

**ADIGÜZEL HİDROELEKTRİK SANTRALİ' NİN
MODELLENMESİ, KISA DEVRE ANALİZİ VE
BULANIK MANTIK KONTROLÖR İLE YÜK-
FREKANS KONTROLÜ**

Ahmet KAYSAL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Eylül, 2013

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ADIGÜZEL HİDROELEKTRİK SANTRALİ' NİN
MODELLENMESİ, KISA DEVRE ANALİZİ VE BULANIK
MANTIK KONTROLÖR İLE YÜK-FREKANS KONTROLÜ

Ahmet KAYSAL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Eylül, 2013

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet KAYSAL tarafından hazırlanan “Adıgüzel Hidroelektrik Santrali’ nin Modellenmesi, Kısa Devre Analizi ve Bulanık Mantık Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü” adlı tez çalışması lisansüstü eēitim ve  ēretim y netmeliēinin ilgili maddeleri uyarınca 11/09/2013 tarihinde aŗaēıdaki jüri tarafından oy birliēi ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik Eēitimi Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiŗtir.

Danışman : Doç. Dr. Yüksel OēUZ

Başkan : Prof. Dr. Hasan ÇİMEN İmza
AK  Teknoloji Fakültesi,

 ye : Doç. Dr. Yüksel OēUZ İmza
AK  Teknoloji Fakültesi,

 ye : Doç. Dr. İbrahim MUTLU İmza
AK  Teknoloji Fakültesi,

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıŗtır.

.....
Prof. Dr. Mevl t DOēAN

Enstitü Müdürü

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

ADIGÜZEL HİDROELEKTRİK SANTRALİ’NİN MODELLENMESİ, KISA DEVRE
ANALİZİ VE BULANIK MANTIK KONTROLÖR İLE YÜK-FREKANS
KONTROLÜ

Ahmet KAYSAL
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Yüksel OĞUZ

Bu tez çalışmasında, değişik yükleme durumlarına göre yük-frekans kontrolünün gerçekleştirilmesi için Adıgüzel Hidroelektrik Santrali’nin (HES) dinamik davranışının modellenmesi Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. 36MVA gücündeki senkron generatör ve sistemdeki diğer bileşenlerin dinamik modeli, gerçek sistemdeki davranışını yansıtacak özellikte oluşturularak hız regülatörü devresindeki kontrolörün değişik yükleme durumlarına göre performansı incelenmiştir. Hız regülatörü devresinde iki çeşit kontrolör tasarlanmış, tasarlanan PID (Oransal-İntegral-Türevsel) kontrolör ve BMK’ nın (bulanık mantık kontrolör) kıyaslanması simülasyon sonuçları bölümünde farklı yükleme durumlarına göre verilmiştir. Adıgüzel HES’ te olması muhtemel faz-toprak, faz-faz, iki faz toprak ve üç faz kısa devre arızalarının gerçek sistem parametreleriyle simülasyonları yapılmış ve senkron generatörün teknik kataloğundaki gerçek sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Yapılan simülasyon çalışmalarında görülmektedir ki değişik yük durumlarında gerilim ve frekanstaki salınımlar 2–4 saniye gibi kısa bir sürede izin verilen tolerans sınırları içerisinde minimize edilerek HES kararlı duruma gelmektedir. Ayrıca simülasyonu yapılan kısa devre olaylarının gerçek test verileriyle bire bir örtüştüğü görülmüştür.

2013, xii + 121 sayfa

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik Santral, Yük-Frekans Kontrolü, Dinamik Model, PID, Bulanık Mantık.

ABSTRACT
M.Sc. Thesis

**ADIGÜZEL HYDROELECTRIC POWER PLANT MODELLING, SHORT CIRCUIT
ANALYSIS AND LOAD-FREQUENCY CONTROL WITH FUZZY LOGIC
CONTROLLER**

Ahmet KAYSAL
Afyon Kocatepe University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Education
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yüksel OĞUZ

In this study, by creating the quality of the behaviour in the genuine system, power synchronous generators of 36 MVA and other components of the system dynamic model are examined according to the various load performances of the controller in the speed regulator. Two different kinds of controllers are designed in the speed regulator circuit. The comparisons between the designed PID (Proportional-Integral-Derivative) controller and BMK (fuzzy logic controller) are given for every load change in the simulation results part. With the real system parameters simulations of the possible phase-ground, two phase-ground, and three phase short circuit faults in the Adıgüzel HEPP are carried out. The comparison between the short circuits and the real results in the foundation of the synchronous generator is observed to match with each other.

We have monitored that in different loads the oscillation of the voltage and frequency is minimized in the period of 2 or 4 seconds within the limits of acceptable tolerance so that HPP is made steady state. Short circuit tests simulated match with the outcomes of the real test data.

2013, xii + 121 pages

Key Words: Hydroelectric Power Plant, Load-Frequency Control, Dynamic Model, PID, Fuzzy Logic.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Yüksel OĞUZ' a, teknik verilerin elde edilmesinde her türlü imkânı sunan Adıgüzel Hidroelektrik Santrali işletme müdürü Sayın Etem CAMCI ve çalışma arkadaşlarına, her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm Erkan CENGAVER' e, hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı eşim Kübra KAYSAL ve kızım Melike' ye teşekkür ederim.

Ahmet KAYSAL

AFYONKARAHİSAR, 2013

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
RESİMLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	4
2.1 Giriş.....	4
2.2 Elektrik Üretim Santrallerindeki Kontrolör Çalışmaları.....	4
2.3 Hidroelektrik Santrallerinin Tasarım Çalışmaları	13
2.4 Kısa Devre Arıza Analizi Çalışmaları.....	15
3. MATERYAL ve METOT.....	17
3.1 Türkiye'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli.....	17
3.2 Hidroelektrik Potansiyel Gelişiminin Bugünkü Durumu.....	18
3.3 Hidroelektrik Santral	19
3.4 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali	21
3.4.1 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Tesisleri	22
3.4.1.1 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Baraj Gölü ve Gövdesi.....	22
3.4.1.2 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Su Yolu ve Su Alma Tesisleri.....	24
3.4.1.3 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Savak Tesisleri	29
3.4.1.4 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Santral Bina Tesisleri	31
3.4.2 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Türbini.....	32
3.4.2.1 Francis Tipi Hidrolik Türbinin Ana Parçaları ve Görevleri	35
3.4.3 Senkron Generatör ve Bileşenleri	38
3.4.4 Güç Transformatorü.....	42
3.4.4.1 Güç Transformatorünün Endüktansının Bulunması	43
3.5 Güç Sisteminin Kontrolü.....	45
3.5.1 Frekans Kontrolü	47
3.5.1.1 Primer Frekans Kontrolü	50
3.5.1.2 Sekonder Frekans Kontrolü	51
3.5.1.3 Tersiyer Frekans Kontrolü.....	52

3.5.2 Gerilim Kontrolü.....	52
3.5.2.1 Statik Uyarım Sistemi (ST1A)	55
3.6 Adıgüzel HES’ in Yük-Frekans Kontrolünde Kullanılan Kontrolörler	57
3.6.1 PID Kontrolör	57
3.6.2 Bulanık Mantık Kontrolör ve Tasarımı	59
3.6.2.1 Bulanık Mantık	59
3.6.2.2 Bulanık Çıkarım Sistemi	60
3.6.2.2.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi	62
3.6.2.2.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi.....	63
3.7 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali’ nin Modellemesi ve Blok Diyagramı	67
3.7.1 Elektromekanik Sistem Modeli	67
3.7.1.1 Türbin ve Cebri Boru Modeli	67
3.7.2 Senkron Generatör Modeli.....	74
3.7.1.1 Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Endüktans Bağlılıkları.....	77
3.7.1.2 Park ($dq0$) Dönüşümü	78
3.7.1.3 Senkron Makinede Elektromagnetik Moment.....	81
3.7.3 Uyarım Sistemi Modeli.....	82
3.8 Güç Üretim Sistemlerinde Arıza Durumları	83
4. BULGULAR	86
4.1 Giriş.....	86
4.2 Elektro-Hidrolik Hız Regülatörünün Yapısı	88
4.2.1 Hız Regülatöründeki Elektronik Sistemin Yapısı.....	89
4.3 Adıgüzel HES’ in Simülasyonu ve Yük-Frekans Kontrolü	94
4.3.1 PID Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü	94
4.3.2 Bulanık Mantık Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü	99
4.4 Kısa Devre Arıza Durumlarının Simülasyonu	102
4.4.1 Faz-Toprak Arızasının Simülasyonu	102
4.4.2 Faz-Faz Arızasının Simülasyonu	104
4.4.3 İki Faz-Toprak Arızasının Simülasyonu.....	105
4.4.4 Üç Fazlı Simetrik Arızanın Simülasyonu	106
4.4.5 Üç Faz-Toprak Arızanın Simülasyonu	107
4.4.6 Arıza Durumlarında Kontrolörlerin Senkron Devir Üzerindeki Etkisi.....	109
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	111
6. KAYNAKLAR.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	121

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Amper
Gwh/yıl	Gigawatt saat/yıl
H	Henry
Hz	Hertz
ha	Hektar
hp	Beygir gücü
hm ³ /s	Hektometreküp/saniye
kA	Kilo Amper
kg/m ³	Kilogram/metreküp
kg/cm ³	Kilogram/santimetreküp
km	Kilometre
km ²	Kilometrekare
m	Metre
m ³	Metreküp
m ³ /s	Metreküp/saniye
MVA	Mega volt amper
MW	Megawatt
pu	Per-unit
rpm	Dakikadaki tur sayısı
s	Saniye
Twh/yıl	Terawatt saat/yıl
V	Volt
W	Watt
Ω	Ohm
°C	Santigrat derece

Kısaltmalar

AC	Alternatif Akım
AGC	Otomatik Üretim Kontrolü
ANFIS	Adaptif Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi
ANN-PID	Adaptive Neural Network - Oransal İntegral Türev
AVR	Otomatik Gerilim Regülatörü
BDT-3	Elektro-Hidrolik Hız Regülatörü Modeli
BMK	Bulanık Mantık Kontrolör
BM-ID	Bulanık Mantık - İntegral Türev
BM-PI	Bulanık Mantık - Oransal İntegral
BM-PID	Bulanık Mantık - Oransal İntegral Türev
BPSO	Bakteriyel Parçacık Sürü Optimizasyonu
CMEC	Çin Ulusal Makine ve Ekipman İthalat ve İhracat A.Ş.
DC	Doğru Akım
DEK-TMK	Dünya Enerji Konseyi - Türk Milli Komitesi
DFIG	Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü
DSİ	Devlet Su İşleri
EİE	Elektrik İşleri Etüt İdaresi

EMK	Elektro Motor Kuvvet
ENTSO-E	Avrupa Elektrik Şebekesi İletim Sistem İşletmecileri
EPŞY	Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği
FEL	Geri Bildirim Hata Öğrenme Denetleyicisi
FGPI	Bulanık Kazanç Programlı Oransal İntegral
FPID	Bulanık Mantık Tabanlı Oransal İntegral Türev
GA	Genetik Algoritma
GFPID	Genetik Bulanık Oransal İntegral Türev
GSA	Yer Çekimi Arama Algoritması
HES	Hidroelektrik Santrali
IT2FLC	Tip 2 Bulanık Mantık Denetleyici
IPSO	Geliştirilmiş Parçacık sürü Optimizasyonu
IPSO-PID	Geliştirilmiş Parçacık Sürü Optimizasyonu - PID
LFC	Yük Frekans Kontrol
MATLAB	Matris Laboratuvarı
MMF	Manyeto Motor Kuvvet
MTPGS	Mikro Türbin Enerji Üretim Sistemi
ONAF	Doğal Yağ Cebri Hava
PB	Pozitif Büyük
PC	Bilgisayar
PD	Oransal Türev
PI	Oransal İntegral
PID	Oransal İntegral Türev
PK	Pozitif Küçük
PMG	Sabit Mıknatıslı Generatör
PSCAD-EMTDC	Güç Analiz Programı
PSS	Güç Sistem Kararlılığı
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
PSO-PID	Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Oransal İntegral Türev
PO	Pozitif Orta
SCADA	Danışmalı Kontrol ve Veri Toplama Sistemi
SCIG	Sincap Kafesli İndüksiyon Generatörü
SHFC	Hiyerarşik Bulanık Kontrolör
ST1A	Tip 1A Statik Uyarım Sistemi
TL	Türk Lirası
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UCA	Yardımcı Program İletişim Mimarisi
UCTE	Elektrik İletim Koordinasyon Birliği
YSA	Yapay Sinir Ağı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün yakıt cinslerine göre dağılımı.....	18
Şekil 3.2. Hidroelektrik santral enerji dönüşüm şeması.....	19
Şekil 3.3. Hidroelektrik santralin temel yapısı.....	19
Şekil 3.4. Adıgüzel HES su yolu ve su alma tesisleri planı	24
Şekil 3.5. Cebri boru üzerindeki kelebek vananın şematik gösterimi	27
Şekil 3.6. Denge bacasının prensip şeması.....	29
Şekil 3.7. Francis tipi hidrolik türbinin verim-güç-düşü-debi ilişkileri	34
Şekil 3.8. Dikey şaft Francis türbin.....	34
Şekil 3.9. Adıgüzel HES' e ait dikey şaft Francis türbinin kesiti.....	35
Şekil 3.10. Adıgüzel HES' e ait türbin ayar çemberi ve servomotor sistemi.....	36
Şekil 3.11. Adıgüzel HES' e ait çıkık kutuplu senkron generatör kesiti.....	39
Şekil 3.12. İki kutuplu senkron generatör (a) Çıkık kutuplu (b) Yuvarlak rotorlu	40
Şekil 3.13. Güç sistemi kontrolünün yapısı.....	46
Şekil 3.14. Senkron generatör ünitesinin yapısı.....	47
Şekil 3.15. Hız regülasyonuna ait genel blok gösterimi.....	48
Şekil 3.16. BDT-3 tip elektro-hidrolik hız regülatörü şematik diyagramı	49
Şekil 3.17. Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işlem akışı.....	50
Şekil 3.18. Sekonder kontrol ile sistem frekansının davranışı	52
Şekil 3.19. Uyarım sisteminin blok diyagramı.....	53
Şekil 3.20. Adıgüzel HES generatör yükleme/kapasite eğrisi.....	54

Şekil 3.21. Adıgüzel HES’ te kullanılan statik tip uyarım sistemi.....	56
Şekil 3.22. PID kontrolör blok diyagramı	58
Şekil 3.23. Bulanık mantık denetleyicisinin temel yapısı	61
Şekil 3.24. Mamdani bulanık çıkarım yapısı.....	62
Şekil 3.25. Sugeno bulanık çıkarım sistemi	63
Şekil 3.26. Sistemde kullanılan bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı.....	64
Şekil 3.27. BMK ile denetlenen sisteminin simülasyon blok diyagramı	65
Şekil 3.28. Sugeno tipi BMK’ nın üç giriş ve bir çıkış sinyalinden oluşan yapısı.....	65
Şekil 3.29. Hata sinyali $e(t)$ ’ nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı.....	66
Şekil 3.30. Hatada ki değişim sinyali $de(t)/dt$ ’ nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı. 66	
Şekil 3.31. Ölçülen güç sinyali $pe(t)$ ’ nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı.....	66
Şekil 3.32. Hız kontrolünün genel simülasyon blok diyagramı	67
Şekil 3.33. Hidroelektrik santralin şematik gösterimi.....	69
Şekil 3.34. Simülasyonu gerçekleştirilen hidrolik türbinin blok diyagramı	74
Şekil 3.35. Senkron generatörün stator ve rotor devresi	75
Şekil 3.36. $dq0$ çerçevesindeki senkron generatörün temsili gösterimi	79
Şekil 3.37. ST1A uyarım sistem modelinin blok diyagramı	83
Şekil 3.38. Generatöre yakın bir kısa devre arızası.....	85
Şekil 4.1. Adıgüzel HES tek hat şeması.....	87
Şekil 4.2. BDT–3 tip elektro-hidrolik hız regülatörünün prensip şeması	88
Şekil 4.3. Frekans ölçü devresi.....	89
Şekil 4.4. Frekans ayar devresi.....	90

Şekil 4.5. Yükseltecin çıkış karakteristiği	90
Şekil 4.6. DC Diferansiyel yükselteç	91
Şekil 4.7. Geri besleme (sönümlleme) devresi.....	92
Şekil 4.8. Güç ayar devresi.....	92
Şekil 4.9. Elektro-hidrolik hız regülatörü devresinin besleme devresi	93
Şekil 4.10. Güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı.....	94
Şekil 4.11. Güç üretim sisteminin alt simülasyon blok diyagramı.....	94
Şekil 4.12. Hidrolik türbin ve hız regülatörünün alt simülasyon blok diyagramı	95
Şekil 4.13. Hız kontrolsüz HES' in tam yük ile yüklendiğindeki simülasyon eğrileri ..	96
Şekil 4.14. HES' in 12MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim.....	96
Şekil 4.15. HES' in 21MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim.....	98
Şekil 4.16. HES' in 30,6MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim.....	98
Şekil 4.17. BMK tabanlı güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı.....	99
Şekil 4.18. HES' in farklı yüklenme durumlarına göre sinyallerdeki değişimler.....	101
Şekil 4.19. Kısa devre blok diyagramı eklenmiş güç üretim sistemi	102
Şekil 4.20. Faz-toprak arızası oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri.....	103
Şekil 4.21. Faz-faz arızası oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri	104
Şekil 4.22. İki faz-toprak arızası oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri	105
Şekil 4.23. Üç fazlı simetrik arızanın oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri .	106
Şekil 4.24. Üç faz-toprak arızanın oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri.....	108
Şekil 4.25. 13,8 kV barada üç fazlı simetrik arızanın oluştuğu andaki sinyaller	109
Şekil 4.26. Üç faz kısa devre arızasına PID ve BMK kontrolörlerin tepkisi	110

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Türkiye hidroelektrik enerji potansiyelinin projelere göre dağılımı	18
Çizelge 3.2. Adıgüzel baraj gölü ile ilgili karakteristik bilgiler	22
Çizelge 3.3. Adıgüzel baraj gövdesi ile ilgili karakteristik bilgiler	23
Çizelge 3.4. Adıgüzel HES dolu savak tesisine ait veriler	30
Çizelge 3.5. Çeşitli tiplerdeki hidrolik türbinlerin değişik verimlerin değerleri	32
Çizelge 3.6. Adıgüzel HES türbin teknik verileri	33
Çizelge 3.7. Çıkık kutuplu senkron generatörün parametreleri	41
Çizelge 3.8. 36MVA güç transformatörün teknik verileri	44
Çizelge 3.9. Uyarım sistemi modelleri.....	55
Çizelge 3.10. Uyarım sisteminin parametreleri.....	57
Çizelge 3.11. PID kazanç katsayıları.....	58
Çizelge 3.12. Değişen yük durumuna göre yük-frekans kontrolü için BMK' ya ait kural tablosu	64

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1. Adıgüzel HES' e ait baraj gölü ve gövdesi	23
Resim 3.2. Adıgüzel barajı ızgaraları.....	25
Resim 3.3. Cebri boru üzerindeki kelebek vana	27
Resim 3.4. Adıgüzel HES' e ait dolu savak tesisleri	30
Resim 3.5. Adıgüzel HES santral binası ve şalt tesisi	31
Resim 3.6. HES salyangoz montajı.....	37
Resim 3.7. Adıgüzel HES' e ait türbin şaftı ve türbin çukuru	38
Resim 3.8. Adıgüzel HES' e ait senkron generatörler	41
Resim 3.9. Adıgüzel HES' e ait güç transformatörü ve parçaları	42
Resim 4.1. Adıgüzel HES' in şalt tesisi	87
Resim 4.2. Hız regülatörünün mekanik ve hidrolik aksamı.....	93

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi, ekonominin ve sosyal yaşantının vazgeçilmez bir unsurudur. Teknolojinin hızla gelişmesi elektrik enerjisine olan talebi her geçen gün arttırmaktadır. Günümüzde elektrik ihtiyacını hidroelektrik, termik, nükleer, jeotermal ve rüzgâr santralleri ile güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktayız.

Enerji santralleri tarafından üretilen elektrik enerjisinin temel kaynağı suyun kinetik enerjisi veya fosil yakıtlardan ya da nükleer fisyonlardan elde edilen ısı enerjisidir. Tahrik sistemleri bu enerji kaynaklarını mekanik enerjiye dönüştürürken, senkron generatörler ise elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Burada dikkat edilmesi gereken husus elektrik enerjisini talep anında ve talep edildiği kadar üretme zorunluluğudur. Bu da etkin bir planlama ve koordinasyon sistemi ile sağlanmalıdır. Elektrik enerji sektöründe planlama çalışmaları yapılırken; elektrik enerjisinin mümkün olduğu kadar ucuz olmasına, üretimin talebi karşılamada yeterli ve güvenilir olmasına, elektrik enerjisinin kaliteli olmasına dikkat edilmelidir.

Bir güç sisteminde enerji kalitesini üç madde ile özetleyebiliriz:

- (i) Kabul edilebilir toleransta sabit gerilim,
- (ii) Kabul edilebilir toleransta sabit frekans,
- (iii) Üretimin sürekliliği.

Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en çok kullanılan hidroelektrik santralleri, durgun haldeki suyun potansiyel enerjisinin, kinetik enerjiye dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır. Hidroelektrik sistemlerde su, bir cebri boru veya kanal yardımıyla yüksek bir yerden alınarak türbine verilmektedir. Türbinlere bir mil (şaft) ile bağlı olan senkron generatörlerin dönmesi ile elektrik enerjisi üretilmektedir. Türbinden elde edilen mekanik güç, suyun düşü yüksekliğine ve debisine bağlıdır. Mekanik enerjinin kontrol edilebilir olması senkron generatörden üretilen aktif gücün kontrolünü ve senkron generatörün frekansını doğrudan etkilemektedir. Elektrik üretim santrallerinde senkron generatörün devrini ya da sistem frekansını sabit tutmak amacıyla üretimi otomatik kontrol eden hız regülatörleri bulunmaktadır.

Bu tez çalışmasında, Adıgüzel HES' ten elde edilen gücün kalitesini veya üretim sisteminin performansını en üst noktaya getirmek için hız regülatörü devresinde PID kontrolör ve BMK olmak üzere iki farklı kontrolör tasarlanmıştır. Hidroelektrik güç üretim sisteminde, her bir üretim ünitesinden elde edilen çıkış geriliminin genliği ve frekansı arzu edilen değerler içerisinde tasarlanan kontrolörler yardımıyla korunmaya çalışılacak ve elde edilen simülasyon sonuçları bulgular bölümünde verilecektir.

Hidroelektrik güç sisteminde tasarladığımız PID kontrolörde oransal (K_P), integral (K_I) ve türevsel (K_D) olmak üzere üç parametre bulunmaktadır. Belirli bir çalışma kriterine göre kontrol parametrelerinin belirlenmesi, PID kontrolörün tasarımında önemli konulardan biridir. Bu parametre değerleri kontrolörü oluşturan bir ya da daha fazla transfer fonksiyonuna ilişkin katsayılardır. Temel tasarım yaklaşımı, bireysel parametrelerin tasarım koşullarını ve neticede sistem davranışını nasıl etkilediğini belirlemektir. PD kontrolörün sisteme zayıflama getirdiği ancak sistemin kararlı hal davranışını etkilemediği, PI kontrolörün ise, göreceli kararlılığı ve aynı zamanda kararlı hal hatalarını düzelttiği, ancak yükselme zamanını arttırdığı bilinmektedir (Kuo 2009). Bu sonuçlar, PI ve PD kontrolörlerin iyi yönlerinden yararlanmayı sağlayan, PID kontrolörü kullanmaya yöneltmiştir.

Hidroelektrik güç sisteminde tasarladığımız ikinci kontrolör bulanık mantık kontrolördür. Bu kontrolörün tasarımında, uzman kişinin bilgi ve deneyimlerinden yararlanılır. Uzman; dilsel niteleyiciler olarak tanımladığımız az, çok, çok az, çok fazla, biraz az, biraz çok gibi günlük hayatta sıkça kullanılan nitelemeler doğrultusunda esnek bir denetim gerçekleştirir. Bulanık mantık kontrolörün temeli bu tür sözlü ifadeler ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkiler üzerine kurulmuştur. Bulanık mantık denetiminde kullanılan sözlü ifadeler uzman tabanlı otomatik denetim algoritmasına çevrilir. BMK tasarlanırken sistemin matematiksel modellenmesi şart değildir (Elmas 2011).

Klasik küme kuramında bir eleman o kümenin ya elemanıdır ya değildir. Nesnenin üyelik değeri 1 ise kümenin tam elemanı, 0 ise elemanı değildir. Diğer bir ifadeyle klasik küme elemanlarının üyelikleri $\{0,1\}$ değerlerini alırlar. Klasik mantık kuramına göre eğer sıcaklık $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' nin altına düşerse sıcak değildir. Yani $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcak değildir.

Doğal olarak bu mantığın hiçbir esnekliği yoktur. Yaşadığımız dünyada ise sınırlar bu kadar keskin değildir. Endüstriyel denetleyici için bu durum ele alınırsa, denetleyicideki fiziksel büyüklüklerin dâhil olduğu kümeler birbirinden böyle keskin sınırlarla ayrılmışlarsa denetim çıktısının ani değişiklikler göstermesi kaçınılmaz olacaktır. Klasik kümelerin aksine bulanık kümelerde elemanların üyelik dereceleri $[0,1]$ aralığında sonsuz sayıda değişebilir. Klasik kümelerdeki keskin ifadeler soğuk-sıcak, hızlı-yavaş gibi ikili değişkenler, bulanık mantıkta biraz soğuk, biraz sıcak gibi esnek niteleyicilerle yumuşatılarak gerçek dünyaya benzetilir (Elmas 2011).

Hidroelektrik güç üretim sisteminde tasarlanan kontrolörlerin performans analizlerinin yanı sıra olması muhtemel üç fazlı, iki fazlı, iki faz – toprak ve faz – toprak kısa devre arızalarında kontrolörlerin tepkisi karşılaştırılmıştır. Enerji sistemlerinde faz iletkenlerinin birbirine, nötr iletkenine veya toprağa değmesi sonucunda ortaya çıkan arıza akımlarının, normal çalışma koşullarından veya farklı yollardan devrelerini tamamlamasına kısa devre denilmektedir. Başka bir deyişle kısa devre; elektrik tesislerinde, farklı potansiyellerde olan iki veya daha fazla dolaşım noktası arasında kazara veya kasıtlı olarak gerçekleşen düşük dirençli bağlantıdır.

Enerji sistemlerinin güvenli bir şekilde çalışmaları, doğabilecek kısa devre akımlarının doğrulukla bulunması, alınacak önlemlerle sınırlandırılması ve önlenmesiyle sağlanabilir. Kısa devre olayının nedeni, genelde, yalıtkan malzemelerin yalıtkanlık özelliğini kaybetmesidir. Yalıtkanlığın bozulmasına eskime, aşırı gerilimler sonucu delinme, malzemenin kötü kullanılması ve mekanik arızalar gibi etkenler neden olabilir. Kısa devre durumunda devrenin genel empedansı azalır ve bu nedenle de devrenin dallarında ki akımlar artmış olur. Akımlar arttığı için devre elemanlarındaki gerilim düşümleri de artar; dolayısıyla çeşitli düğüm noktalarındaki gerilim değerleri azalır (Şerifoğlu 2006).

Çeşitli kısa devre arızalarının da incelendiği bu tez çalışmasında, gerçek test verileriyle simülasyon sonuçlarından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Giriş

Hidroelektrik santrallerde yükteki değişime göre üretilen gücün artırılması veya azaltılması işlemi hız regülatörleri vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Hız regülatörlerinin pozisyonlarının belirlenmesi ise sistemdeki değişimi algılayarak ayar kanatlarının pozisyonunu ayarlayan kontrolörler tarafından yapılmaktadır. Tasarlanan kontrolörlerin sistemdeki bu değişimlere olabildiğince hızlı tepki vermelerinin gerekliliğinden dolayı bu konuda birçok çalışma yapılmıştır.

2.2 Elektrik Üretim Santrallerindeki Kontrolör Çalışmaları

Zhang and So (2000), yaptıkları çalışmada, kombine çevrim santralının matematiksel modelini oluşturmuşlar ve hız regülatörü sisteminin performansını arttırmak için bir PID kontrolör tasarlamışlardır. Oluşturdukları modeli iki bölgeyi bir güç sistemi üzerinde test etmişlerdir. Sisteme uygulanan bozucu etkilere göre PID kontrolör ve PID kontrolör olmaksızın sistemin performansını incelemişlerdir. PID kontrolör ile önerilen modelin sistemin dinamik performansını arttırdığı simülasyon sonuçları ile gözlenmiştir.

Demirören vd. (2001), yaptıkları çalışmada, iki alanı buhar diğeri de hidro türbin olmak üzere üç alanlı bir güç sisteminde, yük-frekans kontrolü sorununu incelemek için yapay sinir ağı denetleyici uygulamasını önermişlerdir. Önerilen kontrolörde geri yayılım sinir ağı, öğrenme kuralı olarak kullanılmıştır. Ayrıca önerilen kontrolör ile integral kontrolörün kıyaslaması yapılmış ve YSA kontrolörün performansının geleneksel integral kontrolöre göre daha iyi olduğu elde edilen simülasyon sonuçlarından görülmüştür.

Cheng vd. (2002), yaptıkları çalışmada, Antropomorfik yapıya dayanan yeni bir akıllı PID kontrolör algoritması önermişlerdir. Önerilen yeni kontrolör ile geleneksel PID kontrolör karşılaştırılmış ve akıllı PID kontrolörün hız regülatörü sisteminin dinamik

performansının daha iyi olduğu ve geleneksel PID kontrolöre göre sistemin daha hızlı kararlılık şartlarını sağladığını simülasyon sonuçları ile göstermişlerdir.

Çam ve Kocaarslan (2002), yaptıkları çalışmada, tek bölgeli bir güç sisteminde yük frekans kontrolünü iyileştirmek amacıyla PI kontrolörün bulanık mantıkla kazancı ayarlanmıştır. Bu yolla, oransal ve integral kazançları için değişik değerler alınarak sistemin dinamik performansının geliştirilmesi sağlanmıştır. Önerilen yeni kontrolör ile geleneksel PI kontrolör karşılaştırılmış ve bulanık mantıkla yapılan kontrolde sistemin oturma zamanı %25 daha iyi olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda maksimum bozulma da %20 daha iyi sonuç vermiştir.

Yılmaz vd. (2003), yaptıkları çalışmada, yapay sinir ağları ve bulanık mantık esasına dayanan bir yük frekans denetleyicisi önermişlerdir. Önerilen yeni kontrolör bu iki kontrol şeklinin sakıncalı taraflarının üstesinden gelmekte ve her birinin üstün taraflarını kullanmaktadır. Dinamik bulanık ağ olarak adlandırdıkları bu yeni denetleyiciyi, iki bölgeli bir güç sisteminde ikincil frekans denetimi yapmak amacıyla gerçekleştirilmiş ve klasik integral denetleyici ile kıyaslaması yapılmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde dinamik bulanık denetleyici frekans ve salınımları başarılı bir şekilde azaltmıştır.

Özkop vd. (2004), yaptıkları çalışmada, güç sisteminin bulanık mantık denetleyici ile kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Tasarlanan bulanık mantık kontrolörde değişik üyelik fonksiyonları (üçgen, yamuk, gaussian, cauchy) kullanılarak sistem çıkışının davranışı incelenmiştir. Oluşturulan 9 kurallı ve 25 kurallı kontrolörde en küçük aşma ve en kısa oturma zamanı ile cauchy üyelik fonksiyonunun en uygun sonucu verdiği gözlenmiştir.

Oysal vd. (2004), yaptıkları çalışmada, akıllı denetim esasına dayanan bir yük frekans denetleyicisi önermişlerdir. Önerilen yeni kontrolörün sinir ağları ve bulanık mantık teknolojilerinin sakıncalı taraflarının üstesinden geldiği ve her birinin üstün taraflarını kullandığı görülmüştür. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, dinamik bulanık ağ tabanlı kontrolörün geleneksel PI kontrolöre göre yük değişimlerine daha hızlı cevap verdiği ve frekanstaki salınımların daha kısa sürede sönümlendiği görülmüştür.

Oğuz ve Demirören (2004), yaptıkları çalışmada, tek alanlı bir güç sisteminde geçici süreçte oluşan salınımların sönümünü arttırmak için otomatik gerilim regülatörü devresinde bulanık mantık tabanlı bir kontrolör tasarlamışlardır. Önerilen kontrolör, sonsuz baraya paralel iki hat üzerinden bağlı durumdaki senkron generatörün terminal uçlarında oluşan arıza durumu için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Simülasyon grafikleri incelendiğinde, üç fazlı simetrik kısa devre sırasında ve sonrasında bulanık mantık tabanlı kontrolör, klasik kontrolöre göre salınımların genliğini düşürdüğü ve yerleşme süresini kısalttığı görülmüştür.

Kaytez vd. (2005), yaptıkları çalışmada, senkron generatörün görünür kutup d-q eksenlerine göre matematiksel modeli oluşturularak, generatörün uyarım devresinin kontrolünde kullanılan geleneksel PID kontrolör ile BMK' nın kıyaslaması yapılmıştır. Matlab/Simulink programı kullanılarak tasarlanan sistemde, kontrolün BMK ile yapılmasıyla, çıkış büyüklüklerindeki salınımlarda geleneksel PID kontrolöre göre azalmalar görülmüş ve istenilen sönüm karakteristiği elde edilmiştir.

Zhang ve Zhang (2006), yaptıkları çalışmada, hidro-türbin regülatör sistemine geleneksel PID kontrol ve uyarlamalı bulanık kontrol teorilerini birleştirerek yeni bir kontrol tasarlamışlardır. Yeni kontrol stratejisinin statik ve dinamik performansları incelenmiş ve simülasyon sonuçlarında önerilen kontrol yönteminin doğru ve pratik olduğu gösterilmiştir.

Anower vd. (2006), yaptıkları çalışmada, tek alanlı bir güç sisteminin otomatik üretim kontrolünde bulanık mantık denetleyici kullanarak farklı yük değerleri için geleneksel integral kazancın kendinden ayarlanabilirliği sağlanmıştır. Tasarlanan kontrolör ile frekansın yerleşme zamanı, büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir.

Altaş (2006), yaptığı çalışmada, iki alanlı bir güç sisteminde yük frekans salınımlarını minimuma düşürmek için bulanık mantık tabanlı bir kontrolör tasarlamıştır. Önerilen kontrolörün performansı klasik integral tip kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Yük

değişiminin, bulanık mantık tabanlı kontrolörde, daha kısa yerleşme zamanı ve daha az aşma ile kontrol altına alındığı gözlemlenmiştir.

Shayeghi vd. (2007), yaptıkları çalışmada, üç alanlı güç sisteminin yük frekans kontrolü için genetik algoritma tabanlı çoklu durum bulanık denetleyici önerilmiştir. Kontrolörde iki kural tabanı kullanılmıştır. Çoklu durum bulanık kontrolörle klasik bulanık PID kontrolör karşılaştırılmış ve tasarlanan kontrolörün üstünlükleri simülasyon sonuçları ile verilmiştir.

Culberg vd. (2007), yaptıkları çalışmada, tek alanlı hidro-türbin generatör sisteminin frekansının denetlenmesi için bulanık çıkarım tabanlı bir kontrolör tasarlamışlardır. Geliştirilen kontrolör, geleneksel PID kontrolör ile kıyaslaması yapılmış ve simülasyon sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak yeni denetleyicinin frekanstaki aşma ve salınımları azalttığı görülmektedir.

Yu vd. (2007), yaptıkları çalışmada, hidrolik türbindeki hız regülatörü sisteminin performansını arttırmak amacıyla bulanık bağışık kayan mod kontrolör önerilmiştir. Bulanık kontrol teknolojisi ile kayan mod kontrol teorisi, bağışıklık algoritması dâhil edilerek geliştirilmiştir. Simülasyon grafikleri incelendiğinde, önerilen kontrolör dışarıdan uygulanan bozucu etkilere göre performansının iyi olduğunu göstermiştir.

Çam (2007), yaptığı çalışmada, tek bölgeli ve iki bölgeli hidroelektrik güç sistemine geleneksel PI kontrolör ve kazanç değerlerinin bulanık mantıkla ayarlandığı PI kontrolörün karşılaştırmasını yapmıştır. Tasarlanan bulanık mantık PI kontrolörün geleneksel PI kontrolöre göre performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Bu nedenle tek bölgeli ve iki bölgeli güç sisteminin yük frekans kontrolünü sağlamak amacıyla bulanık mantık PI kontrolörün gelişmiş bir kontrolör olarak tavsiye edilebilir olduğunu göstermiştir.

Abdolmaleki vd. (2007), yaptıkları çalışmada, İran' da bulunan Abbaspour Hidroelektrik Santrali' nin dinamik modeli Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve yük frekans kontrolünü geliştirmek için adaptif bulanık mantık PI

kontrolör geliştirilmiştir. Önerilen adaptif bulanık mantık PI kontrolör ile geleneksel PI kontrolör karşılaştırılmış ve önerilen kontrolün sistem frekansındaki aşma ve oturma sürelerini azalttığı görülmüştür.

Petrov vd. (2008), yaptıkları çalışmada, paralel dağıtılmış nöro-bulanık model öngörü kontrolörü doğrusal olmayan bir hidro türbin-generatör sistemini kontrol etmek için önerilmiştir. Önerilen kontrolörün test ve simülasyonları endüstriyel tesis üzerinde denenmiş ve uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Sabahi vd. (2009), yaptıkları çalışmada, yük frekans problemi için modifiye geribildirim hata öğrenme yaklaşımına dayalı yeni bir uyarlamalı kontrolör önermişlerdir. Önerilen geribildirim hata öğrenme denetleyicisi ile geleneksel hata öğrenme denetleyicisinin kıyaslaması yapılmıştır. Ayrıca önerilen kontrolör bazı performans endeksleri tarafından PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır. Önerilen kontrolörün, geleneksel FEL kontrolör ve PID kontrolör ile karşılaştırıldığında daha iyi performansa sahip olduğu görülmektedir.

Nademi and Tahami (2009), yaptıkları çalışmada, buhar türbinli güç generatörlerinin hız regülatörü devresinde, doğrusal matris eşitsizlikleri yaklaşımı ile çok değişkenli PID kontrolör tasarlamışlardır. Mevcut oransal kontrolör ile önerilen kontrolörün kıyaslaması yapılmış ve sistem parametrelerindeki değişimlere ve bozucu etkilere rağmen sistemin daha kararlı olduğunu göstermiştir. Tasarlanan kontrolör, Damavand Güç Santrali' nin buhar ünitesine eklenmiş ve deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçları arasında yüksek uyum elde edilmiştir.

Hassan vd. (2009), yaptıkları çalışmada, iki alanlı bir güç sisteminde frekans kontrolü sorununa Takagi-Sugeno bulanık sistemi kullanılarak PID kontrolörün parametreleri belirlenmiştir. Bulanık mantık tabanlı integral-türev ve bulanık mantık tabanlı oransal-integral kontrolörlerin kıyaslaması simülasyon sonuçları ile verilmiştir. Bu sonuçlarda integral hatasının karesi karşılaştırma ölçütü olarak kullanılmıştır. Karşılaştırılan BMPID, BMID ve BMPI kontrolörlerde integral hatasının karesi $2,56 \times 10^{-5}$ ile BMPID kontrolör en iyi sonucu vermiştir.

Wang vd. (2009), yaptıkları çalışmada, 500 MW gücündeki buhar türbinin kontrolünün adaptif nöro bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tabanlı yeni bir öngörülü kontrol sistemi önermişlerdir. Oluşturulan doğrusal model için çalışma noktaları elde edilmiş ve sistem üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Simülasyon sonuçları yeni kontrol stratejisinin çok etkili olduğunu göstermiştir.

Lüy vd. (2009), yaptıkları çalışmada, 765 MW gücündeki bir termik santralin güç ve entalpi çıkışlarını düzenlemek üzere yapay sinir ağı (YSA) kontrol tekniği dizayn edilip sisteme uygulamışlardır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde YSA kontrolör, sisteme verilen bozucu etkiye hemen tepki vermekte, sistemin çıkışlarını istenilen değere kısa sürede getirmekte ve aşma değerleri de küçük çıktığı görülmektedir.

Salhi vd. (2010), yaptıkları çalışmada, mikro-hidroelektrik santralının yük değişimlerinin neden olduğu frekans dalgalanmalarının kararlılığını sağlamak amacıyla hız regülatörü devresinde bulanık mantık denetleyicili bir kontrol sistemi geliştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör ile çıkış frekansının kararlılığı ve suyun daha ekonomik kullanılabilirliği sağlanarak enerji kaybı en aza indirilmiştir. Simülasyon sonuçları ile önerilen bulanık kontrol sisteminin uygulanabilirliği gösterilmiştir.

Gautam and Goyal (2010), yaptıkları çalışmada, tek alanlı bir güç sisteminde geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (IPSO) tabanlı bir PID kontrolör tasarlamışlardır. Tasarlanan PID kontrolör ile geleneksel PI kontrolör kıyaslanmış ve küçük bir yük değişimine karşılık IPSO-PID kontrolörün tepkisinin daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca önerilen kontrol algoritmasının etkili olduğu ve sistem performansında belirgin bir iyileşme sağladığını göstermiştir.

Qian vd. (2010), yaptıkları çalışmada, hidroelektrik güç üretim sisteminin hız regülatörü devresinde genetik algoritma tabanlı bulanık kayan mod kontrolör önermişlerdir. Kontrolörde kayma yüzeyi parametreleri bir grup seçmek için, genetik algorithmada bu parametreleri aramak için kullanmışlardır. Kayan mod kontrol, salınım sorununu azaltmıştır. Kontrol kazancının düzenlenmesinde bulanık arayüz sistemi kullanılmıştır.

Hidro-türbin ünitesinin hız regülatöründe sunulan yöntemin fizibilite ve sağlamlığı simülasyon sonuçları ile verilmiştir.

