikle orta-büyük ünitelerde ünite dururken türbin hızı anma hızının % 20-40'ına düştüğünde generatör frenleri devreye girer ve türbin hızının düşüşünü Şekil 5.2-b'de 80. saniye sonrasında görüldüğü gibi hızlandırır. Bu şekilde anma hızının % 20-30'una denk gelen bölgede ölçülen türbin hızında görülen kademelenmenin sebebi frenlerin ünite türbin hızı sıfır olana dek düzenli olarak devreye girmesi ve çıkmasıdır. Şekildeki simülasyon sonuçları ve saha test sonuçları ünite durdurma süreci için birbiri ile frenleme dönemi dışında örtüşmektedir. Hidroelektrik santral lineer olmayan modeline fren etkisi hız regülatörü tasarımına bu bölgedeki değişikliklerin bir etkisi olmadığı içi eklenmemiştir.

Şekil 5.2-c'de ünitenin yük alması sırasında aktif güç çıkışı ve ayar kanatlarında meydana gelen değişiklik gösterilmiştir. Seyhan I HES'te ünitenin yük alması veya yük atması santral operatörünün hız regülatörü paneline girdiği hedef değeri ile olmaktadır. Aktif güç çıkışının 0.19 pu'da 0.25 pu'ya yükseltilmesi için ayar

kanatları 0.27 pu'da 0.31 pu'ya kadar artırılmıştır. Şekilde görülen benzetim sonuçları ile saha testleri birbiri ile örtüşmektedir. Aktif çıkış gücü saha testlerinde görülen dalgalanma ölçü transformatörleri ve hız regülatörü aktif güç ölçü devresindeki cihaz hassasiyetleri nedeniyle olmaktadır. Bu sebeple simülasyon sonuçlarında bu tip bir değişiklik veya dalgalanma görülmemektedir.

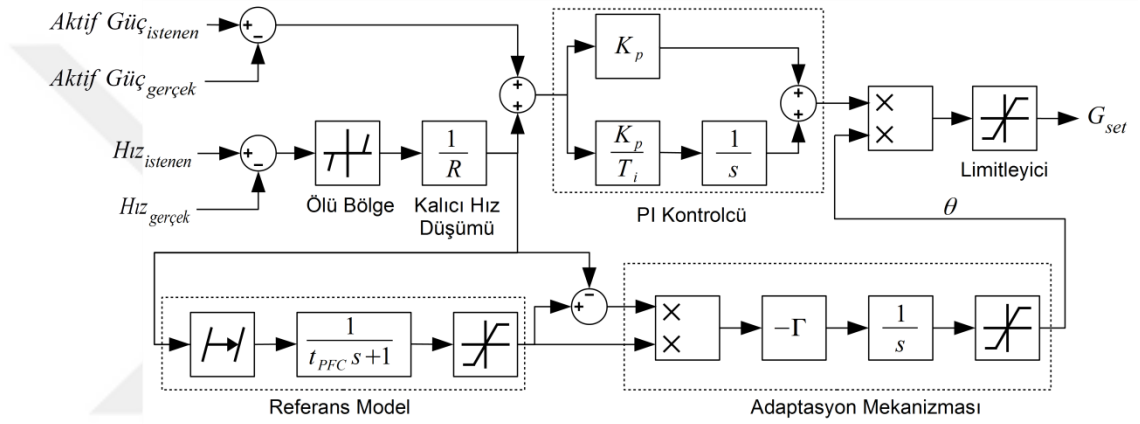
5.3 Adaptif Kontrolcü Tasarımı

Şekil 5.3'te PFK etkili aktif güç kontrolü için referans model ile santral davranışı gösterilmiştir. Bu şekilde referans model ile santral davranışının arasındaki ilişkinin tek bilinmeyene dayanmadığı görülmektedir. Primer frekans kontrol etkili aktif güç kontrolünde referans model çıkışı ile santral çıkışı arasındaki fark sadece bir katsayıdan ibaret değildir. Birinci dereceden bir transfer fonksiyonu ile ifade edilen referans modelin hem DC kazanç (DC gain) hem de zaman sabiti santral çıkışından farklı olmaktadır. [109] nolu kaynakta referans model ile gerçek santral çıkışının iki bilinmeyen ile ilişkilendirilmesi halinde iki farklı Θ (Θ_1 , Θ_2) değerleri kullanılması gerektiği yazmaktadır. Ancak, bu kaynaktaki adaptif kontrol yaklaşımında referans model doğrudan hedef değer girişini almaktadır ve sonrasında herhangi bir kontrolcü bulunmamaktadır. Tez çalışması kapsamında önerilen model referanslı adaptif kontrolcüde ise referans model giriş değeri PI kontrolcü çıkışıdır ve hedef değer alınmasından sonra kapalı çevrim PI kontrolcü yer almaktadır. Bu nedenle iki farklı Θ değeri yerine PI kontrolcüsünün katsayılarını değiştiren tek bir Θ ile primer frekans kontrolü için model referanslı adaptif kontrolcü elde edilebilmiştir.



Şekil 5.3 : PFK etkili aktif güç kontrolü için referans model ile santral davranışı.

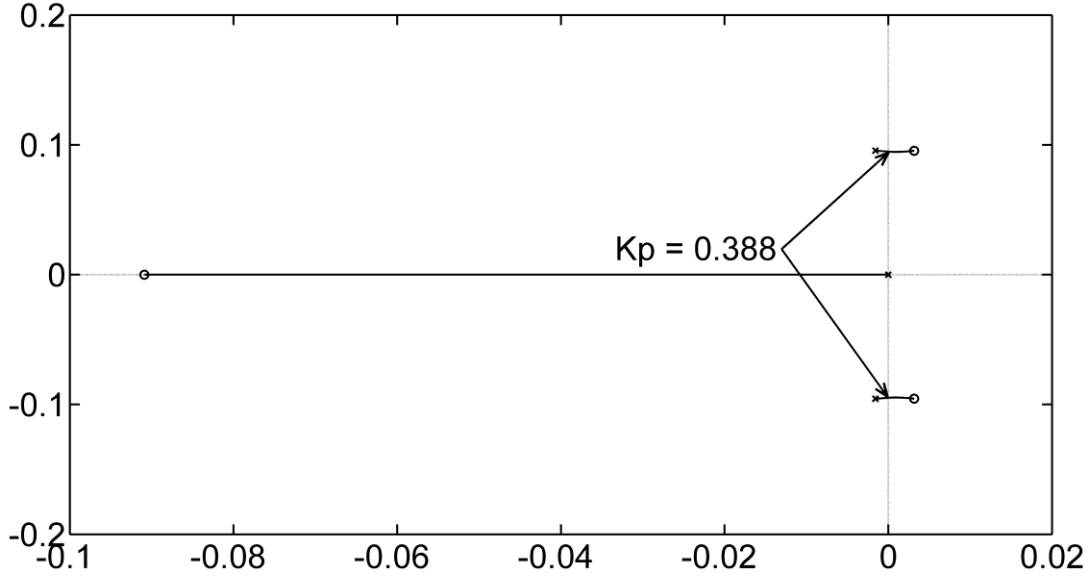
Şekil 5.5'te tek bir Θ değeri ile geliştirilen primer frekans kontrol etkili model referanslı adaptif kontrolcünün şematik gösterimi yapılmıştır. PI kontrolcünün girişi farklı hedef değerleri olan ve farklı geri beslemelere sahip iki koldan oluşmaktadır. Bu kollardan ilki aktif güç çıkışı koludur. Bu kol için hata değeri sisteme verilen aktif güç çıkış hedef değeri (*Aktif Güç_{istenen}*) ile gerçek aktif güç çıkışı (*Aktif Güç_{gerçek}*) arasındaki farktır. İkinci kol ise frekans sapmasını oluşturan istenen frekans değeri (*Hız_{istenen}*) ile gerçekleşen frekans değeri (*Hız_{gerçek}*) arasındaki fark değerinin ölü bölgede değerlendirilmesini takiben kalıcı hız düşümüne bölünmesinin ardından aktif güç çıkışı koluna eklenmesi ile elde edilen primer frekans kontrol koludur.



Şekil 5.4 : Primer frekans kontrolü etkili model referanslı adaptif kontrolü blok şeması.

Ayrıca ikinci koldan elde edilen primer frekans kontrolü hatası başka bir kol üzerinden referans modele gönderilir. Ayar kanatlarının hareketinde meydana gelen gecikmeyi oluşturmak için referans modele bir gecikme eklenmiştir. Referans model içinde yer alan sınırlayıcı ise referans model çıkışını önceden belirlenen primer frekans kontrolü rezervi içinde tutmaya yarar. Referans model tarafından oluşturulan istenen davranış ile gerçek primer frekans kontrol tepkisi arasındaki fark adaptasyon mekanizmasına verilir. Adaptasyon mekanizmasının çıkışı olan Θ değeri ile PI kontrolcünün çıkışı düzeltilmektedir. Çoğu hız regülatörü sisteminde, kontrolcü çıkışı bir yük sınırlayıcı vasıtasıyla sınırlandırılır. Kontrolcü çıkışı (G_{set}) sınırlayıcının ardından ayar kanat eyleyicisine gönderilir. Bu hedef değer üzerinden ayar kanatları regüle edilerek türbine giren su miktarı ayarlanır.

Şekil 4.3 ile karşılaştırıldığında PI kontrolcü çıkışı u' , u' ile Θ çarpımı u , referans model çıkışı Y_m , adaptasyon mekanizması çıkışı Θ , e takip hatası olarak adaptasyon mekanizmasına girmektedir.



Şekil 5.5 : Aktif güç çıkışı döngüsü root locus.

Tasarlanan kontrolcünün kararlılık durumunun değerlendirilmesi için [114] nolu çalışmada tarif edilen yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde Bölüm 3.3 Eşitlik 3.28'de sunulan ve cebri boru-denge bacası arasındaki hidrolik etkileşimi de hesaba dahil eden türbin mekanik güç çıkışı ile ayar kanat açıklığı arasındaki ilişkinin lineer modeli kullanılmaktadır. Kapalı çevrim aktif güç kontrol döngüsünün root locus analizi Matlab programında yapılmıştır. Bu şekilde adaptif kontrolcünün hangi Θ değerinden sonra kararsız duruma geçtiği görülecektir. Buna ek olarak, öğrenme oranı (Γ) değeri adaptasyon mekanizmasının çıkış değerine (Θ) ne kadar hızlı bir şekilde yaklaşılacağını belirlemektedir. Öğrenme oranının belli bir değer üstüne çıkması durumunda ise Θ değerinde salınımlar görülmektedir. Öğrenme oranındaki kritik değer yapılan simülasyonlar ile bulunmaktadır.

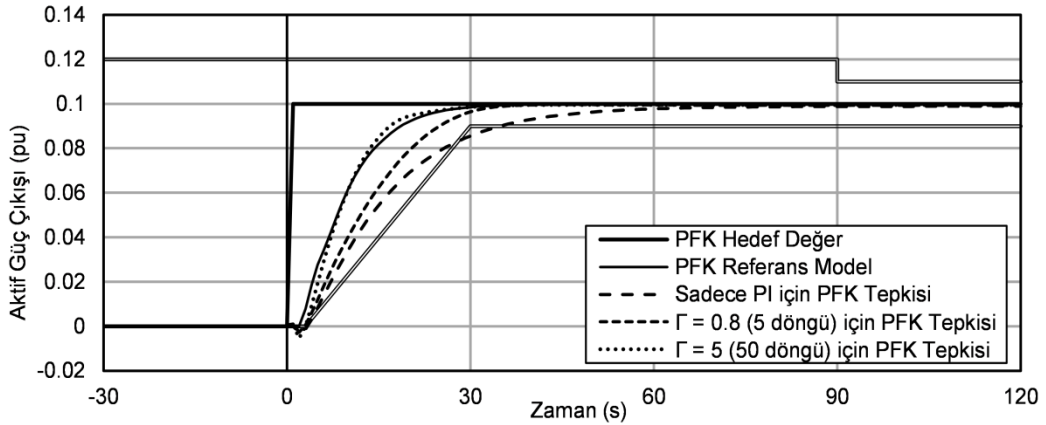
Şekil 5.4'te bulunan PI kontrolcünün parametreleri $K_p = 0.25$ ve $T_i = 11$ s.'dir. Şekil 5.5 model referanslı adaptif kontrolcü etkin değilken, kapalı çevrim sistemin farklı oransal kazanç değerleri için root locusunu göstermektedir. Düşük frekanslı kutup çifti, $K_p = 0.388$ değerinden sonra kompleks düzlemin sağ tarafına geçmektedir. Model referanslı adaptif kontrolcü etkin olarak K_p değerini değiştirdiği için, kapalı çevrim sistem $\Theta=1.55$ değerine kadar kararlılığını koruyacaktır.

5.4 Simülasyonlar

5.4.1 Net düşüde yaşanan değişim

Baraj göllü bir HES'in göl seviyesi kuru bir mevsimin ardından anma değerinin yüzde 90 dolaylarına düşebilir ya da yağışlı bir mevsimin ardından anma değerinin yüzde 110 seviyelerine çıkabilir. Bunun yanında komşu ünitelerin devreye girmesi, ünitelerden daha çok suyun türbinlenerek bırakılacağı için kuyruk suyunu artırır. Model referanslı adaptif kontrol katkısı net düşü değeri 0.9'a düştüğü zaman daha hissedilir hale gelir. Çünkü hız regülatörü, aynı hedef güç değerine ulaşmak için ayar kanatlarını daha çok açmak durumunda kalır. Bu durum primer frekans kontrol davranışında gecikmeye yol açar.

Referans model gerçek primer frekans kontrol hareketini anma düşü değerine (net düşünün 1.0 olması durumu) göre modeller. Öğrenme oranı Γ değeri ise referans model ile gerçek primer frekans etkisi birbirine belirli bir aralık içinde eşitse değerini korur ve 1 kalır. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi kalıcı hız düşümü değeri, frekans sapsmalarına karşı ünitenin ne kadar yük alacağını belirlemektedir. Bu çalışmada $R=0.04$ olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, 0.004'lük bir frekans sapsması, örneğin şebeke frekansının 49.8 Hz olması, primer frekans kontrolü hareketinin 0'dan 0.1'e doğru değişmesini gerektirmektedir.



Şekil 5.6 : Net düşünün 0.9 olduğu durumda primer frekans kontrolü simülasyonları.

Şekil 5.6 net düşünün 0.9 olduğu durumda yapılan simülasyonları göstermektedir. Bu şekildeki aktif çıkış gücü değeri Seyhan I HES'in ünite anma aktif çıkış gücü değerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir. 0.1'lik aktif güç değişimine neden olacak test frekans değişimi modele verilmiştir. Model referanslı

adaptif kontrol eklentisi etkin değilken, mevcut ayarlarıyla PI kontrolcü, frekans sapmasından ancak 60 saniye sonra primer frekans kontrol hareketini tamamlayabilmektedir. Bu hareket taban performans olarak belirlenmiş ve referans modelin hatalarının toplamı (e^2) 1 değerine normalize edilmiştir.

Çizelge 5.2 : Model referanslı adaptif kontrolcü katkısı.

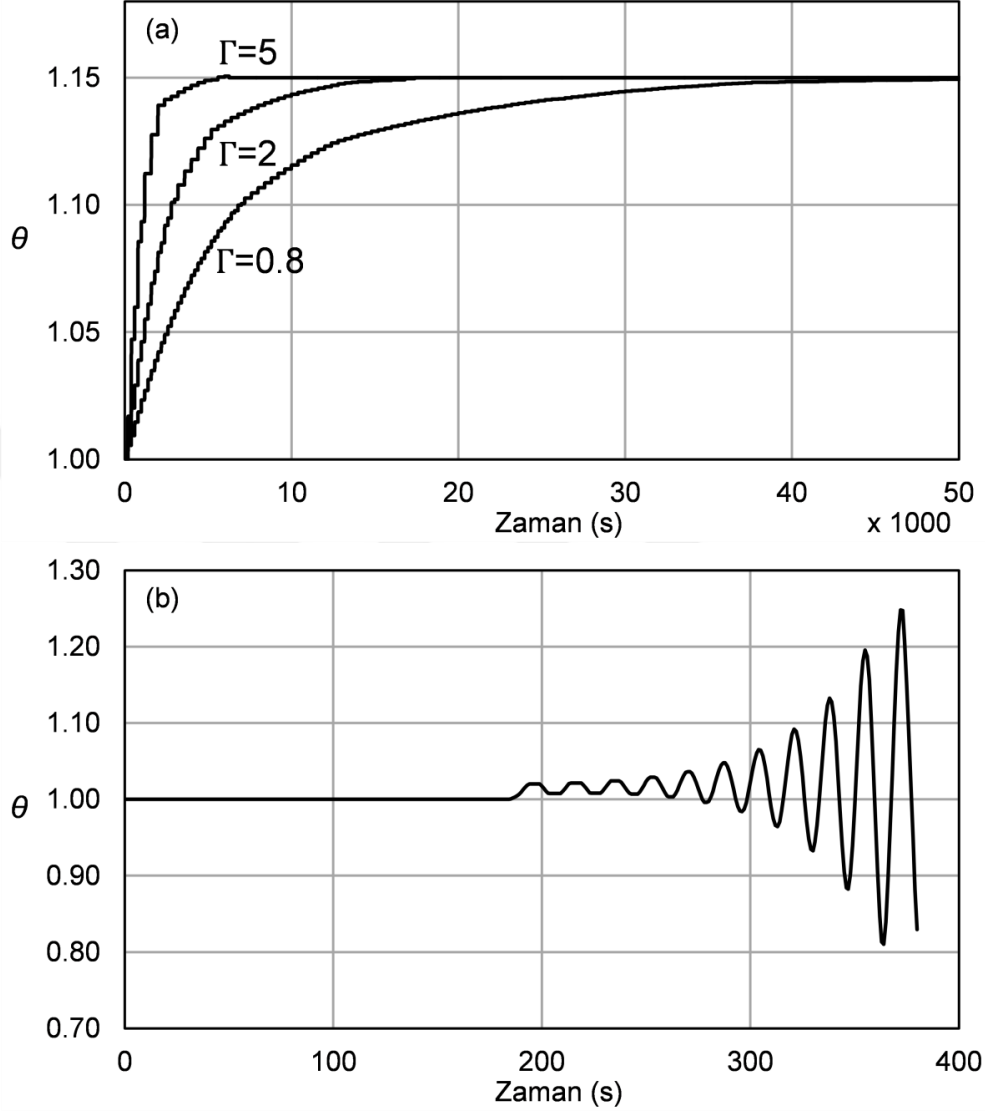
Senaryo		Döngü Sayısı	$\sum e^2$	Baz Senaryoya Göre İyileşme
Net Düşü	Γ			
0.9	-	-	1 pu	Baz
0.9	0.8	5	0.412 pu	58.8%
0.9	0.8	10	0.272 pu	72.8%
0.9	0.8	50	0.047 pu	95.3%
0.9	2	5	0.237 pu	76.3%
0.9	2	10	0.118 pu	88.2%
0.9	2	50	0.026 pu	97.4%
0.9	5	5	0.112 pu	88.8%
0.9	5	10	0.041 pu	95.9%
0.9	5	50	0.025 pu	97.5%

Farklı öğrenme oranı ve döngü sayıları (örneğin frekans sapmasının etkin olması, ortadan kaldırılması, tekrar etkinleştirilmesi) için yapılan simülasyonların sonuçları Çizelge 5.2'de listelenmiştir. Öğrenme oranı, $\Gamma=0.8$ için, 5 döngü sonrası, primer frekans rezervinin tamamı 35 saniyede verilmektedir, ancak verilen rezerv izin verilen profilde olduğu için isterler karşılanmıştır. Hataların toplamı olan e^2 değeri baz alınarak bir değerlendirme yapılırsa sağlanan iyileşmenin % 58.8 olduğu görülmektedir. Döngü sayısı arttıkça iyileşme artmaktadır. 50 döngü sonrası % 95'ten fazla iyileşme sağlanmıştır.

Anma net düşü değerinde, primer frekans kontrol tepkisi ile referans model çıkışı örtüşmektedir. Bu nedenle Θ değeri 1'dir. Net düşü azalınca, her bir döngüde Θ değeri güncellenir. 100 Hz'lik bir kontrol döngüsünde, bu güncelleme sayısı 30 saniye içinde 3000 güncellemeye ulaşır. Ancak; belirli bir net düşü için Θ değeri hep aynı değere yakınsar ve öğrenme oranı Γ değeri arttıkça, bu yakınsama Şekil 5.7-a'da görüldüğü gibi daha hızlı gerçekleşir. Simülasyon çalışmaları sonucu $\Theta=1.15$ olarak bulunmuştur. Bu nihai değer, önceki bölümde yapılan kararlılık analizlerinde elde edilen kararlılık sınırlarının içindedir.