Yalçın vd. (2010), yaptıkları çalışmada, dört bölgeli güç sisteminin PID kontrolör ile denetimini gerçekleştirmiş ve performansını irdelemişlerdir. Tasarladıkları güç üretim sistemini, tek bölgeli ve iki bölgeli güç sistemleri ile kıyaslamasını yapmışlardır. Ayrıca oluşturulan sistemin oturma zamanı ve maksimum bozulma değeri açısından PID kontrolörün PI kontrolöre göre çok daha iyi sonuç verdiğini analiz sonuçları ile göstermişlerdir.

Kumar vd. (2010), yaptıkları çalışmada, iki alanlı termal güç sisteminde otomatik üretim kontrolü için genetik bulanık mantık tabanlı PID kontrolör önermişlerdir. Genetik algoritma, PID kazancını ayarlamak için uygulanmıştır. Üyelik fonksiyonlarını ve kural tabanını ayarlayan FPID kontrolör, frekans sapmaları ve bozucu etkileri en aza indirmektedir. Sonuçlar, her iki bölgede kullanılan GFPID kontrolörün yük frekans kontrolüne etkileri, Ziegler-Nicholas yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon grafikleri incelendiğinde geleneksel PID kontrolörün önerilen kontrolöre göre daha hantal olduğu görülmüş ve önerilen kontrolörün daha küçük aşma ve yerleşme zamanına sahip olduğu incelenmiştir.

Özbay ve Gençöglü (2010), yaptıkları çalışmada, küçük hidroelektrik santrali için denge bacası olmayan türbin modelinde uyarlamalı BMK tasarımı önermişlerdir. Geleneksel kontrol yöntemlerinde kullanılan oransal ve integral parametreleri her yük için tek tek belirlemek gerekirken uyarlamalı bulanık mantık denetleyici kullanarak tek bir denklemde kontrol sağlanmıştır. Doğrusal olmayan türbin modelinin, doğrusal türbin modeline göre daha kısa sürede frekans kararlılığı sağladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca rampa yük değişimlerinin step yük değişimlerine göre daha kısa sürede istenilen frekans değerini yakaladığı simülasyon grafikleri ile gösterilmiştir.

Kocaarslan ve Tiryaki (2010), yaptıkları çalışmada, Ankara Çayırhan Termik Santrali'nin birinci ve ikinci ünitelerini kapsayan modelin (300 MW) güç ve entalpi çıkışlarını kontrol etmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu tabanlı bir oransal-integral-türev

(PSO-PID) kontrolör ve bulanık mantık kuralları ile programlanan oransal-integral (FGPI) kontrolör elektrik santrali modeline uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, kısa oturma zamanının istenildiği durumlarda PSO-PID kontrolörün, düşük seviyeli aşma değeri ve yumuşak adaptasyon istenildiği durumlarda da FGPI kontrolörün kullanılabileceği gösterilmiştir.

Dongsheng vd. (2011), yaptıkları çalışmada, PID kontrolörün eksiklerinin üstesinden gelmek amacıyla geliştirilmiş parçacık sürüsü optimizasyonuna (IPSO) dayalı bir algoritma tasarlamışlardır. Böylece DC motor kontrolünde kullanılan PID kazanç katsayıları bu algoritmayla belirlenmiştir. Geliştirilen kontrolörün, klasik PID kontrolöre göre karşılaştırması yapılmış ve simülasyon sonuçlarıyla üstünlüğü ispatlanmıştır.

Vijayaraghavan and Sanavullah (2011), yaptıkları çalışmada, düşük frekanslı güç sistemi salınımlarının sönümlenmesi ve güç sistemi kararlılığının sağlanması için hiyerarşik bulanık kontrolör (SHFC) önerilmiştir. Önerilen kontrolörün performansı, farklı çalışma koşulları ve bozucu etkiler ile geleneksel PSS ve bulanık mantık denetleyici tabanlı PSS üzerinde karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. SHFC tabanlı PSS kısa yerleşme zamanı, küçük aşma distorsiyonları ve dinamik tepki süresinin yüksek olmasıyla performansının daha etkili olduğu göstermiştir.

Khuntia and Panda (2011), yaptıkları çalışmada, üç alanlı hidro-termal sistemin otomatik üretim kontrolü için adaptif nöro bulanık çıkarım denetleyicisi (ANFIS) önermişlerdir. Bu üç alanlı güç sisteminin iki alanı termal üçüncü alanda hidro ünitelerden oluşmaktadır. %1 adım yük değişiminde geleneksel integral kontrolöre kıyasla ANFIS kontrolör en uygun simülasyon sonuçlarını vermiştir.

Oğuz (2011), yaptığı çalışmada, iki alanlı bir güç sisteminde otomatik üretim kontrolü sorununun üstesinden gelmek amacıyla modifiye bulanık PI kontrolöre paralel bulanık PD kontrolör tasarlamıştır. Önerilen kontrolörün blok diyagramları Matlab/Simulink programında hazırlanmış ve farklı çalışma koşullarında geleneksel PID kontrolör ile

kıyaslaması yapılmıştır. Simülasyon grafiklerinde, önerilen kontrolörün performansının geleneksel PID kontrolöre göre daha iyi olduğu gösterilmiştir.

Zenk vd. (2011), yaptıkları çalışmada, iki alanlı bir güç sisteminde yük frekans kontrolünü iyileştirmek amacıyla bulanık mantık tabanlı PI kontrolör önermişlerdir. Güç üretim sistemi Matlab/Simulink simülasyon programında oluşturulmuş, frekans değişimleri her alan için ayrı ayrı incelenmiş ve simülasyon grafikleriyle gösterilmiştir.

Özbay ve Gençoglu (2011), yaptıkları çalışmada, hidroelektrik santralının yük frekans kontrolünü yapabilmek amacıyla, Matlab/Simulink programını kullanarak türbin, generatör ve regülatör modellerini oluşturmuşlardır. Doğrusal ve doğrusal olmayan türbinli hidroelektrik santrali modelleri kullanılarak, farklı yükleme durumları için güç-zaman ve frekans-zaman değişimlerini elde etmişlerdir. Simülasyon sonuçları incelendiğinde frekansın başlangıçta negatife gittiği, daha sonra arttığı, gücün ise negatiften başlayarak arttığı ve sürekli durumda sabit kaldığı, doğrusal olmayan türbin modelinde ise bu durumun oluşmadığı gözlemlenmiştir.

Oğuz vd. (2012), yaptıkları çalışmada, mikrotürbin enerji üretim sisteminin (MTPGS) çalışma performansını arttırmak ve istenilen kalitede elektriksel çıkış büyüklüğü elde etmek için uyarlamalı nöro bulanık çıkarım sistemi (ANFIS) tasarlamışlardır. MTPGS, hız kontrolörü, silindirik kutuplu senkron generatör, uyarma devresi ve voltaj regülatörü Matlab/Simulink programının simülasyon blok diyagramları kullanılarak oluşturulmuştur. Simülasyon grafikleri incelendiğinde elektriksel büyüklükler 1–1,5 s gibi kısa bir sürede arzu edilen değerlere ulaşmaktadır. Ayrıca sistemde sürekli durum hatasının sıfıra yakın olduğu görülmektedir.

Duman vd. (2012), yaptıkları çalışmada, heuristic arama yöntemi olarak bilinen yerçekimi arama algoritmasını (GSA) tek alanlı bir güç sisteminin yük frekans kontrolünü yapmak amacıyla PI ve PID kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesinde kullanmışlardır. Önerilen PI ve PID kontrolörlerin etkinliği geleneksel PI kontrolör ile kıyaslaması yapılmıştır. Elde edilen verilerde sistemin daha az aşma, daha az osilasyon ve daha kısa geçici süreye sahip olduğunu göstermiştir.

Ismail (2012), yaptığı çalışmada, şebekeden izole edilmiş buhar türbininin hızını kontrol etmek için hidrolik regülatör devresinde PID kontrolör tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu kontrolörün parametreleri, uyarlamalı bulanık mantık kontrol metodu kullanılarak dizayn edilmiştir. Aynı model, ANFIS (Adaptif Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi), GA (Genetik Algoritma), PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu), BPSO (Bakteriyel Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemleri kullanılarak tekrar dizayn edilmiştir. Simülasyon sonuçlarında uyarlamalı bulanık mantık kontrol metodu kullanılarak tasarlanan PID kontrolörün diğer yöntemlere göre çok daha hızlı tepki süresine sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca yükselme zamanı ve yerleşme zamanı açısından çok daha iyi olduğu gözlenmiştir. BPSO yöntemi, klasik PSO ve GA optimizasyon tekniklerine göre daha iyi tepki verdiğini göstermiştir. Dolayısıyla BPSO ve ANFIS, PID kazançlarının belirlenmesinde kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

Venkatraman vd. (2012), yaptıkları çalışmada, iki alanlı termik güç üretim sisteminde tip-I ve tip-II olmak üzere iki farklı üyelik fonksiyonu kullanılarak BMK tasarlamışlar ve geleneksel PI kontrolör ile kıyaslamasını yapmışlardır. Tip-II bulanık kontrolörün diğer kontrolörlerden daha iyi performansa sahip olduğu simülasyon sonuçları ile verilmiştir.

Panda vd. (2012), yaptıkları çalışmada, sonsuz baraya bağlı tek alanlı bir güç sistemi ile çok alanlı bir güç sisteminin güç sistemi kararlılığı tasarımı için tip-2 bulanık mantık denetleyici (IT2FLC) önermişlerdir. Aralık değer kümelerine dayalı bulanık mantık kontrolörün tip-1 bulanık mantık kontrolöre göre salınımların sönümlendirilmesinde daha etkin olduğu görülmüştür. Aynı zamanda önerilen kontrolörün farklı bozucu etkilere ve çeşitli çalışma koşullarına daha iyi tepkiler verdiği simülasyon grafikleri ile gösterilmiştir.

2.3 Hidroelektrik Santrallerinin Tasarım Çalışmaları

Villacorta vd. (2003), yaptıkları çalışmada, hidroelektrik santrali otomasyon projelerinde UCA (yardımcı program iletişim mimarisi) mimari felsefesi kullanılarak SCADA sistemi geliştirmişlerdir. UCA mimarisi, sistemdeki birçok teçhizatın modellenmesi için esnek yapıdadır. Sistemdeki teçhizatlar, regülatörler ve koruma

röleleri SCADA sistemine entegre edilmiştir. Bu sayede hidroelektrik santrali otomasyon sistemlerinde farklı üretici firmalar arasında birlikte çalışabilirliği genişletmek için sağlam bir temel oluşturulmuştur.

 zakt rk vd. (2006), yaptıkları çalışmada, küçük hidroelektrik santralinin g    hem klasik hem de bulanık mantık yöntemi ile hesaplanmıştır. Uygulamada, Pelton türbini kullanıldığından debi değerleri $0 - 2 \text{ m}^3/\text{s}$ ve düşü değerleri $30 - 1300 \text{ m}$ aralığında seçilmiştir. Her iki yöntemle üretilen g   ler arasında maksimum %1,5 sapmanın olduğu g r lm ştir. Önerilen bulanık mantık yöntemiyle santral göçünün hesaplanabileceği gösterilmiştir.

Salhi vd. (2008), yaptıkları çalışmada, bir mikro hidroelektrik santralinin matematiksel modelini oluşturmuşlar ve gerçek sistem verileriyle simülasyon sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Frekansı sabit tutmak için PI kontrolör kullanmışlardır. Gerçek zamanlı sistemde, regülasyon işlemi elektronik haberleşme kartı üzerinden PC aracılığı ile yapılmıştır. Elde edilen simülasyon sonuçları ile gerçek zamanlı sistemdeki sonuçların benzer yapıda olduğu g r lm ştir.

Fang vd. (2008), yaptıkları çalışmada, tipik bir hidroelektrik santralinin Matlab/Simulink tabanlı yazılım ortamında simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyonda yüksek bir su düşüsü, uzun bir cebri boru, denge bacası ve Francis türbini modeli gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, hız regülatörü PID kazançları, yüksek basınçlı su sistemi gibi hidrolik türbini parçalarının dinamik performansları farklı parametreler kullanılarak analizi yapılmıştır. Önerilen simülasyon sistemi, hidroelektrik projelerinin  n tasarımı veya değerlendirmelerde yararlı olabileceğini simülasyon grafikleri ile kanıtlamıştır.

Robert and Michaud (2012), yaptıkları çalışmada, elektrik şebekesine bağlı hidroelektrik santral modeli sunulmuştur. Modeli oluşturulan 252 MVA göçünde ki iki adet hidro ünitenin simülasyon grafikleri ile gerçek sistemdeki ünitelerin kıyaslaması yapılmış ve gerçek sistem performansına yakın değerler elde edilmiştir.

Ramkumar and Durairaj (2012), yaptıkları çalışmada, kapalı çevrim vektör kontrol sistemi ile DFIG' in ayrıntılı bir matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Enterkonnekte sisteme bağlı rüzgar türbini DFIG ile hız regülatörlü senkron generatörün normal ve

geçici durum çalışma koşullarında simülasyonlarını yapmışlardır. Bu koşullar sırasında senkron ve asenkron generatör gerçek ve reaktif güç akışlarının varyasyonları PSCAD / EMTDC yazılımı ile analizleri yapılmıştır.

Borkowski and Wegiel (2013), yaptıkları çalışmada, 150kW gücünde küçük bir hidroelektrik sistemi (hidro-set) dizayn etmişlerdir. Şebeke bağlantılı sistemde pervaneli türbin, AC/DC/AC çevirici, ayar kanadı ve sabit mıknatıslı senkron generatör kullanmışlardır. Bu sistem aynı nehir üzerine paralel olarak çalışan iki hidro-set' ten oluşmaktadır. Sistemde kullanılan şanzıman, geleneksel sistemlere göre önemli ölçüde sistem performansını iyileştirmiştir. Pervane türbinin verimi nominal parametreler ile %85 iken sistemin toplam verimi %65 ila %80 arasında değişmektedir. Önerilen sistemin modüler ve kompakt oluşundan dolayı diğer uygulamalarda da kullanılabilir olduğunu göstermiştir.

2.4 Kısa Devre Arıza Analizi Çalışmaları

Zhao and Feng (2010), yaptıkları çalışmada, 1000MW gücündeki yüksek kapasiteli senkron generatörün dq koordinat sisteminde matematiksel modelini oluşturmuşlar ve üç faz kısa devre arıza analizini incelemişlerdir. Senkron generatörün ani kısa devre sırasında büyük bir etki ve dalgalanmanın olduğu, kısa devre sonrasında da istikrarlı bir seviyeye ulaştığı simülasyon grafikleri ile gösterilmiştir.

Barakat vd. (2010), yaptıkları çalışmada, 75kVA senkron generatörün dinamik modeli oluşturularak Matlab/Simulink' te ani kısa devre ve ani açık devre simülasyonlarını yapmışlardır. İlk olarak senkron generatörün dq eşdeğer devresi hesaplanmış ve amortisör sargılarının varlığı dikkate alınarak senkron makine modeli oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları incelendiğinde, amortisör sargılarının, makinenin terminal davranışı üzerinde etkili olmadığı gösterilmiştir. Oluşturulan modelin doğruluğu gerçek sistemdeki deneysel testlerle gösterilmiştir.

Jing vd. (2011), yaptıkları çalışmada, Lorentz kuvvet yöntemi ile dinamik modeli oluşturulmuş 1000 MW gücündeki çıkık kutuplu senkron generatörün elektromanyetik kuvvet hesaplarını yapmışlardır. Senkron generatörün üç faz kısa devre hatası

oluştuğunda sargılardaki elektromanyetik dalgaların durumu simülasyon grafikleriyle incelenmiştir.

Sulla vd. (2011), yaptıkları çalışmada, Crowbar metodu yani rotor akımının yüksek olduğu veya DA-link geriliminin sınır değeri aştığı durumlarda, generatörün rotoru güç elektroniği anahtarları ile harici dirençler üzerinden kısa devre edilmesi yöntemi kullanılarak, sincap kafesli (SCIG) ve DFIG generatörlerinin kısa devre akımlarının hesaplanması için genel bir yöntem sunmuşlardır. Sunulan teorik analizde, SCIG kısa devre davranışı ile yüksek crowbar dirençli DFIG arasında önemli farklılıklar vurgulanmaktadır. Ayrıca dinamik simülasyonların sonuçları incelenerek AC devre elemanlarının maksimum akım taşıma kapasitesine göre koruma rölelerinin ayarları yapılabilmektedir.

Sonuç olarak araştırılan çalışmalarda, geçmişten günümüze kadar elektrik santrallerinin hız ve uyartım regülatörü devrelerinde birçok kontrolör tasarlanmış ve çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında da iki tür kontrolör tasarlanmış, tasarlanan PID kontrolör ve BMK' nın sisteme olan etkileri incelenmiştir. Diğer çalışmalardan farklı olarak iki üniteye sahip 62 MW gücündeki Adıgüzel HES' ten elde edilen gücün kalitesini ve üretim sisteminin performansını iyileştirmek için, tasarlanan kontrolörlerin parametrelerinde gerçek sistem parametrelerinin kullanılması ve ilk kez Adıgüzel HES için kapsamlı bir çalışma yapılmasıdır.

Tasarlanan kontrol yöntemleri Bölüm–3 'de detaylı bir şekilde açıklanmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Bölüm–4 'de verilmiştir.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Türkiye'nin Hidroelektrik Enerji Potansiyeli

Enerji, gelişmenin ve çağdaş insan yaşamının en önemli unsuru olmakla beraber, bütünün sadece bir parçasıdır. Su ise, yaşamsal bir maddedir ve su yapı projeleri ile yaşamsal ihtiyaçların kesintisiz karşılanması sağlanabilir. Su yapılarının; içme suyu temini, sulama, taşkın koruma, enerji ve su ürünleri üretimi gibi ekonomik olarak değerlendirilebilir amaçlarının yanında, rekreasyon, emisyon azalımı gibi ekonomik olarak değerlendirilmeyen bir çok amaçları da bulunmaktadır. Bütün bunlar, su kaynakları geliştirme projelerinin önemini ve gereğini vurgulamaktadır.

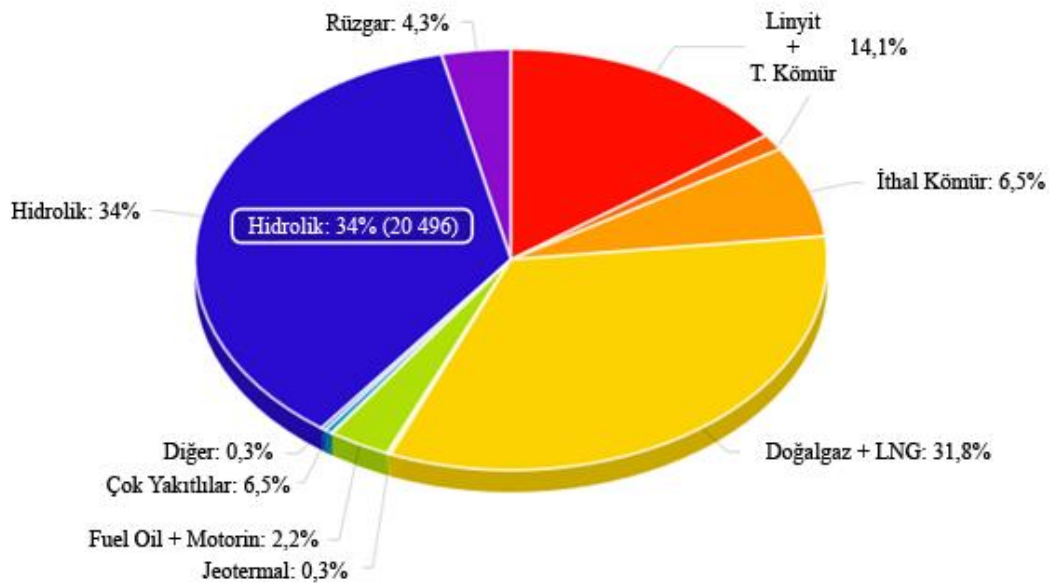
Hidroelektrik potansiyelin belirlenmesinde “teorik potansiyel”, “teknik potansiyel” ve “ekonomik potansiyel” kavramları ön plana çıkmaktadır. Ülke sınırlarına veya denizlere kadar bütün tabii akışların %100 verimle değerlendirilebilmesi varsayımına dayanılarak hesaplanan hidroelektrik potansiyel, o ülkenin brüt teorik hidroelektrik potansiyelidir. Ülkemizin yenilenebilir enerji potansiyeli içinde en önemli yeri tutan hidrolik kaynaklarımız bakımından incelendiğinde Türkiye’de teorik hidroelektrik potansiyeli 433TWh/yıl mertebesindedir.

Mevcut teknolojilerle teorik potansiyelin tamamının kullanılması mümkün olmadığından mevcut teknoloji ile değerlendirilebilecek azami potansiyele teknik yapılabilir hidroelektrik potansiyel denir. Ülkemizin teknik olarak değerlendirilebilir potansiyeli 216 TWh/yıl civarındadır.

Teknik yapılabilirliği olan her tesis ekonomik yapılabilirliği olan tesis demek değildir. Teknik potansiyelin, mevcut ve beklenen yerel ekonomik şartlar içinde geliştirilebilecek bölümü ekonomik yapılabilir hidroelektrik potansiyel olarak adlandırılmakla beraber gelişen teknoloji ve artan enerji fiyatları teknik ve ekonomik potansiyelimizin teknik potansiyele yaklaşmasını sağlamıştır. Ülkemizin ekonomik hidroelektrik enerji potansiyeli 170 TWh/yıl’ dır. Buna göre Türkiye’ de ekonomik yapılabilir HES potansiyel, teknik yapılabilir HES potansiyelin %59’ u dolayındadır (Anonim 2012).

3.2 Hidroelektrik Potansiyel Gelişiminin Bugünkü Durumu

Elektrik enerjisi üretiminde; fosil ve nükleer yakıtlı termik ve doğalgazlı santraller yanında hidroelektrik santrallerin yenilenebilir ve puant çalışma gibi iki önemli özelliği mevcuttur. 31 Temmuz 2013 tarihi itibarıyla, Türkiye’ nin toplam elektrik kurulu gücü 60 281 MW’ a ulaşmıştır. Termik yakıtlı santrallerin payı % 61,1 (36 832 MW) ve yenilenebilir yakıtlı santrallerin payı % 38,9 (23 449 MW) dur (Anonim-a 2013).



Şekil 3.1. Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün yakıt cinsine göre dağılımı (Anonim-a 2013)

Türkiye’de hidroelektrik proje üretimiyle ilgili EİE ve DSİ gibi kuruluşların önemli görevlerinden biri olan ülkenin hidroelektrik potansiyelinin gelişimini temin edecek şekilde; tüm etüt ve proje hizmetlerinin ihtiyacı olan veri toplama faaliyetlerini yürüterek, havza master planlarını, baraj ve santrallerin ön inceleme, planlama ve proje çalışmalarını sürdürmektir. Çizelge 3.1’ de proje dağılımları görülmektedir (Anonim 2011).

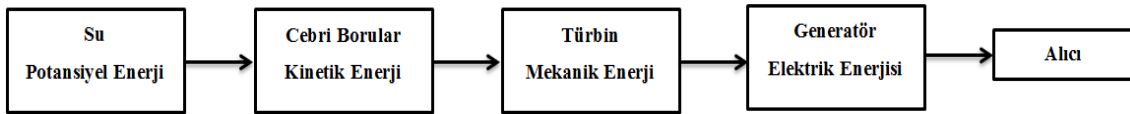
Çizelge 3.1. Türkiye hidroelektrik enerji potansiyelinin projelere göre dağılımı (Anonim 2011)

Faaliyet	Ortalama Yıllık Üretim (GWh/yıl)	Oran (%)	Kurulu Güç (MW)	HES Adedi
İşletmede	62 000	38	17 372	303
İnşaat Halinde	35 000	21	10 590	256
Planlama ve Proje	67 000	41	19 535	1 084

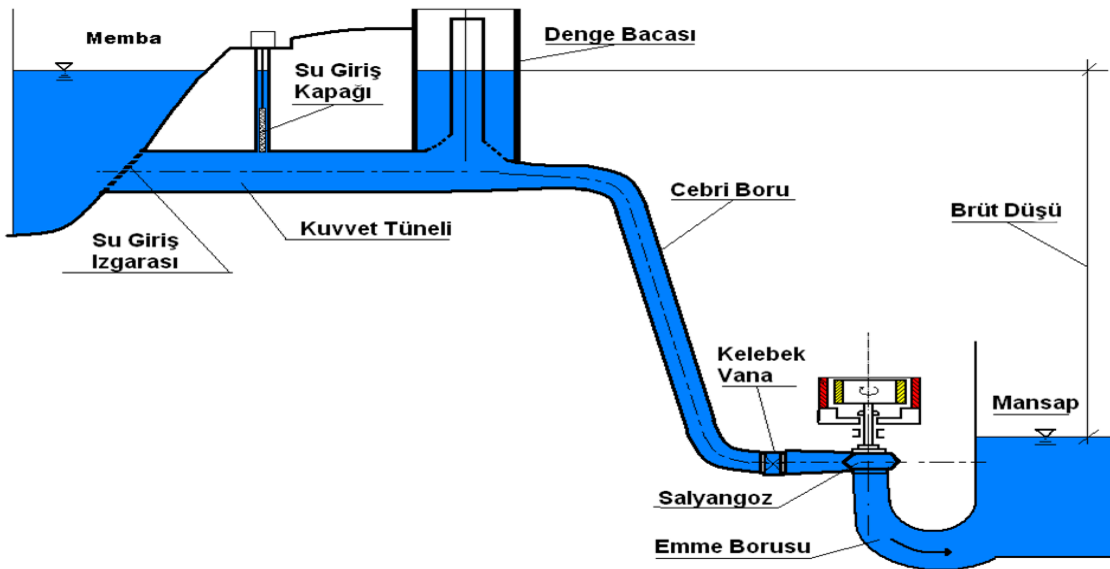
3.3 Hidroelektrik Santral

Su enerjisi, yüksek dağlardaki doğal göllerde ve önüne set çekilmiş barajlarda potansiyel enerji olarak, akarsularda, akıntılı deniz boğazlarında ve gel-git olayı bulunan denizlerde kinetik enerji olarak karşımıza çıkar. Santral tesislerine göre belirli bir yükseklikteki barajlarda ya da yükleme havuzlarında depolanmış durumda bulunan su, durgun vaziyette iken yükseklikle doğru orantılı olarak bir potansiyel enerjiye sahiptir.

Söz konusu su kütlelerinin kuvvet tüneli ve cebri borular vasıtasıyla türbin çarkına doğru hareket ettirilmesi sonucu hareket hızının büyüklüğü oranında bir kinetik enerjiye sahip olacaktır. Suyun kinetik enerjisi, hidrolik santralde bulunan türbini belirli bir devirde döndürerek türbin milinde mekanik enerjiye, mekanik enerji de generatör rotorunu döndürerek generatörün stator sargılarında elektrik enerjisine dönüşmektedir. Şekil 3.2’ de hidroelektrik santral enerji dönüşüm şeması ve Şekil 3.3’te de basit bir hidroelektrik santralin temel yapısı görülmektedir.



Şekil 3.2. Hidroelektrik santral enerji dönüşüm şeması



Şekil 3.3. Hidroelektrik santralin temel yapısı

Hidroelektrik santraller;

- (i) Yenilenebilir kaynak olan sudan enerji elde etmeleri,
- (ii) Sera gazı emisyonu yaratmamaları,
- (iii) İnşaatın yerli imkânlarla yapılabilmesi,
- (iv) Teknik ömrünün uzun olması ve yakıt giderlerinin olmaması,
- (v) İşletme bakım giderlerinin düşük olması,
- (vi) İstihdam imkânı yaratmaları,
- (vii) Kırsal kesimlerde ekonomik ve sosyal yapıyı canlandırmaları yönünden en önemli yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Hidroelektrik santraller özellikler bakımından aşağıdaki gibi sıralama yapılabilir (Anonim-b 2013):

a. Depolama yapılarına göre;

- Depolamalı (rezervuarlı) HES' ler.
- Nehir tipi HES' ler.

b. Düşülerine göre;

- Alçak düşülü HES' ler ($H < 10$ metre).
- Orta düşülü HES' ler ($H = 10 - 50$ metre arasında).
- Yüksek düşülü HES' ler ($H > 50$ metre).

c. Kurulu güçlerine göre;

- Çok küçük (mikro) kapasiteli HES' ler (< 99 kW).
- Küçük (mini) kapasiteli HES' ler (100 – 999 kW).
- Orta kapasiteli HES' ler (1000 – 9999 kW).
- Büyük kapasiteli HES' ler ($> 10\,000$ kW).

d. Ulusal elektrik sisteminin yükünü karşılama durumuna göre;

- Baz yük HES' ler.
- Puant (Pik) HES' ler.
- Hem baz hem de puant yük HES' ler.

- e. Baraj gövdesinin tipine göre;
- Ağırlıklı beton gövdeli barajlı HES' ler.
 - Beton kemer gövdeli barajlı HES' ler.
 - Kaya dolgu gövdeli barajlı HES' ler.
 - Toprak dolgulu gövdeli HES' ler.
- f. Santral binasının konumuna göre;
- Yer altı HES' ler.
 - Yarı gömülü veya batık HES' ler.
 - Yer üstü HES' ler.

Yukarıdaki tanımlanan sıralamaya göre Adıgüzel HES; depolamalı, yüksek düşülü, büyük kapasiteli, baz yük, kaya dolgu gövdeli ve yarı gömülü sınıfına girmektedir.

3.4 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali

Adıgüzel HES, Denizli iline bağlı Güney ilçesinin 16km doğusunda Büyük Menderes nehri üzerinde bulunmaktadır. Denizli ve Aydın illerindeki sulama alanlarına hizmet sunma yönünden en büyük ve en önemli tesistir. Baraj gölalanı, Denizli ve Uşak il sınırları içerisinde yer almaktadır. Bu tesis vasıtası ile 94 825 hektar (ha) tarım arazisine sulama suyu verilmekte ve 35 000 ha arazi taşkın sularından korunmaktadır. Ayrıca bu santralin 280 GWh/yıl enerji üretim kapasitesi bulunmaktadır. Adıgüzel baraj ve tesislerinin maliyeti 1989 yılı fiyatlarıyla 238 milyar TL olarak hesaplanmıştır.

Adıgüzel HES' nin montajını Çin Halk Cumhuriyeti firmalarından Çin Ulusal Makine ve Ekipman İthalat ve İhracat A.Ş. (CMEC)' nin yüklemi altındadır. Malzeme temini ve montajı bu firma tarafından yapılmıştır.

3.4.1 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Tesisleri

Bir hidroelektrik santral, binlerce parçadan meydana gelir. Ana bölümleri şunlardır;

- (i) Baraj gövdesi ve gölü,
- (ii) Su alma tesisleri,
- (iii) Suyolu tesisleri,
- (iv) Savak tesisleri,
- (v) Santral binası,
- (vi) Santral çıkış suyu kanalı,
- (vii) Şalt tesisleri olarak sınıflandırabiliriz.

3.4.1.1 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Baraj Gölü ve Gövdesi

Nehir suyunun depolanması ve su düşüşünün elde edilmesine hizmet eden tesislerdir. Adıgüzel baraj gölü ile ilgili bazı karakteristik bilgi ve değerler Çizelge 3.2’ de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Adıgüzel baraj gölü ile ilgili karakteristik bilgiler (Anonim 1989)

Karakteristik Bilgiler	Değerler
Amacı	Sulama, taşkın kontrolü ve enerji
Yağış alanı	9 006 km ²
Yıllık ortalama yağış	630 mm
Yıllık ortalama akım	820 hm ³
Ortalama debi	26 m ³ /s
Sulama için düzenlenen yıllık su	574 hm ³
Sulama regülasyon oranı	% 70
Maksimum su seviyesi	457,72 m
Maksimum işletme seviyesi	453,50 m
Minimum işletme seviyesi	403,25 m
Maksimum depolama hacmi	1094 hm ³
Maksimum aktif hacim	811 hm ³
Minimum aktif hacim	581 hm ³
Taşkın kontrol hacmi	230 hm ³
Minimum işletme seviyesindeki hacim	283 hm ³
Rezervuar alanı	25,90 km ²
Rezervuar uzunluğu	27 km

Genel anlamda baraj gövdesi, gerekli olan hidrolik düşünün, su miktarının depo edilmesine ve istenilen su debisinin alınmasını temin etmek, çamurlu ve kumlu olarak gelen suyun dinlenip temizlenmesini böylece türbinlere temiz su alınmasını sağlamak, fezeyan mevsimlerinde gelen suyun depolanmasını sağlamak olarak sıralayabiliriz. Baraj gövdesi statik ve dinamik su basıncı zorlamalarına emniyetle dayanabilecek, su sızdırmayacak şekilde inşa edilmelidir. Adıgüzel barajının kurulma amaçlarının en başında taşkın kontrolü ve sulama gelir. Bu amaçların gerçekleştirilmesi esnasında da elektrik üretimi düşünülmüştür. Resim 3.1’ de Adıgüzel baraj gölü ve gövdesi, çizelge 3.3’ te baraj gövdesi ile ilgili bazı karakteristik bilgiler verilmiştir.



Resim 3.1. Adıgüzel HES' e ait baraj gölü ve gövdesi

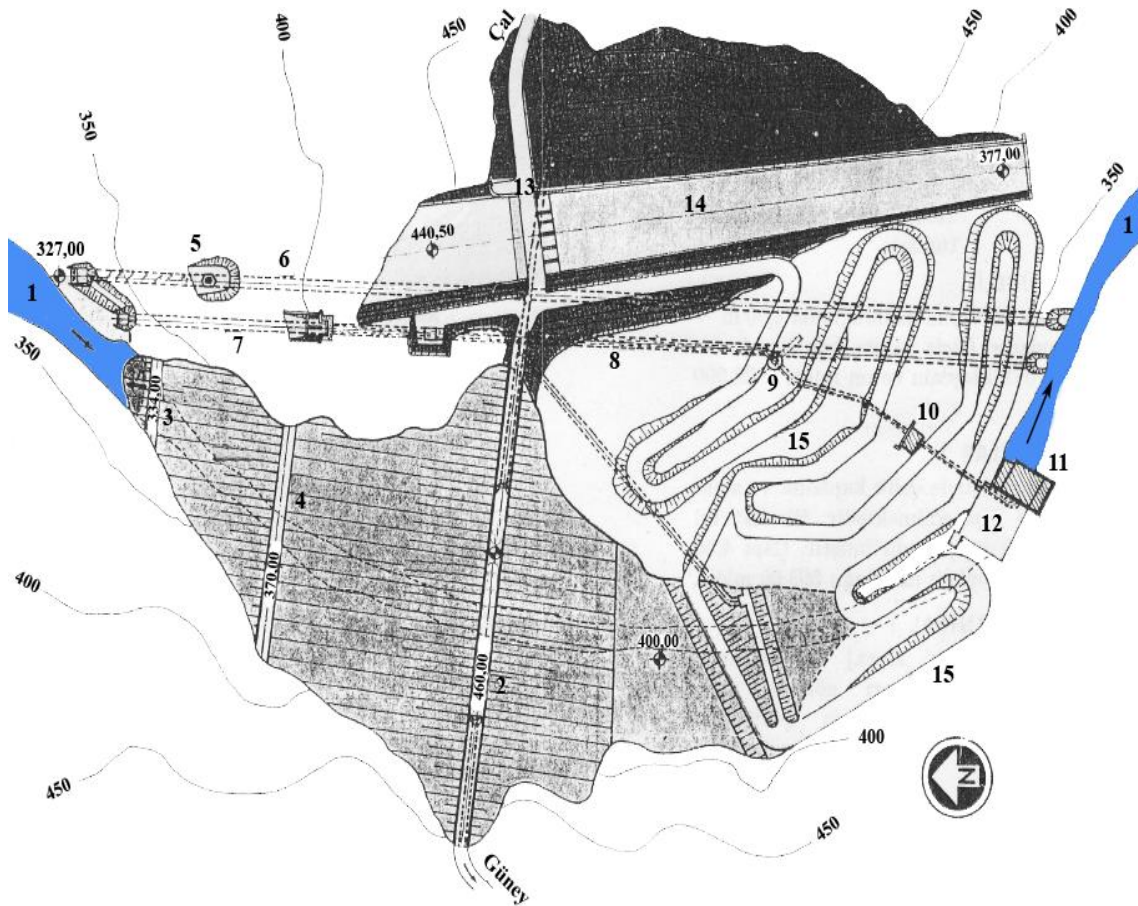
Çizelge 3.3. Adıgüzel baraj gövdesi ile ilgili karakteristik bilgiler (Anonim 1989)

Karakteristik Bilgiler	Değerler
Barajın tipi	Zonlu kaya dolgu
Talveg kotu	316,00 m
Kret kotu	460,00 m
Temelden yüksekliği	145,00 m
Kret uzunluğu	377,00 m
Kret genişliği	12,00 m
Gövde dolgu hacmi	7,125 hm ³

3.4.1.2 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Su Yolu ve Su Alma Tesisleri

Bir hidroelektrik santral tesisinde türbinlerin tahriki ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılan suyun kaynaktan alınarak türbinlere kadar sevk edildiği su alma yapısı, su iletim kanalı, çökeltme havuzları, su iletim tüneli (basınçsız tünel), denge bacası, yükleme havuzu, enerji tüneli (basınçlı tünel), cebri boru vs. gibi suyun geçtiği yollara “suyolları” ve bu su yolları üzerinde bulunan hidromekanik teçhizata ise “su yolları teçhizatı” adı verilir.

Baraj gölündeki suyun su iletim tesislerine alınmasına ve gerektiğinde suyun kapatılmasına hizmet eden yapılara su alma tesisleri denir. Hidroelektrik tesisin yapılış şekline göre değişik tip su giriş yapısı tesisleri inşa edilmektedir. Şekil 3.4’ te Adıgüzel HES su yolları ve su alma tesislerinin genel planı görülmektedir.



Şekil 3.4. Adıgüzel HES su yolu ve su alma tesisleri planı

Şekil 3.4' teki genel vaziyet planının numaralandırılan parçaların isimleri şunlardır:

(1) Büyük Menderes Nehri	(9) Denge bacası
(2) Baraj kreti	(10) Ø3,7m Vana odası
(3) Ön batardo	(11) Santral
(4) Ana batardo	(12) Şalt sahası
(5) Su alma ağzı	(13) Enjeksiyon galerisi
(6) T1 tüneli	(14) Dolu savak
(7) T2 tüneli	(15) Santral yolu
(8) Enerji tüneli (Cebri boru)	

Bu tesislerden ızgaralar; türbinlere zarar verebilecek yüzer katı maddelerin tünel veya cebri boruya girmesini ve türbinlere intikalini önlemektir. Bu nedenle su alma yapısı ızgaralarının aralıkları, türbinlerin rotor kanatları çıkış aralıklarından daha dar olmalıdır. Su giriş yapısı ızgara demirlerindeki aralıklar, küçük güçlü HES tesislerinde 4–5 cm' yi, büyük güçlü HES tesislerinde ise 10–12 cm' yi geçmemelidir. Adıgüzel HES' e ait ızgaralar resim 3.2' de görülmektedir.



Resim 3.2. Adıgüzel barajı ızgaraları

Su alma yapısındaki diğer tesislerden batardo ve servis kapakları, giriş kapakları membasında, dolusavak kapaklarının membasında, dipsavak yapılarının memba ve mansaplarında, türbin mansabında bulunan emme borusunun işletimi sırasında kullanılırlar. Bu kapakların görevleri arasında taşkın koruma, koruma ekipmanı (türbin membasındaki acil durumlarda), rezervuar su seviyesinin kontrolü ve sabit tutulması, bakım öncesi susuzlaştırma, su alma yapısı girişi, derivasyon konduvisi tıkaçı ve dipsavak deşarj kontrolü vb. sayılabilir. Makaralı ve kızaklı olmak üzere iki tip kapak kullanılmaktadır.

Derivasyon tüneli, baraj gövdesinin inşaatı sırasında bu bölgenin kuru tutulması amacıyla akarsu yatağının değiştirilmesi gereklidir. Suyu dağın içinde ileten çoğunlukla dairesel bazen de atnalı kesitinde yapılan tünellerdir. Adıgüzel HES' in derivasyon tünelleri sol sahilde 6 metre çapında 2 adet daire kesitli betonarme tünelden ibaret olup, toplam uzunluğu 1 735,34 metredir. Dip savak vanaları bu tünellere yerleştirilmiştir. Şekil 3.4' teki genel vaziyet planında Adıgüzel HES' e ait derivasyon ve dip savak tüneli görülmektedir.

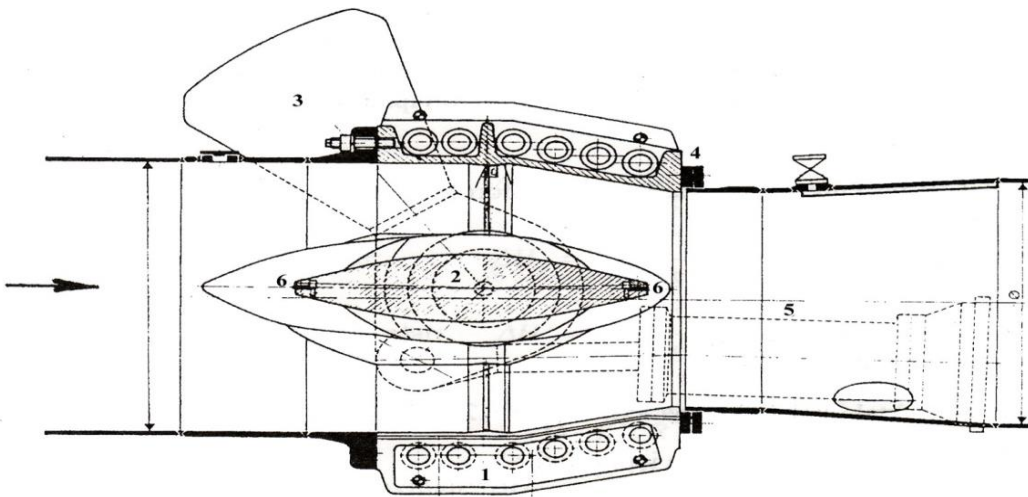
Üstü açık su iletim kanalları don olayı, heyelan, sel suları gibi doğa şartlarından ve ağaç yaprakları veya parçaları gibi dış etkenlerden kolayca etkilendikleri ve büyük su basınçlarına dayanamadıkları için suyun iletilmesinde kanalların yerine tüneller kullanılır. Ancak su iletim tünellerinin tesis edilmesi çok pahalı olduğu için sadece gereken yerlerde ve gereken çap uzunluklarda inşa edilirler. Adıgüzel HES' in enerji tüneli, sol sahilde 550 metre uzunluğunda 4,5 m – 3,9 m çapındadır. Giriş yapısı, kapak şaftı ve denge bacası dâhil toplam beton miktarı 22 000 m³ tür.