Diğer yandan, öğrenme oranı sürekli artırılarak, bu artışın kontrolcü performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucu Γ değerinin belli bir

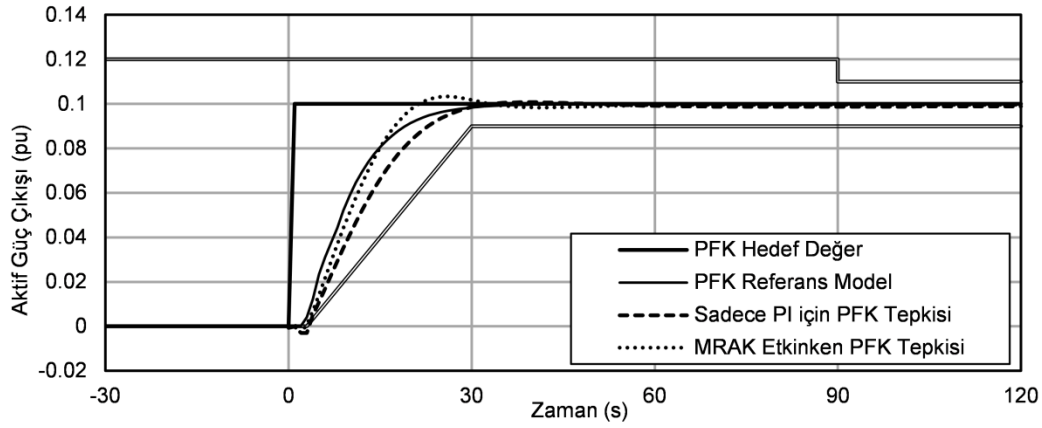
sınır değerin üstüne çıkması durumunda, θ değerinin değişiminde kararsız davranışlar görülür. Yapılan simülasyonlar kritik Γ değerinin 5.6 olduğunu göstermiştir. θ değerindeki kararsız davranış Şekil 5.7-b’de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Net düşünün 0.9 olduğu durumda farklı Γ değerleri için θ değerindeki değişim a) $\Gamma < \Gamma_{kritik}$ (b) $\Gamma > \Gamma_{kritik}$

5.4.2 Türbin veriminde düşüş

Yaşlanma nedeniyle türbin verimi yıllar içinde çarpıcı bir şekilde düşebilir. Verim değeri düştüğünde aynı aktif güç çıkışını verebilmek için, hız regülatörü ayar kanatlarını daha çok açar ve daha çok su türbinler. Bu senaryo G_{fl} değerini artırılması ile test edilebilir. Bu değer ünitenin anma aktif güç çıkışına ulaştığı ayar kanat açıklığı değeridir. Bu değerdeki artış türbin kazancı olan K_{tur} değerini etkiler.



Şekil 5.8 : Anma net düşü değerinde düşük türbin verimi ile ilgili simülasyonlar.

Şekil 5.8'de türbin verimi üstte anlatıldığı şekilde düşürüldüğü durumda yapılan simülasyonlar verilmiştir. Bu şekildeki aktif çıkış gücü değeri Seyhan I HES'in ünite anma aktif çıkış gücü değerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir. Anma net düşü değerinde tam yük ayar kanat açıklığı, G_{fl} , değeri % 84'ten % 94'e artırılmıştır. Bu değişiklik türbin kazancı değerinde % 13'lük bir azalma oluşturmuştur. Model referanslı adaptif kontrol eklentisi etkin değilken primer frekans kontrol tepkisi referans model ile tanımlanan profilden sapmaktadır. Ancak; hız regülatörü kontrolcüsü bu sapmanın üstesinden gelerek ünite aktif güç çıkışını istenen aralıkta sağlamayı başarmaktadır. Model referanslı adaptif kontrol etkinleştirildiğinde ise primer frekans kontrol tepkisi iyileştirilmiştir. Bu durumda çarpıcı bir iyileştirme etkisi olmamasına karşın, model referanslı adaptif kontrolcü bu tip eskimeye bağlı performans düşüklüğü sorunları için önleyici bir yöntem olarak kullanılabilir.

6. SENKRONİZASYON ÖNCESİ HIZ KONTROLÜ İÇİN MRAK EKLENTİSİ

6.1 Gezende HES Proje Bilgisi



Şekil 6.1 : Gezende HES üstten görünüm.

Şekil 6.1’de görülen Gezende HES Türkiye’nin güneyinde Mersin ili sınırları içinde yer alır. 1993 yılında devreye alınmıştır. Üç adet düşey Francis türbinli ünitesi bulunan Gezende HES, toplam 159 MW kurulu gücündedir. 154 kV’luk bir şalt sahası üzerinden elektrik şebekesine bağlanmaktadır. 3.8 km²’lik bir göl alanına sahip olan Gezende HES’e ait karakteristik değerler Çizelge 6.1’de verilmiştir. Baraj gölünden alınan su tek bir enerji tüneli üzerinden denge bacasına gelmektedir. Enerji tünelinin uzunluğu yaklaşık 8.5 km’dir. Denge bacasının ardından sürekli açık tutulan ana kelebek vanadan geçirilerek tek bir cebri boru ile ünite girişlerine kadar getirilen su ünite girişlerinde üç farklı cebri boruya ayrılır. Ünitelerdeki ünite kelebek

vanalarından sonra su ayar kanatlarına ulaşmaktadır. 154 metrelik anma net düşü değerine sahip olan Gezende HES anma ünite debisi $38.6 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Gezende HES'e ait karakteristik değerler Çizelge 6.1'de sunulmuştur.

Çizelge 6.1 : Gezende HES karakteristik değerleri.

Parametre	Değer	Birim
Anma Net Düşü	154	m
Anma Akış Oranı	38.6	m^3/s
Enerji Tüneli Uzunluğu	8543	m
Enerji Tüneli Kesit Alanı	24.6	m^2
Enerji Tüneli Sürtünme Sabiti	0.08	-
Denge Bacası Depolama Süresi	124.8	s
Denge Bacası Ortalama Kesit Alanı	310	m^2
Cebri Boru Uzunluğu	549.3	m
Cebri Boru Kesit Alanı	19.63	m^2
Cebri Boru Sürtünme Sabiti	0.05	-
Yüksüz Konum Ayar Kanat Açıklığı	18	%
Tam Yükte Ayar Kanat Açıklığı	93	%
Servo Silindir Zaman Sabiti	0.5	s
Ayar Kanatları Gecikmesi	0.5	s
Generatör Atalet Momenti	803	ton.m^2
Türbin Anma Hızı	333.33	d/d
Anma Görünür Güç	62.5	MVA
Generatör Ataleti Zaman Sabiti	3.14	s

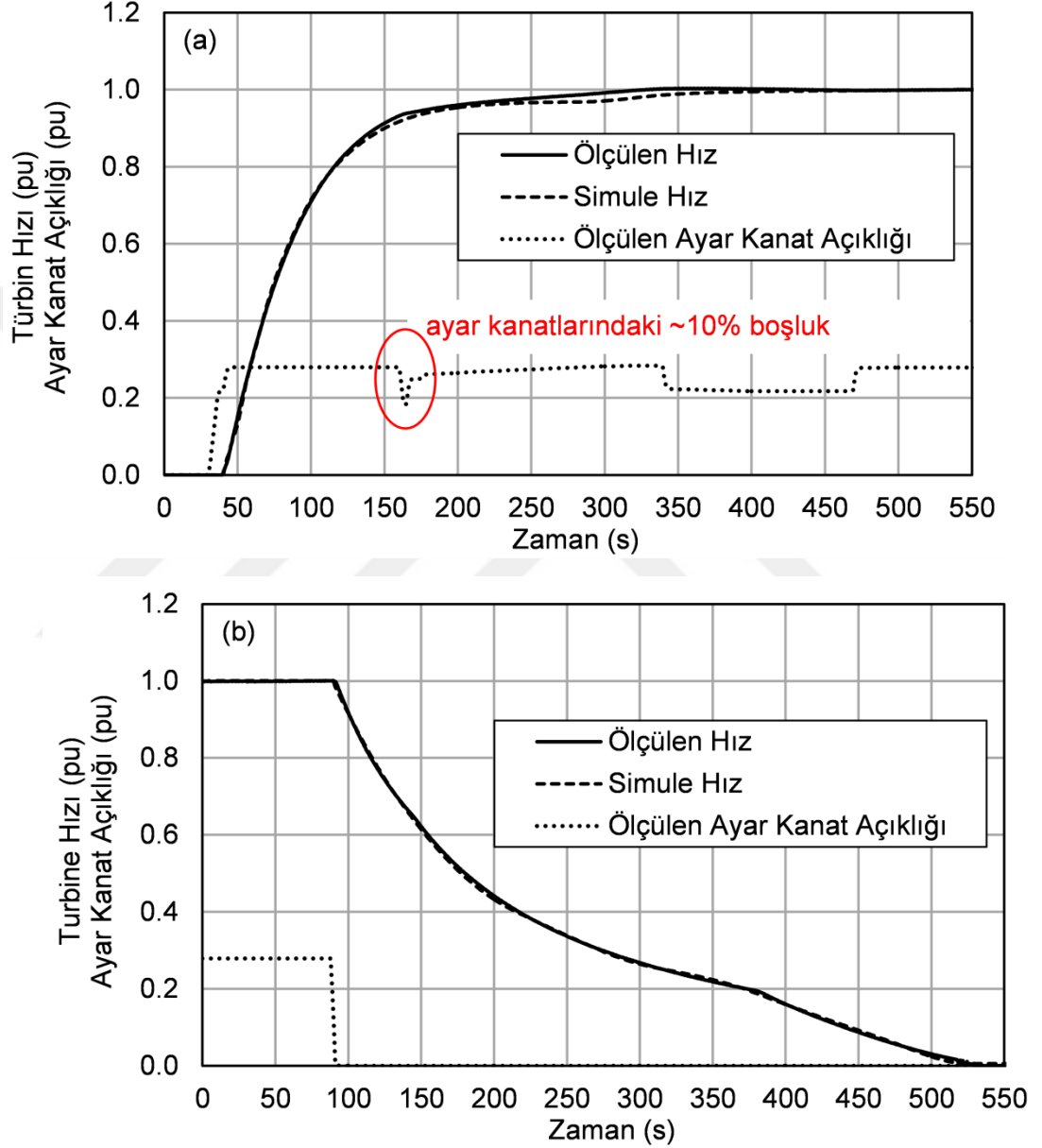
6.2 Model Doğrulama Çalışmaları

Gezende HES'in matematiksel modeli oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar ve modelleme ilkelerinden faydalanılmıştır:

- 1- Modellenen santral kısa-orta uzunlukta bir cebri boruya sahiptir. Bu yüzden ilerleyen dalga etkisi göz önüne alınmamıştır. Santralde enerji tüneli ve denge bacası mevcuttur.
- 2- Seyhan I HES modeline benzer şekilde generatöre dair elektromanyetik etkileşimler göz önüne alınmamıştır. Generatörün ünite hızına etkisi mekanik başlama zamanı üzerinden dikkate alınmıştır.
- 3- Gezende HES modeli türbin hız kontrolü için kullanıldığından dolayı şebeke ve yük modellemesi yapılmamıştır.

Doğrulama için sahadan toplanan ayar kanat açıklığı bilgisi Matlab/Simulink'te oluşturulan matematiksel modele girdi (simin) olarak verilmiştir. HES modelinden

elden edilen türbin hızı bilgileri çıktı (simout) olarak kaydedilerek daha önce sahadan toplanan türbin hızı bilgisi ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.2’de benzetim sonuçları ve saha testleri sonucu elde edilen bilgilerin karşılaştırılması gösterilmektedir. Bu şekillerdeki türbin hızı ve ayar kanat açıklığı değerleri Gezende HES’teki ilgili anma değerlerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir.



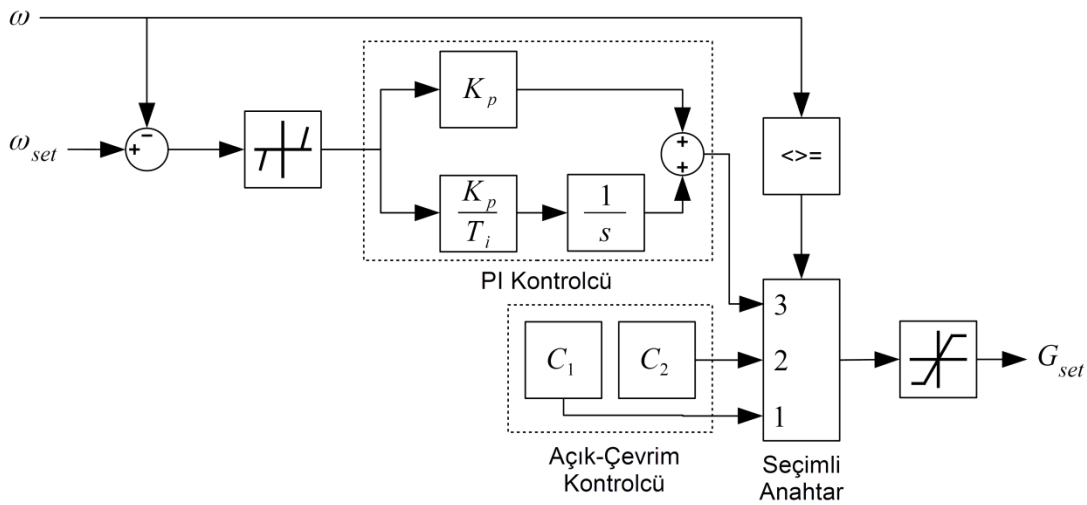
Şekil 6.2 : Gezende HES saha ölçümleri ile HES modelinin doğrulanması a) ünitenin başlatılması b) ünitenin durdurulması.

Özel bir vaka olarak, Gezende HES’teki servo silindir, regülasyon çemberi ve ayar kanatları arasındaki boşluğun ayar kanatlarının kontrolü için çok büyük bir olumsuz etki oluşturduğunu belirtmek gerekir. Şekil 6.2-a’da görüldüğü gibi santraldeki eski ve yıpranmış mekanik sistemlerdeki aşırı aşınma ve boşluklar sebebiyle ayar

kanatları neredeyse % 10 hareket ettirildiği halde türbin hızında hiçbir değişiklik gözlemlenmemiştir. Bu durum hız regülatörünün servo silindiri hareket ettirmesi sonucu ortaya çıkan strok hareketinin regülasyon çemberi, mafsal kolları, çember yatakları, vb. yerlerdeki boşlukların alınması için kullanılması ve etkin bir şekilde ayar kanatlarında hareket görülmemesi neticesinde ortaya çıkmaktadır. Bu durumun ortadan kaldırılması için önden beslemeli kontrol yöntemi geliştirilmiştir [115]. Bu yöntem ile daha önceden belirlenen boşluk kadar bir açıklık hareket yönü değiştiğinde (açma veya kapama) ayar kanatlarına uygulanmaktadır. Bu ekleme ya da çıkartma hareketi özellikle türbin hızı regülasyonu için önem arz etmektedir. İlgili şekilde görülen ayar kanat açıklığındaki basamak değişiklikler bu yöntemin bir sonucudur. Benzetim sonuçları ve saha testleri karşılaştırıldığında ise HES modeli ile saha verilerinin birbiri ile tam uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 6.2-b’de ise ünitenin durdurulması esnasında aynı ayar kanat açıklığı değişikliği için HES modelinin ve saha testlerinin sonuçları görülmektedir. Seyhan I HES’teki duruma benzer şekilde generatör freni devreye girince türbin hızının yavaşlaması hızlanmaktadır.

6.3 Adaptif Kontrolcü Tasarımı

Hız regülatörü, ayar kanat açıklığını kontrol ederek türbine giren su miktarını düzenler. Şebeke senkronizasyonu için, hedef değer (ω_{set}) şebeke frekansı ve geri besleme sinyali (ω) ise türbin hızıdır. Gezende HES’te kurulu buluna hız regülatörü Siemens S7 kontrolcüdür ve bu kontrolcünün içinde çalışan açık ve kapalı çevrim kontrol yaklaşımı Şekil 6.3’te gösterilmiştir.

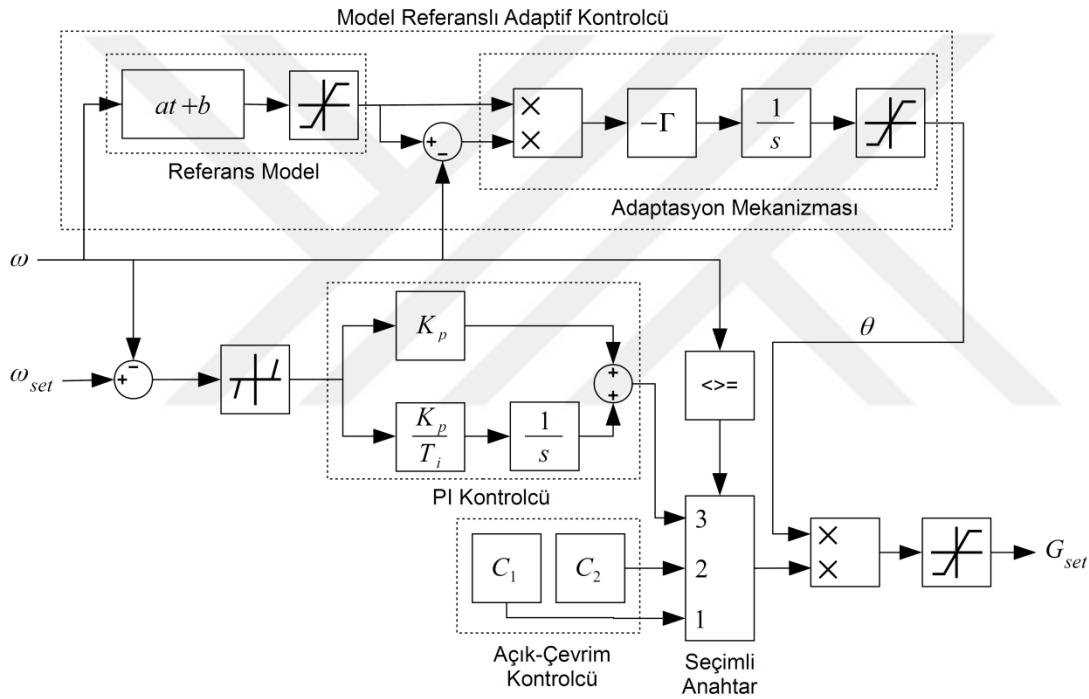


Şekil 6.3 : Gezende HES türbin hız kontrolcüsü.

hız kontrolünde referans model ile santral davranışı arasındaki ilişki tek bir bilinmeyene dayandığı için burada kullanılabilir.

Çizelge 6.2 : Gezende HES kazanç ayarlama parametreleri.

Gross Head (m)	N = 0 - 1		N = 2		K _p	T _i
	C ₁ (%)	C ₂ (%)	C ₁ (%)	C ₂ (%)		
162 ≤ H _g	22	16	24	18	1.1	700 ms
157 ≤ H _g < 162	23	17	25	19	1.1	650 ms
152 ≤ H _g < 157	25	19	27	21	1.2	600 ms
147 ≤ H _g < 152	28	22	30	24	1.25	600 ms
142 ≤ H _g < 147	29	23	31	25	1.3	550 ms
H _g ≤ 142	30	24	32	26	1.4	500 ms



Şekil 6.5 : Gezende HES model referanslı adaptif kontrolcü eklentili türbin hız kontrolcüsü.

Türbin hız kontrolü için oluşturulan referans model istenen türbin hız profilini çıkış değer olarak verir. Referans modelden çıkan bu değer ile istenen ve gerçek türbin hızı arasındaki fark çarpılarak adaptasyon mekanizmasına aktarılır. Bu çarpımın, öğrenme oranı Γ değeri ile çarpıldıktan sonra her bir döngüde toplaması yapılarak integrali alınır. Bu şekilde adaptasyon mekanizmasının çıkışı olan ve ana kontrolcünün çıkış değerini değiştiren θ değeri elde edilmiş olur. Öğrenme oranını büyütürken daha hızlı bir şekilde istenen türbin hızı profiline ulaşmak mümkün olmakla birlikte, kritik bir değerden sonra öğrenme oranını artırmak kararsız bir θ

değeri ortaya çıkarmaktadır. Bu kritik değer yapılan simülasyonlar sonucu bulunmaktadır. Model referanslı adaptif kontrolcü çıkışı etkin olarak C_1 , C_2 ve K_p değerlerine etki etmektedir. Bu değerler anma net düşü değerine (örneğin $H_g=154$ m) göre ayarlanmıştır. Gezende HES eski bir santral olduğu için santralin kararlı ve güvenli bir şekilde çalıştığı parametre değerleri bilinmektedir. Bu yüzden Θ değerinin 0.9 ile 1.1 değerleri arasında kalmasını sağlayacak bir sınırlayıcının kontrolcüye eklenmesi uygun bulunmuştur. G_{set} değeri, Şekil 3.2’de gösterilen servo silindir ile ayar kanatlarına gönderilmektedir.