Cebri borular, HES tesisinin cinsine ve topoğrafya durumuna göre baraj gölü ile türbinler arasındaki basınçlı borulara, yükleme odası ile türbinler arasındaki basınçlı borulara veya denge bacası ile türbinler arasındaki basınçlı borulara denir. Bu borular veya boru branşmanları çelik sac levhaların kıvrılıp kaynakla birbirlerine birleştirmeleri ile imal edilirler. Adıgüzel HES' in cebri boruları, enerji tüneli içinde çelik kaplama ve açıkta olmak üzere inşa edilmiştir. Bir hat iki branşman olarak projelendirilmiştir. Çapı 3,7 m – 2,4 m, toplam uzunluğu 503 metredir.



Resim 3.3. Cebri boru üzerindeki kelebek vana

Resim 3.3’ te Adıgüzel HES’ ten kesiti görülen basınçlı suyolları kapama organlarından olan kelebek vanalar kullanılmıştır. Toplam 3 adet olmak üzere biri cebri boru üzerinde 3,7 m çapında ve diğer ikisi cebri boru branşmanları üzerinde 2,4 m çapındadır. Kelebek vana şeması şekil 3.5’ te görülmektedir.



Şekil 3.5. Cebri boru üzerindeki kelebek vananın şematik gösterimi

Şekil 3.5’ teki kelebek vananın numaralandırılan parçaların isimleri şunlardır:

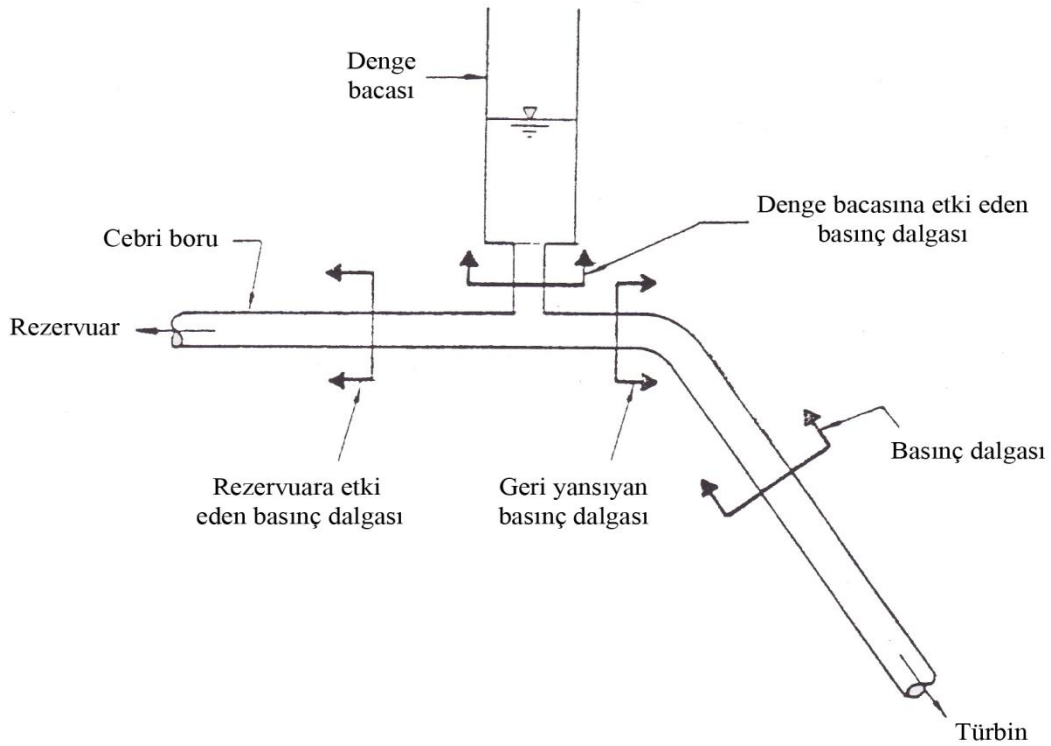
- (1) Vana gövdesi,
- (2) Vana merceği,
- (3) Kapama ağırlığı,
- (4) Bağlantı flanşı,
- (5) Kelebek vanayı açma servomotoru,
- (6) Sızdırmazlık önlemleri.

Denge bacası, HES tesislerine ait basınçlı su iletim tüneli (enerji tüneli) ve cebri borularında meydana gelecek ani geçici basınç yükselmeleri (pozitif su koçu) darbelerini veya ani geçici basınç düşmesi (negatif su koçu) darbelerini sönmüleyerek cebri borunun veya basınçlı tünelin hasar görmesini önleyen ve cebri boru ile tünelin çap, et kalınlığı ve beton kalınlığı yönlerinden en ekonomik bir şekilde yapılmalarını sağlayan haznelerdir.

Bir HES’ te türbin-generatör ünitesi üzerindeki yük, herhangi bir nedenle ani olarak atılacak olursa yani türbin ayar kanatları ani olarak kapanacak olursa cebri boru ve basınçlı tünel içinde hareket halindeki su kütesinin hızı ani olarak sıfır olur. Bu yüzden cebri borunun özellikle alt ucunda ani olarak büyük bir basınç artışı meydana gelir. Bu basınç artışı cebri boru ve tünel içinde hızla membaya yani baraj gölüne doğru yayılarak baraj gölü su yüzü ile cebri boru alt ucu arasında yayılma hızı ve basıncı azalan dalgalar halinde yansıyarak devam eder. Denge bacası bu basınç dalgalarının büyük bir kısmını kendi serbest su yüzeyinde sönmüleyerek membaya intikalini önler ve bu sayede tüneldaki aşırı basınç darbeleri önlenmiş ve tünel korunmuş olur.

Aynı şekilde türbin-generatör ünitesi ani olarak tam yük alınacak yani türbin ayar kanatları ani olarak %100 açıklığa kadar açılacak olursa cebri boru içinden ani olarak büyük bir su kütlesi çekilmiş olacağı için cebri boru içindeki su kütesinin hızı ani olarak artar ve cebri boru iç basıncı ani olarak düşerek negatif su koçu darbesi olayı meydana gelir. Bu durumda tünelden cebri boruya ani olarak yeterli miktarda su kütlesi intikal edemeyeceği için denge bacası içinde depolanmış su ile boruya ani olarak gerekli

miktarda su sağlanmış olur ve cebri borunun hasar görmesi önlenir. Denge bacasının diğer önemli görevi de, türbin-generatör ünitesinin üzerindeki yük salınımlarının önlenmesine yani regülasyon olayına katkıda bulunmak ve kapalı basınçlı su yolunun boyunu kısaltarak cebri boruda oluşacak basınç dalgalanmalarının mertebesini azaltmaktır (Başesme 2003). Denge bacasının açıklanan görevlerini temsil eden prensip şemaları şekil 3.6’ da görülmektedir.



Şekil 3.6. Denge bacasının prensip şeması (Başesme 2003)

3.4.1.3 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Savak Tesisleri

Baraj gölünde, suyun belli bir seviyeden fazla yükselmesini önlemek amacıyla kullanılır. Savaklar baraj gölünde kullanıldıkları yere göre, dolu savak ve dip savak olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır.

Baraj gölünün suyunu gerektiğinde nehir yatağı mansabına bırakmaya yarayan tesislere dip savak tesisleri denir. Adıgüzel HES’ te dip savak, tünel içinde 1,78 m x 1,78 m sürgülü vana ve 2 m konik vana olarak tertip edilmiştir. Kapasitesi 121,25 m³/s (453,50 kotunda)’ dir.

Aşırı yağışlı yıllarda baraj gölü maksimum su seviyesine kadar dolduğunda, baraj gövdesinin zarar görmemesi için fazla gelen suların nehir yatağının mansabına atılmasına yarayan tesislere dolu savak tesisleri denir. Adıgüzel HES’ te dolu savak, sol sahilde, önden alışı radyal kapaklı olarak tertip edilmiştir. Dolu savak tesisine ait veriler çizelge 3.4’ te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Adıgüzel HES dolu savak tesisine ait veriler (Anonim 1989)

Karakteristik Bilgiler	Değerler
Kapak adedi	6
Genişlik	7,00 m
Yükseklik	9,30 m
Toplam beton hacmi	55 000 m ³
Dolu savak kret kotu	444,00 m
Katastrofal taşkın debisi	5 600 m ³ /s
Katastrofal taşkın anındaki toplam hacim	1188 hm ³
Dolu savak proje debisi	4 260 m ³ /s
Enerji kırıcı tesis tipi	Sıçratmalı

Adıgüzel HES’ e ait radyal kapaklı dolu savak tesisleri resim 3.4’ te görülmektedir.



Resim 3.4. Adıgüzel HES' e ait dolu savak tesisleri

3.4.1.4 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Santral Bina Tesisi

Santral binası, içine türbinler ve yardımcıları ile generatörler ve yardımcıları gibi elektromekanik teçhizatın ve koruma, kontrol-kumanda gibi elektriki teçhizatın ve diğer yardımcı teçhizatın yerleştirilmesine yarayan özel bir binadır.

Adıgüzel HES' e ait santral binası, baraj mansabında yarı gömülü tipte 28,5 m genişliğinde, 49,6 m uzunluğunda ve 40,9 m yüksekliğindedir. Santral tesisi için kullanılan toplam beton hacmi 31 000 m³' tür. Resim 3.5' te Adıgüzel HES' e ait santral binası ve şalt tesisi görülmektedir.



Resim 3.5. Adıgüzel HES santral binası ve şalt tesisi

Transformatörler, devre kesicileri, ayırıcılar ve parafudr vs. gibi elektriki teçhizatın monte edildiği mahallere şalt tesisi denir. Adıgüzel HES' e ait şalt tesisi 100 m uzunluğunda ve 50 m genişliğindedir. 154 kV' luk hat ile biri Denizli şalt sahasına diğeri Çivril şalt sahasına olmak üzere enterkonnekte sisteme bağlanmaktadır. 31,5 kV' luk kapalı şalt ise yerel yerleşimleri beslemektedir.

Büyük Menderes Nehri üzerinde Adıgüzel HES yakınlarında, bir tanesi yapım aşamasında olan toplam 4 adet HES kurulmuştur. Bu santrallerin enterkonnekte sisteme bağlantısı Adıgüzel HES’ teki şalt sahası üzerinden yapılacaktır. Bu nedenle Adıgüzel HES’ in mevcut şalt sahası ve şalt tesisi büyüyecek, Denizli bölgesinin büyük trafo merkezleri arasına girecek kapasiteye ulaşacaktır.

3.4.2 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali Türbini

Hidrolik türbinler, suyun hidrolik akım enerjisini devamlı olarak döner çarklar yardımı ile mekanik enerjiye çeviren döner hidrolik makinalardır. İşletme tarzlarına, yapılış şekillerine, hidrolik düşüye ve su akımının rotordaki yönüne göre hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür. Ancak, genellikle hidrolik türbinleri “üst basınç türbinleri” ve “serbest püskürtmeli türbinler” olmak üzere iki ana gruba ayırmak mümkündür (Başesme 2003).

Hidrolik türbinlerin en uygun işletme sahalarındaki yüklerde çalıştırılmaları halinde türbin genel verimi (H) ile hidrolik verim (η_v), debisel verim (η_h) ve rotor iç verimi (η_i) ile mekanik verim (η_m) değerleri, çizelge 3.5’ te verilen değerler kadar olmaktadır.

Çizelge 3.5. Çeşitli tiplerdeki hidrolik türbinlerin değişik verimlerin değerleri (Başesme 2003)

Hidrolik Türbinin Cinsi ve Büyüklüğü	H	η_v	η_h	η_i	η_m
Küçük güçlü üst basınç türbinleri	0,80	0,95	0,88	0,99	0,97
Orta güçlü üst basınç türbinleri	0,85	0,97	0,92	0,99	0,98
Büyük güçlü üst basınç türbinleri	0,92	0,99	0,95	0,98	0,99
Küçük güçlü Pelton tipi türbinler	0,80	-	0,85	0,97	0,97
Orta güçlü Pelton tipi türbinler	0,85	-	0,88	0,98	0,98
Büyük güçlü Pelton tipi türbinler	0,88	-	0,91	0,98	0,99

Üst basınç türbinlerinden olan Francis tipi hidrolik türbinler, 2 – 600 metrelik hidrolik düşüler ve 2 – 800 000 kW güçler arasında imal edilmektedir (Başesme 2003). Adıgüzel HES’ te üst basınç türbinleri grubuna giren “düşey eksenli Francis” tipi hidrolik türbin kullanılmıştır. Bu türbine ait teknik veriler çizelge 3.6’ da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Adıgüzel HES türbin teknik verileri (Anonim 1983)

Teknik Veriler		Değerler
Tipi		Dikey şaft Francis
Adedi		2 ünite
	Maksimum	132,80 m
Etkin düşü	Nominal	116,00 m
	Minimum	84,30 m
Nominal düşüdeki çıkış gücü		31 375 kW
Nominal düşüdeki debi		30 m ³ /s
Devir		300 rpm
Hız eğimi		0,05
Suyun hareket süresi (T_w)	Maksimum düşüde	1,4047 s
	Nominal düşüde	1,569 s
Servo kazancı (K_a)		3,3
Servo zaman sabiti (T_a)		0,07 s

Adıgüzel HES' e ait Francis türbinin verimi, nominal yük ve nominal düşüde %92 civarındadır. Çizelge 3.6' daki veriler kullanılarak türbinin nominal verimini, eşitlik (3.1) ve (3.2)' den de mekanik güç veya elektriksel güç cinsinden bulunabilir.

$$N = (\gamma \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t) / 75 \quad [HP] \quad (3.1)$$

$$N = (\gamma \cdot Q \cdot H_d \cdot \eta_t) / 102 \quad [kW] \quad (3.2)$$

burada

N , türbin gücü (HP veya kW)

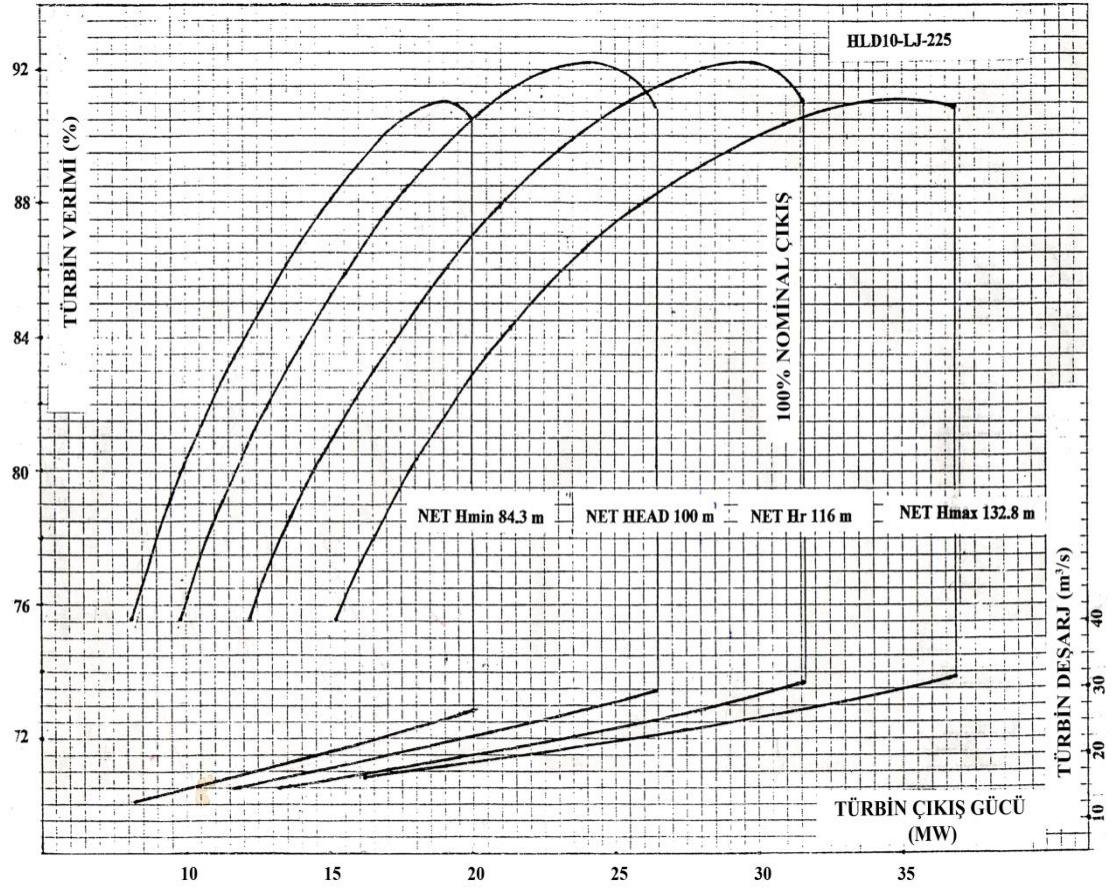
γ , suyun özgül ağırlığı (1000 kg/m³)

Q , türbin debisi (m³/s)

H_d , türbin dizayn net düşüsü (m)

η_t , türbin verimi (%)

Şekil 3.7' de Adıgüzel HES' e ait düşey eksenli Francis tipi hidrolik türbinin verim-güç-düşü-debi ilişkileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde debi ve düşü verilerinin bilinmesi ile türbin çıkış gücü ve verimi bulunabilmektedir. Şekil 3.8' de dikey şaft Francis türbin görülmektedir.



Şekil 3.7. Francis tipi hidrolik türbinin verim-güç-düşü-debi ilişkileri



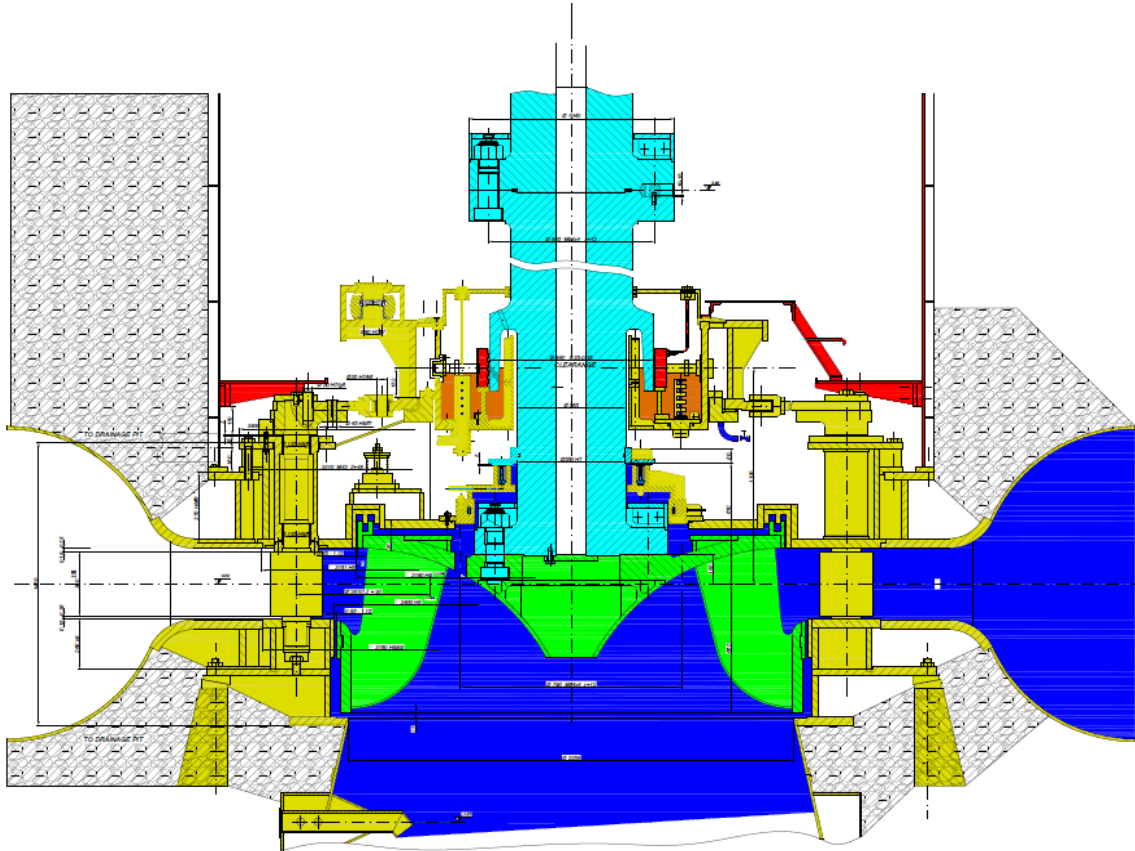
Şekil 3.8. Dikey şaft Francis türbin

3.4.2.1 Francis Tipi Hidrolik Türbinin Ana Parçaları ve Görevleri

Francis tipi hidrolik türbini teşkil eden ana organları şöyle sıralayabiliriz.

- (i) Türbin rotoru
- (ii) Türbin ayar kanadı
- (iii) Türbin ayar kanadı ayarlama çemberi
- (iv) Ayar kanatları açma kapama servomotorları
- (v) Salyangoz
- (vi) Türbin çarkı
- (vii) Türbin şaftı
- (viii) Türbin emme borusu

Francis tipi türbin rotorlarının alt ve üst gövdeleri ayrı ayrı ve kanatları da ayrı ayrı olmak üzere çelik dökümden döküldükten sonra kaynak konstrüksiyon ile birleştirilerek tek bir parça haline getirilmektedir. Şekil 3.9’ da Francis türbinin kesiti görülmektedir.



Şekil 3.9. Adıgüzel HES’ e ait dikey şaft Francis türbinin kesiti

Diagram illustrating the components of a circular gate mechanism, labeled in Turkish:

- Türbin çukuru**: Turbine pit
- Servomotor kilidi**: Servomotor lock
- Ayar kanat bağlantı mili**: Adjustment wing connection shaft
- Elastik hortum**: Elastic hose
- Pnömatik emniyet pimi**: Pneumatic safety pin
- Servomotor**: Servomotor
- Kapama**: Closing

Türbin ayar kanatları ayar çemberi, türbin için gerekli olan giriş momentini meydana getirmek, her işletme durumu için gerekli olan su debisini ayarlamak ve bir kapama organı rolü oynamaktır.

Francis ve kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılan salyangozların görevi, tahrik suyunun türbin rotorunun çevresine eşit basınç ve eşit hızlarda 360° dağıtmak ve tahrik suyunu ayar kanatlarının aralıklarına yönlendirmektir. Türbin salyangozunda eşit basınç ve hızlarla yönlendirilen su, ayar kanatlarının aralıklarında türbin rotorunun kanatlarının aralıklarına intikal eder. Resim 3.6’ da salyangoz montajından bir kesit görülmektedir.



Resim 3.6. HES salyangoz montajı

Türbin emme borusu, çarktan iş görerek çıkan suyun 90° yön değiştirerek nehir yatağına çıktığı çelik sac ve betonarme bir yapıya sahip olan türbin teçhizatının bir parçasıdır. Emme borusundaki suyun hızının 1 m/s değerini, basıncının da 0,5 kg/cm²’yi geçmemesi gerekir.

Türbin shaftı, su kuvvetinin türbin rotorunda meydana getirdiği döndürme momentini, generatör rotoruna nakletme görevini yapmaktadır. Resim 3.7’ de Adıgüzel HES’ e ait türbin shaftı ve türbin çukuru görülmektedir.

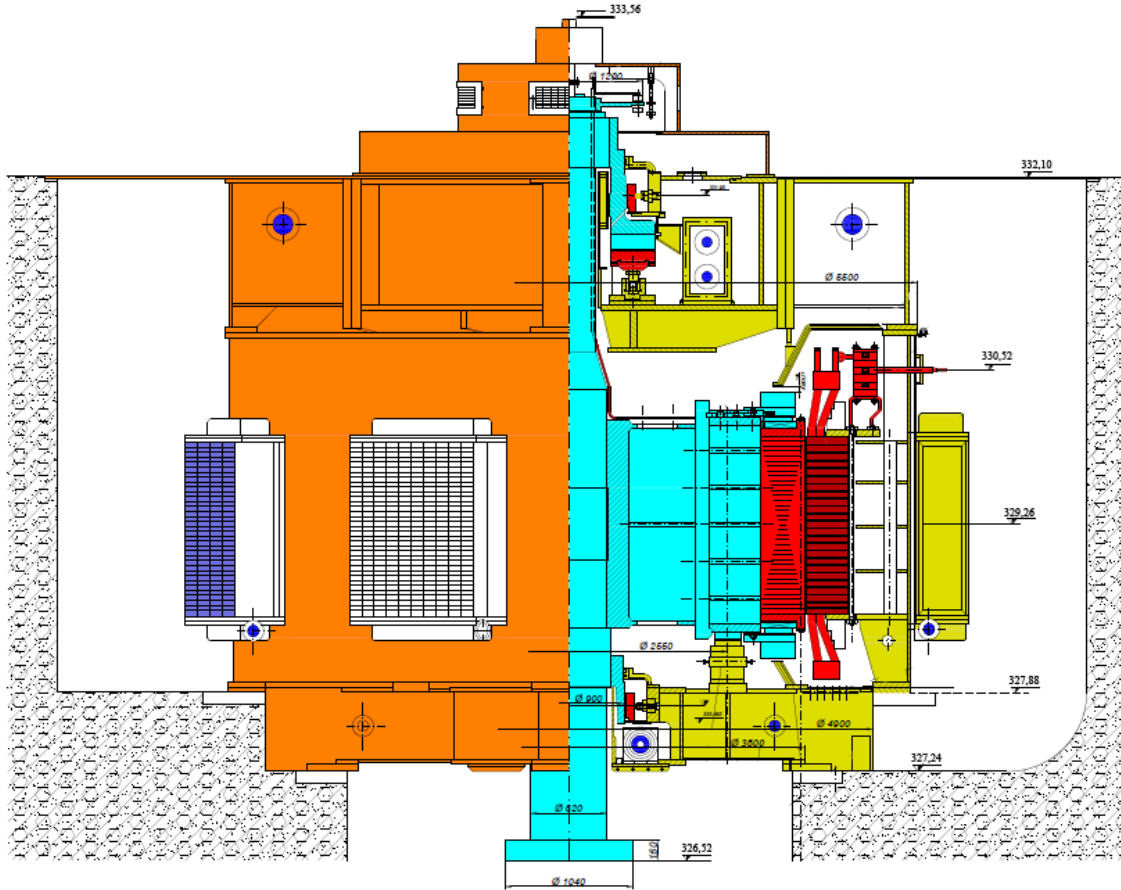


Resim 3.7. Adıgüzel HES' e ait türbin şaftı ve türbin çukuru

3.4.3 Senkron Generatör ve Bileşenleri

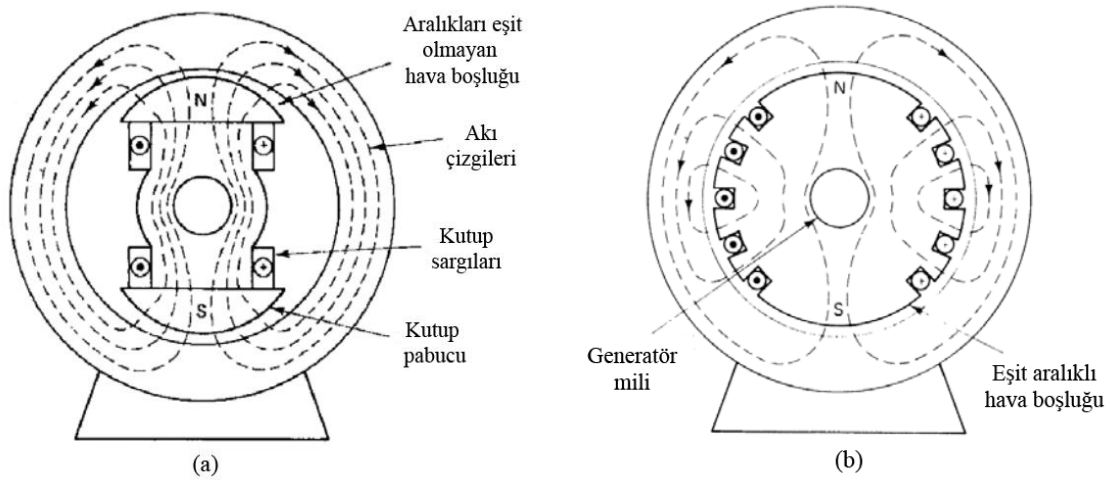
Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren elektrik makinelerine generatör denilmektedir. Elektrik enerjisi üretimi için en yaygın kullanılan elektrik makinasıdır. Bu nedenle, birkaç MVA' dan binlerle ifade edilen MVA' ya kadar çok farklı boyutlarda üretilirler.

Tüm generatörler stator ve rotor adı verilen iki ana manyetik parçadan oluşurlar. Her ikisi de silisli çelik sac paketlerinden üretilmişlerdir. Stator gövdesi ve iç oluklar ince tabakalar halindeki ferromanyetik metallerin birleştirilmesinden meydana gelmiştir. Sisteme güç veren ve yük akımını taşıyan armatür sargısı, stator iç yüzeyinde eşit aralıklarla açılmış oluklara yerleştirilmiş üç özdeş faz sargısından oluşur. Bu sargılar faz eksenleri arasında $2\pi/3$ radyan elektriksel açı olacak şekilde kutupların üzerine eşit olarak dağıtılmış ve rotor milinin hareketine karşı yalıtılmıştır (Caner 2006).



Şekil 3.11. Adıgüzel HES' e ait çıkık kutuplu senkron generatör kesiti

Yapısal olarak iki farklı generatör tipi bulunmaktadır. Bunlar, yuvarlak kutuplu ve çıkık kutuplu yapılardır. Yuvarlak kutuplu generatörler, buhar veya gaz türbinlerinde yatay konumda kullanılmaktadır. Turbo generatör olarak adlandırılan bu generatörlerin boyları uzun ve çapları küçük olup, mili yere paralel olarak kullanılır. Bunlar yüksek hızda döndürölüp genellikle 2 veya 4 kutuplu yapırlar. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı Şekil 3.12 (b)' de görüldüğü gibi sabittir. Çıkık kutuplu generatörler ise çok kutuplu olup, boyları kısa ancak çapları büyüktür ve mili yere dik olarak imal edilirler. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı Şekil 3.12 (a)' da görüldüğü gibi çıkık kutuptan dolayı değişkendir (Çolak 2010). Adıgüzel HES' te kullanılan tip çıkık kutuplu senkron generatördür.



Şekil 3.12. İki kutuplu senkron generatör (a) Çıkık kutuplu (b) Yuvarlak rotorlu (Caner 2006)

Rotor, kısa devre edilmiş damper veya sönüm adı verilen sargıları da içerir. Kutup ayaklarında açılan oluklara ve daire kesitli deliklere yerleştirilen bu sargılar, tek parça ve kalın bakır iletkenlerden yapılmıştır. Kutup ayaklarının başlangıç ve bittiği yerlerde bütün iletkenler, kesiti daha kalın birer iletkenle kısa devre edilirler ve bir kısa devre kafesi meydana getirirler. Senkron generatörde sönüm sargılarının görevi, moment salınımlarının (mekanik osilasyonlar) ve dengesiz yüklenmede negatif bileşeninin söndürülmesinde kullanılır (Mergen 2010).

DC akımla beslenen rotor uyartım sargısı, uyartım akımı büyüklüğü ile orantılı olarak bir dönen manyetik akı üretir. Bu dönen manyetik akı üç fazlı stator armatür sargısının her bir fazı üzerinde bir elektromotor (emk) kuvvet indükler. Bu endüklenen emk ise güç sistemine AC akım akışı sağlar. Üç fazlı senkron makineler enerji üretiminde yaygın olarak kullanılırlar. Birkaç makine birlikte çalışırken senkron hızda yani sabit hızda çalışırlar. Yani rotor bir mekanik güç kaynağına bağlıdır ve analizleri basitleştirme açısından sabit hızla döndürüldüğü düşünülür (Caner 2006).

Bu çalışmada simülasyonu gerçekleştirilen çıkık kutuplu senkron generatörün teknik verileri çizelge 3.7' de, Adıgüzel HES' e ait senkron generatörlerin görünümü resim 3.8' de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Çıkık kutuplu senkron generatörün parametreleri (Anonim 1983)

Teknik Veriler		Değerler
Tipi		3-faz, dikey şaft
Rotor tipi		Çıkık kutuplu
Nominal güç		36 MVA
Güç faktörü		0,85
Frekans		50 Hz
Nominal çıkış gerilimi		13,8 kV
Nominal çıkış akımı		1506 A
Nominal hız		300 rpm
Ambalman hız		630 rpm
Stator sargı direnci		0,0141 Ω
Rotor sargı direnci		0,0857 Ω
Rotor kutup çifti		10
Stator sargı bağlantısı		Yıldız
Nominal yük ve gerilimdeki reaktanslar (p.u)	X_d	0,992
	X_d'	0,295
	X_d''	0,183
	X_q	0,687
	X_q''	0,186
	X_l	0,184
Zaman sabitleri	T_{do}'	7,133 s
	T_d'	2,123 s
	T_a	0,177 s

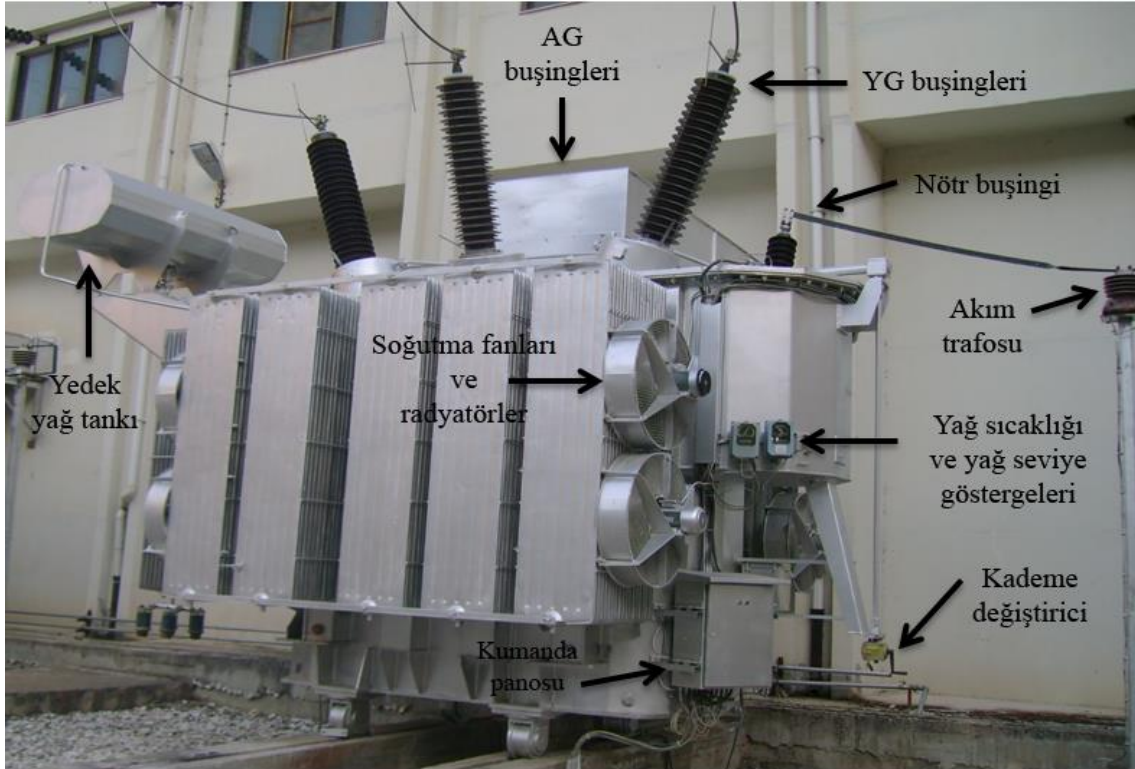


Resim 3.8. Adıgüzel HES' e ait senkron generatörler

3.4.4 Güç Transformatörü

Transformatörler ince saclardan yapılmış ve demir gövde adı verilen kapalı bir manyetik devre ile yalıtılmış iletkenlerden sarılıp demir gövde üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelmiştir. Temel olarak nüve, sargılar, izolasyon malzemeleri ve bunları kaplayan bir tanktan oluşur. Yağlı tip transformatörlerde kazana ısınan bobinleri soğutmaya yarayan yalıtkan bir yağ konulur. Soğutma yağı, pompa yardımıyla radyatörlerde dolaştırılarak soğutulur.

Transformatörlerin nüveleri, silisyum alaşımlı özel saclardan yapılır. Silisyum sac levhaların eklenmesi, silisyumun özgül direncinin yüksek olmasından dolayı oluşan girdap akımını azaltmış olur. Bunun yanı sıra, manyetik geçirgenliği artırır. Çekirdek; soğuk haddelenmiş, kristalleri yönlendirilmiş, yüksek manyetik geçirgenliğe sahip, yüzeyleri pürüzsüz silisli sacdan imal edilir. Levhalar basınç altında veya sıcak yağ içerisinde bozulmayacak izolasyona sahiptir. Çekirdek tipi, menteşeli tip ve dağıtılmış tip olmak üzere çeşitleri vardır.



Resim 3.9. Adıgüzel HES' e ait güç transformatörü ve parçaları

3.4.4.1 Güç Transformatörünün Endüktansının Bulunması

Adıgüzel HES' te kullanılmakta olan 36MVA güç transformatörünün teknik katoloğunda sargı dirençlerinin olmasına rağmen sargıların endüktanslarına yer verilmemiştir. Simülasyon çalışmalarının yapılabilmesi için güç transformatörünün endüktansının bilinmesi gerekir. Transformatörün endüktanslarının bulunabilmesi için, aktif ve reaktif gerilim düşümü yüzdeleri verilen kısa devre gerilimi yüzdesi kullanılarak eşitlik 3.3 ve 3.4' de hesaplanmıştır.

$$\%U_r = \frac{P_{cu}}{P_n} * 100 \quad (3.3)$$

$$\%U_x = \sqrt{U_k^2 - U_r^2} \quad (3.4)$$

burada

$\%U_r$, Bağlı aktif gerilim düşümü

$\%U_x$, Bağlı reaktif gerilim düşümü

$\%U_k$, Bağlı kısa devre gerilimi

P_{cu} , Nominal akımdaki bakır kayıpları (W)

P_n , Güç transformatörünün nominal gücü (W)

Aktif ve reaktif gerilim düşümü yüzdeleri bulunduktan sonra transformatörün endüktif reaktansını (X_T) eşitlik 3.5 ile hesaplayabiliriz.

$$X_T = \frac{U_x}{100} * \frac{U_n^2}{P_n} \quad (3.5)$$

Son olarak transformatör sargılarının endüktansını (L) eşitlik 3.6 ile elde ederiz.

$$L = \frac{X_T}{2\pi f} \quad (3.6)$$

Güç transformatörünün sargı dirençleri 16°C test sıcaklığında ölçümü yapılmıştır. Standartlar çerçevesinde simülasyonu yapılacak transformatörün sargı dirençleri oda sıcaklığında yani 20 °C’ de olması gerekmektedir. Buna göre bu değerler eşitlik 3.7’ de hesaplanmıştır.

$$R_{20} = \frac{R_{16}}{\frac{234,5 + t_1}{234,5 + t_2}} \quad (3.7)$$

burada

R_{20} , 20 °C’ deki sargı direnci

R_{16} , 16 °C’ deki sargı direnci

t_1 , test anındaki ortam sıcaklığı

t_2 , oda sıcaklığı

Bu çalışmada simülasyonu gerçekleştirilen güç transformatörünün teknik verileri çizelge 3.8’ de verilmiştir.

Çizelge 3.8. 36MVA güç transformatörün teknik verileri (Anonim 1983)

Teknik Veriler		Değerler
Nominal güç		36 MVA
Nominal frekans		50 Hz
Bağlantı tipi		YNd11
Primer sargı parametreleri (ABC terminali)	Nominal giriş gerilimi (V_{rms})	13,8 kV
	Nominal giriş akımı (I_{rms})	1506 A
	Sargı direnci	0,0178 Ω
	Sargı endüktansı	0,00174 H
Sekonder sargı parametreleri (abc terminali)	Nominal çıkış gerilimi (V_{rms})	154 kV
	Nominal çıkış akımı (I_{rms})	135 A
	Sargı direnci	1,5056 Ω
	Sargı endüktansı	0,2172 H

3.5 Güç Sisteminin Kontrolü

Daha önceki başlıklarda da ifade edildiği gibi bir güç sistemi, ana hedefe ulaşmak için birlikte çalışan birçok doğrusal olmayan unsurların topluluğu olarak ifade edilebilir. Uygun şekilde tasarlanmış ve işletilen güç sistemi aşağıdaki temel gereksinimleri karşılamalıdır.

- (i) Sistem sürekli aktif ve reaktif güç talebini karşılayabilmelidir. Elektrik enerjisi diğer enerji tipleri gibi kolayca depolanamadığı için aktif ve reaktif güç için güvenilir çalışma şartı sağlanmalı ve sürekli kontrol edilmelidir.
- (ii) Sistem enerjiyi en az maliyet ve en az ekolojik zararla sağlamalıdır.
- (iii) Enerji üretim sisteminin kalitesini belirleyen frekans, gerilim ve güvenilirlik seviyesi değerleri standartlara uygun olmalıdır.