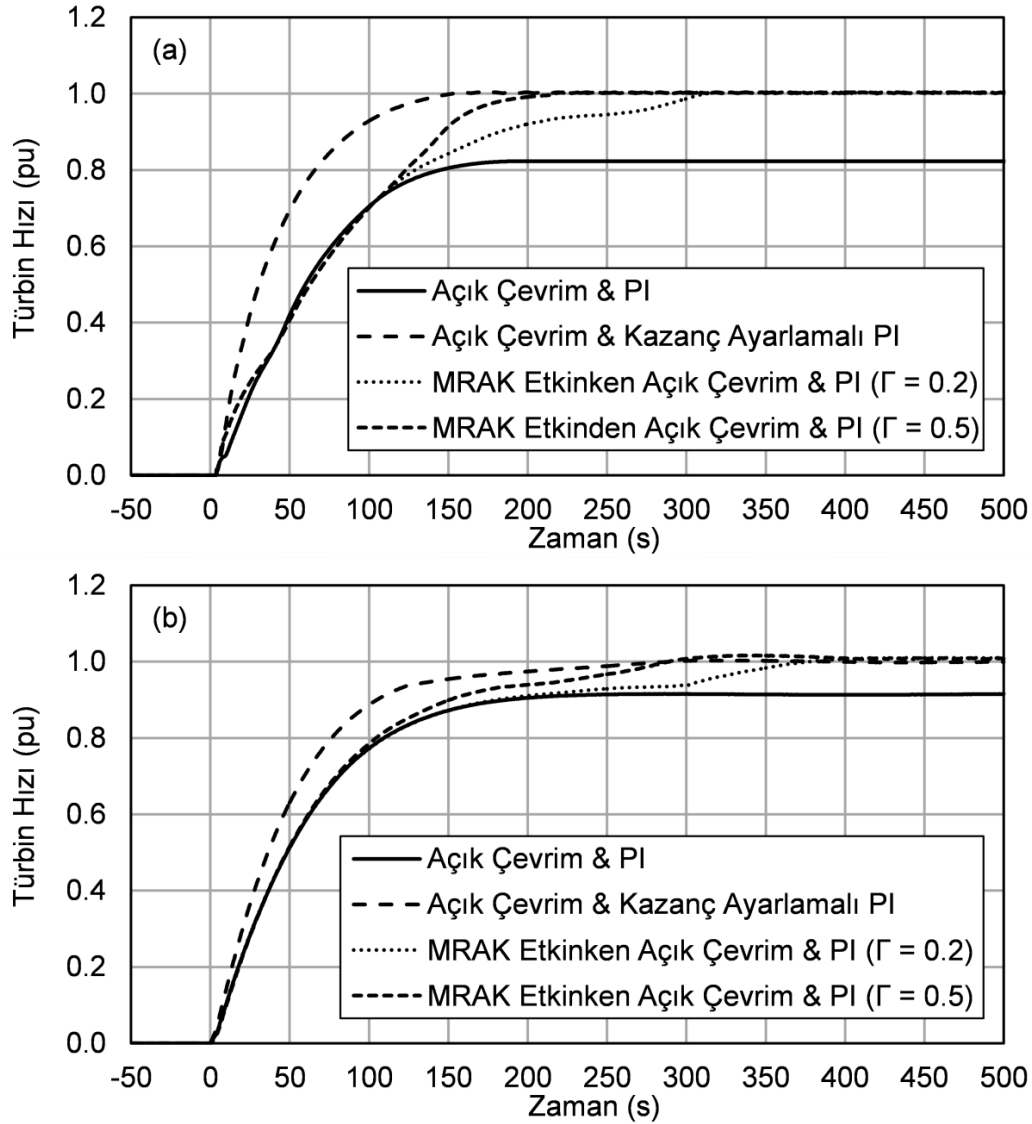
6.4 Simülasyonlar ve Saha Testleri

Şekil 6.6 adaptif eklentiler etkin değilken ve adaptif eklentiler etkin iken kontrolcünün simülasyon ve saha test performanslarını göstermektedir. Bu şekillerdeki türbin hızı değeri Gezende HES’teki anma türbin hızı değerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir. Şekil 6.6-a, 0.9 düşüde ve tek bir komşu ünite çalışırken ($N = 1$) yapılan yazılım döngülü simülasyon çalışmalarındaki kontrolcü performanslarını göstermektedir. Adaptif eklentiler etkin değilken, hız regülatörü kontrolcüsü açık-çevrim kontrole $C_1 = 25\%$ ile başlamaktadır. Bu değer anma düşü değerine göre belirlendiği için C_2 sabitine geçiş için belirlenen eşik hız değerine ulaşamamıştır. Bu durum ise kapalı-çevrim kontrole geçilememesine neden olmuştur. Grafik incelendiğinde türbin hızının 0.81 değerine sabitlendiğini ve ünitenin şebeke senkronizasyonu aşamasına gelmediği görülmektedir.

Diğer yandan kazanç ayarlama eklentisi faal iken, hız regülatörü kontrolcüsü Çizelge 2’de görüldüğü üzere $C_1 = 30\%$, $C_2 = 24\%$, $K_p = 1.4$, ve $T_i = 400$ ms parametreleri ile çalışmaktadır. Bu durumda türbin hızı anma hızına yumuşak bir şekilde oturmaktadır. Bu parametreler tecrübe sonucu belirlendiği için bu beklenen bir sonuçtur.

Model referanslı adaptif kontrol eklentisinin etkinleştirilmesi öğrenme oranının iki farklı değer alması ile incelenmiştir. Yapılan simülasyonlara $\Gamma = 0.2$ değeri ile başlanmıştır. Öğrenme oranı değeri, kazanç ayarlamalı eklenti ile benzer bir performans yakalana dek artırılmış ve $\Gamma = 0.5$ için model referanslı adaptif kontrolü ile kazanç ayarlama eklentileri performans açısından benzer durumdadır. Referans modelin çıkışı olan istenen türbin hızı ile gerçek hız arasında kayda değer sapmalar oluncaya kadar model referanslı adaptif kontrolcü eklentisinin olduğu ve olmadığı

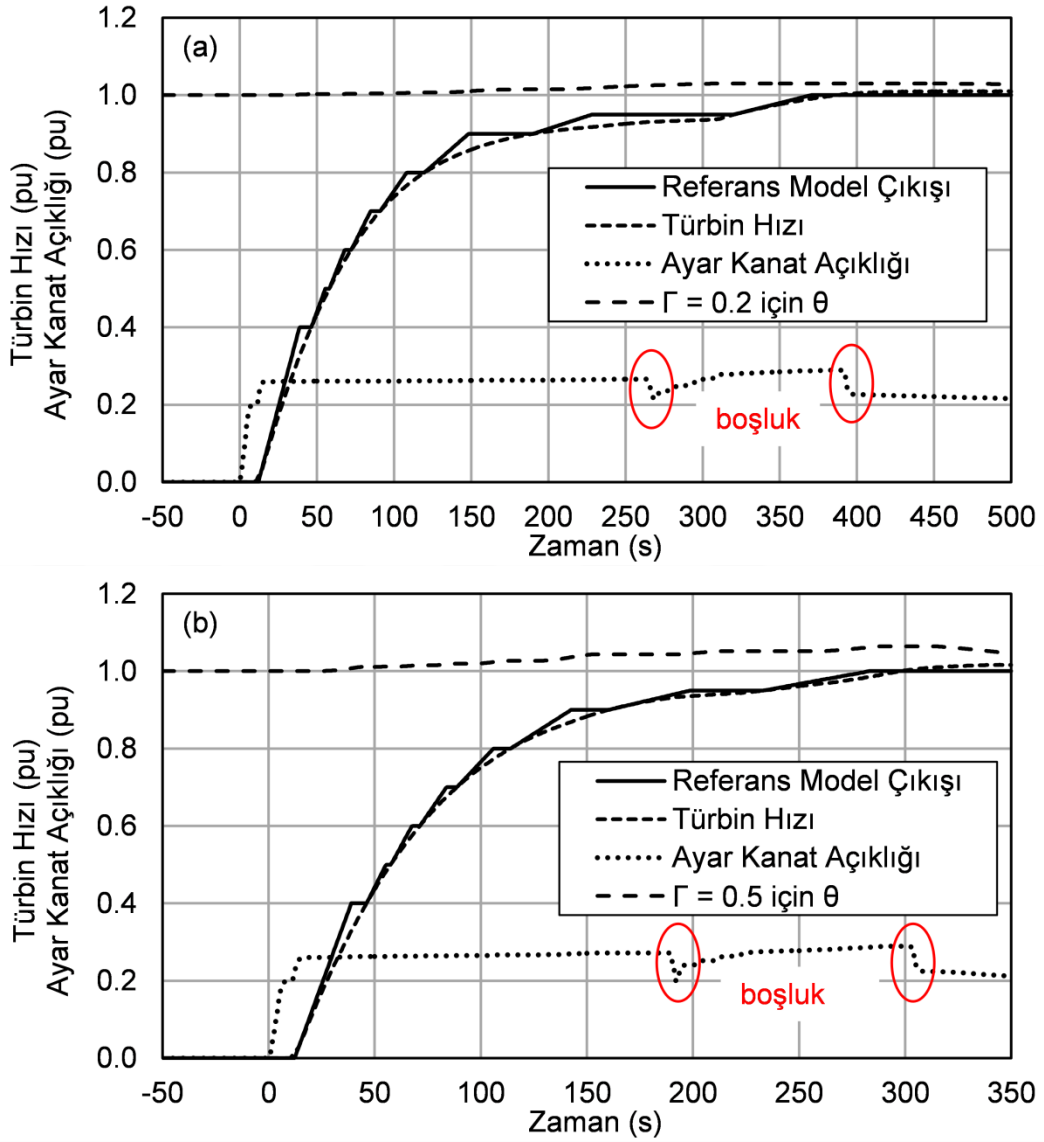
durumlar birbirine benzerdir. Hız regülatörü kontrolcüsünün 0.9 ve 0.95 türbin hızlarındaki mod geçişi özellikle $\Gamma = 0.2$ için görülmektedir.



Şekil 6.6 : Kontrolcülerin performans karşılaştırması a) simülasyon ($H_g = 0.9$ pu, $N = 1$), b) saha ölçümleri ($H_g = 0.95$ pu, $N = 1$).

Simülasyonları yapılan kontrol yaklaşımları kontrolcülere uygulanmıştır. Bu kontrolcülerin saha test sonuçları Şekil 6.6-b'de gösterilmiştir. Saha testleri boyunca düşü 0.95 değerinde olmuştur. Ayrıca komşu olan ünite de çalışmaktadır ($N = 1$). Adaptif kontrol eklentileri etkin değilken, hız regülatörü kontrolcüsü anma hızına ulaşamamıştır. C_2 sabiti değerinin devreye girmesi için gerek duyulan gerçek hıza ulaşılmış ancak bu durumda ayar kanat açıklığı %19 değerine düşürüldüğü için türbin hızı 0.91 değerinde kalmıştır. Kazanç ayarlama eklentisi ve $\Gamma = 0.5$ öğrenme oranlı model referanslı adaptif kontrolcü 280 saniye içinde türbin hızını anma

değerine oturtmayı başarmıştır. $\Gamma = 0.2$ öğrenme oranlı model referanslı adaptif kontrolcü ise önceki uygulamalardan 100 saniye daha yavaş kalmıştır.



Şekil 6.7 : Model referanslı adaptif kontrolcü için saha test sonuçları ($H_g = 0.95$ pu, $N = 1$) a) $\Gamma = 0.2$, b) $\Gamma = 0.5$.