Bu gereksinimlerin karşılanabilmesi için güç sistemin elemanları üzerinde kontroller mevcuttur. Üretim sistemi, tahrik sistemi ve uyarım sistemi kontrollerini içerir. Tahrik sistemi kontrolleri, hız regülasyonu ve enerji sağlayan sistem değişkenleri ile ilgilidir. Uyarım kontrolü ise generatör çıkış gerilimi ve reaktif güç çıkışının regülasyonunu sağlar (Kundur 1994).

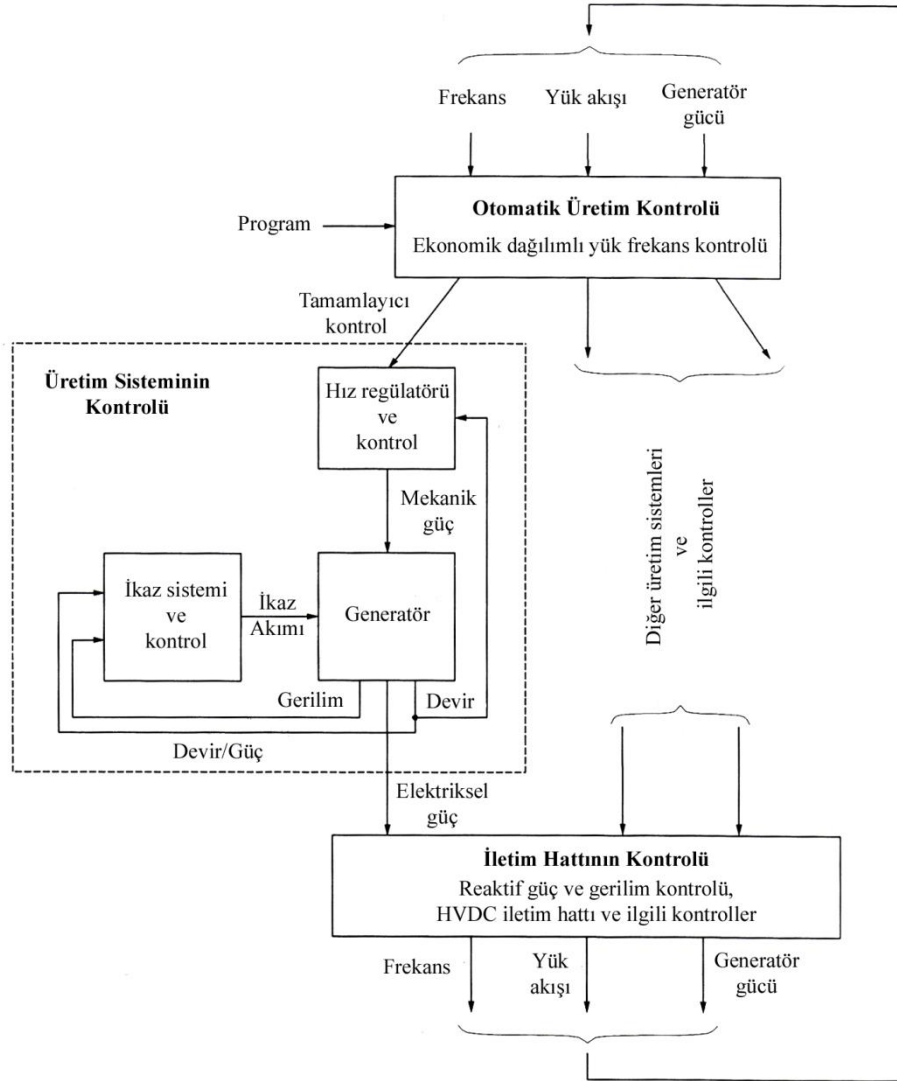
Yukarıda açıklanan yaklaşım genel olarak güç sistemi kontrol yapısını belirler. Güç sistemi kontrol probleminde pratik ve etkin çözümler elde etmek için şekil 3.13' te görüldüğü gibi daha küçük alt gruplara ayrılır.

Senkron generatörlerin yapısından kaynaklanan hız-frekans ve uyarım akımı-gerilim ilişkilerinden yola çıkılarak iki adet kontrol çevrimi geliştirilmiştir.

- (i) Frekans kontrolü
- (ii) Uyarım kontrolü

Aktif güçteki değişimler temel olarak sistem frekansını etkilemektedir. Reaktif güç, frekanstaki değişikliklere daha az duyarlıdır ve temel olarak gerilim değerinin büyüklüğüne bağlıdır. Böylelikle, aktif ve reaktif güçler teker teker kontrol

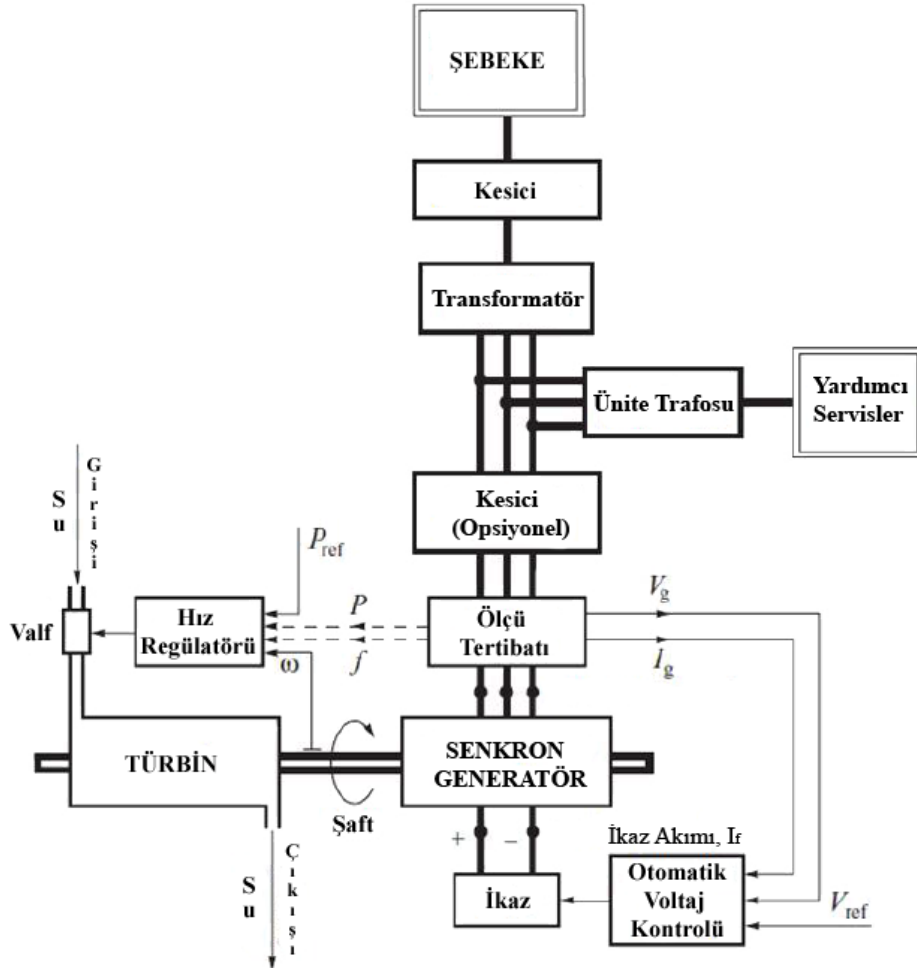
edilmektedir. Yük frekans kontrol (LFC) döngüsü, frekansı ve aktif gücü kontrol etmektedir. Otomatik gerilim regülatör (AVR) döngüsü ise reaktif gücü ve gerilimin genliğini sınırlamaktadır. LFC, enterkonnekte sistemlerin gelişmesi ile önem kazanmış ve enterkonnekte sistemlerin daha kararlı olmasını sağlamıştır.



Şekil 3.13. Güç sistemi kontrolünün yapısı (Kundur 1994)

Enterkonnekte güç sistemlerinde, LFC ve AVR ekipmanları her generatör için kurulmaktadır. Şekil 3.14' te AVR ve LFC döngüsünün şematik diyagramı görülmektedir. Yük talebindeki küçük değişiklikleri dikkate alarak frekans ve gerilimin genliği, belirlenen limitler dâhilinde korunmak için kontrolörler ayarlanmaktadır. Aktif güç içerisindeki küçük değişiklikler, temel olarak rotor açısı ve frekansa bağlıdır.

Reaktif güçte ise temel olarak gerilimin genliğine bağlıdır. Uyarım sisteminin zaman sabiti, ilk hareket ettirici zaman sabitinden çok daha küçük ve geçici bozuculuğu daha hızlıdır (Saadat 1999).

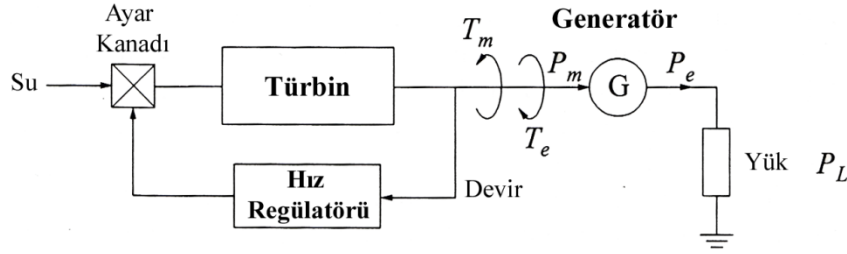


Şekil 3.14. Senkron generatör ünitesinin yapısı (Machowski 2008)

3.5.1 Frekans Kontrolü

Hidroelektrik santrallerde ki hız (frekans) kontrolü iki temel mantıkla yapılmaktadır. Bunlardan ilki debi ayarı diğeri ise yük ayarı ile yapılarak kontroldür. Kullanılan türbinlerin hız kontrollerinde, türbin-generatör şaftının devir sayısı veya bu devir sayısına uygun olan bir elektriki büyüklük, hız regülatörünün giriş büyüklüğü olarak değerlendirilir. Bazı hallerde de türbinin tahrik ettiği senkron generatörün frekans veya gerilimi, hız regülatörünün giriş büyüklüğü olarak seçilebilmektedir.

Debinin ayarlanması ile yapılan kontroldeki prensip, türbinin kumanda mekanizması özel servomotorlar vasıtası ile tahrik edilmesi ve türbin ayar kanatlarının pozisyonunun değiştirilmesi ve dolayısıyla türbin gücünün değiştirilmesidir. Francis, Kaplan ve Cross-Flow tipi türbinlerde türbin ayar kanatları kumanda servomotoru ile yapılır. Pelton tipi türbinlerinde ise düzdeki iğneyi kontrol eden servomotoru ve saptırıcı servomotoru ile yapılır. Gücün değişmesi esnasında türbinin devir sayısı sabit kalır. Aslında türbinin gücü ne kadar değişirse değişsin, devir sayısını istenilen ölçüler içinde sabit tutmak hız regülatörünün ana görevidir (Başşme 2003). Frekans kontrolüne ait genel blok gösterim Şekil 3.15’ te verilmiştir.



Şekil 3.15. Hız regülasyonuna ait genel blok gösterimi (Kundur 1994)

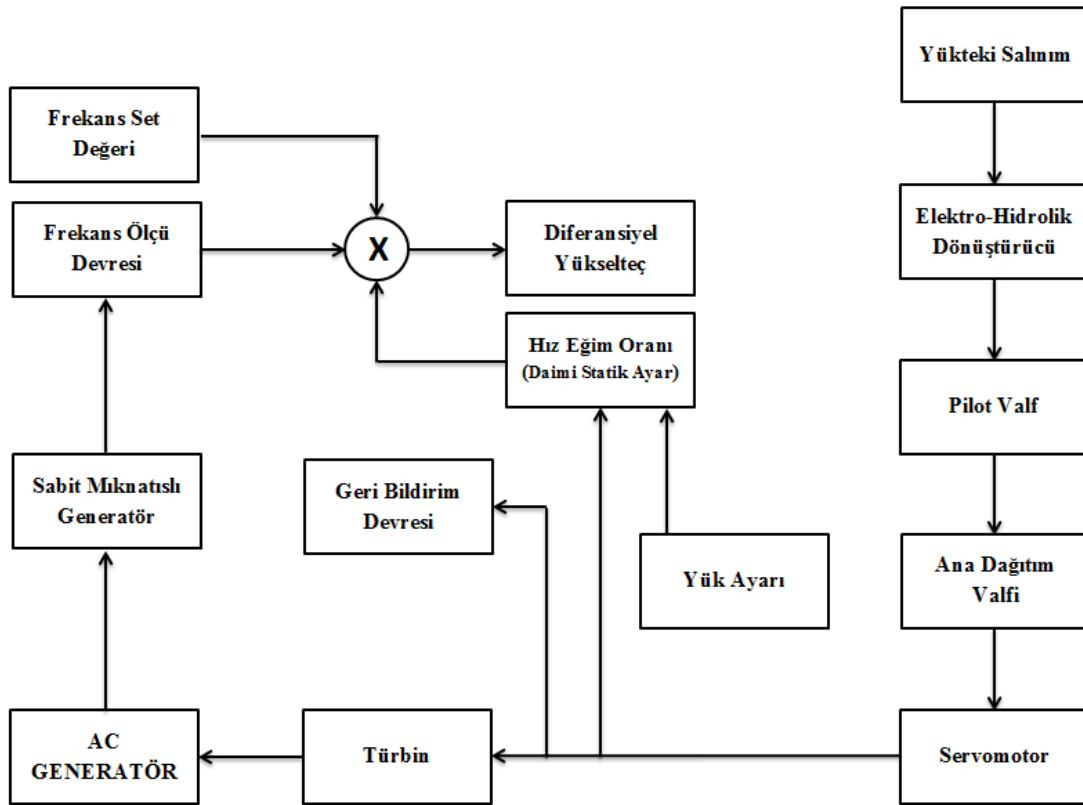
Türbin-generatör ünitesinin frekansının belirli ve istenilen sınırlar içinde sabit kalması ile birlikte, gücünün değişmesi için hız regülatörünce türbin ayar kanatlarının açıklıklarının değiştirilmesi yani türbin su debisinin ayarlanması olayına “regülasyon” adı verilmektedir.

Meydana gelen regülasyon hareketleri ile su akımının ve su debisinin değişmesi sonucu cebri boru ve salyangoz gibi organlarda ani geçici basınç değişiklikleri meydana gelir. Bu ani geçici basınç değişiklikleri regülasyon olayı üzerine kötü etkide bulunurlar yani regülasyon olayını bozucu büyüklükler olarak tesir ederler.

Şebekenin türbin hız regülasyonu üzerine değişik etkilerde bulunması, türbin-generatör ünitesinin izole bir şebeke içinde veya ulusal elektrik sistemi içinde ve diğer enerji üretim tesisleri ile paralel çalışması şartlarına göre değişir. Hız regülasyonu için dikkate alınması gereken diğer bir konu da türbinin tahrik ettiği generatörün gerilim regülasyonu devresidir. Omik yüklü izole bir şebekede çalışan bir HES’ e ait gerilim

regülasyonu devresinin ayarı konusu, hız regülasyonu için çok büyük bir önem arz etmektedir. Çünkü türbinin ve generatörün devir sayısında meydana gelecek herhangi bir değişme, generatörün geriliminde de geçici bir değişikliğin meydana gelmesine yol açmakta ve sistem durumuna göre devir sayısı regülasyon devresine büyük ölçüde tesir etmektedir. Dolayısı ile frekans kontrolü, aktif güç kontrolü olarak ve gerilim kontrolü de, reaktif güç kontrolü olarak ifade edilmekle beraber; bu iki kontrol, birbirinden ayrı düşünülmemesi gereken konulardır (Başşme 2003).

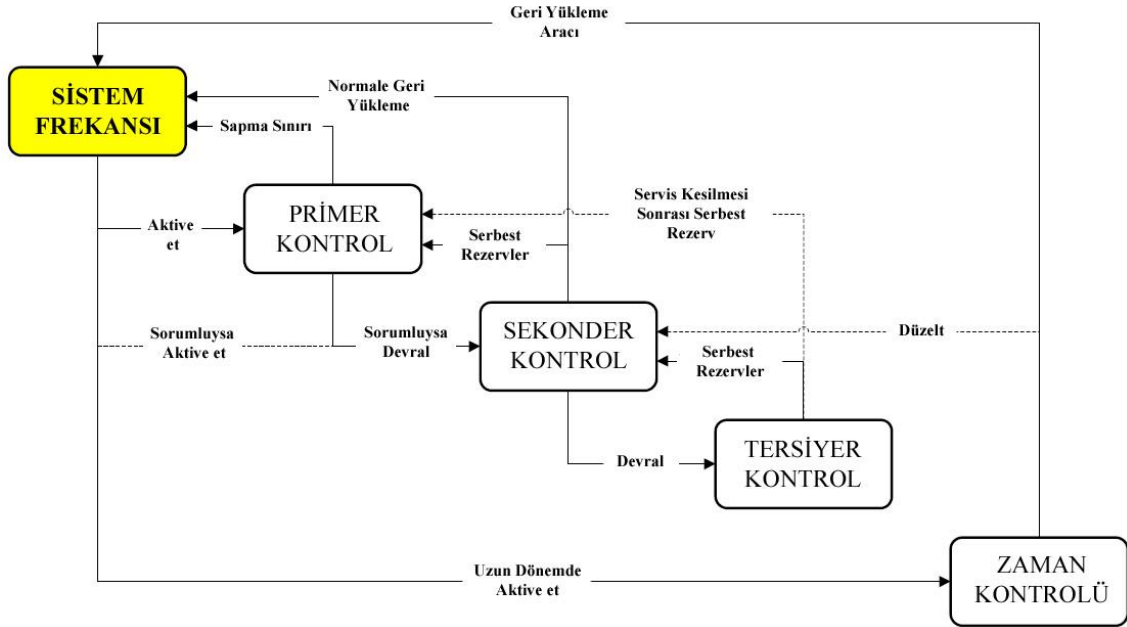
Adıgüzel HES' te türbin ayar kanatlarının kontrolünde kullanılan hız regülatörü tipi BDT-3 elektro-hidrolik hız regülatörüdür. Türbin hız regülatörünü oluşturan otomatik regülasyon sisteminin şematik diyagramı şekil 3.16' da gösterilmiştir.



Şekil 3.16. BDT-3 tip elektro-hidrolik hız regülatörü şematik diyagramı (Anonim 1986)

Bu çalışmada simülasyonu gerçekleştirilen hidrolik türbin ve hız regülatörünün teknik verileri çizelge 3.6' da verilmiştir.

Genel olarak bir elektrik şebekesinde hız yerine frekans ifadesi kullanılır. Üretildiği anda tüketilen tek şey elektriktir. Elektrğin tüketildiği an üretilmesi gerekir ki üretim ve tüketimin eşit olduğu an frekansın 50 Hz olduğu andır. Frekans kontrolü, bir elektrik sisteminin üretim-tüketim dengesinin kontrolüdür ve üç seviyede ele alınır. Bu üç seviye şekil 3.17’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işlem akışı (UCTE 2004)

3.5.1.1 Primer Frekans Kontrolü

Elektrik enerjisi üretim ve tüketiminin eşit olmaması durumunda saptmaya uğrayan sistem frekansını, sabit bir değerde dengeleyip frekans değişimini durdurmak için ünite rezerv kapasitesinin, türbin hız regülatörünün ayarlanan hız eğim (speed-droop) oranında, frekans sapması süresince merkezi müdahale olmaksızın, otomatik olarak sağlanması suretiyle katkıda bulunmasıdır. UCTE (ENTSO-E) kriterlerine göre eğer frekans sapması $\pm 200\text{mHz}$ ’ i geçerse primer frekans aktive olur. Primer kontrol yapan üniteler frekanstaki sapmayı takip edecek maksimum 15 saniye içerisinde primer rezerv yükünün % 50’sini, 30 saniye içerisinde de tamamını aktif edebilmelidir (Bircan 2006).

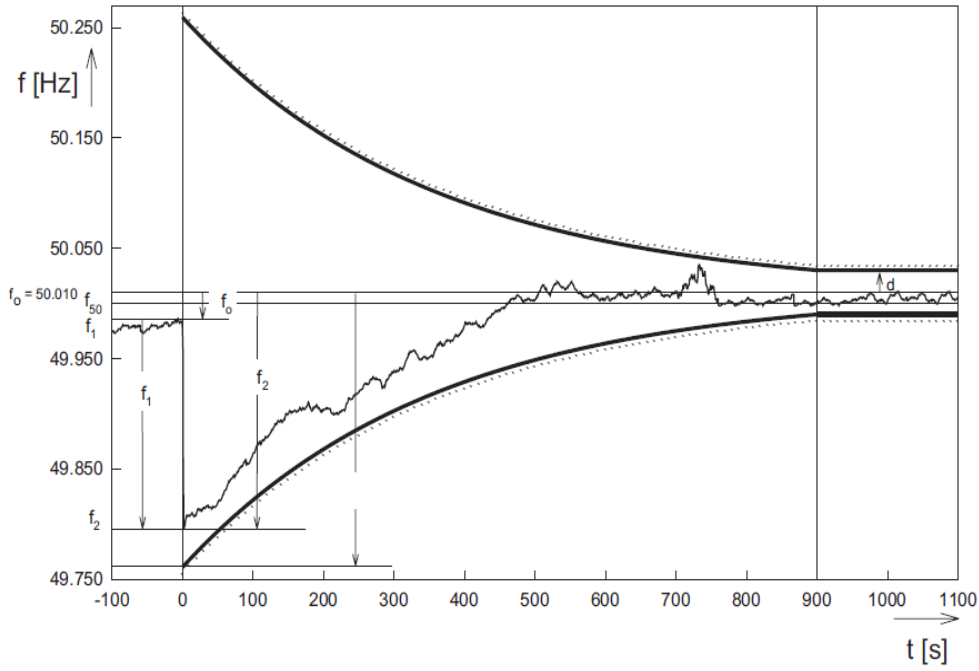
Primer frekans kontrolünün amacı enterkonnekte sistemde üretilen enerji ile tüketilen enerji arasındaki dengeyi sağlamaktır. Üretim-tüketim arasındaki denge durumunda şebeke frekansı sabit bir değerdedir. Enterkonnekte sistemde üretim-tüketim dengesini bozacak çeşitli dalgalanmalar (ani bir üretim sisteminin devre dışı kalması, çeşitli üretim sistemlerinin yük alması-atması, iletim hatlarında açma-kapama olaylarının yaşanması ve sistemde ani yüklerin devreye girmesi gibi) durumunda enterkonnekte sistemin frekansında bir sapmaya neden olur ve primer kontrolde çalışan üretim sistemleri bu dalgalanmaya cevap vererek sistem frekansının sabit değerde kalmasını sağlar.

Elektrik piyasası şebeke yönetmeliğine (EPŞY) göre 50 MW ünite gücü, 100 MW kurulu gücü bulunan tüm elektrik üretim santrallerinin primer frekans kontrolü yapması zorunludur. Primer frekans kontrolü yapacak santraller kabiliyetleri ölçüsünde belirlenen oranlarda (hidroelektrik santraller için %10, kömür ve doğal gaz yakıtlı termik santraller için ise %5) primer frekans kontrolüne katılmalıdır (Bircan 2006).

3.5.1.2 Sekonder Frekans Kontrolü

Sekonder kontrol edici (AGC) aracılığıyla ve primer kontrol tarafından kullanılan gücün serbest kalması amacıyla frekansın nominal değerine geri dönebilmesi için katkıda bulunmak üzere (özellikle en büyük üretim ünitesinin servis harici olmasından sonra) alan kontrol hatasını otomatik olarak düşürmeye yeterli olan işletme rezervinin ilave bir miktarıdır. Ünitenin çıkısındaki değişimin başlaması için maksimum tepki süresi 30 saniyedir ve sapma, maksimum 15 dakika içinde dengelenmelidir.

Büyük frekans saptmaları sırasında, frekans değeri, sistem şartlarına bağlı olarak belirlenen parametrelerle tespit edilmiş trompet eğrisi tarafından oluşturulan bir zarf içinde kalmalıdır. Şekil 3.18' de sekonder kontrol ile sistem frekansının tipik davranışı görülmektedir.



Şekil 3.18. Sekonder kontrol ile sistem frekansının davranışı (UCTE 2004)

3.5.1.3 Tersiyer Frekans Kontrolü

Sekonder kontrole katılan ünitelerin çalışma noktasını değiştirmeye ve sekonder kontrol gücünü ekonomik açıdan farklı ünitelere mümkün olan en iyi şekilde dağıtmaya yeterli olan işletme rezervinin ilave bir miktarıdır. Tersiyer kontrol rezervi, herhangi bir anda (genelde 3–20 dakika) devreye alınabilmelidir. Tersiyer rezerv, başka bir olayı karşılayabilmek için sekonder rezervi serbest hale getirir (Bircan 2006).

3.5.2 Gerilim Kontrolü

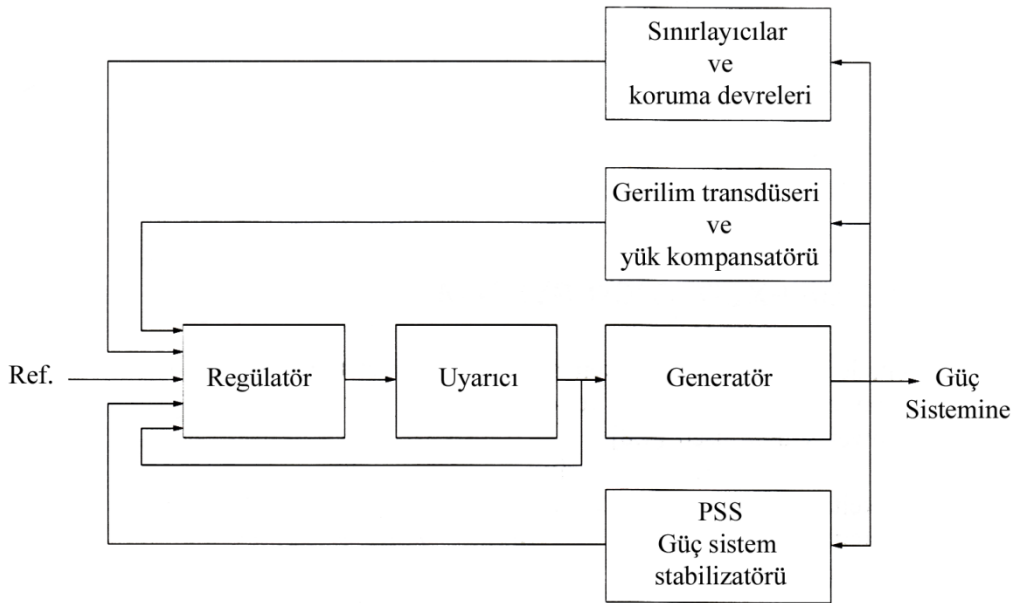
Genel olarak bir uyarıcı ve bir gerilim regülatörünü içeren uyartım sisteminin ana görevi senkron generatöre DC alan akımı sağlamaktır. Güç sistemleri açısından bakılırsa, uyartım sistemleri etkili bir gerilim kontrolü sağlamalı ve güç sisteminin kararlılığını arttırmalıdır. Geçici hal kararlılığını arttırmak için bozucu etkilere karşı hızlı cevap verebilme kabiliyeti olmalı ve küçük sinyal kararlılığını arttırmak için generatör alanını modüle etme yeteneğine sahip olmalıdır (Caner 2006).

Generatör uyartım sistemi, generatör gerilimini korur ve reaktif güç akışını kontrol eder. Eski sistemlerin generatör uyartımı, senkron makinenin rotoru ile aynı mil üzerine

yerleştirilmiş DC jeneratörler tarafından fırçalar yada bilezikler tarafından sağlanırdı. Ancak modern uyartım sistemleri genellikle fırçasız uyartım olarak bilinen doğrultuculu AC generatörler kullanmaktadır.

Generatörde ki reaktif güç, alan uyartımı ile kontrol edilmektedir. Elektrik iletim sistemleri üzerindeki geliştirilmiş diğer ek metotlar ise transformatör yük kademe değiştiriciler, anahtarlama kondansatörler, adım-gerilim regülatörleri ve statik kontrol ekipmanlarıdır. Generatör reaktif güç kontrolünde ilk akla gelen AVR' dir. AVR, giriş kontrol sinyallerini işler, yükseltir ve uyarıcının kontrol edilmesi için uygun hale getirir. Ayrıca senkron generatörün terminal geriliminin büyüklüğünü istenen seviyede tutmayı amaçlar. Senkron generatör uyartım sisteminin blok diyagramı Şekil 3.19' da gösterilmektedir.

AVR, set noktası değeri ile aktif veya reaktif güç arasındaki orana göre ilave kontrol sinyalleri oluşturur. Ayrıca AVR, aktif veya reaktif gücün neden olduğu ünite trafosu veya nakil hattı üzerindeki gerilim düşümünü dengeler. Genelde AVR, yumuşak yol verici (soft start) fonksiyonuna da sahiptir. Değerlendirme süresi çok küçük olup yaklaşık 5 ms civarındadır (Arda 2006).

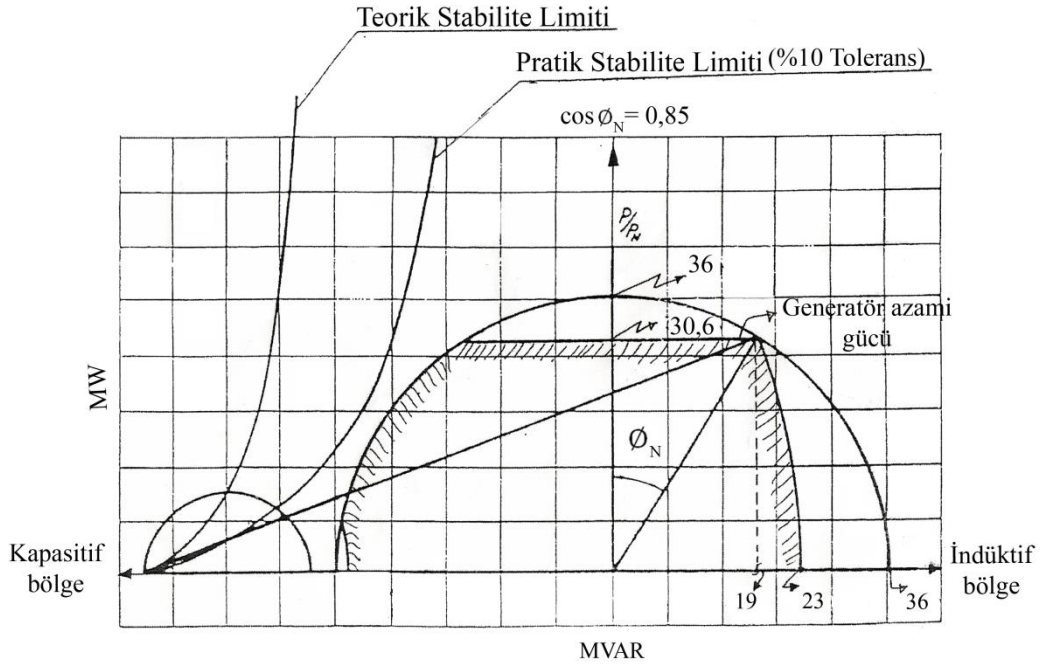


Şekil 3.19. Uyartım sisteminin blok diyagramı (Kundur 1994)

Generatörün reaktif yükündeki bir artış terminal geriliminin genliğinde de bir düşüşe neden olmaktadır. Gerilimin genliği, herhangi bir faza bağlı olan gerilim trafosu aracılığı ile algılanır. Bu gerilim doğrultulur ve bir DC set değeri ile karşılaştırılır. Yükseltile hata sinyali uyarım alanını kontrol eder ve terminal gerilimini artırır. Böylelikle generatör alan akımı artırılmaktadır. Terminal gerilimi istenen değerde dengelenene kadar reaktif güç üretimi artırılmaktadır (Saadat 1999).

Uyarım sisteminin görevini tam olarak yerine getirilebilmesi için aşağıdaki performans gereksinimlerini sağlaması gerekmektedir (Caner 2006);

- (i) Güç sisteminin kararlılığı için yeterli performansa karşılık gelen sistem tepkisine sahip olmalı,
- (ii) Sınırlama ve koruma fonksiyonları generatörün ve diğer cihazların zarar görmelerini engelleyecek özellikte olmalı,
- (iii) İşletmede esneklik sağlanması için gerekli özelliklere sahip olmalı,
- (iv) İstenen güvenilirlik özelliklerine sahip olmalı ve gerekli dayanıklılık, dâhili hata bulma ve yalıtım kapasitesine sahip olmalıdır.



Şekil 3.20. Adıgüzel HES generatör yükleme/kapasite eğrisi (Anonim 1983)

AVR’ deki sınırlayıcılar, uyarım sistemini koruma amaçlı kullanılmıştır. Minimum uyarım sınırlayıcısı, generatör gerilim ve akımına göre uyarım akımını denetler, uyarım akımının minimum set değerinin altına inmesi durumunda sistemi korumaya alır. Maksimum uyarım sınırlayıcısı, generatör gerilim ve akımına göre uyarım akımının maksimum set değerinin aşılması durumunda sistemi korumaya alır. Sınırlayıcılar ile ilgili generatör yükleme/kapasite eğrisi şekil 3.20’ de gösterilmiştir. Grafiğin X eksenı reaktif gücü, Y eksenı ise aktif gücü göstermektedir. Çizgilerle taranmış bölge AVR’ nin aktif çalışma bölgesidir.

IEEE tarafından geçici hal ve küçük sinyal kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere birçok uyarım sistemi modeli geliştirilmiştir (IEEE Std. 421.1–2007). Adıgüzel HES’ teki generatörlerin uyarım sisteminde kullanılan model, ST1A statik uyarım sistemidir. Standart hale getirilmiş uyarım sistemi modelleri çizelge 3.9’ da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Uyarım sistemi modelleri (IEEE Std. 421.1–2007)

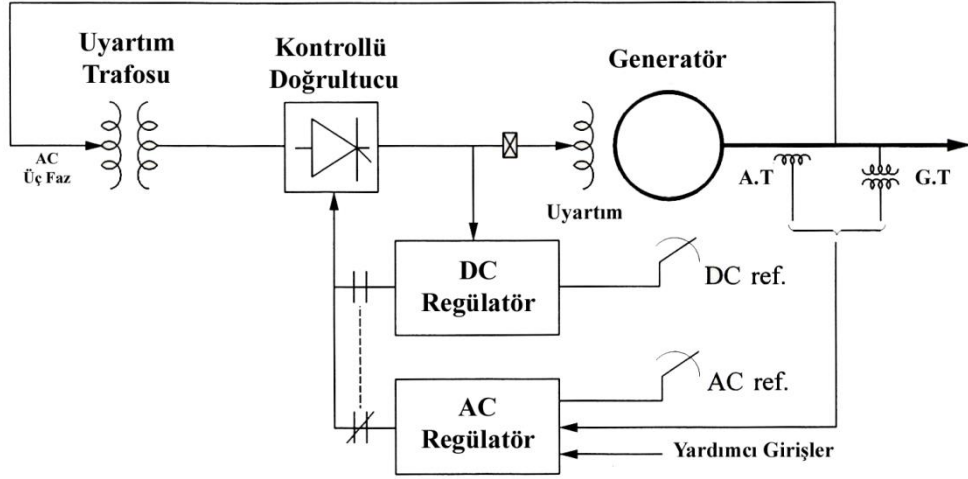
Uyarım Kategorisi	Model Tipi
DC	DC1A - DC2A - DC3A
AC	AC1A - AC2A - AC3A - AC4A
ST	ST1A - ST2A - ST3A

Uyarım sistemleri hakkında toplanan komitenin standart olarak belirlediği uyarım sistem modellerinin her biri kendine özgü farklılıklar içermektedir. Yapılan bu tez çalışmasında uyarım sistem modeli olarak ST1A modeli kullanıldığından diğer modellere değinilmeyecektir.

3.5.2.1 Statik Uyarım Sistemi (ST1A)

Senkron generatör, uyarım için gereken gücü bir uyarım trafosu ve tristörlü AC/DC dönüştürücüsü üzerinden alır. Gerilimi (bileşik sistemlerde aynı zamanda akımı), uygun bir değere dönüştürmek için bir transformatör kullanır. Doğrultucular generatör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak üzere kontrollü veya kontrolsüz olabilirler. Bu sistemlerin çoğundan negatif alan gerilimi elde edilebilir. Statik sistemlerin çoğunda

uyartım gerilimi çok yüksek değerlere çıkabilir. Bu yüzden uyartım sistemini ve generatör rotor sargılarını korumak için ilave alan akım sınırlama devreleri kullanılır.



Şekil 3.21. Adıgüzel HES' te kullanılan statik tip uyartım sistemi (Kundur 1994)

Şekil 3.21' de gösterilen tristör kontrollü statik uyartım sistemi günümüzde en çok kullanılan sistemlerdendir. Bu sistem normal çalışma sırasında yük ve gerilim değişimleri gibi bozukluklar için mükemmel cevap karakteristiğine sahiptir. Ancak ana yük hattındaki 3 faz kısa devre arızası süresince alan akımı sürdürmesinde bazı zorluklar vardır ve eğer alan akımının azalmasından itibaren arıza devam ederse, uzun bir süre generatörün gerilim tespiti imkânsızlaşır. Bu durum büyük kapasiteli generatörler için ciddi bir sorundur.

Adıgüzel HES' teki statik uyartım sistemi, uyartım trafosu, AVR, tristörlü AC/DC dönüştürücü, DC kesici ve deşarj devresinden oluşmaktadır. Bu çalışmada simülasyonu gerçekleştirilen uyartım sisteminin teknik verileri çizelge 3.10' da verilmiştir.

Güç sistem stabilizatörü (PSS), güç sistem osilasyonlarının sönümlenmesi için, regülatöre ilave giriş sinyali sağlar. PSS 'in giriş sinyali olarak rotor hız değişimi yaygın olarak kullanılır. Ayrıca bara frekansı, hızlandırıcı güç (mekanik giriş gücü ile elektriksel güç arasındaki fark) ve elektriksel güç pratikte kullanılan giriş sinyalleri arasındadır (Caner 2006).

Çizelge 3.10. Uyarım sisteminin parametreleri (Anonim 1983)

Teknik Veriler		Model Tipi
Tipi (IEEE Std. 421.1–2007)		ST1A
Uyarım trafosunun gücü		530 kVA
Nominal uyarım tavan gerilimi		311,6 V
Uyarım trafosunun gerilim değerleri	Primer	13,8 kV
	Sekonder	285 V
Dönüştürücünün tavan akımı		1985 A
Regülatör	Kazancı (K_a)	200
	Zaman sabiti (T_a)	0,02 s
Dengeleyici	Kazancı (K_f)	0
	Zaman sabiti (T_f)	1
Uyarım Sınırlayıcısı	Kazancı (K_{LR})	4,54
	Set değeri (I_{LR})	11,5 pu

3.6 Adıgüzel HES’ in Yük-Frekans Kontrolünde Kullanılan Kontrolörler

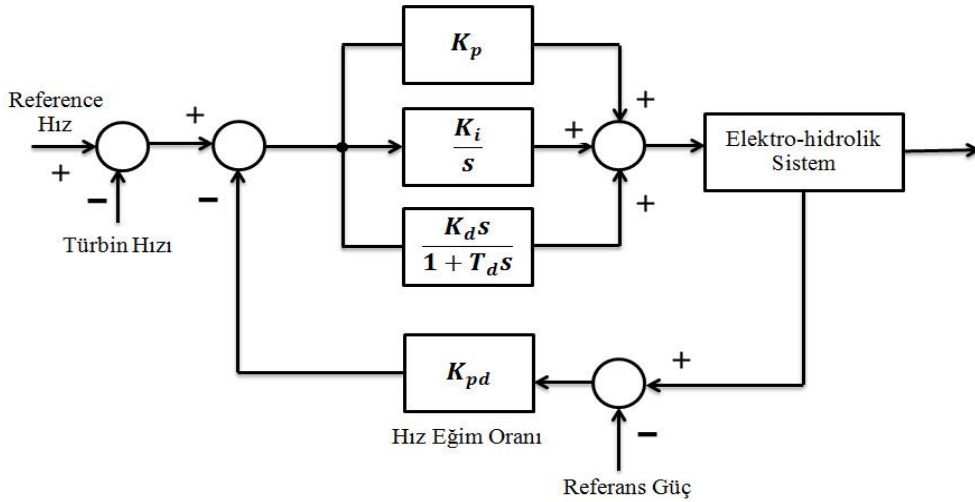
Bu tez çalışmasında Adıgüzel HES’ in hız regülatörü devresinde ilk olarak PID kontrolör tasarlanmış ve sistemin değişik yüklenme durumuna göre simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Ancak sistemin ani yük değişimlerinde referans frekans değerinden saptığı ve uzun bir süre bu frekansı yakalayamadığı gözlenmiştir. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla ani yük değişimlerinde değişen PID katsayılarının otomatik olarak sisteme uyarlanabilmesi için BMK tasarlanmış ve sistem performansını iyileştirdiği görülmüştür.