Model referanslı adaptif kontrolcünün etkisini gösteren grafikler referans model çıkışı ve adaptasyon mekanizması θ çıkışı değeri ile Şekil 6.7'de sunulmuştur. Bu şekillerdeki türbin hızı ve ayar kanat açıklığı değerleri Gezende HES'teki ilgili anma değerlerine bölünerek per unit cinsinden normalize edilmiştir. $\Gamma = 0.2$ öğrenme oranı etkinken, θ değeri ağır bir şekilde artmakta ve en fazla 1.034 değerine ulaşmaktadır. Bu artış Şekil 6.7-a'da 5. bölgeden (80. saniyeden itibaren) itibaren görülmektedir. Şekil 6.7-b'de öğrenme oranının artırılarak $\Gamma = 0.5$ yapılmıştır. Bu durum θ

değerinin daha hızlı bir şekilde artarak azami değeri olan 1.064 değerine oturması ile sonuçlanmıştır. Bu değer 1.1 olan limit değerinin altındadır.

Önerilen referans modelin mutlak bir zaman bağıllığı yoktur. Bunun yerine anma değerine yumuşak bir şekilde ulaşması için türbin hızını yönlendirmek üzere tasarlanmıştır. Bu senkronizasyon öncesi türbin hız kontrolü için çok önemlidir. Çünkü aktif güç çıkışı olmadığı için, ayar kanatları gereğinden fazla açıldığı durumda, türbin hızı anma değerini hızlı bir şekilde aşabilir. Eğer referans model zaman ekseninde sabitlenseydi, örneğin birinci dereceden bir fonksiyon ile, sürekli biriken hata, özellikle düşük düşü söz konusu olduğunda, θ değerinin hızlı bir şekilde artmasına neden olurdu. Bahsedildiği şekilde bir referans model kullanılmış olsaydı, adaptasyon mekanizması çıkışına konan limitleyici kararsız çalışmaya karşı koruyucu görevini devam ettirirdi.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Santrallerde yer alan hız regülatörlerinin çalışma bölgesi ikiye ayrılabilir: Türbinin döndüğü ancak şebeke bağlantısının bulunmadığı senkronizasyon öncesi bölge ve türbinin anma hızında döndüğü, ünitenin aktif çıkış gücü veya reaktif güç sağladığı şebeke senkronizasyonu sonrası bölge. Bu çalışmada, bir HES'in performansı için önem arz eden bu iki bölgedeki kontrolcü performansının adaptif yöntemlerle iyileştirilmesi konusu irdelenmiştir. Öncelikle santralin dinamik matematik modeli oluşturularak santral özelinde parametre değerleri belirlenmiştir. Ardından santralden alınan saha testleri kullanılarak oluşturulan ve yapılandırılan santral modelinin doğruluğu teyit edilmiştir. Teyit edilen model kullanılarak hız regülatörü kontrolcüsü ve tasarımı yapılan eklentilerin simülasyonları yapılmıştır.

Aktif güç kontrolü etkinken kullanılan primer frekans kontrolü, şebekenin tamamındaki arz – talep arasındaki dengesizliğin azaltılmasına yardımcı olur. Tasarlanan model referanslı adaptif kontrolcü ile bir HES ünitesinin primer frekans kontrolü performansının bozucu etkilere karşı iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Düşüde meydana gelen değişimler ve türbin verimindeki düşüş gibi bozucu etkilerin varlığında aktif güç kontrol moduna eklenen model referanslı adaptif kontrol eklentisinin kayda değer iyileştirmeler yaptığı gösterilmiştir.

Diğer uygulamada ise senkronizasyon öncesi türbin hızının anma koşullarından farklı koşullara karşı performansının muhafaza edilmesi için iki farklı adaptif kontrol eklentisi sunulmuştur. Bu eklentilerin, kurak sezon koşullarında 0.9 düşü değerinde simülasyonları yapılmıştır. Eklentilerin etkin olmadığı durumlarda hız regülatörü kontrolcüsünün türbin hızını senkron hıza yaklaştıramadığı görülmüştür. Eklentilerin varlığında istenen senkronizasyon öncesi performansa simülasyonlar ile ulaşıldığı görülünce, sahadaki benzer koşullarda saha testleri uygulanarak eklentilerin saha koşullarında çalışması test edilmiştir.

Kazanç ayarlamalı eklenti yıllar boyunca elde edilen deneyim ile kontrolcü parametrelerinin otomatik olarak seçilmesi işlevini görür. Ayarlanan değerler aslında santral operatörleri tarafından saha koşullarına göre elle girilen parametrelerin kendisidir. Bu çalışma ile bu parametrelerin iş görürlüğü teyit edilmiştir. Ancak, bu yöntem muhtemel tüm koşulların bilinmesini gerektirmektedir. Eğer bilinmesi gereken bu ölçek geniş ise, tasarım ve uygulama için daha fazla zaman ve emek istemektedir. Kazanç ayarlama değişkenleri karşılaşılabilecek tüm şartlar için oluşturulduğunda ise, kontrolcü meydana gelen değişikliklere hızlı bir şekilde cevap vermektedir.

Model referanslı adaptif kontrol eklentisi ise bir öğrenme oranına ve anma koşullarında istenen davranışı tanımlayan bir referans modele ihtiyaç duymaktadır. Referans modelin hangi bölgede olduğunun belirlenmesi için gerçek türbin hızı kullanılmaktadır. Önerilen parçalı referans model, türbin hızına ulaşması esnasında hız üstünde kararlılık sağlar. Saha testleri sonucunda, $\Gamma = 0.5$ öğrenme oranlı model referanslı adaptif kontrolcünün düşünün 0.95 olmasının getirdiği bozucu etkiyi ortadan kaldırdığı ve anma koşullarındakine benzer bir profil yakaladığı görülmüştür. $\Gamma = 0.2$ öğrenme oranı etkinken türbin hızı benzer bir şekilde anma hızına oturtulmuştur ancak bu daha yavaş olmuştur.

Her iki uygulamada kullanılan eklentiler raf ürünü hız regülatörü kontrolcülerine uygulanabilir. Programlanabilir mantık kontrolcülerini (programmable logic controller-PLC) güç santrali kontrol ve otomasyonunda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Primer frekans kontrolü uygulamalarında öğrenme oranına bağlı olarak frekans kontrol etkisi istenen karakteristiğe uyumlandırılmaktadır. Frekans değişikliklerinin sık görülmediği büyük bağlaşımlı şebekelerde model referanslı adaptif kontrol eklentisi kontrolcü içinde oluşturulan test frekans sinyalleri ile eğitilebilir. Göreceli daha küçük şebekelerde ise, örneğin sadece bir ülkenin bağlaşımlı elektrik şebekesi, model referanslı adaptif kontrol eklentisi meydana gelen frekans sapsmaları ile test frekansına ihtiyaç duymadan öğrenmesini tamamlayacaktır.

Senkronizasyon öncesi hız kontrolü için kullanılan adaptif kontrol yaklaşımları daha az su harcayarak otomatik senkronizasyon hedefleyen, özellikle insansız santrallerde kullanılabilir. Bu amaç için geliştirilen iki adaptif kontrol eklentisini karşılaştırmak gerekirse, kazanç ayarlamalı eklenti bir yardımcı ölçüme ve bir tabloya ihtiyaç duyan daha basit bir tasarımdır. Bu yöntem eski santrallere modelleme ve simülasyon

yapmadan geçmiş tecrübeler kullanılarak uygulanabilir. Ancak, kazanç ayarlamalı adaptif kontrolde, herhangi bir nedenle değişkenlerde bir hata meydana gelirse, kontrolcü içinde bu hatayı telafi edecek iç geri besleme mekanizması yoktur. Ayrıca, göz önüne alınmayan yeni bir bozucu etki varlığında, kazanç ayarlama değerlerinin gözden geçirilmesine ihtiyaç duyulur.

Model referanslı adaptif kontrolcü tasarımı ise yeni veya eski olsun her santral için istenen davranışın tanımlanmasını sağlayacak modelleme gerektirir. Simülasyonlar özellikle yeni projelerde kararlılık ve performansın garanti edilmesi için faydalı olabilir. Tasarımı yapıldıktan sonra yardımcı bir ölçüm istemeden santral koşullarına göre kapalı çevrim bir davranış sergiler. Parametrelerde herhangi bir hata olması durumunda ise performansı düşse bile istenen yönde davranmaya devam edecektir.

Ünitenin şebeke senkronizasyonun uzaması veya ilgili santralin primer frekans kontrolüne gerekli rezervi aktaramaması durumunda santral işletmelerinin boşa su atılması ve taahhüt edilen rezervi sağlayamama cezası ödemesi gibi mali kayıpları bulunmaktadır. Buna ek olarak tasarlanan adaptif kontrol eklentileri operatör hatalarının minimize edilmesi hususunda da fayda sağlayacaktır. Yapılan çalışmaların kullanılmasının, cezaya düşülmesini engellemesi ve aktif güç üretilmeden atılan su miktarı ile operatör hatalarını azaltması yönleriyle olumlu ekonomik sonuçları olacaktır.

İlerleyen dönemde bu konu ile ilgili çalışmaların geliştirilmesi için aşağıdaki konularda ayrıntılı çalışma yapılabilir:

- Açıklık kontrolü ve debi kontrolü için adaptif kontrol eklentileri

Özellikle nehir tipi HES'lerde kullanılan debi kontrol modu ve hız regülatörünün doğrudan açıklık geribeslemesi ile çalışan açıklık kontrol modu için adaptif kontrol uygulamaları geliştirilebilir.

- Tasarım ve uygulama ile ilgili maliyet/fayda analizi

Tasarımı yapılan ve sahaya uygulanan adaptif kontrol uygulamalarının maliyetleri ve getirileri incelenebilir.

- Adaptif kontrol uygulamalarının durum izleme sistemleri için kullanılması

Özellikle model referanslı adaptif kontrol uygulamaları için kullanılan referans modeller bir sistem veya ekipmanın istenen çalışma profilini

göstermektedir. Referans modeller istenen çalışma profilinden ziyade ilk kez kurulumu yapılan ve devreye alınan bir ekipmanın çalışma profilini yansıtacak şekilde oluşturulursa, ekipmanın ilerleyen yıllardaki çalışma durumunun mukayese edilebileceği bir referans elde edilmiş olur. Bu sayede santraldeki sıcaklık, seviye, basınç, vb. sinyallerin olağandışı değişimi referans model ile karşılaştırılarak bulunabilir.