3.6.1 PID Kontrolör

Endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan PID kontrolörler K_p oransal kazanç, K_I integral kazancı ve K_D türevsel kazanç bileşenlerini içerir. PID kontrolörün çıkışı bu üç terimin toplamından oluşur. PD kontrolör sürekli hal hatasını düzeltmemesi, PI kontrolörün ise sistemin yükselme süresini arttırması nedeniyle bu iki kontrolörün iyi özelliklerini taşıyan PID kontrolörün kullanılması daha iyi sonuçlar vermektedir. PID kontrolörün en genel ifadeyle transfer fonksiyonu eşitlik 3.8’ de görülmektedir. Simulinkte kullanılan sürekli zamanlı paralel PID kontrolör, “Forward Euler” metodunu kullanarak kazanç katsayılarını belirlemektedir.

$$(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.8)$$

Güç sisteminde yükte oluşacak değişimler önceden tahmin edilemeyeceği için frekans cevabındaki istenilen aşım, yükselme zamanı, yerleşme zamanı gibi zaman tanım bölgesi kriterlerinin kesin değeri bilinmez. Bununla birlikte arama uzayı içinde frekans hatasını en aza indirecek kontrolör katsayılarının bulunması amaçlanmaktadır. PID kontrolör katsayılarının bulunmasında PID kazançlarını otomatik ayarlayan Matlab/Simulink bloklarından PID Kontrolör bloğundan yararlanılmıştır. Simülasyon modelinde kontrolör olarak şekil 3.22’deki PID kontrolör modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.22. PID kontrolör blok diyagramı

Çizelge 3.11. PID kazanç katsayıları

P_{mek}	$Gate$	P_{elk}	K_P	K_I	K_D
0,1	0,0965	3,1825	0,00558537	0,00000080	8,5467000568
0,2	0,1930	6,7897	0,01124169	0,00000331	8,4482199936
0,3	0,2896	10,4070	0,25623287	0,01780566	-2,4179942742
0,4	0,3861	14,0375	0,71591296	0,04657833	-3,2007578307
0,5	0,4826	17,6865	0,88054668	0,06950864	-3,0580565336
0,6	0,5791	21,3600	1,07148533	0,09612619	-2,5605848591
0,7	0,6756	25,0640	1,21479695	0,14046803	-0,8917655191
0,8	0,7721	28,8000	1,46073222	0,18331606	0
0,9	0,8687	32,5800	1,99686681	0,14315631	-1,2251305837
1,0	0,9652	36,4000	1,26943876	0,18692192	0

burada

P_{mek} , referans mekanik güç (pu),

$Gate$, ayar kanat açıklığı (pu),

P_{elk} , sistem çıkışındaki güç (MVA).

Yük-frekans kontrolü için hız regülatörü devresindeki PID kontrolörün değişik yükleme durumlarına göre PID kazanç katsayıları çizelge 3.11’ de verilmiştir. Bu çizelgede referans mekanik güç (pu), hız regülatörünün kontrol ettiği ayar kanatlarının pozisyonu ve sistem çıkışındaki güç değerleri verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kazanç katsayıları 0,1 pu ve 1,0 pu aralığında her bir yükleme durumlarına göre belirlenmiştir. Analizleri yapılan 10 farklı yükleme sonucunda elde edilen K_P , K_I , K_D değerlerine ait simülasyon grafikleri bulgular bölümünde detaylı bir şekilde incelenecektir.

3.6.2 Bulanık Mantık Kontrolör ve Tasarımı

Adıgüzel HES’ in hız regülatörü devresinde ikincil kontrolör olarak BMK tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemin performansını, herhangi bir bozucu etkiden sonraki frekansın oturma zamanını ve sistemin tepki süresini tasarlanan PID kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

3.6.2.1 Bulanık Mantık

Bulanık mantık üzerine ilk çalışmalar Amerika Birleşik Devletleri’ nde düzenlenen bir konferansta 1956 yılında duyurulmuştur. Ancak bu konudaki ilk ciddi adım 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından yayınlanan bir makalede bulanık mantık veya bulanık mantık kuramı adı altında ortaya konulmuştur (Elmas 2011). Zadeh bu çalışmasında insan düşüncesinin büyük çoğunluğunun kesin olmayıp bulanık olduğunu belirtmiştir. Bu yüzden 0 ve 1 ile temsil edilen boolean mantık bu düşünce biçimini yeterince ifade edememektedir. İnsan mantığı, açık-kapalı, sıcak-soğuk gibi kesin ifadelerin yanı sıra, az açık, az kapalı, serin, ılık gibi ara değerleri de bünyesinde barındırmaktadır. Klasik denetim uygulamalarında karşılaşılan zorluklar nedeniyle, bulanık mantık denetimi çok hızlı gelişmiş ve modern uygulama alanında geniş uygulama alanı bulmuştur.

Bulanık mantığın genel özellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir (Elmas 2011);

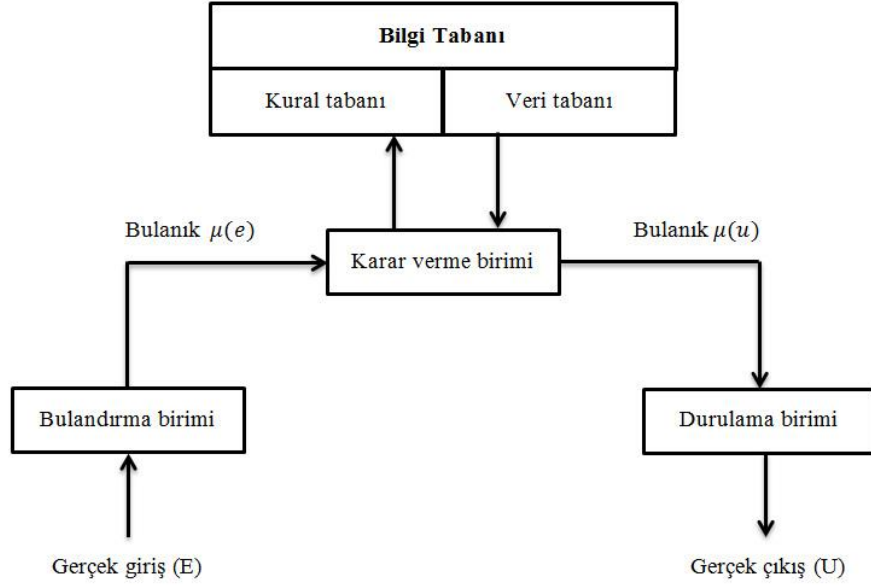
- (i) Bulanık mantıkla, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme kullanılır.
- (ii) Bulanık mantıkta her şey $[0,1]$ aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- (iii) Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok az gibi dilsel ifadeler şeklindedir.
- (iv) Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- (v) Her mantıksal sistem bulanık olarak ifade edilebilir.
- (vi) Bulanık mantık matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için çok uygundur.
- (vii) Bulanık mantık tam olarak bilinmeyen veya eksik girilen bilgilere göre işlem yapma yeteneğine sahiptir.

3.6.2.2 Bulanık Çıkarım Sistemi

Bulanık bir sistemde bulanık çıkarım motoru matematik denklemler yerine bulanık kümeleri ve kural tabanını kullanır. Bulanık sistemde biri gözlenmiş ve ölçülmüş değerler, diğeri de uzman kişinin görüşleri olmak üzere iki bilgi kaynağı bir arada düşünülür. Bunun anlamı sayısal veri tabanına ilave olarak sözel kural tabanının bulunmasıdır. Uzman görüş, sistemde bilinmeyen belirsizliklerin modellenmesinde işe yarar. Genel olarak, bir uzman sistemde kullanıcı ile etkileşimli olarak üç ana kısım vardır. Bunlar (Şen 2009);

- 1) Bilgi tabanı; uygulama alanı ile ilgili olabilecek tüm bilgileri içerir. Burada sorunun geçerli olduğu alan ve bu alan içindeki değişkenler arasındaki ilişkileri tanımlayan kurallar bulunur. Bilgiler “eğer... ise” önermeleri şeklinde yazılır.
- 2) Çıkarım motoru; sorunun çözümlenebilmesi için verilen bilgilerin ışığı altında etkin olan cevapları bulabilmek için yapılan işlemlerden ibarettir.
- 3) Kullanıcı etkileşimi; bu kısım kullanıcı ile kurulan sistem işleyişi arasındaki etkileşimi gösterir. Böylece yeni bilgi ve görüşlerin ortaya çıkması ile önerilen bulanık sistemin daha da iyileştirilmesini temin eder.

Genel bir bulanık çıkarım sisteminin kurulmasında dört adım bulunur. Bu adımlar şekil 3.23' teki blok şemada gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Bulanık mantık denetleyicisinin temel yapısı (Elmas 2011)

Bulanık mantık denetleyiciler, bilgi tabanı, bulandırma, karar verme ve durulama birimleri olmak üzere dört temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar (Elmas 2011);

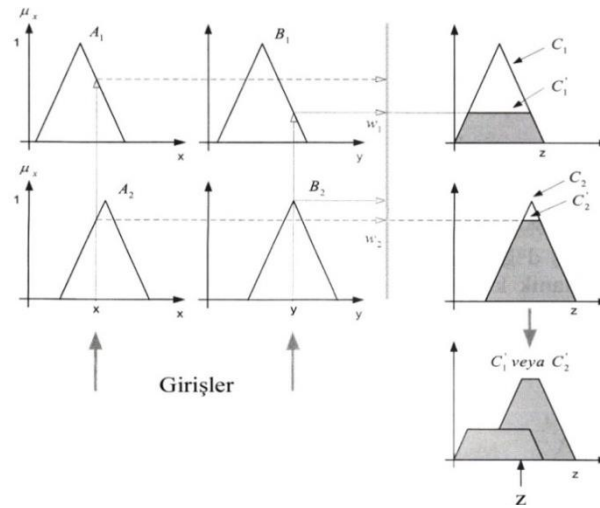
- 1) Bulandırma birimi; sistemden alınan denetim giriş bilgilerini dilsel niteleyiciler olan sembolik değerlere dönüştürme işlemidir. Üyelik işlevinden faydalanılarak giriş bilgilerinin ait olduğu bulanık kümeyi ve üyelik derecesini tespit edip, girilen sayısal değere küçük, en küçük gibi dilsel değişken değerler atar. Sistemin verimli çalışmasını sağlamak amacıyla değişik şekillerde bulanık kümeler seçilebilir. Tasarlanan bulanık kontrolörde üçgen tipi bulanık küme kullanılmıştır.
- 2) Bilgi tabanı; karar verme biriminin kural tabanının da kullandığı bilgileri aldığı veri tabanı ve denetim amaçlarına uygun dilsel denetim kurallarının bulunduğu kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Girişler ve çıkışlar arasındaki bağlantılar, kural tabanındaki kurallar kullanılarak sağlanır.
- 3) Karar verme birimi; çıkarım motoru olarak ta adlandırılır. Bulanık mantık denetiminin çekirdek kısmıdır. Bu kısım insanın karar verme ve çıkarım yapma

yeteneğinin benzeri bir yolla bulanık kavramları işler ve çıkarım yaparak gerekli denetimi belirler.

- 4) Durulama birimi; bulanık çıkarımın sonucu bulanık kümedir. Bu sonucun tekrar sisteme uygulanması için giriş değeri gibi sayısal değere dönüştürülmesi gerekir. Bu işleme durulama işlemi denilir. Durulama birimi karar verme biriminden gelen bulanık bir bilgiden bulanık olmayan ve uygulamada kullanılacak gerçek değerlerin elde edilmesini sağlar.

3.6.2.2.1 Mamdani Bulanık Çıkarım Sistemi

Mamdani bulanık çıkarım sisteminde, kontrol uygulamalarında maksimum operatör olarak VEYA minimum operatör olarak da VE operatörleri kullanıldığı halde, diğer bulanık operatör türlerine şartlı cümlelerin farklı bölümleri arasında ilişki kurmak amacıyla gerek duyulur. Bulanık kontrol kuralında kullanılan maksimum bulanıklaştırma operatörü VEYA ise kontrol çıkışı girişin maksimum üyelik derecesine göre ölçeklendirilir. Eğer kontrolde minimum bulanıklaştırma operatörü VE kullanıldıysa kontrol çıkışı bu sefer girişin minimum üyelik derecesine göre derecelendirilir (Oğuz 2007). Mamdani bulanık çıkarım şekil 3.24’ te görülmektedir. Bu çıkarım sistemine ait bütüncül çıkarımı eşitlik 3.9’ da ki hesaplama ile bulunur.



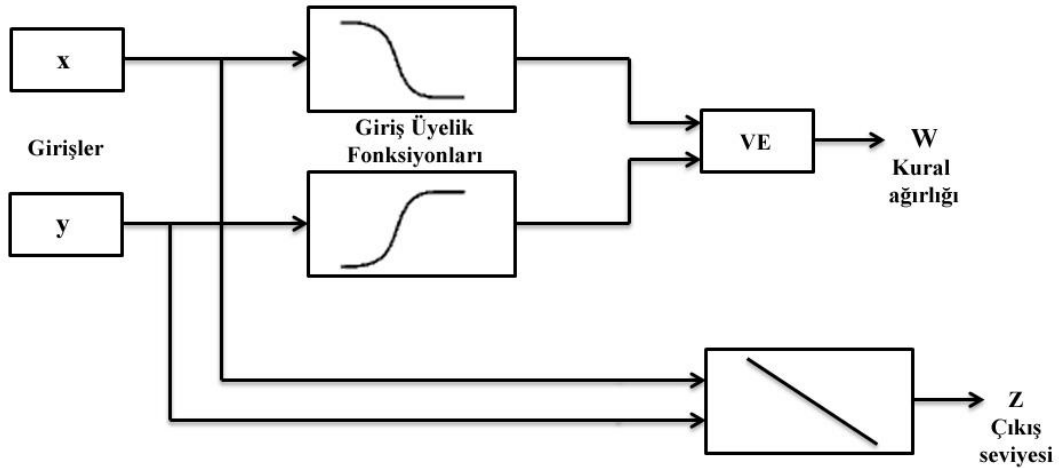
Şekil 3.24. Mamdani bulanık çıkarım yapısı (Elmas 2011)

$$z = \frac{\sum r_i z_i}{\sum z_i} \quad (3.9)$$

3.6.2.2 Sugeno Bulanık Çıkarım Sistemi

Bu model aynı zamanda Takagi-Sugeno-Kang bulanık çıkarım sistemi olarak ta bilinir. Mamdani bulanık mantık yönteminin bir uyarlamasıdır. Giriş değişkenlerinin bulanıklaştırılması ve bulanık mantık işlemleri Mamdani tipi ile tamamen aynıdır. Mamdani ve Sugeno bulanık çıkarım sistemindeki tek fark, Sugeno bulanık çıkarım sistemindeki çıkış üyelik fonksiyonlarının lineer ve sabit olmasıdır.

Sugeno bulanık çıkarım şekil 3.25’ te görülmektedir. Bu çıkarım sistemine ait bütüncül çıkarımı, eğer 1. giriş x ve 2. giriş y ise çıkış $z = ax + by + c$ ’ dir. Burada x ve y , girişlerin üyelik fonksiyonları için tanımlanmış öncül kısımdaki bulanık kümeler, a , b ve c ise sonuç kısmındaki parametrelerdir. Böylece her bir kural için bir çıkış değeri eşitlik 3.10’ da ki gibi elde edilir.



Şekil 3.25. Sugeno bulanık çıkarım sistemi (Oğuz 2007)

$$\text{Çıkış} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (3.10)$$

burada

N , kural sayısı

w , kural ağırlığı

z , çıkış seviyesi

Güç üretim sisteminin işletme performansını arttırmak ve istenilen kalitede güç elde etmek için sugeno bulanık çıkarım sistemine dayalı BMK dizayn edilmiştir. Kontrolörün üç giriş sinyalinden birincisi; hata sinyali $e(t)$, ikincisi; hata sinyalinin zamana göre değişimi $de(t)/dt$, üçüncüsü; HES' in çıkış uçlarından çekilen gücün per-unit olarak hesaplanmış $pe(t)$ değeridir. Kontrolörün çıkış sinyali ise; ayar kanat açıklığının istenilen ölçüde ayarlanabilmesi için servomotorların kontrolünü sağlayan $u(t)$ kontrol sinyalidir. Şekil 3.26' daki sistemde tasarlanan üç giriş değişkenli bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.26. Sistemde kullanılan bulanık mantık kontrolörün blok diyagramı

Sugeno tipi BMK' nın çıkışı reel sayılardan oluştuğundan dolayı giriş sinyali üyelik fonksiyonu gibi işaretlemesi söz konusu değildir. Çıkış değişkeni 27 adet reel sayıdan oluşmaktadır ve değer aralığı -0,2222 ile 1,2222' dir. Tasarlanan kontrolörün 27 kurallı kural tablosu çizelge 3.12' de görülmektedir.

Çizelge 3.12. Değişen yük durumuna göre yük-frekans kontrolü için BMK' ya ait kural tablosu

Ölçülen Güç [pe(t)]	Hata [e(t)]								
	N			S			P		
	Hatadaki değişim [de(t)/dt]								
	N	S	P	N	S	P	N	S	P
PK	-0,2222	-0,1666	-0,1111	-0,0555	0	0,05555	0,1111	0,16666	0,2222
PO	0,27776	0,33331	0,38886	0,44441	0,5	0,55555	0,6111	0,66665	0,7222
PB	0,77775	0,8333	0,88885	0,9444	1	1,05555	1,1111	1,16665	1,2222

Çizelge kolayca şu şekilde okunmaktadır;

EĞER $e(t) = N$, $de(t) = S$ ve $pe(t) = PO$ ise, O HALDE $u(t) = 0,33331$

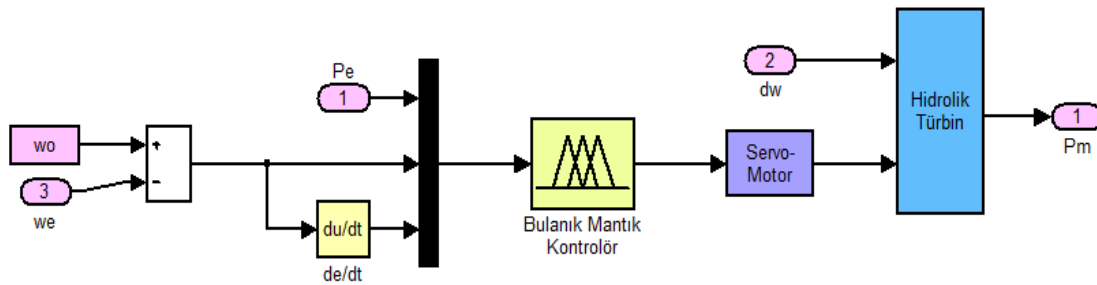
EĞER $e(t) = P$, $de(t) = P$ ve $pe(t) = PO$ ise, O HALDE $u(t) = 0,72222$

.

.

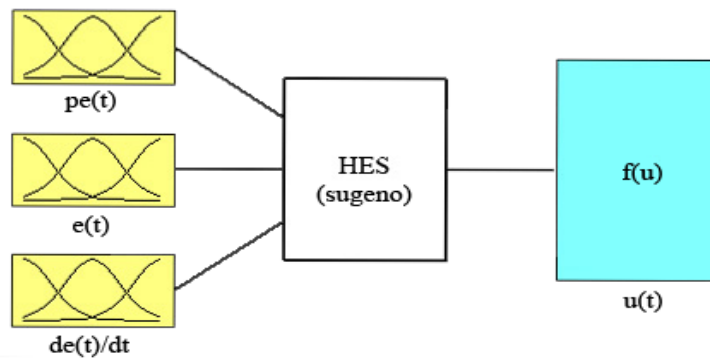
EĞER $e(t) = P$, $de(t) = P$ ve $pe(t) = PB$ ise, O HALDE $u(t) = 1,2222$

Tasarlanan sistemde, Matlab yazılımının bulanık mantık araç kutusundaki BMK modeli kullanılmıştır. Kullanılan BMK' nın simülasyon blok diyagramı şekil 3.27' de görülmektedir.



Şekil 3.27. BMK ile denetlenen sistemin simülasyon blok diyagramı

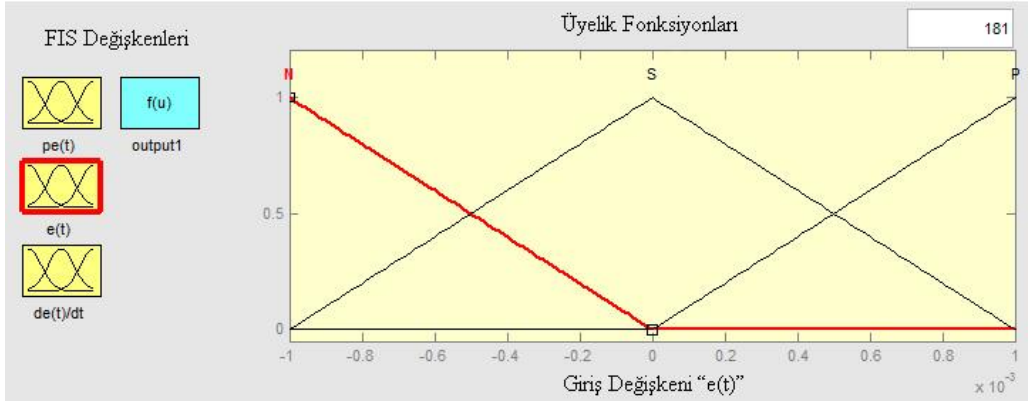
Adıgüzel HES' in hız regülatörü devresinde tasarlanan sugeno tipi BMK' nın üç giriş ve bir çıkış sinyalinden oluşan yapısı şekil 3.28' de görülmektedir.



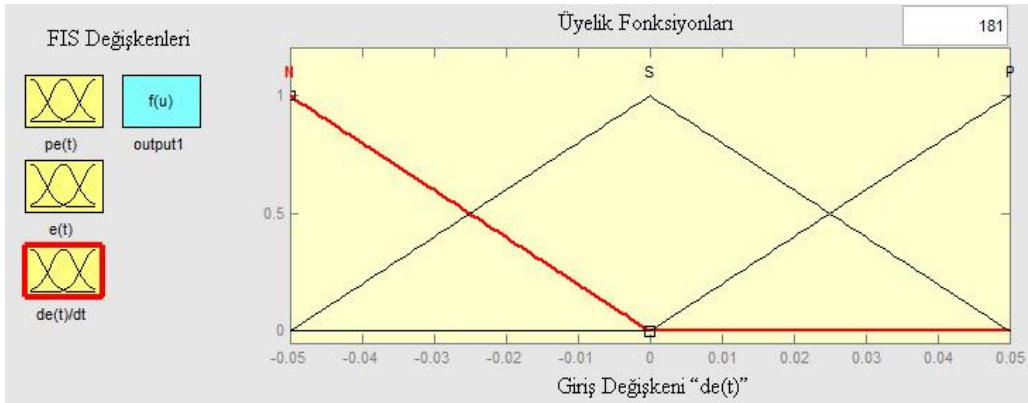
Şekil 3.28. Sugeno tipi BMK' nın üç giriş ve bir çıkış sinyalinden oluşan yapısı

BMK' nın giriş değişkenlerinden olan hata sinyali $e(t)$ ' nin ve hatadaki değişim sinyali $de(t)/dt$ ' nin dilsel değişkenleri, negatif (N), sıfır (S) ve pozitif (P)' tir. Üçüncü giriş

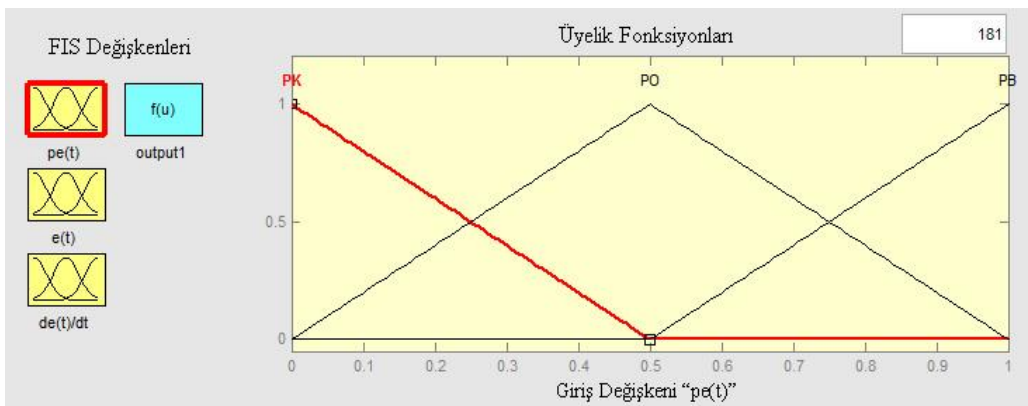
değişkeni olan baradan çekilen güç sinyali $pe(t)$ ' nin dilsel değişkenleri, pozitif küçük (PK), pozitif orta (PO) ve pozitif büyük (PB)' tür. Bulanık çıkarım sisteminin girişleri, üçgen tipi üyelik fonksiyonlarının değer aralıkları ile birlikte şekil 3.29 – 3.30 ve 3.31' de görülmektedir. Kural tabanını oluşturulurken mantıksal işlemlerden “ve” operatörü kullanılmıştır.



Şekil 3.29. Hata sinyali $e(t)$ ' nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı



Şekil 3.30. Hatada ki değişim sinyali $de(t)/dt$ ' nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı



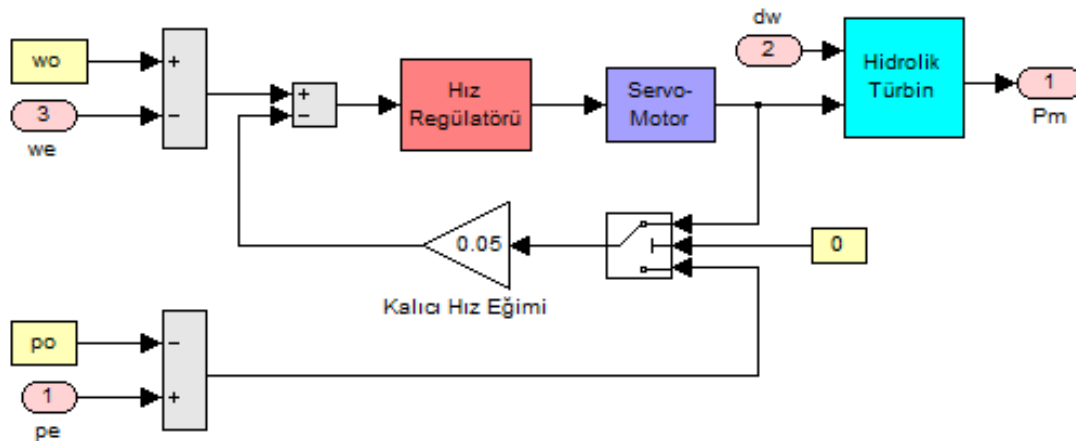
Şekil 3.31. Ölçülen güç sinyali $pe(t)$ ' nin üyelik fonksiyonu ve değer aralığı

3.7 Adıgüzel Hidroelektrik Santrali' nin Modellemesi ve Blok Diyagramı

Mühendislik çalışmalarının en önemli aşamalarından birisi herhangi bir sistemin matematiksel modelleme sürecidir. Büyük bir güç sistemi üzerinde çalışmalar yaptığımızı düşünelim. Bu durumda bileşenlerden her birinin tüm detaylarıyla temsil edilmesi uygun değildir. Matematiksel modelleme için çalışma süresince yapılan varsayımlarda modelin uygulama alanı ve güvenilirliği belirlenir. Pratikte birçok karmaşık sistemi, uygun mühendislik varsayımlar yapılarak çok basit ve etkili bir şekilde modelleme yapılabilir. Yapılan simülasyonların çoğunda bu basitleştirilen modeller kullanılmaktadır. Örneğin, doğrusal olmayan sistem analizi için uygun şartların gerçekleşmesi durumunda belirli bir çalışma noktası çerçevesinde doğrusallaştırma yapılabilir.

3.7.1 Elektromekanik Sistem Modeli

Elektromekanik sistemin modellenmesi, türbin ve cebri boru ile hız regülatörü modeli olarak iki aşamada yapılmaktadır. Sistemin genel modeli şekil 3.32’ de verilmiştir.



Şekil 3.32. Hız kontrolünün genel simülasyon blok diyagramı

3.7.1.1 Türbin ve Cebri Boru Modeli

Sistem çözümünde rezervuardan itibaren suyu cebri boru içinde türbine kadar akışkan mekaniği, su enerjisinin mekanik enerjisine ve türbin shaftı hızına dönüşümü sağlayan

türbin mekaniği dikkate alınacaktır. Suyun cebri boru iç cidarlarına sürtünmesinden kaynaklı oluşan hidrolik kayıplar sistemin çözüm amacına uygun olarak çok düşük mertebelerde olmaktadır. Bu nedenle, bir kısım model çözümlerinde (doğrusal modelleme) hidrolik kayıplar dikkate alınmaz.

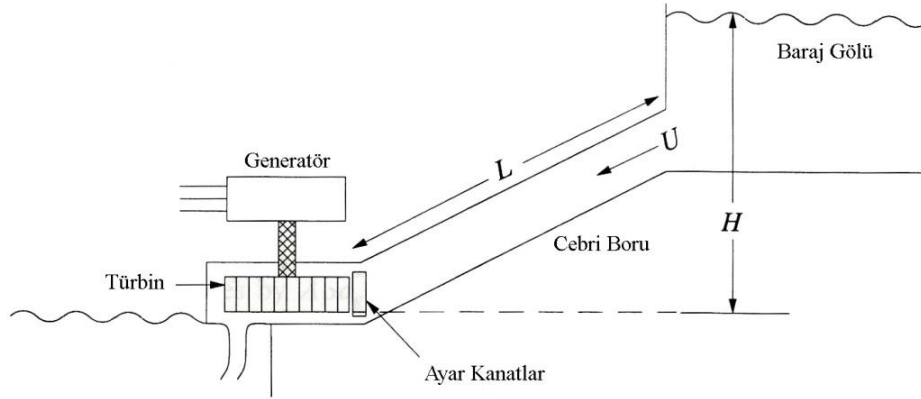
Suyun cebri boru içinde hareketi ve türbin kanatlarına çarpması sırasında, suyun eylemsizliği, suyun sıkıştırılabilirliği ve cebri borunun elastik yapıda olması doğal olarak aşırı su dalgalarına neden olmaktadır. Bu su dalgaları, mekanik aksama zarar verebilir. Bu olaya “su çekici” denir. Cebri boru boyunca ilerleyen aşırı su dalgalarının mekanik aksama zarar vermemesi için denge bacası kullanılır. Bu tesis vasıtasıyla su dalgaları sönmelenir. Genellikle uzun cebri borulu hidrolik santrallerde dikkate alınabilir.

Türbin için çok farklı modeller yapılabilir. Örneğin, doğrusal model, doğrusal olmayan model, ilerleyen dalga teorisi ile doğrusal olmayan model, ilerleyen dalga teorisi ve denge bacası ile doğrusal olmayan model gibi akışkan mekaniğinin çok detaylı olarak incelenebilecek modeller geliştirilebilir (Kılıçkap 2007). Bu çalışmada, generatör hız kontrolü açısından çok fazla etkili olmayacağı için sadece doğrusal ve doğrusal olmayan model dikkate alınacaktır.

Kararlılık çalışmalarında hidrolik türbin ve suyun temsili genellikle aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır (Kundur 1994):

- (i) Hidrolik kayıplar ihmal edilebilir.
- (ii) Cebri boru esneyemez ve su sıkıştırılamaz.
- (iii) Suyun hızı, ayar kanat açıklığı ile net hidrolik düşünün karekökü ile doğru orantılıdır.
- (iv) Türbin mekanik gücü, hidrolik düşü ve su hızının çarpımı ile doğru orantılıdır.

Hidrolik tesisin temel unsurları şekil 3.33' te gösterilmektedir.



Şekil 3.33. Hidroelektrik santralin şematik gösterimi (Kundur 1994).

Türbin ve cebri boru karakteristikleri aşağıdaki üç temel denklem ile belirlenir:

- (i) Cebri borudaki suyun hızı
- (ii) Türbin mekanik gücü
- (iii) Suyun ivmesi

Cebri boru içerisinde akan akışkanın sıkıştırılmadığını varsayarsak, temel hidrodinamik denklemler aşağıdaki gibidir.

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (3.11)$$

burada

U , suyun hızı

G , ideal ayar kanat açıklığı

H , hidrolik düşü

K_u , orantı sabiti

Çalışma noktasındaki küçük bir değişme oluştuğunda hız değişimi, hidrolik düşüye ve ayar kanat açıklığına bağlı olarak oluşan hız değişimleri toplamıdır.

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (3.12)$$

Eşitlik 3.12' nin kısmi türevi alınıp $U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0}$ ile bölünürse eşitlik 3.13 elde edilir.

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (3.13)$$

burada

U_0 simgesi başlangıç kalıcı durum değerini,

Δ öneki küçük sapmayı,

– simgesi kalıcı durum çalışma değerindeki normalize değeri gösterir.

Türbin çıkış gücü, hidrolik düşü ve su hızının çarpımı ile doğru orantılı olduğundan dolayı eşitlik 3.14 elde edilir.

$$P_m = K_p H U \quad (3.14)$$

Doğrusallaştırma için küçük değişimler dikkate alındığında ve eşitliğin her iki tarafı $P_{m0} = K_p H_0 U_0$ ile bölündüğünde eşitlik 3.15 elde edilir.

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.13' te ki $\Delta \bar{U}$, eşitlik 3.15' te yerine yazılırsa eşitlik 3.16 ve 3.17 elde edilir.

$$\Delta \bar{P}_m = 1,5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (3.16)$$

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (3.17)$$

Newton'un II. hareket kanununa göre cisim üzerindeki net kuvvet, cismin kütlesi ile ivmesinin çarpımına eşittir. Cebri boru içerisindeki su kütlesi göz önüne alındığında,

cebri borudaki akımın değişim hızı basınç ile ilişkilidir. Bundan dolayı mevcut hidrolik düşünün hareketi eşitlik 3.18' deki gibi gösterilebilir.

$$(\rho LA) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho a_g)\Delta H \quad (3.18)$$

burada

L , kanalın uzunluğu

A , borunun kesiti

ρ , kütle yoğunluğu

a_g , yerçekimi ivmesi

ρLA , kanalın içerisindeki su kütlesi

$\rho a_g \Delta H$, türbin girişindeki basınç değişimi

t , zaman (s)

Eşitlik 3.18' in her iki tarafı $A\rho a_g H_0 U_0$ bölünürse ivme denklemi eşitlik 3.19 elde edilir.

$$\frac{LU_0}{a_g H_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta H}{U_0} \right) = -\frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19' daki türevsel eşitliğin sol tarafı suyun hareket süresi (T_w) olarak adlandırılmaktadır. T_w , hidrolik düşünün H_0 iken cebri borudaki suyun U_0 hızına ulaşmasına kadar geçen süredir. Bu süre yüke bağlı olarak değişmektedir. Tipik olarak T_w , tam yükte 0,5 s ile 4,0 s arasındadır (Kundur 1994).

$$T_w \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad (3.20)$$

$$T_w = \frac{LU_0}{a_g H_0} \quad (3.21)$$

Hızdaki değişim ve ayar kanat pozisyonundaki değişim arasındaki ilişkiyi eşitlik 3.13 ve 3.20' den eşitlik 3.22' de ki gibi ifade edebiliriz.

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (3.22)$$

Eşitlik 3.22' nin Laplace dönüşümü alındığında eşitlik 3.23 elde edilir.

$$T_w s \Delta\bar{U} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (3.23)$$

$$\Delta\bar{U} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (3.24)$$

Eşitlik 3.17' de ki $\Delta\bar{U}$, eşitlik 3.24' te yerine yazılırsa eşitlik 3.25' te doğrusal model elde edilir.

$$\frac{\Delta\bar{P}m}{\Delta\bar{G}} = \frac{1 - T_w s}{1 + \frac{1}{2} T_w s} \quad (3.25)$$

Doğrusal olmayan sistem modeli için eşitlik 3.11 – 3.14, doğrusal sistemde olduğu gibi geçerlidir. Hız eşitliğinde hidrolik düşü için $t = 0$ anındaki değeri kullanılarak doğrusal olmayan hız değişim denklemi eşitlik 3.26' daki gibi elde edilir.

$$\frac{d}{dt} U = -\frac{a_g}{L} (H - H_0) \quad (3.26)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{U} = -\frac{1}{T_w} (\bar{H} - \bar{H}_0) \quad (3.27)$$

Eşitlik 3.27' nin Laplace gösterimi eşitlik 3.28' deki gibi yazılabilir.

$$\frac{\bar{U}}{\bar{H} - \bar{H}_0} = -\frac{1}{T_w s} \quad (3.28)$$

Eşitlik 3.21' deki denklemde anma değerler kullanılırsa, suyun hareket süresi eşitlik 3.29' daki gibi elde edilir.

$$T_w = \frac{LQ_r}{a_g A H_r} \quad (3.29)$$

Türbinin eylemsizliğinden ve kayıplardan dolayı türbinin dönmesi için minimum su hızına ihtiyaç vardır. Minimum su hızının oluşturduğu mekanik güç, türbin kayıplarıdır. Mekanik güç çıkışı P_m eşitlik 3.30'daki gibi yazılabilir.

$$P_m = P - P_L \quad (3.30)$$

$$P_L = U_{NL} H \quad (3.31)$$

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \bar{H} \quad (3.32)$$

$$\bar{G} = A_t \bar{g} \quad (3.33)$$

burada

P_L , türbinin sabit güç kayıpları

U_{NL} , yüksüz durumdaki su hızı

A_t , türbin kazancı

Su kolonu denklemini eşitlik 3.34' te verilmiştir.

$$\frac{d}{dt} \bar{U} = -\frac{1}{T_w} \left[\left(\frac{\bar{U}}{A_t \bar{g}} \right)^2 - \bar{H}_0 \right] \quad (3.34)$$

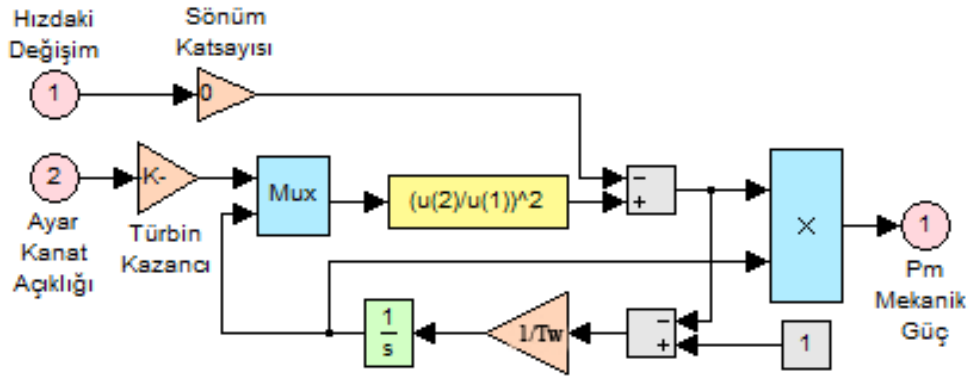
Türbin denklemi eşitlik 3.35' teki gibi yazılabilir.

$$\bar{T}_m = \frac{\bar{U} - \bar{U}_{NL}}{\bar{\omega}} \left(\frac{\bar{U}}{A_t \bar{g}} \right)^2 \bar{P}_r \quad (3.35)$$

Eşitlik 3.34' ten yüksüz koşul göz önüne alınarak kalıcı durum eşitliği 3.36' da verilmiştir.

$$U_{NL} = A_t \bar{g}_{NL} (\bar{H}_0)^{1/2} \quad (3.36)$$

Şekil 3.34' te Matlab/Simülink' te oluşturulmuş doğrusal olmayan hidrolik türbin modeli görülmektedir.



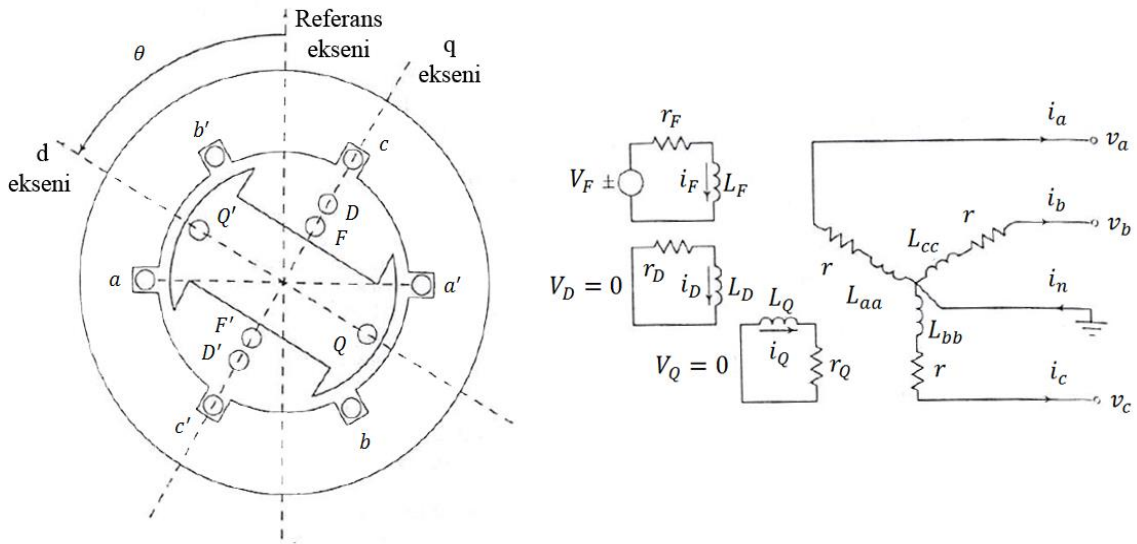
Şekil 3.34. Simülasyonu gerçekleştirilen hidrolik türbinin blok diyagramı

3.7.2 Senkron Generatör Modeli

Termik santrallerdeki senkron generatörün rotoru genellikle yüksek hızlarda çalıştırılırken, hidrolik türbinlerin büyük kütlelerinden dolayı hidroelektrik santrallerdeki senkron generatörlerin hızı oldukça yavaştır. Bu nedenle hidroelektrik santrallerde kullanılan generatörler genellikle çıkık kutuplu senkron generatörlerdir. Dolayısıyla bu çalışma boyunca çıkık kutuplu generatörlerin analizi yapılacaktır.

Modelleme çalışmaları boyunca aşağıdaki varsayımlar yapılır (Machowski 2008):

- (i) Üç faz stator sargıları simetriktir.
- (ii) Tüm sargıların kapasitans etkisi ihmal edilir.
- (iii) Dağıtım sargılarının herbiri yoğunlaştırılmış bir sargı ile temsil edilebilir.
- (iv) Rotor pozisyonu, stator sargılarının endüktans değişimi nedeniyle sinüsoidaldir ve daha yüksek harmonik içermez.
- (v) Histerisis kayıpları göz ardı edilebilir ancak sönüm sargılarında ki eddy akımlarının etkisi modele dahil edilebilir.
- (vi) Geçici ve alt geçici durumda rotor hızı senkron hıza yakındır ($\omega \cong \omega_s$).
- (vii) Manyetik devreler doğrusaldır (doymamış) ve endüktans değerleri akıma bağlı değildir.