KAYNAKLAR

- [1] **International Energy Agency 2017 Enerji İstatistikleri** <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>>, alındığı tarih:23.09.2018.
- [2] **Türkiye Elektrik İletim A. Ş. Kurulu Güç Bilgileri**, <https://www.teias.gov.tr/sites/default/files/2018-07/kurulu_guc_haziran_2018.pdf> alındığı tarih:23.09.2018.
- [3] **Saarinen, Linn**, "The Frequency if the Frequency: On Hydropower and Grid Frequency Control", Doktora Tezi, Uppsala Üniversitesi, Uppsala, 2017.
- [4] **European Network of Transmission System Operators for Electricity**, "Continental Europe Operation Handbook", ENTSO-E, 2004.
- [5] **Munoz-Hernandez, G. A.**, *Modelling and Controlling Hydropower Plants*, New York, Springer, 2013.
- [6] **Fasol K. H.**, "A short history of hydropower control," *IEEE Control Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 68-76, 2002.
- [7] **Hagihara, S., Yokota, H., Goda, K., ve Isobe, K.**, "Stability of a Hydraulic Turbine Generating Unit Controlled by P.I.D. Governor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2294-2298, 1979.
- [8] **Phi, D. T., Bourque, E. J., Thorne, D. H. ve Hill, E. F.**, "Analysis and Application of the Stability Limits of a Hydro-Generating Unit," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 7, pp. 3203-3212, 1981.
- [9] **Wozniak, L.**, "A graphical approach to hydrogenerator governor tuning," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, no. 3, pp. 417-421, 1990.
- [10] **Kamwa, I., Lefebvre, D., ve Loud, L.**, Small signal analysis of hydro-turbine governors in large interconnected power plants, 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, vol.2, pp. 1178-1183, 2002.
- [11] **Eilts, L. E., ve Schleif, F. R.**, "Governing features and performance of the first 600-MW hydrogenerating unit at grand coulee," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 2, pp. 457-466, 1977.
- [12] **Filbert, T. L. and L. Wozniak**, "Speed loop cancellation governor for hydrogenerators. II. Application," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 3, no. 1, pp. 91-94, 1988.

- [13] **Lim, C. aM.**, "A self-tuning stabiliser for excitation or governor control of power systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 4, no. 2, pp. 152-159, 1989.
- [14] **Lansberry, J. E., Wozniak, L., ve Goldberg, D. E.**, "Optimal hydrogenerator governor tuning with a genetic algorithm," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 4, pp. 623-630, 1992.
- [15] **Yamamoto, T., Kaneda, M., Oki, T., Watanabe, E., ve Tanaka, K.**, Intelligent tuning PID controllers, 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century, Vancouver, BC, vol.3, pp. 2610-2615, 1995.
- [16] **Padrón , S., Hernández, M., ve Falcón, A.**, "Reducing Under-Frequency Load Shedding in Isolated Power Systems Using Neural Networks. Gran Canaria: A Case Study," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 63-71, 2016.
- [17] **Venayagamoorthy , G. K., Harley , R. G., ve Wunsch, D. C.**, "Implementation of adaptive critic-based neurocontrollers for turbogenerators in a multimachine power system," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 14, no. 5, pp. 1047-1064, 2003.
- [18] **K. Natarajan**, "Robust PID Controller Design for Hydroturbines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 661-667, 2005.
- [19] **North American Electric Reliability Corporation**, "Balancing and Frequency Control", NERC, 2011.
- [20] **IEEE Power Engineering Society**, "Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units", IEEE, 2004.
- [21] **Jauch , C., ve Hippel , S.**, "Hydraulic–pneumatic flywheel system in a wind turbine rotor for inertia control," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 1, pp. 33-41, 2016.
- [22] **F. D. Bianchi and J. L. Domnguez-Garca**, "Coordinated Frequency Control Using MT-HVDC Grids with Wind Power Plants," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 213-220, 2016.
- [23] **Wang-Hansen , M., Josefsson, R., ve Mehmedovic , H.**, "Frequency Controlling Wind Power Modeling of Control Strategies," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 954-959, 2013.
- [24] **Yang, W., Yang, J., Guo, W., ve Norrlund, P.**, "Response Time for Primary Frequency Control of Hydroelectric Generating Unit," *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, vol. 74, pp. 16-24, 2016.
- [25] **Abdolmaleki, M., Ansarimehr, P., ve Ranjbar, A. M.**, A robust fuzzy logic adaptive PI controller for hydro power plants, SICE Annual Conference 2007, Takamatsu, pp. 2592-2595, 2007.
- [26] **Ruzhekov, G., Slavov, T., ve Puleva, T.**, Modeling and implementation of hydro turbine power adaptive control based on gain scheduling technique, 2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Hersonissos, pp. 1-6, 2011.
- [27] **Setiawan, I., Priyadi, A., ve Purnomo, M. H.**, Controlling of non-minimum

phase micro hydro power plant based on adaptive B-Spline neural network, 2013 International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Yogyakarta, pp. 460-464, 2013.

- [28] **I. C. Report**, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 6, pp. 1904-1915, 1973.
- [29] **Bryce, G. W., Agnew, P. W., Foord, ve diğerleri**, "On-site investigation of electrohydraulic governors for water turbines," *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 124, no. 2, pp. 147-153, 1977.
- [30] **Özbay, E., ve Gençoğlu, M. T.**, Load frequency control for small hydro power plants using adaptive fuzzy controller, 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Istanbul, pp. 4217-4223, 2010.
- [31] **Puleva, T., Garipov, E., ve Ruzhekov, G.**, Adaptive power control modeling and simulation of a hydraulic turbine, 2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, Hersonissos, pp. 1-6, 2011.
- [32] **Hamann, A., Hug, G., ve Rosinski, S.**, "Real-Time Optimization of the Mid-Columbia Hydropower System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 157-165, 2017.
- [33] **Vereide, K., Svingen, B., Nielsen, T. K., ve Lia, L.**, "The Effect of Surge Tank Throttling on Governor Stability, Power Control, and Hydraulic Transients in Hydropower Plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 1, pp. 91-98, 2017.
- [34] **Giosio, D. R., Henderson, A. D., Walker, J. M., ve Brandner, P. A.**, "Physics-Based Hydraulic Turbine Model for System Dynamic Studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1161-1168, 2017.
- [35] **Silva, P. C. O., Nicolet, C., Grillot, P., Drommi, J. L., ve Kawkabani, B.**, "Assessment of Power Swings in Hydropower Plants Through High-Order Modeling and Eigenanalysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3345-3354, 2017.
- [36] **Murgan, I., Vasile, G., Ioana, C., ve diğerleri**, "Hydraulic Turbine Vortex Detection and Visualization Using Strain Gauge Sensor," *IEEE Sensors Letters*, vol. 1, no. 5, pp. 1-4, 2017.
- [37] **Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N., ve Shen, Z.**, "Basic Modeling and Simulation Tool for Analysis of Hydraulic Transients in Hydroelectric Power Plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 834-841, 2008.
- [38] **Puleva, T., ve Ichtev, A.**, "Adaptive multiple model algorithm for hydro generator speed and power control," *AT&P Journal, Control of Power Plants*, 2008.
- [39] **Kosterev, D.**, "Hydro turbine-governor model validation in pacific northwest," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1144-1149, 2004.

- [40] **I. C. Report**, "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 1, pp. 167-179, 1992.
- [41] **Hannett, L. N., Feltes, J. W., ve Fardanesh, B.**, "Field tests to validate hydro turbine-governor model structure and parameters," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1744-1751, 1994.
- [42] **Kundur, P., Balu, N., ve Lauby, M.**, *Power system stability and control*, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [43] **Wang, L., Zhao, J., Liu, D., ve diğerleri**, "Governor tuning and digital deflector control of Pelton turbine with multiple needles for power system studies," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 13, pp. 3278-3286, 2017.
- [44] **Chen, Z., Yuan, X., Yuan, Y., ve diğerleri**, "Parameter Identification of Integrated Model of Hydraulic Turbine Regulating System With Uncertainties Using Three Different Approaches," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 5, pp. 3482-3491, 2017.
- [45] **Lidenholm, J., ve Lundin, U.**, "Estimation of Hydropower Generator Parameters Through Field Simulations of Standard Tests," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, pp. 931-939, 2010.
- [46] **Saarinen, L., Norrlund, P., ve Lundin, U.**, "Field Measurements and System Identification of Three Frequency Controlling Hydropower Plants," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 1061-1068, 2015.
- [47] **Kishor, N., Saini, R. P., ve Singh, S. P.**, "A review on Hydropower Plant Models and Control," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 5, pp. 776-796, 2007.
- [48] **Ramey, D. G., ve Skooglund, J. W.**, "Detailed Hydrogovernor Representation for System Stability Studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 1, pp. 106-112, 1970.
- [49] **IEEE Task Force Report**, "IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units," *IEEE Std 1207-2011*, vol., no., pp.1-139, 2011.
- [50] **Piriz, H.D., Cannatella, A. R., ve Porcari, D. A.**, "Inertia of Hydrogenerators, Influence on the Dimensioning, Cost, Efficiency and Performance of the Units", 2012 CIGRE, A1-102, 2012.
- [51] **Fischer, N., Benmouyal, G., ve Samineni, S.**, "Tutorial On The Impact Of The Synchronous Generator Model On Protection Studies", *SEL Journal of Reliable Power*, vol. 3, no. 1, 2012.
- [52] **I. C. Report**, "Computer representation of excitation systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, no. 6, pp. 1460-1464, 1968.
- [53] **I. C. Report**, "Excitation System Dynamic Characteristics," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 1, pp. 64-75, 1973.
- [54] **I. C. Report**, "Excitation System Models for Power System Stability Studies,"

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2, pp. 494-509, 1981.

- [55] **Elgerd, O. I., ve Fosha, C. E.**, "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy Systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, no. 4, pp. 556-563, 1970.
- [56] **IEEE Task Force**, "Load representation for dynamic performance analysis of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 472-482, 1993.
- [57] **Liu, Y., Lan, Q., Qian, C., ve diğeri**, "Universal finite-time observer design and adaptive frequency regulation of hydraulic turbine systems," *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 4, pp. 363-370, 2016.
- [58] **Lansberry, J. E., ve Wozniak, L.**, "Adaptive hydrogenerator governor tuning with a genetic algorithm," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 1, pp. 179-185, 1994.
- [59] **Findlay, D., Davie, H., Foord, T. R., ve diğeri**, "Microprocessor-based adaptive water-turbine governor," *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 127, no. 6, pp. 360-369, 1980.
- [60] **Singh, B., ve Rajagopal, V.**, "Neural-Network-Based Integrated Electronic Load Controller for Isolated Asynchronous Generators in Small Hydro Generation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4264-4274, 2011.
- [61] **Jiang, J., ve Doraiswami, R.**, "Reliable Hydraulic Turbine Governor Based on Identification and Adaptive Filtering," *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-7, no. 6, pp. 34-34, 1987.
- [62] **Zidane, Z., Lafkih, M., ve Ramzi, M.**, "Simulation Studies of Adaptive Predictive Control for Small Hydro Power Plant," *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 2(6): 169-175, 2012.
- [63] **Simani, S., Alvisi, S., ve Venturini, M.**, "Fault tolerant control of a simulated hydroelectric system", *Control Engineering Practice*, vol. 51, pp 13-25, 2016.
- [64] **Marjanović, A., Krstić, M., Đurović, Ž., ve Kovačević, B.**, "Control of Thermal Power Plant Combustion Distribution Using Extremum Seeking," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 1670-1682, Sept. 2017.
- [65] **Zhang, J., Zhou, S., Ren, M., ve Yue, H.**, "Adaptive neural network cascade control system with entropy-based design," *IET Control Theory & Applications*, vol. 10, no. 10, pp. 1151-1160, 2016.
- [66] **Tan, J., ve Zhang, Y.**, "Coordinated Control Strategy of a Battery Energy Storage System to Support a Wind Power Plant Providing Multi-Timescale Frequency Ancillary Services," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 1140-1153, 2017.
- [67] **Kim, D. E., ve El-Sharkawi, M. A.**, "Dynamic Equivalent Model of Wind Power Plant Using Parameter Identification," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 37-45, 2016.