Şekil 3.35. Senkron generatörün stator ve rotor devresi (Saadat 1999)

Çıkık kutuplu senkron generatörün stator ve rotor devresi şekil 3.35’ te görülmektedir. Generatörün üç fazlı stator armatür sargıları (a, b, c harfleri ile gösterilen), rotor üzerine monte edilmiş alan sargısı (F ile gösterilen), rotor üzerine eklenmiş iki adet fiktif sargılar, biri d eksenı boyunca (D ile gösterilen) ve diğeri q eksenı boyunca (Q ile gösterilen) yerleştirilmiştir. Bu fiktif sargılar kısa devre edilmiş sönüm sargılarının modelidir.

Stator akımları generatörün terminallerinden pozitif yönde dışarı doğru aktığı varsayılır. Generatörün gerilim denklemi eşitlik 3.37' deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ -v_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Eşitlik 3.37' deki denklem eşitlik 3.38' de kompakt bir yapıda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ V_{FDQ} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Generatörün her bir sargısında endüklenen akı diğer tüm sargı akımlarına bağlı olduğundan dolayı akı denklemi eşitlik 3.39' daki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Eşitlik 3.39' daki denklem eşitlik 3.40' daki kompakt bir yapıda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

burada

r , statorun fazör sargılarının dirençleri

r_F , uyarım sargısının direnç değeri

r_D, r_Q , sönüm sargılarının dirençleri

v_{abc} , stator fazör sargılarının gerilimleri

v_{FDQ} , uyarım ve sönüm devresinin gerilimleri

i_{abc} , stator fazör sargılarının akımları

i_{FDQ} , uyarım ve sönüm devresinin akımları

λ_{abc} , stator fazör sargılarının toplam akıları

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} , stator sargılarının öz endüktansları

L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} , stator sargıları arasındaki karşıt endüktanslar

L_{aF}, L_{aD}, L_{aQ} , stator a fazı ve rotor sargıları arasındaki karşıt endüktanslar

L_{FF}, L_{DD}, L_{QQ} , rotor sargılarının öz endüktansları

3.7.1.1 Çıkık Kutuplu Senkron Generatörün Endüktans Bağlılıları

Rotor endüktansındaki değışim d ve q eksenleri boyunca aynı değildir. Oysa rotor sargısının manyeto motor kuvveti (mmf) daima d veya q eksenleri boyunca yönelirler. Bu iki eksene bağılı stator sargılarında ortaya çıkan mmf' nin yönü güç faktörüne bağılı olarak değışecektir. d ve q eksenleri boyunca, stator bileşke mmf' sinin manyetik etkisini çözmek için sistematik olarak ortak bir yaklaşım yürütölür.

Rotor açısı ile a fazına ait akı bağıntısı arasındaki fonksiyonel ilişkiye dayanarak statorun a faz sargısının öz endüktansı eşitlik 3.41' de verilmiştir. b ve c faz sargılarının öz endüktansı, faz sargıları arasında 120° lik elektriksel açı farkı olacak şekilde eşitlik 3.42 ve 3.43' teki gibi temsil edilir.

$$L_{aa} = L_s + L_m \cos 2\theta \quad (3.41)$$

$$L_{bb} = L_s + L_m \cos 2(\theta - 2\pi/3) \quad (3.42)$$

$$L_{cc} = L_s + L_m \cos 2(\theta + 2\pi/3) \quad (3.43)$$

Burada θ , a fazının referans manyetik ekseni ve d ekseni arasındaki açıdır. Stator sargılarının a ve b fazı arasındaki yöndeş akı bağıntısı eşitlik 3.44' te, benzer şekilde L_{bc} ve L_{ca} yöndeş endüktansları da eşitlik 3.45 ve 3.46' daki gibi elde edilir.

$$L_{ab} = L_{ba} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + \pi/6) \quad (3.44)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -M_s - L_m \cos 2(\theta - \pi/2) \quad (3.45)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -M_s - L_m \cos 2(\theta + 5\pi/6) \quad (3.46)$$

Stator oyukları ve doyum etkileri ihmal edildiğinden rotorun bütün öz endüktansları sabittir. Bunlar tek simge gösterimi ile temsil edilmektedir ve eşitlik 3.47' de verilmiştir (Saadat 1999).

$$L_{FF} = L_F, \quad L_{DD} = L_D, \quad L_{QQ} = L_Q \quad (3.47)$$

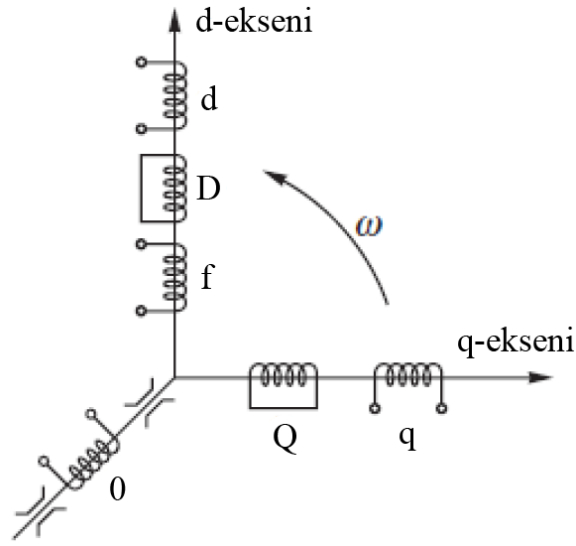
Rotor sargılarının öz ve karşıt endüktans değerleri sabit ve rotorun konumuna bağlı değildir. d veya q eksen sargıları birbirine dik ve karşılıklı endüktansları sıfıra eşittir (Machowski 2008). Bu durum eşitlik 3.48' de gösterilmiştir.

$$L_{FD} = L_{DF} = M_R, \quad L_{FQ} = L_{QF} = 0, \quad L_{DQ} = L_{QD} = 0 \quad (3.48)$$

Bu denklemlerden de açıkça görülmektedir ki L_{SS} ve L_{SR} endüktansları rotor açısının bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Rotorun hız oranına bağlı olarak L_{SS} ve L_{SR} elemanlarının büyüklük değerleri değişmektedir. Her bir faza ait olan büyüklüklerin çözümü için eşitlik (3.38) kullanıldığında, zamana bağlı katsayıların hesaplanması oldukça güçtür. Akı bileşenlerinden faz akımlarını elde etmek için zamana bağlı olarak değişen endüktans matrislerinin tersini her bir zaman periyodu için hesaplamak gerekir. Her bir zaman periyodu için tersi alınan endüktans matrislerinin hesaplanması zaman kaybına neden olacağı gibi sayısal problemler üretebilir (Oğuz 2007).

3.7.1.2 Park ($dq0$) Dönüşümü

Duran kısımda bulunan stator (a, b, c) faz sargılarına ilişkin denklemleri, rotorla birlikte hareket eden (d, q) eksen takımına göre uyarlamak gerekmektedir. Dönüşümün temel ilkesi rotor ve stator arasındaki bağıl hareketi ortadan kaldırmak için rotor ve stator büyüklüklerini aynı referans eksen takımına taşımaktır. Bu işlem için simetrik park dönüşümleri kullanılmaktadır (Oğuz 2007). Senkron generatörün $dq0$ çerçevesinde temsil edilen fiktif dik sargılar şekil 3.36' da gösterilmektedir.



Şekil 3.36. $dq0$ çerçevesindeki senkron generatörün temsili gösterimi (Gençoğlu 2006)

Generatör çalışma durumunda şekil 3.36’ da görüldüğü gibi abc eksenini dq eksen takımına dönüştürüldüğünde q eksen d ekseninden 90° ileridedir. Akımlar için Park dönüşümü eşitlik 3.49’ daki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} I_{0dq} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

burada

I_{0dq} , $0, d, q$ eksen akımlarına karşılık gelen 3×1 matris

I_{FDQ} , F, D, Q eksen akımlarına karşılık gelen 3×1 matris

I_{abc} , a, b, c eksen akımlarına karşılık gelen 3×1 matris

W , eşitlik 3.50’ deki 3×3 dönüşüm matrisi

I , 3×3 birim matrisi

$$W = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

Park dönüşüm matrisi ortogonal matristir. Yani matrisin transpozesi ile tersi birbirine eşittir ($W^T = W^{-1}$) ve bu durumda gücün sabit olması önemli bir özelliktir (Saadat 1999).

Generatör gerilim denklemleri temel Kirchoff' un gerilim kanunu ile endüktans ve sargı dirençleri de dikkate alınarak elde edilebilir. Akı bağıntılarını elde etmek için eşitlik 3.49' un ters dönüşümü alınarak eşitlik 3.51 elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0dq} \\ I_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Açık bir ifadeyle, eşitlik 3.51' deki denklem takımı eşitlik 3.52' deki gibi yazılabilir. Bu eşitliğe göre rotor ve stator eksenleri birbirlerine göre hareketsizdir ve bu Park denklemi senkron makine dinamik çalışmalarında yaygın olarak kullanılır (Gençoğlu 2006).

$$\begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_F \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 & kM_F & kM_D & 0 \\ 0 & 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ 0 & kM_F & 0 & L_F & M_R & 0 \\ 0 & kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Burada $k = \sqrt{\frac{3}{2}}$ ' dir. Eşitlik 3.52' de tanıtilan L_0, L_d, L_q parametreleri eşitlik 3.53, 3.54 ve 3.55' te verilmiştir.

$$L_0 = L_s - 2M_s \quad (3.53)$$

$$L_d = L_s + M_s + \frac{3}{2}L_m \quad (3.54)$$

$$L_q = L_s + M_s - \frac{3}{2}L_m \quad (3.55)$$

Şekil 3.36’ da gösterilen generatör devresinde Kirchoff’ un gerilim kanunu yazılırsa eşitlik 3.56 elde edilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_{0dq} \\ v_{FDQ} \end{bmatrix} = & - \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{abc} & 0 \\ 0 & R_{FDQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{0dq} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} W & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left\{ \begin{bmatrix} W^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{0dq} \\ \lambda_{FDQ} \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (3.56)$$

Sargılar üzerinde endüklenen gerilimin iki bileşeni olan dönüşüm matrisi W ile akı bağıntısının zaman fonksiyonları elde edilmektedir. Bu da dönme emk’ sı olarak isimlendirilir (açısal hız ω ile terimlerin çarpımı). Burada önemli olan nokta d ekseninin dönme emk’ sı q ekseninin akısı ile endüklenirken q ekseninin dönme emk’ sı da d ekseninin akısı ile endüklenir. İşaretler varsayımların bir sonucudur. Akının değişim oranı ile orantılı olan endüvi emk’ sı, dönüşüm emk’ sı olarak adlandırılır (Gençoğlu 2006). Aşağıda verilen denklem takımları, stator devresine göre rotora ait büyüklükleri ve rotorun dq referans ekseninde senkron makinanın gerilim denklemlerini içerir.

$$\begin{aligned} v_0 &= -ri_0 - \dot{\lambda}_0 \\ v_d &= -ri_d - \dot{\lambda}_d + \omega\lambda_q \\ v_q &= -ri_q - \dot{\lambda}_q - \omega\lambda_d \\ v_F &= r_F i_F + \dot{\lambda}_F \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\lambda}_D \\ 0 &= r_Q i_Q + \dot{\lambda}_Q \end{aligned} \quad (3.57)$$

3.7.1.3 Senkron Makinede Elektromagnetik Moment

Senkron makine tarafından üretilen elektromagnetik moment, giriş gücü bileşeninden elde edilir. Senkron makinanın toplam giriş gücü eşitlik 3.58’ deki gibi ifade edilir.

$$P_{in} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c + v_f i_f + v_g i_g \quad (3.58)$$

Stator faz sargısına ait büyüklükler rotorun $dq0$ eksen takımına göre dönüşümü yapıldığında eşitlik 3.58 tekrar düzenlenirse, eşitlik 3.59 elde edilir (Ong 1998).

$$P_{in} = \frac{3}{2}(v_q i_q + v_d i_d) + 3v_0 i_0 + v_f i_f + v_g i_g \quad (3.59)$$

Eşitlik 3.59' daki omik kayıplar ve manyetik enerjideki değişim oranı elimine edilirse elektromagnetik güç denklemi, eşitlik 3.60 gibi yazılabilir.

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.60)$$

P-kutuplu makine için $\omega_r = (P/2) \omega_{rm}$, (burada ω_{rm} , mekanik açısal hız) olacağından eşitlik 3.60 tekrar düzenlenirse;

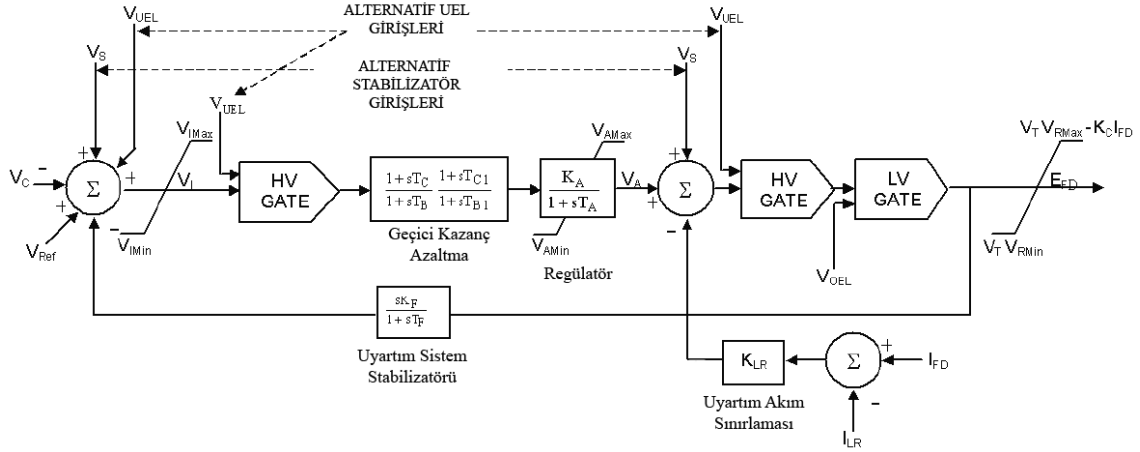
$$P_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \omega_{rm} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.61)$$

Elektromekanik güç rotorun mekanik hızına bölüldüğünde, P-kutuplu senkron makine tarafından üretilen elektromekanik tork eşitlik 3.62' deki gibi yazılır (Oğuz 2007).

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3.62)$$

3.7.3 Uyarım Sistemi Modeli

DC ve AC tip uyarım sistemleri generatörle aynı şaft üzerindedirler ve ana kuvvet mili (şaft) tarafından sürülürler. DC tip uyarım sistemlerinin çoğunda primer uyarım gücü, alan sargısı senkron makine rotoruyla aynı mil üzerine yerleştirilmiş bir DC generatörden sağlanır. DC generatör, ana uyarıcı işlevi görür ve bir pilot uyarıcı ile de ayrıca uyarılır. AC ve statik tip uyarım sistemleri, faz kontrolü ile kontrol edilirler. Tristör içeren kontrollü doğrultuculardan oluşan ST tip uyarım sistemleri, hızlı cevaba sahip elektronik regülatörler kullanırlar (Caner 2006). Şekil 3.37' de Adıgüzel HES' te kullanılan ST1A uyarım sistem modeli görülmektedir.



Şekil 3.37. ST1A uyartım sistem modelinin blok diyagramı (IEEE Std 421.5 2005)

Gerilim regülâtörünün ana zaman sabiti T_A , kazanç ise K_A ile temsil edilir. T_B ve T_C ise regülâtör içerisindeki geçici kazanç azaltım bloğuna ait zaman sabitleridir. Gerilim regülâtörü çıkışı V_R uyarıcıyı kontrol etmek için kullanılır. Uyartım geriliminden K_F kazancı ve T_F zaman sabiti yoluyla türetilen V_F sinyali de uyartım sisteminin kararlılığının artırılmasında kullanılır (IEEE Std 421.5 2005).

Şekil 3.37’ deki uyartım sisteminde geçici kazanç azaltma, regülâtör, uyartım sistem denetleyicisi ve uyartım akım sınırlaması blokları ayrı ayrı oluşturulmuştur. Uyartım için gereken güç, generatör çıkışından bir uyartım trafosu üzerinden sağlanır ve bir ayarlı tristörlü AA/DA dönüştürücüsü ile kontrol edilir. Bundan dolayı uyartım tavan gerilimi, generatör çıkış gerilimi ile doğru orantılıdır. I_{LR} ve K_{LR} , uyartım akım sınırlamasını gösteren parametrelerdir. Bu parametreler uyartım sistemini korumak için kullanılır. K_C denetleyicinin gerilim oranını gösterir, değeri çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Böylece sistemin çıkışındaki sınırlama $V_{R\min}$ ile $V_{R\max}$ arasında kalır.

3.8 Güç Üretim Sistemlerinde Arıza Durumları

Kısa devre neticesinde akımların artması elektrik devre elemanları için tehlikelidir, gerilimin azalması ise tüketicilerin çalışmasına olumsuz etki yapar. Daha düşük gerilimle çalışma durumunda kalan elektrikselsel cihazlar ve elemanlar öngörülen davranışlardan saparlar. Kısa devre olaylarının başlıca türleri ve gerçekleşme olasılıkları aşağıdaki gibidir (Şerifoğlu 2006).

- (i) 3 fazlı (%1–7)
- (ii) 2 fazlı (%2–13)
- (iii) 2 faz – toprak (%5–20)
- (iv) 1 faz – toprak (%60–92)

İlk verilen üç fazlı kısa devre simetrik, diğerleri ise simetrik olmayan kısa devrelerdir. Kısa devre hesaplamaları, bir elektrik devresinde belirli bir kısa devre türü için akım ve gerilimlerin belirlenmesi anlamındadır. Karmaşık, çok makineli elektrik sistemlerinde ayrıntılı ve doğrulukla kısa devre hesaplamaları yapmak çok güçtür. Hesaplamaları kolaylaştırmak için bazı genel sadeleştirmeler yapmak mümkündür (Şerifoğlu 2006).

- (i) Sistem elemanlarında manyetik sistemin doyması ihmal edilir. Bu durumda eşdeğer devrede tüm elemanların reaktansları doğrusal alınır.
- (ii) Transformatörlerde mıknatıslanma devresinin akımı ve reaktansı ihmal edilir. Bu durumda eşdeğer devrede yalnızca boyuna reaktanslar kalır.
- (iii) Üç fazlı sistem simetrik kabul edilir.
- (iv) Devre elemanlarının dirençleri ve kapasitansları genellikle ihmal edilir. Bu durumda eşdeğer devre yalnızca reaktanslardan oluşur (gerilimi 220kV’ tan fazla olan hatlarda kapasitansların, gerilimi 1000V’ tan az olan hava elektrik iletim hatlarının dirençlerinin dikkate alınması gerekir).
- (v) Sistemin düğüm yükleri (tüketiciler) sadeleştirilmiş bir eşdeğer devre (Thevenin veya Norton devresi) ile dikkate alınır ve sistemin tümüne ilişkin eşdeğer devrede eşdeğer bir reaktans olan EMK gibi gösterilebilir.
- (vi) Sistemdeki senkron makinelerin elektromekanik salınımları ihmal edilir. Diğer bir ifade ile tüm generatörlerin ürettiği EMK’ ların faz açıları sabit kabul edilir.

Belirtilen sadeleştirmeler dikkate alındıktan sonra sistemin eşdeğer devresi kurulur ve sistemdeki elemanların parametreleri (aktif elemanlar için EMK’ lar ve reaktanslar, pasif elemanlar için yalnızca reaktanslar) hesaplanır. Doğrusal, çok düğümlü ve çok gözlü eşdeğer devrede Ohm ve Kirchoff yasaları yardımıyla şemanın istenen noktasında gerilim ve akımları hesaplamak mümkündür.

Bir kısa devre olayında meydana gelen akımın alternatif bileşen değeri eşitlik 3.63 ve 3.64 genel ifadeleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$E_y = \frac{E}{\sqrt{3}} \quad (3.63)$$

$$I_k = \frac{E_y}{\sum Z_{(1,2,0)}} \quad (3.64)$$

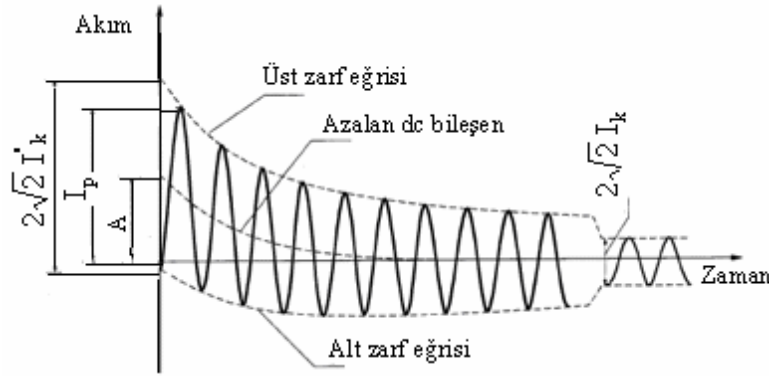
burada

E_y , generatörün elektromotor kuvveti (faz-nötr)

I_k , sürekli kısa devre akımı

$Z_{(1,2,0)}$, empedansın doğru, ters ve sıfır bileşenleri

Şekil 3.38’ de üç fazlı bir senkron generatörün fazlarından herhangi birinin kısa devre edilmesiyle oluşan kısa devre akımının değişimi verilmiştir.



Şekil 3.38. Generatöre yakın bir kısa devre arızası

Kısa devre akımı önce maksimum bir tepe değere (darbe akımı, I_p) ulaşmakta ve bu akım önce hızlı, sonrasında da sönümlenerek kararlı bir sürekli kısa devre akımına (I_k) düşmektedir. Akım kısa bir süre için yatay eksene göre asimetriktir. Şayet kısa devre arızası, generatörden uzakta bir noktada meydana gelirse, generatör empedansları şebeke empedanslarına göre etkilerini kaybederler. Kısa devre akımının başlangıç değeri, kararlı kısa devre akım değerinden çok az farklıdır (Doğruer 2007).

4. BULGULAR

4.1 Giriş

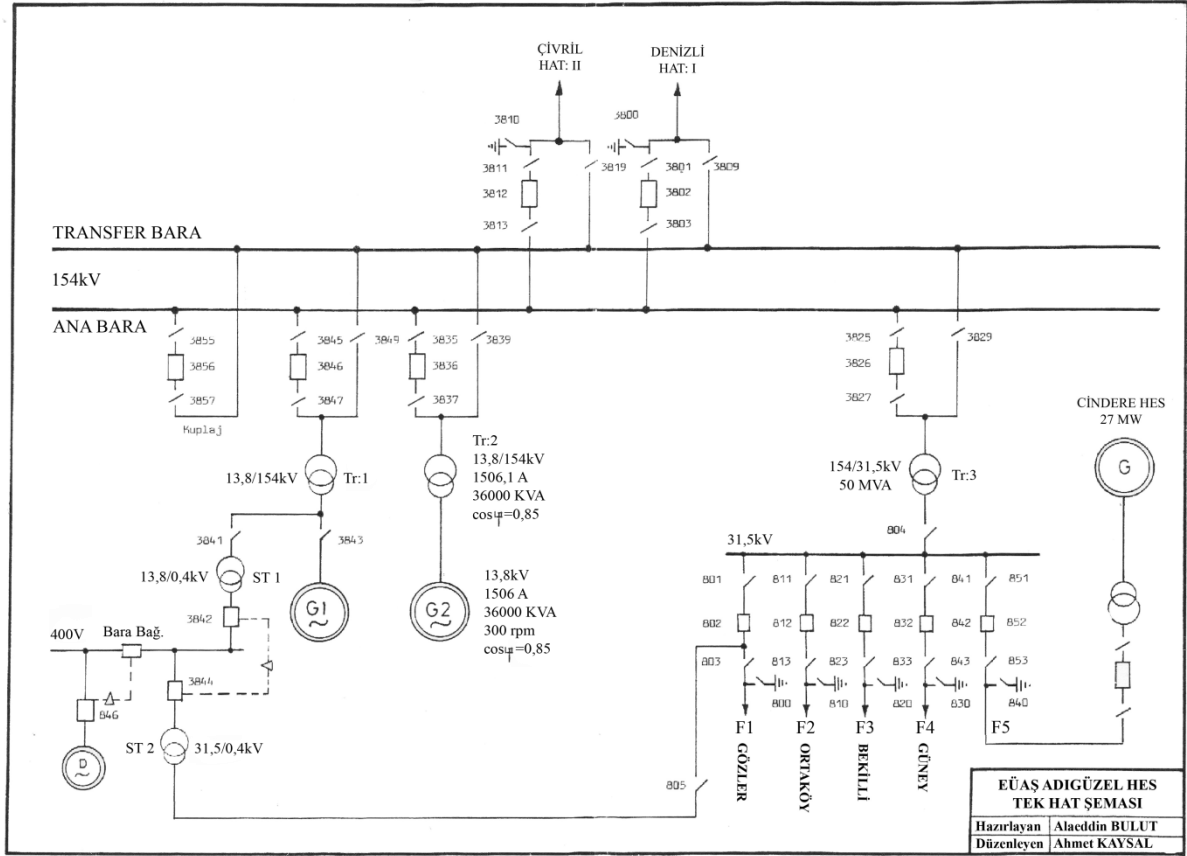
Bu bölümde, kurulacak olan iki farklı güç sistem modeli ile şu an işletmede olan Adıgüzel HES' in gerçek verileri kullanılarak simülasyon çalışması yapılacaktır. Simülasyon için uluslararası alanda kabul görmüş ve aynı zamanda güç sistem analiz programı olan Matlab 7.10 / Simulink 7.5 kullanılmıştır.

Adıgüzel HES enterkonnekte sisteme, şekil 4.1' deki tek hat şemadan da görüldüğü gibi Denizli ve Çivril olmak üzere iki iletim hattı üzerinden bağlantısını sağlamaktadır. Şalt sahasında biri ana bara diğeri transfer bara olmak üzere 2 adet 154 kV bara sistemi bulunmaktadır. Santralde 2 adet ünite bulunduğundan dolayı şalt sahasında 36MVA gücünde ONAF tipinde 2 adet güç transformatorü vardır.

Şalt sahasında bulunan ayırıcılar, çift döner izolatörlü harici tip ayırıcılardır. Ayırıcıların nominal çalışma gerilimi (V_n) 170 kV, nominal çalışma akımı (I_n) 1250 A, termik anma akımı (I_{th}) 31,5 kA, dinamik anma akımı (I_{dyn}) 79 kA' dir.

Şalt sahasında bulunan kesiciler, SF6 gazlı olup nominal çalışma gerilimi 170 kV, nominal çalışma akımı 1600 A, kısa devre akımı 31,5 kA (1 saniye boyunca), 20 °C' deki SF6 gaz basıncı 6 bardır.

Trafo merkezi niteliği de taşıyan Adıgüzel HES' te bir de 50 MVA gücünde indirici tip güç transformatorü bulunmaktadır. 154 kV' luk ana baraya bağlı olan Tr: 3 koduyla tek hat şemada görülmektedir. Tipi: T.S.P.H. 74029, 3 faz, 50 Hz ve transformator sargıları yıldız bağlıdır. Kısa devre dayanma süresi 6 saniyedir. Trafonun AG tarafındaki gerilim 31,5 kV, YG tarafındaki gerilim değeri ise 154 kV' tur. Transformator Adıgüzel HES' in iç ihtiyacını ve Güney, Gözler, Bekilli, Ortaköy olmak üzere 4 adet fideri beslemektedir. Ayrıca 27 MW kurulu güce sahip Cindere HES' in enterkonnekte sisteme bağlantısı bu transformator üzerinden yapılmaktadır.



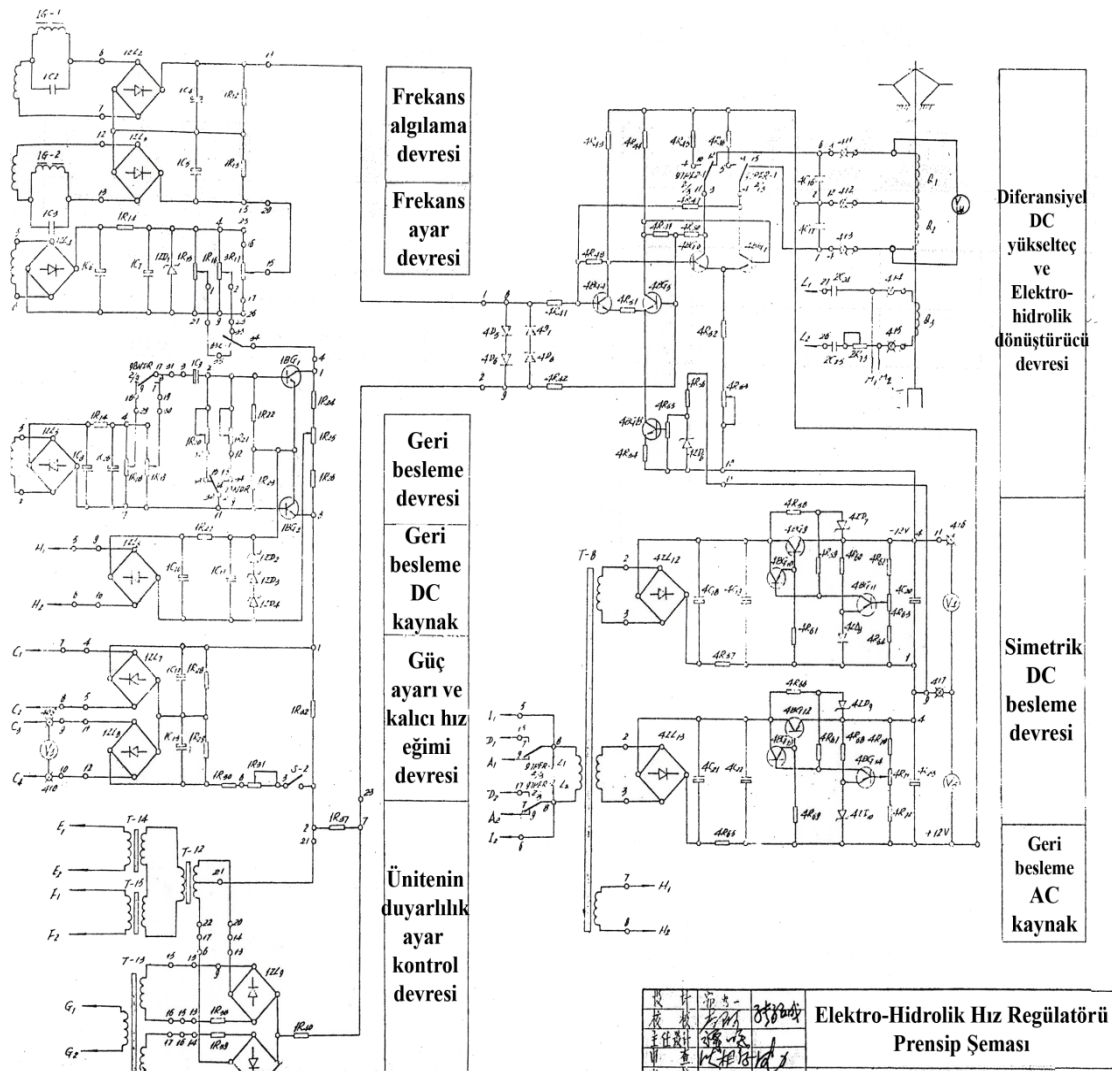
Şekil 4.1. Adıgözel HES tek hat şeması



Resim 4.1. Adıgözel HES' in salt tesisi

4.2 Elektro-Hidrolik Hız Regülatörünün Yapısı

BDT-3 tipinde ki elektro-hidrolik hız regülatörünün elektriksel devresi büyük ve orta Francis türbinin otomatik kontrol ve otomatik regülasyonu için üretilmiştir. Bu regülatöre ait elektronik kartların şemasının bulunduğu elektriksel proje şekil 4.2' de verilmiştir. Bu proje üzerinde frekans algılama ve ayar devresi, geri besleme (sönüm) devresi, güç ayarı ve kalıcı hız eğimi devresi, ünitenin duyarlılık ayar devresi, DC diferansiyel yükselteç ve elektro-hidrolik dönüştürücü devresi ve bu elektronik kartların çalışabilmesi için besleme devreleri bulunmaktadır.



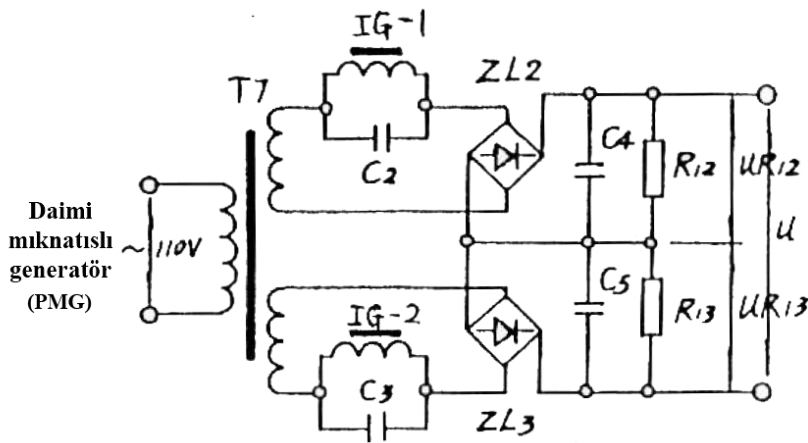
Şekil 4.2. BDT-3 tip elektro-hidrolik hız regülatörünün prensip şeması (Anonim 1986)

Kullanılmakta olan hız regülatörü aşağıdaki durumları gerçekleştirebilir.

- (i) Türbin hız ayarının düzenlenmesini sağlar.
- (ii) Şebekenin frekansını belirlenen kalıcı hız eğimi altında otomatik olarak ayarlar.
- (iii) Manuel kontrol ile generatör gücü ve frekansı belirlenen limitlerde değiştirilebilir.
- (iv) Ünite çalıştırılmak istendiğinde normal şartlarda otomatik olarak devreye alınır ve aynı şekilde otomatik olarak durdurulur. Ünitenin çalışma esnasında istenmeyen durumlarla karşılaşırsa, sistem otomatik olarak acil kapamaya gider ve regülasyon sisteminin güvenli çalışmasını sağlamak amacıyla gerekli koruma ekipmanlarını devreye sokar.

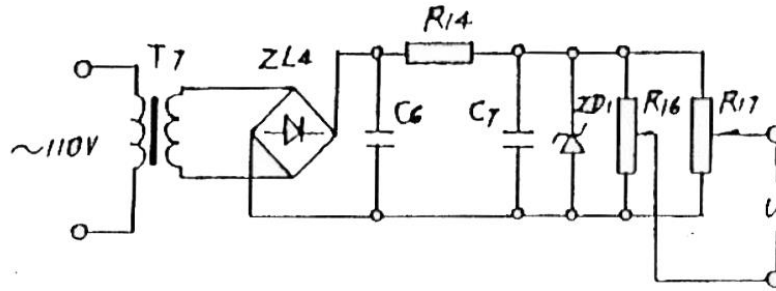
4.2.1 Hız Regülatöründeki Elektronik Sistemin Yapısı

Şekil 4.3' teki frekans ölçü devresinde senkron generatör ile aynı mile bağlı olan sabit mıknatıslı generatörden (PMG) gelen 110V AC gerilim (nominal devreye denk gelen gerilim değeri), T7 (1:1) transformatörü ve ilgili elektronik devre vasıtası ile senkron devreye karşılık gelen bir DC gerilime çevrilir. Bu sayede senkron generatörün o anki devrinin algılama işlemi gerçekleştirilmiş olur.



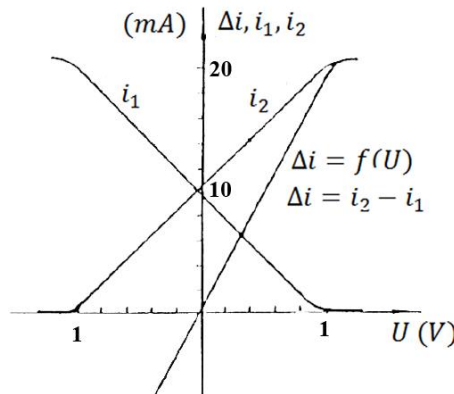
Şekil 4.3. Frekans ölçü devresi (Anonim 1986)

Aynı zamanda PMG' den gelen AC gerilim T7 transformatörünün 3. sargısı ile frekans ayar devresine uygulanmaktadır. Bu devre üzerindeki R16 ve R17 potansiyometreleri nominal devire denk gelen DC gerilimi ayarlar ve sabitler. Yani ünite dururken veya çalışırken şekil 4.4' teki frekans ayar devresinin çıkışında oluşan bu sabit gerilim ile üniteye ilk start verildiğinde şekil 4.3' teki frekans ölçü devresinin çıkışındaki gerilim farkından dolayı ayar kanatlarının açılması (%10) yönünde elektro valfe komut vererek ünitenin senkron devri bulması sağlanır. Buradaki önemli husus ünite durur vaziyetteyken T7 transformatörü şebekeden beslenmektedir.



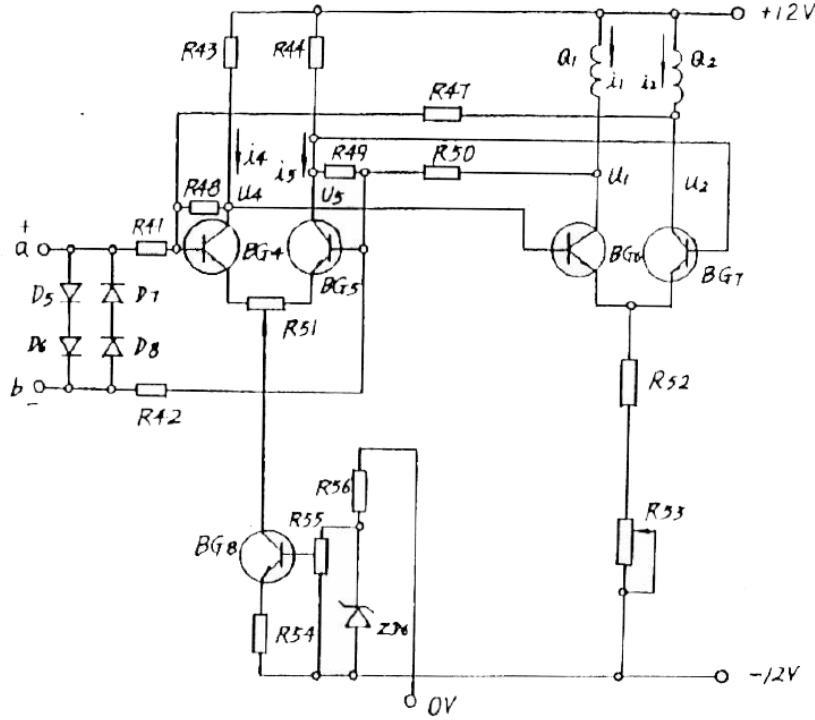
Şekil 4.4. Frekans ayar devresi (Anonim 1986)

Elektro-hidrolik hız regülatöründeki DC yükselteç devresinin görevi ise frekans ölçü devresinde oluşan mevcut gerilim ile geri besleme (sönümlleme) devresinden gelen gerilimin farkını alarak şekil 4.6' daki BG_4 ve BG_5 nolu NPN tipindeki silikon transistör vasıtası ile BG_6 ve BG_7 nolu transistörler + veya - balans durumuna göre aktif edilir. Neticede elektro valfin Q_1 ve Q_2 nolu bobinleri enerjilenerek basınçlı yağ yolların açılması veya kapanması sağlanmaktadır.



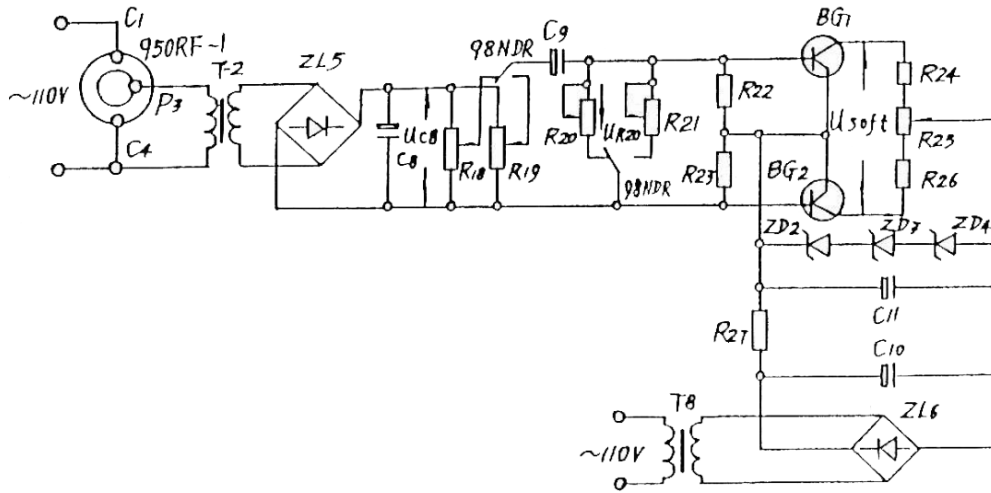
Şekil 4.5. Yükseltecin çıkış karakteristiği (Anonim 1986)

Şekil 4.5' teki karakteristik incelendiğinde i_1 ve i_2 akımları, elektro valfin bobinlerini kontrol eden sinyalin akımları, Δi diferansiyel akımı temsil etmektedir. Buna göre $\Delta i > 0$ ise, elektro valf ayar kanatlarını kapama yönünde komut verirken $\Delta i < 0$ durumunda da açma yönünde komut vermektedir. Ayrıca $\Delta i = 0$ iken sistem kararlı durumda kalmaktadır.

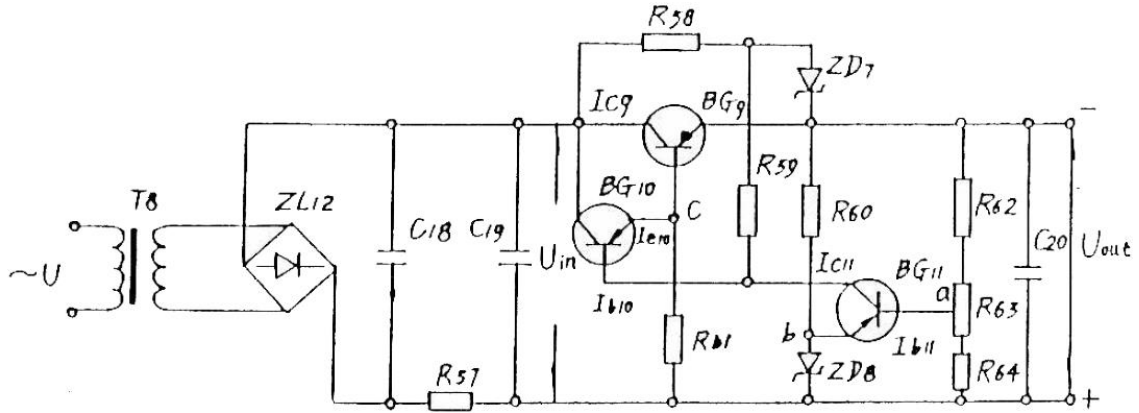


Şekil 4.6. DC Diferansiyel yükselteç (Anonim 1986)

Şekil 4.7' de sönümlleme (geri besleme) devresi görülmektedir. Bu devre üzerindeki 950RF – 1 nolu geri besleme motoru ile ayar kanatlarının pozisyonuna göre üzerindeki gerilim değişmektedir. Bu nedenle ayar kanatlarının ne oranda açıldığını algılayan ve bu bilgiyi DC diferansiyel yükseltece gönderen elektronik yapıdır. Şekil 4.2' deki elektro-hidrolik hız regülatörünün prensip şeması incelendiğinde ünite durur vaziyetteyken 950RF – 1 geri besleme motoru üzerindeki ayar kanatlarının pozisyon bilgisi şebeke vasıtası ile sağlanmaktadır.



Resim 4.2' de Adıgüzel HES' teki hız regülatörünün elektro-hidrolik dönüştürücü, ana dağıtım valfi, pilot valf ve restore mekanizmasından oluşan sistemi görülmektedir.



Şekil 4.9. Elektro-hidrolik hız regülatörü devresinin besleme devresi (Anonim 1986)



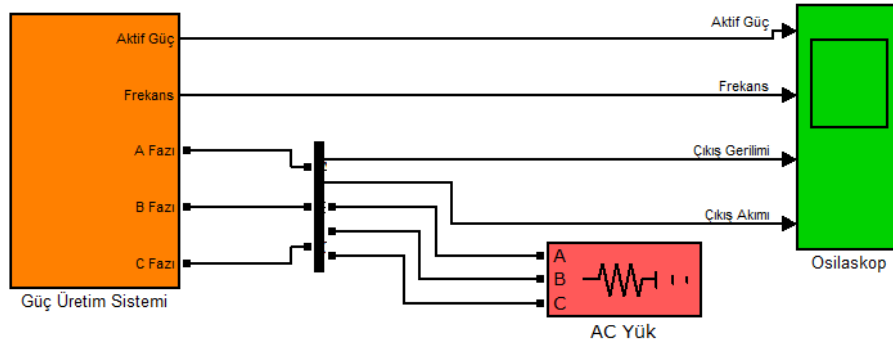
Resim 4.2. Hız regülatörünün mekanik ve hidrolik aksamı

Sonuç olarak, Adıgüzel HES' teki elektro-hidrolik hız regülatörünün kontrol sistemi incelenmiş olup sistemin gerilim ve frekans değişimlerine olan tepki süresini iyileştirmek ve sistemde oluşan salınımları en kısa sürede minimize etmek amacıyla PID ve BMK tasarlanmış, simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

4.3 Adıgüzel HES' in Simülasyonu ve Yük-Frekans Kontrolü

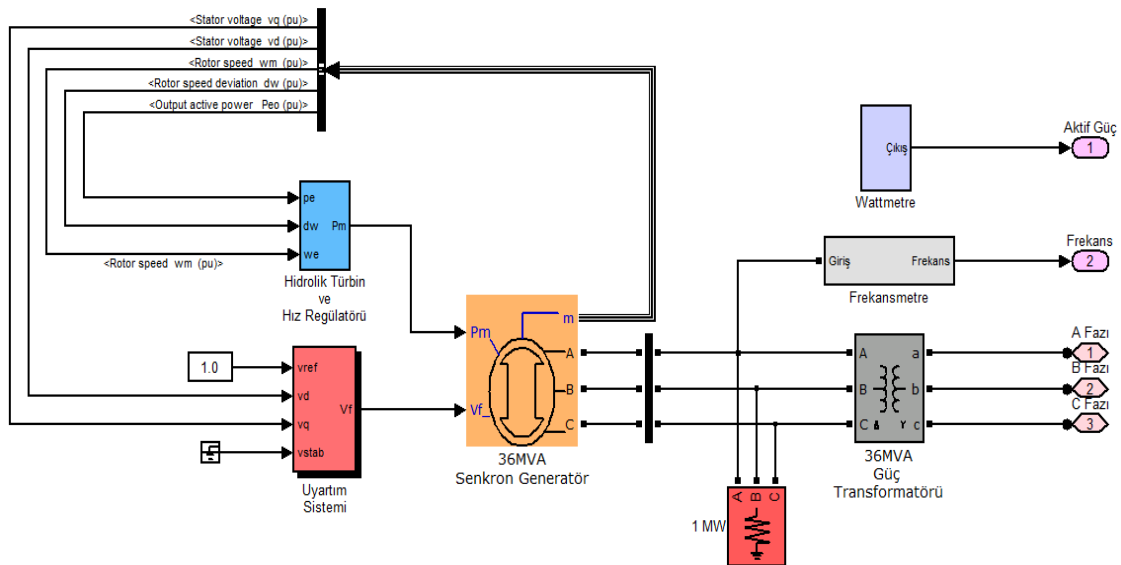
4.3.1 PID Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü

Adıgüzel HES' e ait güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı şekil 4.10' da verilmiştir. Sistem çıkışına 3 faz AC yük bağlanmış olup elektriksel büyüklükleri gösteren osilaskop vasıtasıyla sistem çıkışındaki tüketici gücü, sistem frekansı, terminal gerilimi ve yük akımı sinyallerinin analizi gerçekleştirilmiştir.

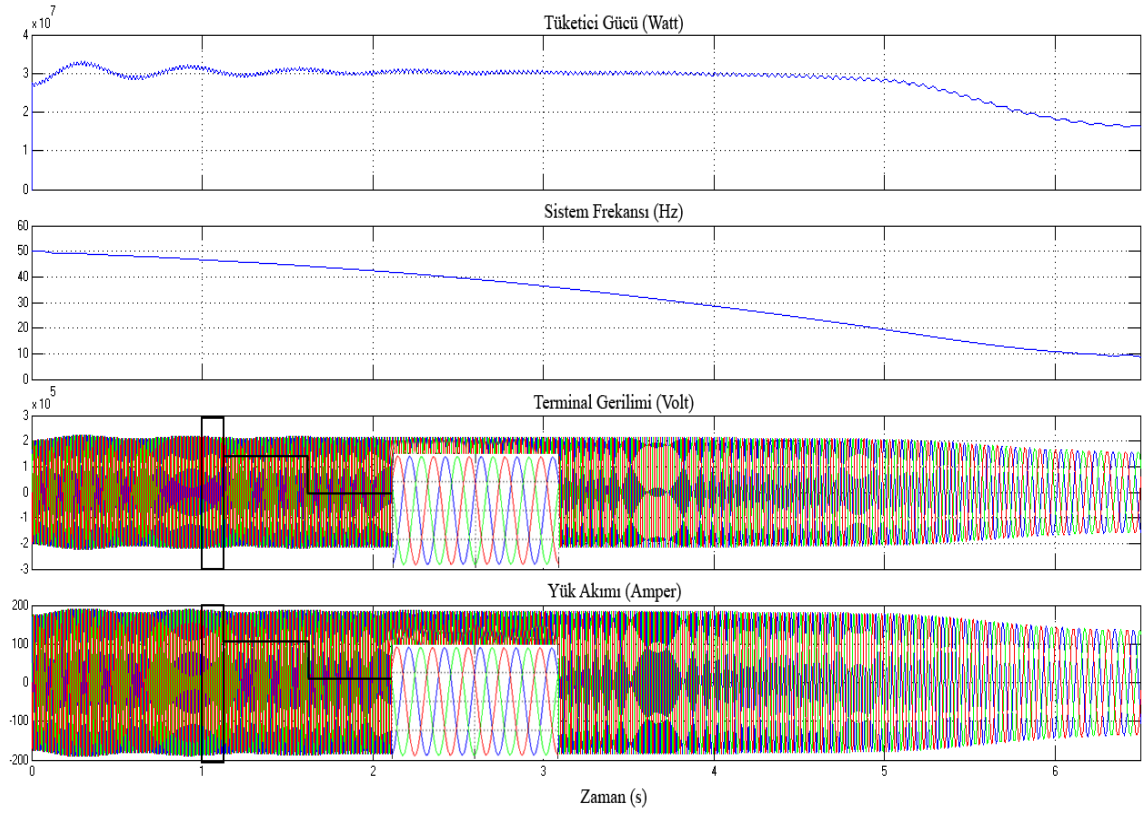


Şekil 4.10. Güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı

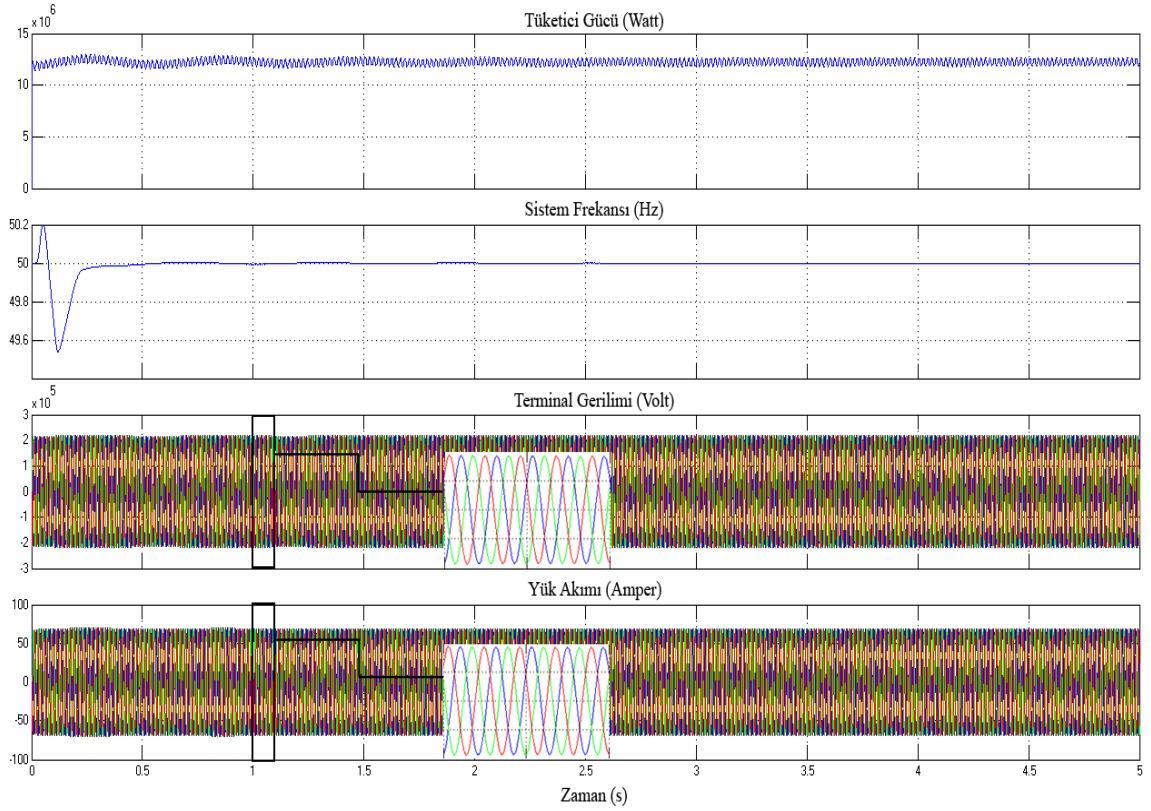
Güç üretim sistemi bileşenlerinin Matlab/Simulink programında gerçekleştirilen alt simülasyon blok diyagramı şekil 4.11' de verilmiştir. Blok diyagram, hidrolik türbin ve hız regülatörü, uyarım regülatörü, çıkık kutuplu senkron generator, güç transformatörü, yük, wattmetre, frekansmetre ve baralardan oluşmaktadır.



Şekil 4.11. Güç üretim sisteminin alt simülasyon blok diyagramı



Şekil 4.13. Hız kontrolsüz HES' in tam yük ile yüklendiğindeki simülasyon eğrileri



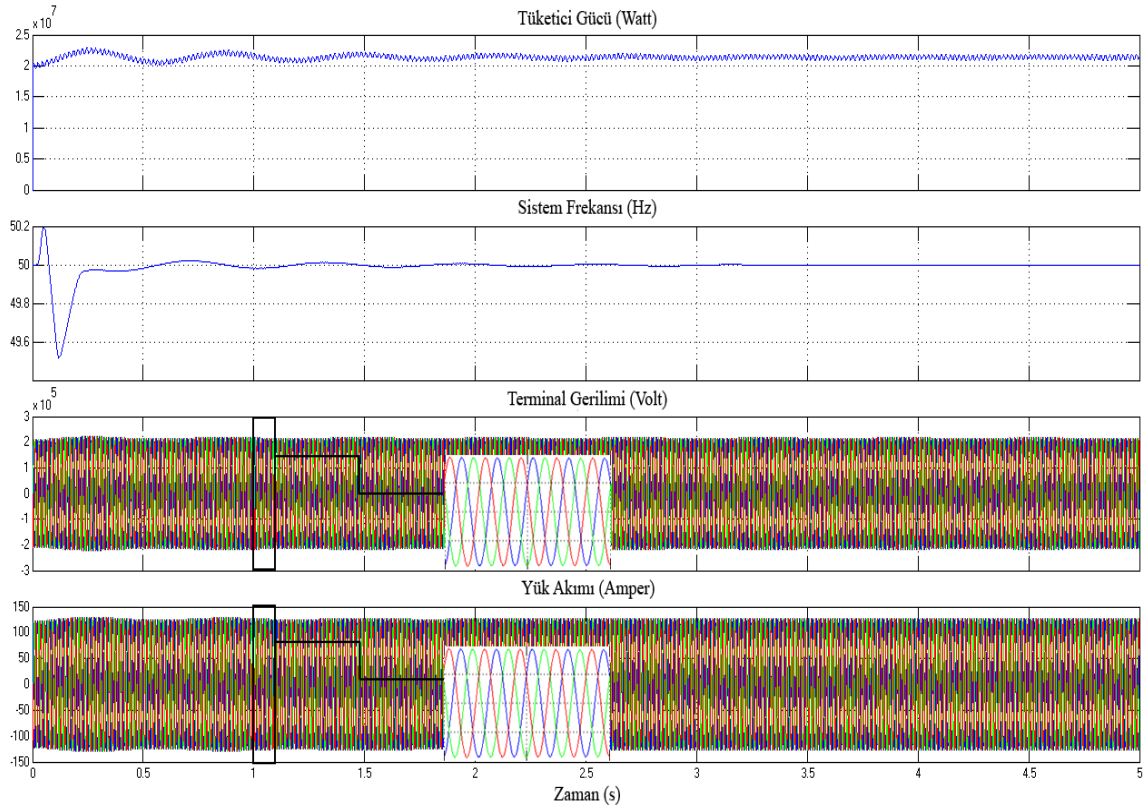
Şekil 4. 14. HES' in 12MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim

Hidrolik türbinin hız regülatörü devresinde herhangi bir kontrolör kullanılmadığında, sistemin elektriksel çıkış büyüklüklerindeki değişimler yapılan simülasyon sonucunda elde edilmiştir. Elektriksel büyüklükler; tüketici gücü (watt), sistem frekansı (Hz), terminal gerilimi (volt) ve yük akımı (amper) sinyalleri olarak ölçülmüştür.

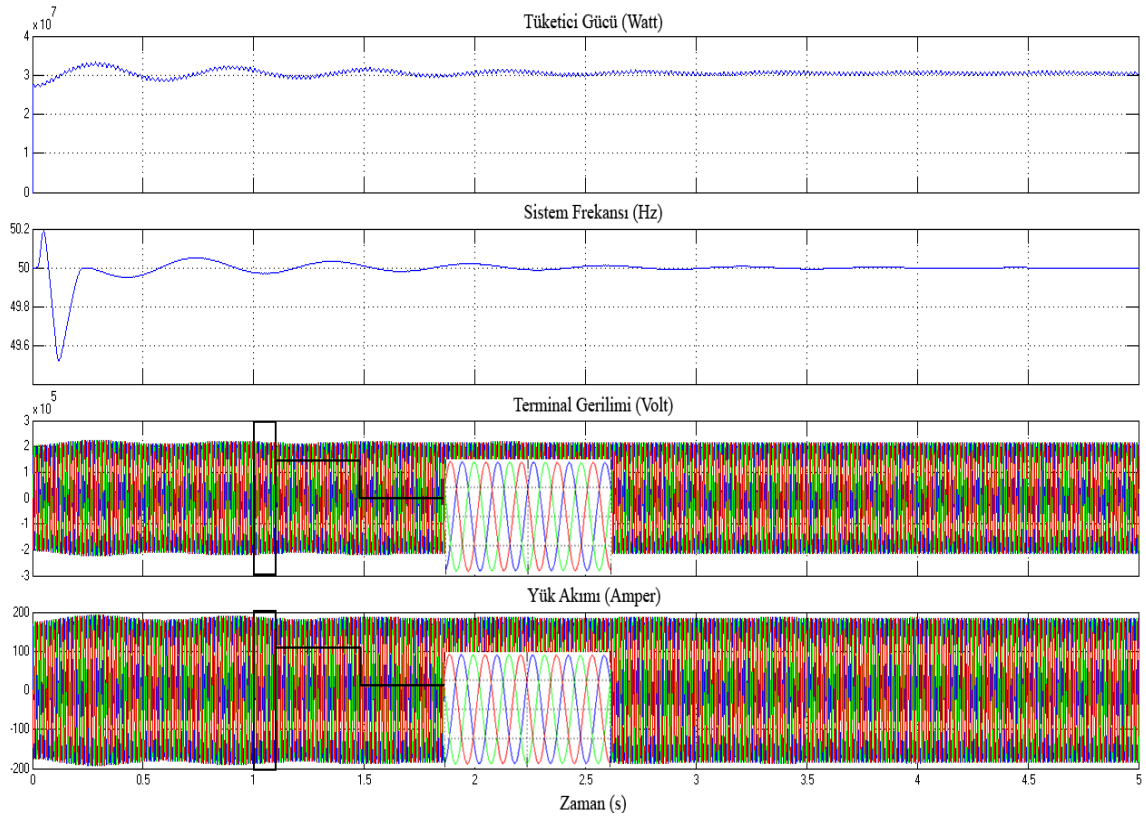
Şekil 4.13’ teki grafiklerde sistem tam yük, yaklaşık $30,6MW$ ile yüklendiğinde sistem frekansı izin verilen tolerans sınırlar dahilinde gerçekleşmediği ve senkron generatörün yaklaşık 5 saniye sonra talep edilen gücü karşılayamaz duruma geldiği ve sistemin 5. saniyeden sonra çöküşe geçtiği görülmüştür. Aynı şekilde gerilim, akım ve frekans değerleri minimum değere düşmüştür. Bu analiz sonucunda kontrolsüz güç üretim sistemini işletmek hem işletme yönünden hem de tüketicilerin temiz enerjiyi kullanması açısından mümkün değildir. Çünkü kontrolsüz olan sistemde üretilen gücün kalitesinden söz edemediğimiz gibi tüketicilerin maddi anlamda çok büyük zararlar göreceği aşikârdır. Bu nedenle hız regülatörü devresinde PID ve BMK ile simülasyon ve analiz çalışmaları yapılmıştır.

Şekil 4.12’ deki hidrolik türbin ve hız regülatörünün alt simülasyon blok diyagramında görüldüğü gibi hidrolik türbinin hız denetimi PID kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. HES’ in $12MW$, $21MW$ ve $30,6MW$ ’lık tüketici yükleri ile yüklenmesi durumundaki dinamik davranışı incelenecektir. Sistemin elektriksel çıkış büyüklüklerini istenilen değerlerde sınırlandırmak için PID kontrolörün kazanç katsayıları Matlab/Simulink içerisindeki PID(s) toolbox kullanılarak otomatik olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu katsayılar çizelge 3.12’ de verilmiştir. Ayrıca yapılan simülasyonlarda elektriksel çıkış büyüklüklerinin 120 saniye boyunca simülasyonu gerçekleştirilmiş ve güç üretim sistemi kararlı duruma gelmiştir. Ancak elektriksel çıkış büyüklüklerinin detaylı bir şekilde görülebilmesi için sistem, kararlılığa ulaştığı andaki 0–5 saniyelik kısmı sonuç olarak eklenmiştir. Bu durum simülasyonu yapılacak diğer grafikler için de geçerlidir.

Şekil 4.14’ teki simülasyon sonucuna göre sistem kararlı olduktan sonraki sinyallerin analizinde, senkron generatörün terminallerinden çekilen toplam yük yaklaşık $12MW$ ($0,4pu$), sistem frekansı arzu edilen sınırlar içerisinde, terminal gerilimi $V_{et} = 153,4kV$ ($V_{max} = 217kV$), yük akımı $I_{et} = 48,8A$ ($I_{max} = 69A$)’ dir.



Şekil 4.15. HES' in 21MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim

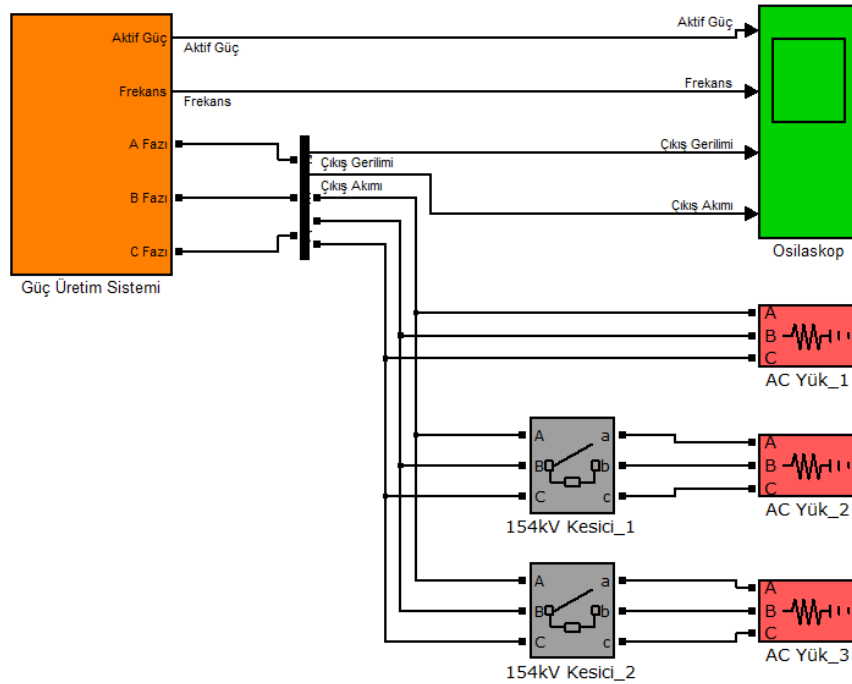


Şekil 4.16. HES' in 30,6MW ile yüklendiğinde çıkış büyüklüklerindeki değişim

Şekil 4.15’ teki simülasyon sonucuna göre sistem kararlı olduktan sonraki analizde, senkron generatörün terminallerinden çekilen toplam yük yaklaşık $21MW$ ($0,7pu$), sistem frekansı arzu edilen tolerans sınırlar içerisinde, efektif terminal gerilimi $V_{et} = 152,7kV$ ($V_{max} = 216kV$), efektif yük akımı $I_{et} = 90A$ ($I_{max} = 127A$)’ dir.

Şekil 4.16’ daki grafikte de, senkron generatörün terminallerinden çekilen toplam yük yani senkron generatörün nominal yükü $30,6MW$ ($1,0pu$), sistem frekansı arzu edilen tolerans sınırlar içerisinde, efektif terminal gerilimi $V_{et} = 151,7kV$ ($V_{max} = 214,5kV$) ve efektif yük akımı $I_{et} = 130,8A$ ($I_{max} = 185A$) olarak ölçülmüştür.

4.3.2 Bulanık Mantık Kontrolör ile Yük-Frekans Kontrolü



Şekil 4.17. BMK tabanlı güç üretim sisteminin simülasyon blok diyagramı

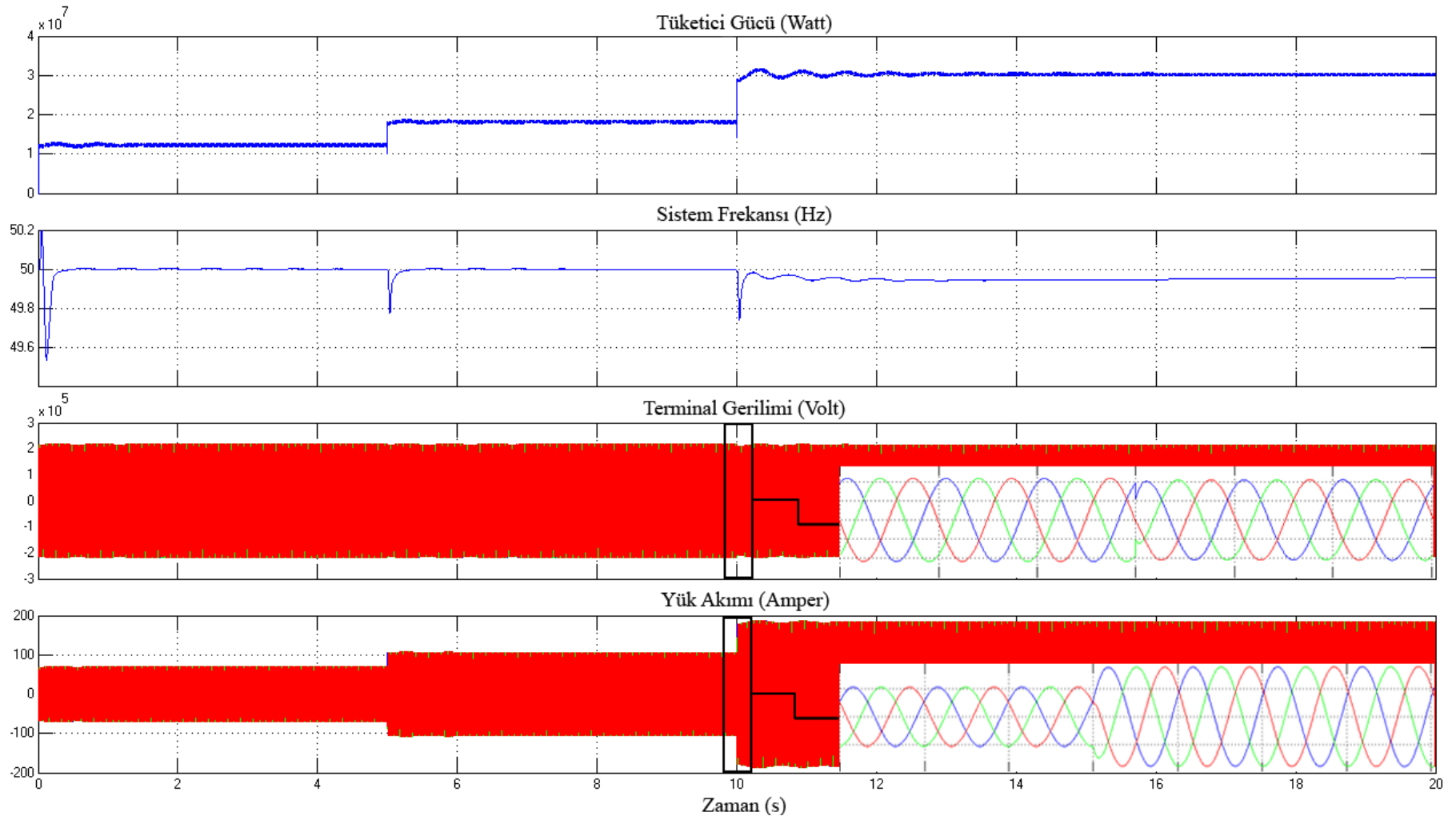
Güç üretim sisteminin işletme performansını geliştirmek, istenilen kalitede ve değerde güç elde etmek için tasarlanan diğer kontrol sistemi de, şekil 4.17’ de simülasyon blok diyagramları görülen bulanık mantık tabanlı kontrolördür. Hız regülatörü devresinde kullanılan BMK ile denetlenen sisteminin simülasyon blok diyagramı şekil 3.27’ de verilmiştir.

Güç üretim sisteminin simülasyonu gerçekleştirilirken, ilk anda senkron generatör $12MW$ ($0,4 pu$)' lık yük ile yüklenmiştir. Simülasyon devam ediyorken mevcut yüke ek olarak şekil 4.17' de görülen kesici_1 ile 5. saniyede $6MW$ ($0,2 pu$)' lık yük eklenmiş ve sistemin toplam yükü yaklaşık $18MW$ ($0,6 pu$)' a ulaşmıştır. Bu yüke ek olarak 10. saniyede kesici_2 devreye alınmış ve sisteme $12MW$ ($0,4 pu$) yük daha eklenmiştir. Simülasyonun 10. saniyesinden sonra sistemin toplam yükü senkron generatörün nominal yükü olan $30,6MW$ ($1,0 pu$)' a ulaşmıştır. Simülasyon 120 s sürdürülmüş ve sistemin tam kararlı olduğu görülmüştür. Ancak simülasyonun net olarak görülebilmesi için 20 saniyelik simülasyon grafiği alınmıştır.

Şekil 4.18' deki grafik incelendiğinde, senkron generatörün terminallerinden ilk 5 saniyede çekilen toplam yük yaklaşık $12MW$ ($0,4 pu$), sistem frekansı arzu edilen tolerans sınırlar içerisinde, efektif terminal gerilimi $V_{et} = 153,4kV$ ($V_{max} = 217kV$) ve efektif yük akımı $I_{et} = 48,8A$ ($I_{max} = 69A$) olarak ölçülmüştür.

5. saniyede kesici_1 devreye girdikten sonra terminallerden çekilen toplam yük yaklaşık $18MW$ ($0,6 pu$)' a yükselmiş ve sistem frekansı $49,78 Hz$ ' e kadar düşmüştür. Ancak 3 saniye gibi kısa bir sürede $50 Hz$ ' de sürekliliğini sağlamıştır. Efektif terminal gerilimi $151,3kV$ ' a düşmüş, küçük dalgalanmalardan sonra uyarım sistemi, hızlı bir şekilde terminal gerilimini $153kV$ ' a tekrar yükseltmiştir. Efektif yük akımı $I_{et} = 75A$ olarak ölçülmüştür.

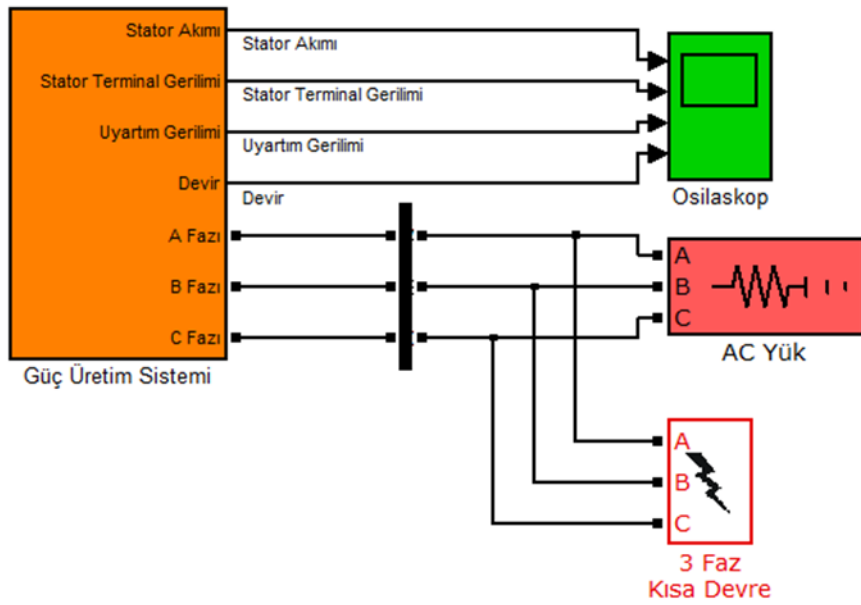
10. saniyede kesici_2 devreye girmiş ve toplam yük $30,6MW$ ($1,0 pu$)' a ulaşmıştır. Son yük sisteme girdiği anda sistem frekansı $49,74Hz$ ' e kadar düşmüş ancak 3 saniye içinde küçük salınımlardan sonra stabil olmuştur. Son eklenen yük, senkron generatörün nominal gücüne nazaran büyük olmasından dolayı efektif terminal gerilimi $147,8kV$ ' ta kadar düşmüş ancak uyarım sistemi 6 saniye gibi kısa süre zarfında terminal gerilimini $152kV$ ' ta yükseltmeyi başarmıştır. Efektif yük akımı $130,1A$ olarak görülmüştür. Yapılan simülasyon ile ilgili elektriksel büyüklükler şekil 4.18' de verilmiştir.



Şekil 4.18. HES' in farklı yüklenme durumlarına göre elektriksel çıkış büyüklüklerindeki değişimi

4.4 Kısa Devre Arıza Durumlarının Simülasyonu

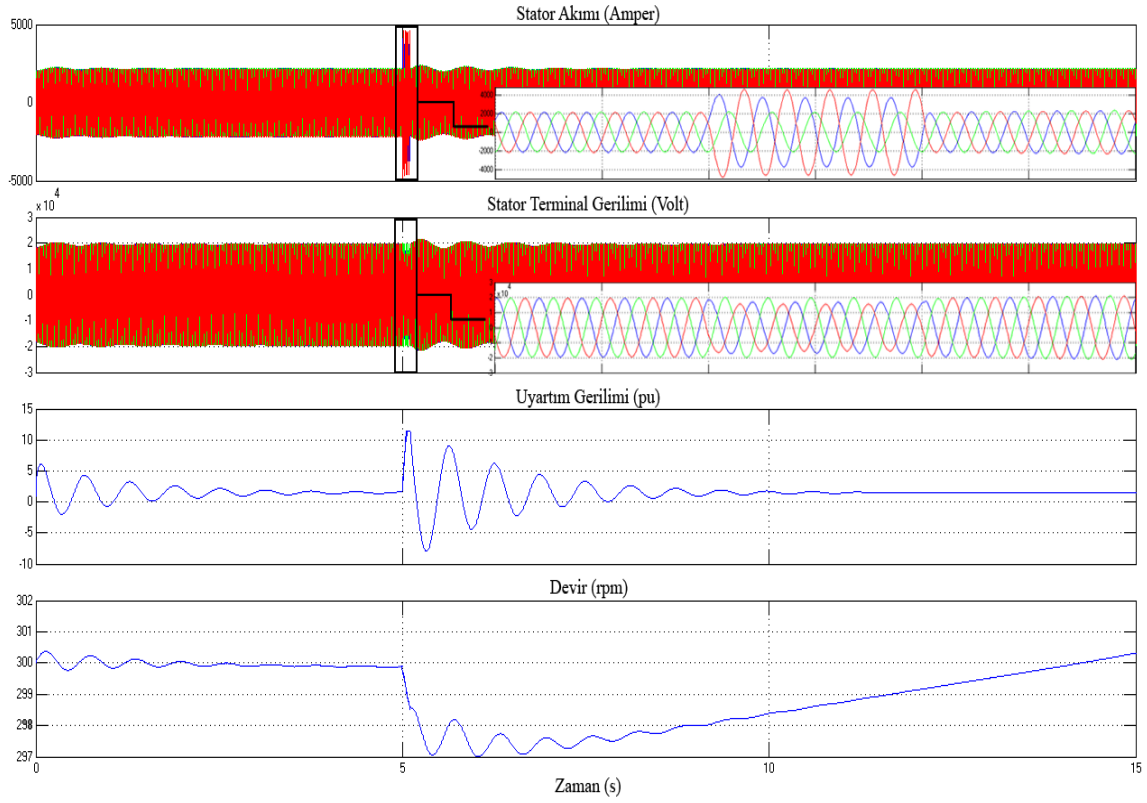
Güç sistemlerinde olması muhtemel faz-toprak, iki faz-toprak, iki fazlı, toprak temaslı ve toprak temassız üç fazlı kısa devre arızaları tasarlanan simülasyon devresinde incelenmiştir. Simülasyonda her bir arızanın stator terminal gerilimi, stator akımı, uyartım gerilimi ve senkron generatörün devrine ait grafikler elde edilmiş ve bu arızalar gerçek arıza verileri ile karşılaştırılıp, yapılan simülasyonlar yorumlanmıştır.



Şekil 4.19. Kısa devre blok diyagramı eklenmiş güç üretim sistemi

4.4.1 Faz-Toprak Arızasının Simülasyonu

Güç üretim sisteminin çıkışında bulunan 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra faz-toprak kısa devresi oluşmuş ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 120 s sürmüştür ancak 15 s' lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Şekil 4.20' deki arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucunda senkron generatörün çıkış akımı, terminal gerilimi, uyartım gerilimi ve senkron generatörün devri incelenmiştir.

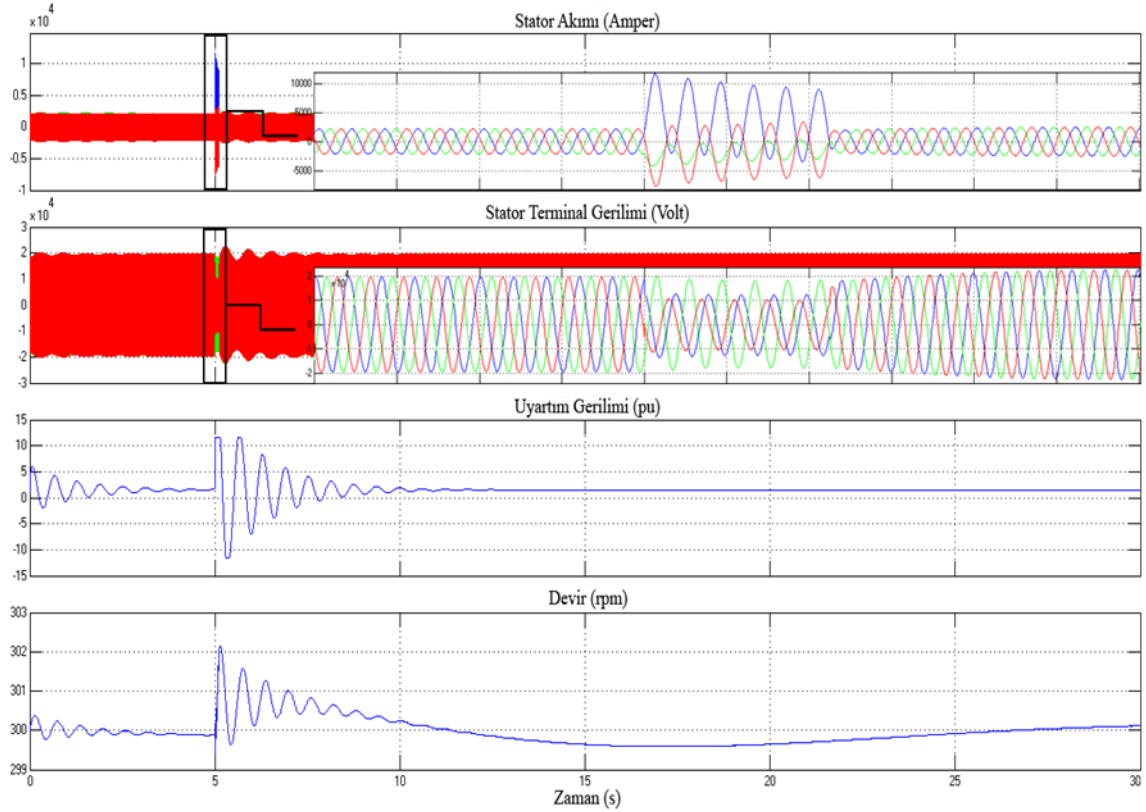


Şekil 4.20. Faz-toprak arızası olduğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

Şekil 4.20’ deki faz-toprak kısa devresinde, nominal etkin değeri $13,8kV$ olan stator terminal geriliminin kısa devrenin meydana geldiği andaki değeri $V_{et} = 10,96kV$ ($V_{max} = 15,5kV$) seviyelerine kadar düşmüş, kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 15,10kV$ ($V_{max} = 21,35kV$) seviyelerine yükselmiştir ve sistemin kararlı duruma geçmesiyle nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Nominal etkin değeri $1506A$ olan stator akımı, kısa devrenin meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı $I_{et} = 3260A$ ($I_{max} = 4610A$), sürekli kısa devre akımı $I_{et} = 3220A$ olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi, kısa devre olduğu anda maksimum değeri olan $11,5$ pu’ ya ulaşmış ve sınırlayıcı devreler ile bu değerde sınırlandırılmıştır. Daha sonra salınımlar yaparak 6 s gibi kısa bir zaman diliminde uyarım sistemi kararlı duruma geçmiştir. Nominal değeri 300 rpm olan senkron generatör devri, kısa devre anında 297 rpm’ ye düşmüş ve arıza anından 40 s sonra da osilasyonlar yaparak kararlı duruma geçmiştir. Simülasyon sonucunda, arızalı fazda beklenildiği gibi gerilimin düştüğü ve akımın yükseldiği görülmüştür.