- [68] **Kim, J., Seok, J. K., Muljadi, E., ve Kang, Y. C.,** "Adaptive Q–V Scheme for the Voltage Control of a DFIG-Based Wind Power Plant," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, pp. 3586-3599, 2016.
- [69] **Tang, Y., He, H., Wen, J., ve Liu, J.,** "Power System Stability Control for a Wind Farm Based on Adaptive Dynamic Programming," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 1, pp. 166-177, 2015.
- [70] **Ceci, M., Corizzo, R., Fumarola, F., ve diğerleri,** "Predictive Modeling of PV Energy Production: How to Set Up the Learning Task for a Better Prediction?," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 13, no. 3, pp. 956-966, 2017.
- [71] **Hasanien, H. M.,** "An Adaptive Control Strategy for Low Voltage Ride Through Capability Enhancement of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3230-3237, 2016.
- [72] **Pickhardt, R.,** "Adaptive control of a solar power plant using a multi-model," *IEE Proceedings - Control Theory and Applications*, vol. 147, no. 5, pp. 493-500, 2000.
- [73] **Khanna, R., Zhang, Q., Stanchina, W. E., ve diğerleri,** "Maximum Power Point Tracking Using Model Reference Adaptive Control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1490-1499, 2014.
- [74] **Jurado, F., ve Saenz, J. R.,** "Adaptive control of a fuel cell-microturbine hybrid power plant," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 18, no. 2, pp. 342-347, 2003.
- [75] **Uhlen, K., Foss, B. A., ve Gjosaeter, O. B.,** "Robust control and analysis of a wind-diesel hybrid power plant," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, pp. 701-708, 1994.
- [76] **He, J., ve Malik, O. P.,** "An adaptive power system stabilizer based on recurrent neural networks," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 4, pp. 413-418, 1997.
- [77] **Zhang, S., ve Luo, F. L.,** "An Improved Simple Adaptive Control Applied to Power System Stabilizer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 2, pp. 369-375, 2009.
- [78] **Lu, S., Swidenbank, E., ve Hogg, B. W.,** "An object-oriented power plant adaptive control system design tool," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 3, pp. 600-605, 1995.
- [79] **Park, J. W., Harley, R. G., ve Venayagamoorthy, G. K.,** "Indirect adaptive control for synchronous Generator: comparison of MLP/RBF neural networks approach with Lyapunov stability analysis," *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 15, no. 2, pp. 460-464, 2004.
- [80] **Kaddissi, C., Kenné, J. P., ve Saad, M.,** "Indirect Adaptive Control of an Electrohydraulic Servo System Based on Nonlinear Backstepping," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 6, pp. 1171-1177, 2011.

- [81] **Mohanty, A., ve Yao, B.,** "Indirect Adaptive Robust Control of Hydraulic Manipulators With Accurate Parameter Estimates," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 567-575, 2011.
- [82] **Kraft, L. G., ve Campagna, D. P.,** "A comparison between CMAC neural network control and two traditional adaptive control systems," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 10, no. 3, pp. 36-43, 1990.
- [83] **Kamalasadan, S., Swann, G. D., ve Yousefian, R.,** "A Novel System-Centric Intelligent Adaptive Control Architecture for Power System Stabilizer Based on Adaptive Neural Networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 8, no. 4, pp. 1074-1085, 2014.
- [84] **Ghandakly, A. A., ve Idowu, P.,** "Design of a model reference adaptive stabilizer for the exciter and governor loops of power generators," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 887-893, 1990.
- [85] **Yousef, H., ve Simaan, M. A.,** "Model reference adaptive control for large scale systems with application to power systems," *IEE Proceedings D - Control Theory and Applications*, vol. 138, no. 4, pp. 321-326, 1991.
- [86] **Zhao, P., ve Malik, O. P.,** "Design of an Adaptive PSS Based on Recurrent Adaptive Control Theory," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 4, pp. 884-892, 2009.
- [87] **Mukherjee, S., Chowdhury, V. R., Shamsi, P., ve Ferdowsi, M.,** "Model Reference Adaptive Control Based Estimation of Equivalent Resistance and Reactance in Grid-Connected Inverters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 4, pp. 1407-1417, 2017.
- [88] **Kasa, N., Lida, T., ve Iwamoto H.,** "Maximum power point tracking with capacitor identifier for photovoltaic power system," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 147, no. 6, pp. 497-502, 2000.
- [89] **Pickhardt, R.,** "Nonlinear modelling and adaptive predictive control of a solar power plant", *Control Engineering Practice*, vol. 8, no. 8, pp. 937-947, 2000.
- [90] **Vogt, M. A., Wozniak L., ve Whittemore, T. R.,** "Output error identification of hydrogenerator conduit dynamics," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 4, no. 3, pp. 329-336, 1989.
- [91] **Uhlen, K., Foss, B. A., ve Gjosæter, O. B.,** "Robust control and analysis of a wind-diesel hybrid power plant," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 9, no. 4, pp. 701-708, 1994.
- [92] **Kovacic, Z., Bogdan, S., ve Balenovic, M.,** "A model reference & sensitivity model-based self-learning fuzzy logic controller as a solution for control of nonlinear servo systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 4, pp. 1479-1484, 1999.
- [93] **Doan, R. E., ve Natarajan, K.,** "Modeling and control design for governing hydroelectric turbines with leaky Wicket gates," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 449-455, 2004.

- [94] **Rodriguez-Martinez, A., Garduno-Ramirez, R., ve Vela-Valdes, L. G.,** "PI Fuzzy Gain-Scheduling Speed Control at Startup of a Gas-Turbine Power Plant," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp. 310-317, 2011.
- [95] **Van, T. L., Nguyen, T. H., ve Lee, D. C.,** "Advanced Pitch Angle Control Based on Fuzzy Logic for Variable-Speed Wind Turbine Systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 2, pp. 578-587, 2015.
- [96] **Bianchi, F.D., Mantz, R.J., ve Christiansen, C.F.,** "Gain scheduling control of variable-speed wind energy conversion systems using quasi-LPV models," *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 2, pp. 247-255, 2005.
- [97] **Chaiyatham, T., ve Ngamroo, I.,** "Improvement of Power System Transient Stability by PV Farm With Fuzzy Gain Scheduling of PID Controller," *IEEE Systems Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1684-1691, 2017.
- [98] **Alsharkawi, A., ve Rossiter, J. A.,** "Towards an improved gain scheduling predictive control strategy for a solar thermal power plant," *IET Control Theory & Applications*, vol. 11, no. 12, pp. 1938-1947, 2017.
- [99] **Johansen, T. A., Hunt, K. J., ve Petersen, I.,** "Gain-scheduled control of a solar power plant," *Control Engineering Practice*, vol. 8, no. 9, pp. 1011-1022, 2000.
- [100] **Cespedes, M., ve Sun, J.,** "Adaptive Control of Grid-Connected Inverters Based on Online Grid Impedance Measurements," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 516-523, 2014.
- [101] **Chang-Chien, L. R., Wu, Y. S., ve Cheng, J. S.,** "Online estimation of system parameters for artificial intelligence applications to load frequency control," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, no. 8, pp. 895-902, 2011.
- [102] **Qiu, W., Vittal, V., ve Khammash, M.,** "Decentralized power system stabilizer design using linear parameter varying approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1951-1960, 2004.
- [103] **Talaq, J., ve Al-Basri, F.,** "Adaptive fuzzy gain scheduling for load frequency control," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 145-150, 1999.
- [104] **Sánchez-Ayala, G., Centeno, V., ve Thorp, J.,** "Gain Scheduling With Classification Trees for Robust Centralized Control of PSSs," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 3, pp. 1933-1942, 2016.
- [105] **Reeve, J., ve Sultan, M.,** "Robust adaptive control of HVDC systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1487-1493, 1994.
- [106] **Farina, M., Guagliardi, A., Mariani, F., ve diğerleri,** "Model predictive control of voltage profiles in MV networks with distributed generation," *Control Engineering Practice*, vol. 34, pp.18-29, 2015.
- [107] **Landau, I. D., Lozano, R., M'Saad, M., ve Karimi, A.,** *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications*, New York, Springer, 2011.

- [108] **Lavretsky, E.**, *Adaptive Control: Introduction, Overview, and Applications*, NASA Adaptive Control Workshop, 2009.
- [109] **Åström, K.J., Wittænmark, B.**, *Adaptive Control*, 1994.
- [110] **Sevcik, K.**, *Model Reference Adaptive Control MRAC Tutorial*,
<<http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html>>
, alındığı tarih: 15.11.2016.
- [111] **Ioannou, P. A.**, *Robust Adaptive Control*, New York, PTR Prentice-Hall, 1996.
- [112] **Energy Market Regulatory Authority**, *Regulation Concerning Electricity Network*, 2004.
- [113] **Cebeci, M. E.**, "The Effects of Hydro Power Plants' Governor Settings on the Stability of Turkish Power System Frequency", Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2009.
- [114] **Vournas, C. D., ve Papaioannou, G.**, "Modelling and stability of a hydro plant with two surge tanks," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 2, pp. 368-375, 1995.
- [115] **Altay, A., Sahin, C., Gezer, D., ve Cakir, C.**, "A compensator design for the aged hydroelectric power plant speed governors", *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 257-268, 2016.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Doğan Gezer
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 09/03/1984, Gaziantep
E-posta : dgezer@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2007, ODTÜ, Mühendislik Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2009, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Tezli Yüksek Lisans
- **Doktora** : 2018, TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2007-2018	TÜBİTAK MAM Enerji E.	Başuzman Araştırmacı
2014	TÜBİTAK MAM	En İyi Araştırma Ekibi

YABANCI DİL:

- İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gezer, D., Taşcıoğlu, Y., ve Çelebioğlu, K.,** “Speed control of hydraulic turbines for grid synchronization using simple adaptive add-ons”, *Measurement and Control*, vol. 52, no.7-8, pp.276-284, 2018.
- **Gezer, D., Taşcıoğlu, Y., ve Çelebioğlu, K.,** “A software-in-the-loop simulation setup for hydroelectric power plants”, 5. European Conference on Renewable Energy Systems, Bosna-Hersek, 2017.