4.4.2 Faz-Faz Arızasının Simülasyonu

Faz-toprak arızasında olduğu gibi 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra faz-faz kısa devresi oluşmuş ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 120 s sürmüştür ancak 30 s' lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucu şekil 4.21' de görülmektedir.



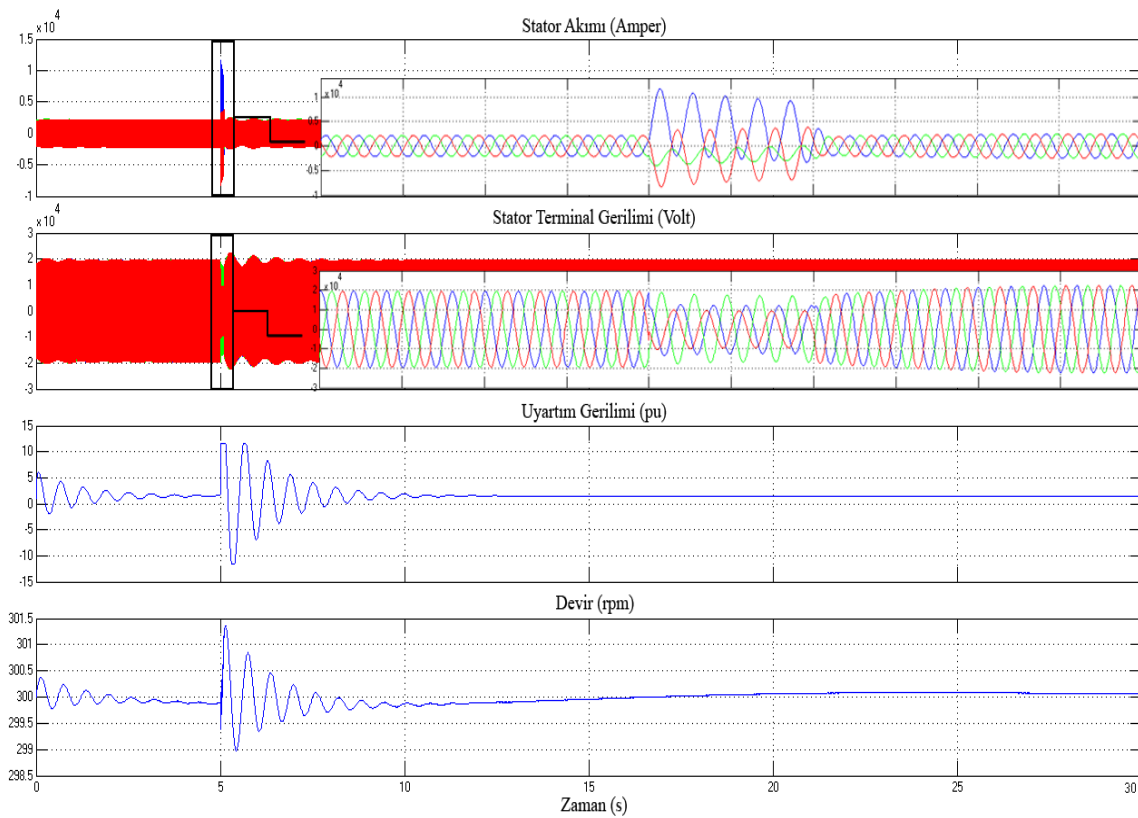
Şekil 4.21. Faz-faz arızası olduğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

Faz-faz kısa devresinde, kısa devrenin meydana geldiği fazlarda stator terminal gerilimleri $V_{et} = 7,17kV$ ($V_{max} = 10,15kV$) seviyelerine kadar düşmüş, kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 15,91kV$ ($V_{max} = 22,5kV$) seviyelerine yükselmiştir ve sistemin kararlı duruma geçmesiyle nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Kısa devrenin meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı $I_{et} = 8270A$ ($I_{max} = 11,7kA$) olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi, kısa devre olduğu anda maksimum değeri olan 11,5 pu değerine ulaşmış 6–7 s gibi kısa bir zaman diliminde uyarım sistemi tekrar kararlı duruma geçmiştir. Senkron generatör devri, kısa devre anında 302 rpm' ye yükselmiş ve simülasyon başladıktan yaklaşık 45 s sonra

osilasyonlar yaparak kararlı duruma geçmiştir. Simülasyon sonucunda, arızalı fazlarda beklenildiği gibi gerilim sinyalleri arasındaki faz farkının bozulduğu, neredeyse üst üste bindiği ve akımların birbirine yaklaşık eşit ve zıt genlikte olduğu görülmüştür.

4.4.3 İki Faz-Toprak Arızasının Simülasyonu

İki faz-toprak arızasında 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra iki faz-toprak kısa devresi oluşmuş ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 120 s sürmüş ancak 30 s' lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucu şekil 4.22' de görülmektedir.



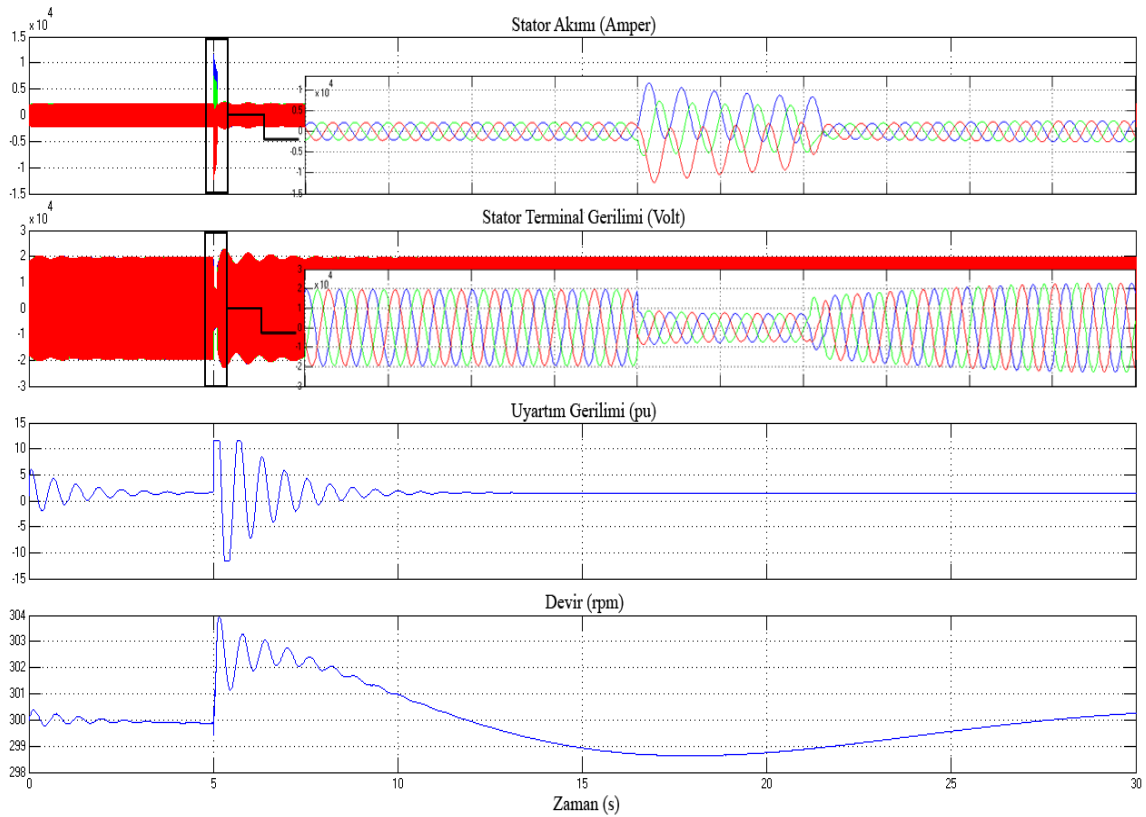
Şekil 4.22. İki faz-toprak arızası olduğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

İki faz-toprak kısa devresinde, kısa devrenin meydana geldiği fazlarda stator terminal gerilimleri $V_{et} = 6,61kV$ ($V_{max} = 9,35kV$) seviyelerine kadar düşmüş, kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 15,82kV$ ($V_{max} = 22,38kV$) seviyelerine yükselmiştir. Stator terminal gerilimi, arıza sonlandıktan 3–4 s gibi kısa bir süre içerisinde kararlı duruma geçmiş ve nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Kısa devrenin

meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı $I_{et} = 8490A$ ($I_{max} = 12kA$) olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi, kısa devre olduğu anda maksimum değeri olan 11,5 pu değerine ulaşmış 6–7 s gibi kısa bir zaman diliminde uyarım sistemi tekrar kararlı duruma geçmiştir. Senkron generatör devri, kısa devre anında 301,5 rpm' ye yükselmiş ve simülasyon başladıktan yaklaşık 35 s sonra senkron devri yakalamıştır. İki faz-toprak kısa devresinin simülasyonu faz-faz kısa devresi ile kıyaslandığında, benzer özellikleri göstermiştir. Ancak iki faz-toprak arızasında akımın, sıfır bileşen empedansın etkisiyle, faz-faz arızasında gerçekleşen değerden daha büyük olduğu görülmüştür.

4.4.4 Üç Fazlı Simetrik Arızanın Simülasyonu

Üç fazlı simetrik arızada 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra kısa devre başlamış ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 120 s sürmüş ancak 30 s' lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucu şekil 4.23' te görülmektedir.



Şekil 4.23. Üç fazlı simetrik arızanın olduğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

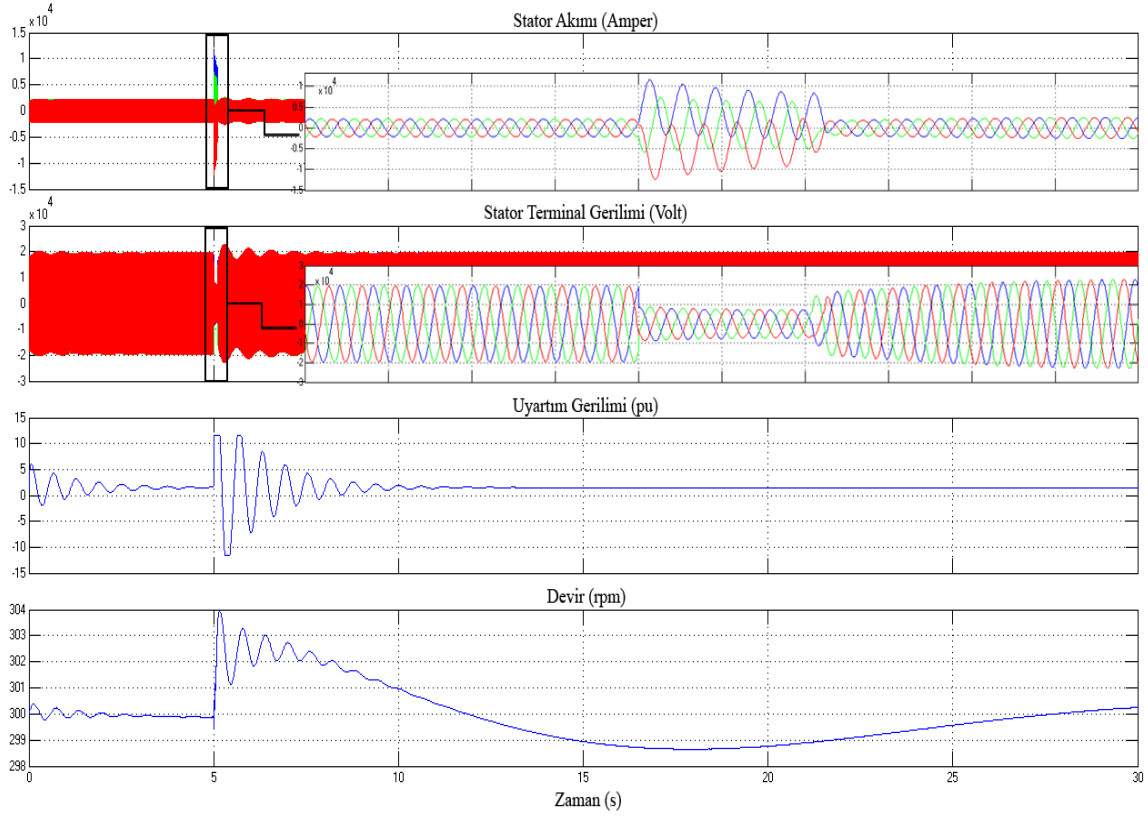
Üç fazlı simetrik kısa devre arızasında, kısa devrenin meydana geldiği fazlarda stator terminal gerilimleri $V_{et} = 5,042kV$ ($V_{max} = 7,13kV$) yani %63,46 oranında azalmıştır. Kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 16,15kV$ ($V_{max} = 22,84kV$) seviyelerine yükselmiştir. 3–4 s içerisinde nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Kısa devrenin meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı $I_{et} = 8733A$ ($I_{max} = 12,35kA$) olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi, kısa devre olduğu anda maksimum değeri olan 11,5 pu değerine ulaşmış ve bu değerde sınırlandırılmıştır. Diğer kısa devre arıza durumlarına benzer olarak 6–7 s gibi kısa bir zaman diliminde uyarım sistemi tekrar kararlı duruma geçmiştir. Senkron generatör devri, kısa devre anında 304 rpm' ye yükselmiş ve simülasyon başladıktan yaklaşık 55–60 s sonra osilasyonlar yaparak kararlı duruma geçmiştir. Simülasyon sonucunda, arızalı fazlarda beklenildiği gibi gerilim ve akımın, kendi aralarında genlikleri eşit kalmış ve 120° faz farkını korumuştur.

4.4.5 Üç Faz-Toprak Arızanın Simülasyonu

Üç faz-toprak arızasında 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra kısa devre başlamış ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 120 s sürmüş ancak 30 s' lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucu şekil 4.24' te görülmektedir.

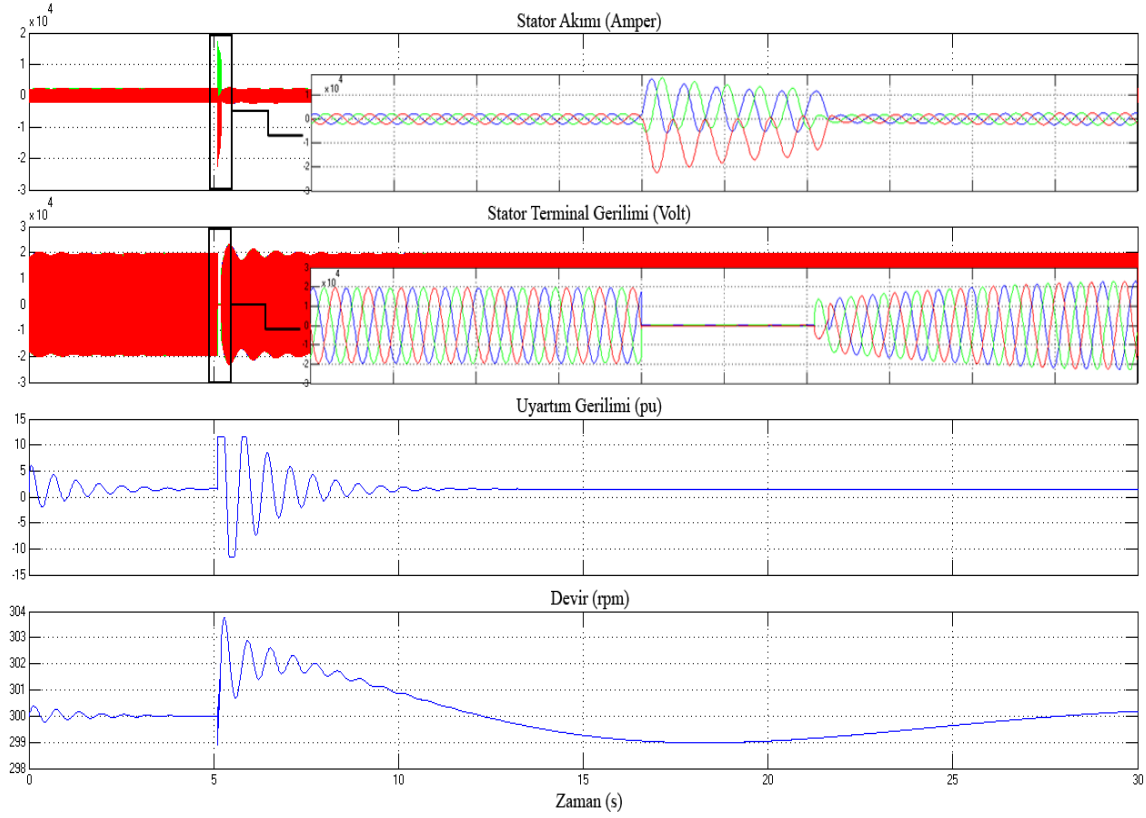
Bu kısa devre arızasında, kısa devrenin meydana geldiği fazlarda stator terminal gerilimleri $V_{et} = 5,04kV$ ($V_{max} = 7,127kV$) seviyelerine kadar düşmüş, kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 16,16kV$ ($V_{max} = 22,85kV$) seviyelerine yükselmiştir. 3–4 s içerisinde nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Kısa devrenin meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı, üç faz simetrik kısa devre arızasında olduğu gibi $I_{et} = 8733A$ ($I_{max} = 12,35kA$) olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi, kısa devre olduğu anda maksimum değeri olan 11,5 pu değerine ulaşmış ve bu değerde sınırlandırılmıştır. Diğer kısa devre arıza durumlarına benzer olarak 6–7 s gibi kısa bir zaman diliminde uyarım sistemi tekrar kararlı duruma geçmiştir. Senkron generatör devri, kısa devre anında 304 rpm' ye yükselmiş ve simülasyon başladıktan yaklaşık 55–60 s sonra osilasyonlar yaparak kararlı duruma geçmiştir. Simülasyon sonucuna göre, üç

fazlı kısa devre arızasında, yıldız noktasının toprağa bağlı olması, kısa devrenin büyüklüğü üzerinde bir etki yapmadığı görülmüştür. Bu durum, şekil 4.23 ve 4.24’ ten de görülmektedir.



Şekil 4.24. Üç faz-toprak arızanın oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

Simülasyonu gerçekleştirilen kısa devre arıza durumları 154kV barada gerçekleştiği varsayılarak analizleri yapılmıştır. Örnek olması açısından üç fazlı simetrik arızanın simülasyonu 13,8kV barada da gerçekleştirilmiştir. Simülasyon başladıktan 5 s sonra kısa devre başlatılmış ve 5,1 s sonra kısa devre arızası sonlandırılmıştır. Diğer arızalarda olduğu gibi simülasyon 120 s sürmüş ve 30 s’ lik zaman dilimi simülasyon grafiği olarak eklenmiştir. Arıza durumu ile ilgili simülasyon sonucu şekil 4.25’ te görülmektedir.



Şekil 4.25. 13,8 kV barada üç fazlı simetrik arızanın oluştuğu andaki elektriksel çıkış büyüklükleri

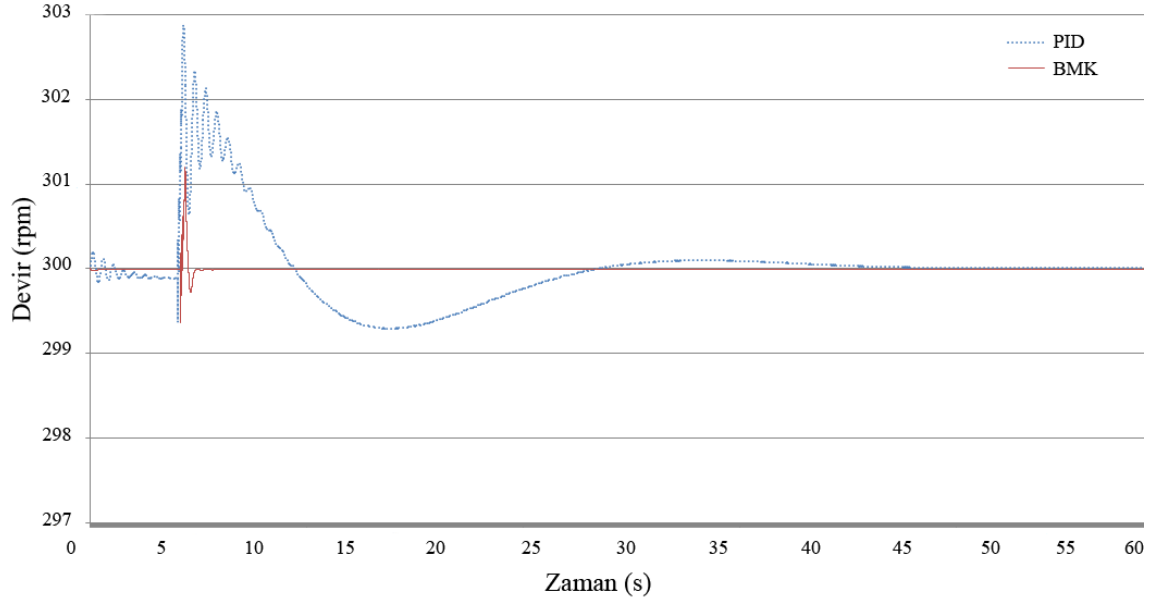
Bu kısa devre arızasında, kısa devrenin meydana geldiği fazlarda stator terminal gerilimleri 0 değerine yaklaşmıştır. Kısa devre ortadan kalktıktan sonra $V_{et} = 16,31kV$ ($V_{max} = 23,07kV$) seviyelerine yükselmiştir. 3–4 s içerisinde nominal terminal gerilim değerini yakalamıştır. Kısa devrenin meydana geldiği andaki darbe kısa devre akımı $I_{et} = 15,91kA$ ($I_{max} = 22,5kA$) olarak gerçekleşmiştir. Uyarım gerilimi ve senkron devir diğer üç faz simetrik kısa devrede olduğu gibidir.

Adıgüzel HES’ teki senkron generatörün teknik kataloğunda belirtilen üç faz kısa devrenin $22kA$ olan akım değeri ile simülasyonu gerçekleştirilen üç faz simetrik kısa devrenin $22,5kA$ olan akım değerinin bire bir örtüştüğü görülmüştür.

4.4.6 Arıza Durumlarında Kontrolörlerin Senkron Devir Üzerindeki Etkisi

Arıza durumlarında, tasarlanan kontrolörlerin tepkisini daha iyi görebilmek amacıyla hız regülatörü devresinde PID ve BMK kontrolörlerin üç faz simetrik kısa devre arızası

anında senkron devir üzerindeki etkileri incelenmiştir. Arıza 154kV barada, simülasyon başladıktan 5 s sonra kısa devre başlamış ve 5,1 s sonra kısa devre arızası ortadan kalkmıştır. Simülasyon 60 s sürmüştür. Arıza durumu ile ilgili PID ve BMK' nın kıyaslandığı simülasyon sonucu şekil 4.26' da verilmiştir.



Şekil 4.26. Üç faz kısa devre arızasına PID ve BMK kontrolörlerin tepkisi

Üç fazlı simetrik kısa devre anında hız regülatörü devresinde PID kontrolör olan senkron generatörün devri 303 *rpm* seviyelerindeyken, BMK olan senkron generatörün devri 301,5 *rpm* seviyelerinde kalmıştır. Ayrıca PID kontrolörlü sistemin BMK' ya göre, devirdeki salınımların ve oturma zamanının çok daha fazla olduğu görülmektedir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu araştırmada, Adıgüzel Hidroelektrik Santrali' nin dinamik modeli oluşturulmuş ve sonuçları analiz edilmiştir. İki yıla yaklaşan uzun bir çalışma ve araştırma sürecinde, sistemdeki bütün teçhizatın teknik verilerine EÜAŞ ve TEİAŞ yetkilileriyle iletişime geçilerek ulaşılmıştır.

Adıgüzel HES' in hız regülatörü devresindeki mevcut kontrolörün, primer frekans kontrolü için yetersiz olması ve enterkonnekte sistemde, yükteki değişimlere göre gerilim ve frekans büyüklüklerine daha duyarlı bir kontrolör ihtiyacından dolayı yeni bir kontrolörün tasarlanması gereği doğmuştur. Bu gerekçeyle, mevcut sistemin simülasyonu oluşturularak yeni kontrolörlerin bilgisayar ortamındaki tepkileri incelenmiştir.

Hız regülatöründen, yük-frekans denetiminde daha iyi sonuçlar elde edebilmek için elektro-hidrolik hız regülatörü devresinde, mevcut kontrolden daha iyi performans gösteren PID ve BMK olmak üzere iki farklı kontrolör tasarlanmıştır. Bu kontrolörlerin senkron generatörün farklı yüklenme koşullarında performansları incelenmiş ve grafiklerle açıklanmıştır. Analiz sonuçlarına göre BMK, PID kontrolöre göre sistemin yük ve frekans değişimlerine olan tepki süresini iyileştirdiğini, ayrıca sistemde oluşan salınımları PID kontrolöre göre daha kısa sürede minimize ettiği simülasyon sonuçlarında görülmüştür.

PID kontrolörün katsayılarının çok iyi belirlenmesi gerektiği aksi takdirde sistemi stabil etmek yerine bozucu etki oluşturduğu, katsayılara ve kullanılan kontrol tipine bağlı olarak kalıcı hal hatasının olduğu, en kısa sürede kararlılık bulması istendiğinde taşma meydana geldiği, taşma olmasının istendiğinde ise stabil olma süresinin uzadığı görülmüştür. Stabil olma süresi kısaltılmak istendiğinde kazanç katsayıları artırıldığında sisteme giren gürültüleri de artırdığından sistem karasız hale geldiği ve hata oranının belirli bir değerin üzerine çıktığında sistemin tamamen dengesizleştiği ve sürekli bir osilasyona girdiği görülmüştür. BMK ise kuralların ve kısıtların iyi tanımlanıp tablonun iyi oluşturulması durumunda kalıcı hal hatasının en az olduğu ve en kısa sürede istikrar bulduğu görülmüştür.

Bununla birlikte Matlab/Simulink ile tasarlanan simülasyon devresinde kısa devre arıza durumları incelenmiş ve analizleri yapılmıştır. Güç sistemlerinde el ile yapılan hesaplama karmaşasından kurtulmak ve hataları minimize etmek için Simulink ile modelleme yaparak kısa devre analizlerini incelemek çok daha avantajlıdır. Ayrıca kısa devre olayının zamana bağlı olarak incelenmesini mümkün kılmaktadır. Tasarlanan simülasyon devresi üzerinde, devre ekipmanlarının parametreleri kolaylıkla değiştirilerek, farklı değerler ve kontrolörler için analiz yapmak mümkün olmaktadır.

Adıgüzel HES' in simülasyon devresinde analizi yapılan üç fazlı simetrik kısa devre arızasında elde edilen darbe kısa devre akımı ile senkron generatörün teknik kataloğunda belirtilen gerçek kısa devre akım değerini yakaladığı görülmüştür. Yapılan simülasyon sonuçlarına göre, tasarlanan kontrolörlerin sistem üzerindeki performanslarından yola çıkılarak, tasarlanan kontrolörün mevcut sisteme adapte edilebilirliğini kolaylaştıracaktır.

Daha sonraki çalışmalarda sistem performansını bir üst seviyeye taşımak amacıyla BMK' nın farklı üyelik fonksiyonları denenebilir veya hız regülatörü devresinde ANFIS, BM-PID, ANN-PID, IPSO-PID gibi kontrolörler tasarlanır yâda bulanık mantık kural tablosu ve diğer parametreler GA ve YSA yöntemleri kullanılarak optimize edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abdolmaleki, M., Ansarimehr, P. and Ranjbar, A.M. (2007). A robust fuzzy logic adaptive PI controller for hydro power plants. *SICE Annual Conference*, 19-21 December, 2592-2595.
- Altas, I.H. and Neyens, J. (2006). A fuzzy logic decision maker and controller for reducing load frequency oscillations in multi-area power systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1-9.
- Anonim, 1983. Adıgüzel DAM and hydroelectric power plant technical specifications-generators, Devlet Su İşleri, Ankara.
- Anonim, 1986. Description for BDT-3 type of electrical device of electrical hydraulic governor, Elektrik Üretim Anonim Şirketi-Adıgüzel Hidroelektrik Santrali, yayın no: K094, China.
- Anonim, 1989. Aşağı Büyük Menderes Projesi - Adıgüzel Barajı ve Hidroelektrik Santrali, Devlet Su İşleri, Ankara.
- Anonim, 2011. DSI, Hidroelektrik Enerji 2011. Devlet Su İşleri, Ankara.
- Anonim, 2012. DEK-TMK, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Enerji Raporu Aralık 2012, Ankara.
- Anonim-a, 2013. TEİAŞ, Türkiye Elektrik Enerjisi Kuruluş ve Yakıt Cinslerine Göre Kurulu Güç, 2013. Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi, Ankara.
- Anonim-b, 2013. YEGM, Hidroelektrik Enerjisi Nedir, 2013. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anower, M.S., Sheikh, M.R.I., Hossain, M.F., Rabbani, M.G. and Nasiruzzaman, A.B.M. (2006). Fuzzy gain scheduling of an AGC in a single area power systems. *ICECE 4th International Conference on Electrical and Computer Engineering*. 17-20 September, 9-12.
- Arda, S. (2006). Senkron Generatörlerin Uyarım Sistemlerinin Yarı İletkenli Devrelerle Denetimi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

- Barakat, A., Tnani, S., Champenois, G. and Mouni, E. (2010). Analysis of synchronous machine modeling for simulation and industrial applications. *Simulation Modelling Practice and Theory*. **18**: 1382-1396.
- Başeşme, H. (2003). Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri, EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığı Yayınları, 2. basım, Ankara, Türkiye.
- Bircan, M. (2006). Türkiye Elektrik Sisteminin UCTE Bağlantısı Kapsamında Frekans Kontrolü Kalitesinin UCTE Standartlarına Çıkarılması. *Türkiye 10. Enerji Kongresi ve Uluslararası 5. Enerji Fuarı*, 27-30 Kasım, 265-273.
- Borkowski, D. and Wegiel, T. (2013). Small hydro power plant with integrated turbine-generators working at variable speed. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 1-8.
- Caner, M. (2006). Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle Senkron Generatörlerde Uyarım Kontrolü, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Cheng, Y.C., Ye, L.Q., Chuang, F. and Cai, W.Y. (2002). Anthropomorphic intelligent PID control and its application in the hydro turbine governor. *Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 4-5 November **1**: 391-395.
- Culberg, J., Negnevitsky, M. and Muttaqi, K.M. (2007). Fuzzy interference system controller for hydro turbine-generator system. *Power Engineering Conference*, 1-6.
- Çam, E. (2007). Application of fuzzy logic for load frequency control of hydroelectrical power plants. *Energy Conservation and Management*. **48**: 1281-1288.
- Çam, E. ve Kocaarslan, İ. (2002). Tek bölge güc sistemlerinde bulanık mantık ile yük frekans kontrolü. *Teknoloji*, **3-4**: 73-77.
- Çolak, İ. (2010). Senkron Makinalar, Seçkin Yayıncılık, İkinci Basım, Ankara.

- Demiroren, A., Zeynelgil, H.L. ve Sengor, N.S. (2001). The application of ANN technique to load frequency control for three area power system. *IEEE Porto Power Tech Conference*, Portugal, 10-13 September, **Doi:** 10.1109/PTC.2001.964793
- Doğruer, V. (2007). Elektrik Güç Sistemlerinde Matlab/Simülink ile Kısa Devre Arıza Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Dongsheng, W., Qing, Y. and Dazhi, W. (2011). A novel PSO-PID controller application to bar rolling process. *Processings of the 30th Chinese Control Conference*, Yantai, China, 22-24 July, 2036-2039.
- Duman, S., Yorukeren, N. and Altas, I.H. (2012). Load frequency control of a single area power system using gravitational search algorithm. *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*. 1-5.
- Elmas, Ç. (2011). Yapay Zeka Uygulamaları, Seçkin Yayıncılık, 2. Basım, Ankara.
- Esen, V. (2011). Elektrik Güç Sistemlerinde Kısa Devre ve Toprak Arızalarının Zaman-Frekans Analizi Yöntemiyle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Fang, H., Chen, L., Dlakavu, N. and Shen, Z. (2008). Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. **23**: 834-841.
- Gautam, S.K. and Goyal N. (2010). Improved particle swarm optimization based load frequency control in a single area power system. *Annual IEEE India Conference*. 1-4.
- Gencoğlu, C. (2010). Assessment of the Effect of Hydroelectric Power Plants Governor Settings on Low Frequency Inter Area Oscillations. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Hassan, L.H., Mohammed, H.A.F., Moghavvemi, M. and Yang, S.S. (2009). Load frequency control of power systems with sugeno fuzzy gain scheduling PID controller. *ICROS-SICE International Joint Conference*, Japan, 18-21 August, 614-618.

- Ismail, M.M. (2012). Adaptation of PID controller using AI technique for speed control of isolated steam turbine. *Japan-Egypt Conference on Electronics, Communications and Computers*. 85-90.
- Jing, C., Yan-ping, L. and Qing-shuang, Y. (2011). The electromagnetic force calculation of damping windings under three-phase sudden short-circuit fault of large hydro-generator. *The 6th International Forum on Strategic Technology*. **1**: 533-536.
- Kaytez, F., Gözde, H. ve Taplamacıoğlu, M.C. (2005). Klasik PID ve bulanık mantık kontrolör ile senkron makina kontrolü. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, 22-25 Eylül, 429-432.
- Khuntia, S.R. and Panda, S. (2011). A novel approach for automatic generation control of a multi area power system. *IEEE 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, Canada*, 1182-1187.
- Kılıçkap, E. (2007). Hidrolik Santralin Dinamik Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kocaarslan İ. ve Tiryaki, H. (2010). PSO-PID ve FGPI kontrolörlerin bir termik santralde karşılaştırılması. *Int.J.Eng. Reseach and Development*. **2**: 39- 44.
- Kumar, A., Kumar, A. and Chanana, S. (2010). Genetic fuzzy PID controller based on adaptive gain scheduling for load frequency control. *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems*. 1-8.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control, McGraw-Hill, USA.
- Kuo, B.C. (2009). Otomatik Kontrol Sistemleri, Literatür Yayıncılık, 7. Basım, İstanbul.
- Lüy, M., Kocaarslan, İ. ve Çam, E. (2009). Bir termik elektrik santralinde yapay sinir ağları kontrolörün etkilerinin incelenmesi. *Int. J. Eng. Research and Development*. **1**: 42-46.
- Machowski, J., Bialek, J.W. and Bumby, J.R. (2008). Power Systems Dynamics, John Wiley & Sons, 2. Edition, United Kingdom.
- Mergen, A.F. ve Zorlu, S. (2010). Elektrik Makineleri-III Senkron Makineler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Nademi, H. and Tahami, F. (2009). Robust controller design for governing steam turbine power generators. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. 1-5.
- Oğuz, Y. (2007). Hibrit Güç Üretim Sisteminin Modellemesi, Analizi ve Neuro-Fuzzy Kontrolör Kullanılarak Sistem Performansının İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oğuz, Y. (2011). Fuzzy PI control with parallel fuzzy PD control for automatic generation control of a two-area power systems. *Gazi University Journal of Science*. **24(4)**: 805-816.
- Oğuz, Y., Üstün, S.V., Yabanova, İ., Yumurtacı, M. ve Güney, İ. (2012). Adaptive neuro-fuzzy inference system to improve the power quality of split shaft microturbine power generation system. *Journal of Power Sources*. **197**: 196-209.
- Oğuz, G. ve Demirören, A. (2004). Bulanık mantıklı kontrolörlerle güç sistemlerinde geçici kararlılığın iyileştirilmesi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 8-12 Aralık, 1-5.
- Ong, C.M. (1998). Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, New Jersey.
- Oysal, Y., Yılmaz, A.S. ve Köklükaya, E. (2004). Dynamic fuzzy networks based load frequency controller design in electrical power systems. *G.U. Journal of Science*. **17(3)**: 101-114.
- Özaktürk, M., Yanıkoğlu, E., Çavuş, T.F. ve Metin, A. (2006). Küçük hidroelektrik santralleri gücünün bulanık mantık yöntemiyle tahmini. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 6-10 Aralık, 1-3.
- Özbay, E. ve Gencoglu, M.T. (2010). Load frequency control for small hydro power plants using adaptive fuzzy controller. *IEEE International Conference on Systems Man and Cynernetics*. 4217-4223.
- Özbay, E. ve Gencoglu, M.T. (2011). Küçük hidroelektrik santrallerde yük-frekans kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. **23(2)**: 119-128.

- Özkop, E., Altaş, İ.H. ve Akpınar, A.S. (2004). Bulanık mantık denetleyicili güç sistem uygulaması. *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 8-12 Aralık, 272-276.
- Panda, M.K., Pillai, G.N. and Kumar, V. (2012). Power system stabilizer design: interval type-2 fuzzy logic controller approach. *2nd International conference on Power Control and Embedded Systems*. 1-10.
- Petrov, M., Taneva, A., Puleva, T. and Ahmed, S. (2008). Parallel distributed neuro-fuzzy model predictive controller applied to a hydro turbine generator. *4th International IEEE Conference Intelligent Systems*. **9**: 20–25
- Qian, D., Yi, J., Liu, X. and Li, X. (2010). GA-Based fuzzy sliding mode governor for hydro-turbine. *International Conference on Intelligent Control and Information Processing*, China, 13-15 August, 382-387.
- Ramkumar, A. and Durairaj, S. (2012). An analysis of transient characteristics of interconnected DFIG with hydro governor synchronous generator. *International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*. 1-10.
- Robert, G. and Michaud, F. (2012). Hydro power plant modeling for generation control applications. *American Control Conference*, Canada, 27-29 June, 2289-2294.
- Saadat, H. (1999). *Power Systems Analysis*, The McGraw-Hill Companies, New York.
- Sabahi, K., Teshnehlal, M. and Aliyari, M. (2009). Recurrent fuzzy neural network by using feedback error learning approaches for LFC in interconnected power system. *Energy Conversion and Management*. **50**: 938-946.
- Salhi, I., Chennani, M., Doubabi, S. and Ezziani, N. (2008). Modeling and regulation of a micro hydroelectric power plant. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 1639- 1644.
- Salhi, I., Doubabi, S. and Essounbouli, N. (2010). Design and simulation of fuzzy controller and supervisor for a micro-hydro power plant. *18th Mediterranean Conference on Control and Automation*, Morocco, 23-25 June, 1401-1406.
- Shayeghi, H., Jalili, A. and Shayanfar, H.A. (2007). Robust modified GA based multi-stage fuzzy LFC. *Energy Conversion and Management*. **48**: 1656-1670.

- Sulla, F., Svensson, J. and Samuelsson, O. (2011). Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators. *Electric Power Systems Research*. **81**: 1610-1618.
- Şen, Z. (2009). Bulanık Mantık İlkeleri ve Modelleme, Su Vakfı Yayınları, 3. Baskı, İstanbul.
- Şerifoğlu, N. (2007). Elektrik Makinaları - Senkron Makinalar ve Doğru Akım Makinaları, Nobel Yayıncılık, 1. Basım, Ankara.
- Şerifoğlu, N. ve Soysal, O. (2006). Elektrik Enerji Sistemleri, Papatya Yayıncılık, 2. Basım, İstanbul.
- Venkatraman, E., Velusami, S., Ansari, M.T. and Ganapathy, S. (2012). Design of type-II fuzzy logic load frequency controller for two area thermal reheat power systems. *International Conference on Computing Electronics and Electrical Technologies*. 180-185.
- Vijayaraghavan, M. and Sanavullah, M.Y. (2011). A supervisory hierarchical fuzzy logic controller for power system stabilizer. *3th International Conference on Electronics Computer Technology*. **2**: 275-279.
- Villacorta, C.A., Jardini, J.A. and Magrini, L.C. (2003). Applying object-oriented technology to project hydroelectric power plant SCADA systems. *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. **2**: 1075-1080.
- Wang, D., Huang, B., Meng, L. and Han, P. (2009). Predictive control for boiler-turbine unit using ANFIS. *International Conference on Test and Measurement*. **2**: 1-4.
- Yalçın, E., Çam, E. ve Lüy, M. (2010). Dört bölgeli güç sisteminde PID kontrolör ile yük frekans kontrolü. *Electrical-Electronics and Computer Engineering Symposium*, Bursa, Aralık, 72-77.
- Yılmaz, S., Oysal, Y. ve Köklükaya, E. (2003). Bir dinamik bulanık ağ ile yük frekans kontrolü uygulaması. *Elektrik – Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 1-4.

- Yu, X., Yang, F., Huang, Y. and Nan, H. (2007). Fuzzy immune sliding mode control based hydro turbine governor. *Third International Conference on Natural Computation*. **1**: 171–176.
- Zenk, H., Zenk, O. ve Akpınar, A.S. (2011). Two different power control system load-frequency analysis using fuzzy logic controller. *International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*. 465-469.
- Zhang, Q. and So, P.L. (2000). Dynamic modeling of a combined cycle plant for power system stability studies. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. **2**: 1538- 1543.
- Zhang, X.Y. and Zhang, M.G. (2006). An adaptive fuzzy PID control of hydro-turbine governor. *Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Dalian, 13-16 August, 325-329.
- Zhao, L. and Feng, Y. (2010). Simulation and analysis of short circuit in 1000MW synchronous generator based on simulink/SPS module. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. 1-4.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet KAYSAL
Doğum Yeri ve Tarihi : Denizli/Tavas - 04.06.1984
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim : akaysal@aku.edu.tr

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Aydın Anadolu Meslek Lisesi (Elektronik/YDA),
1998–2002.
Lisans : Fırat Üniversitesi, Elektronik – Bilgisayar Eğitimi,
2004–2009.
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Elektrik Eğitimi,
2010–2013.

Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : Mert Endüstriyel Elektronik, 2005–2007.
EÜAŞ Adıgüzel Hidroelektrik Santrali, 2007–2012.
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Dinar MYO, 2012–...