

**ÇOK KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE AKILLI DENETLEYİCİ
DESTEKLİ AKTİF VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ**

Yük. Müh. Mahmut Temel ÖZDEMİR

**Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yrd.Doç.Dr. Ahmet ORHAN
MAYIS-2012**

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE AKILLI DENETLEYİCİ
DESTEKLİ AKTİF VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mahmut Temel ÖZDEMİR

(06213203)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Programı: Elektrik Makinaları

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Ahmet ORHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Nisan 2012

MAYIS-2012

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇOK KÜÇÜK HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE AKILLI DENETLEYİCİ
DESTEKLİ AKTİF VE REAKTİF GÜÇ KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Yük. Müh. Mahmut Temel ÖZDEMİR

(06213203)

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28 Nisan 2012
Tezin Savunulduğu Tarih: 17 Mayıs 2012**

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ahmet ORHAN (F. Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ (F.Ü.)

Prof. Dr. Erhan AKIN (F. Ü.)

Prof. Dr. Mehmet AKIN (D. Ü.)

Doç.Dr. Muhsin Tunay GENÇOĞLU(F. Ü.)

MAYIS-2012

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Programı'nda hazırlanmıştır.

Canlılığın kaynağı olan suya, insanlık tarihinde temizlik, uzun ömür, berraklık, azizlik gibi birçok özellik atfedilmiştir. Bunlara ek olarak yüzyılı aşkın bir süreden beri enerji kaynağı olarak da kullanılmakta ve üzerinde elektrik üretimine yönelik yoğun araştırmalar yürütülmektedir. Böyle önemli bir konuyu çalışmama fırsat veren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç.Dr. Ahmet ORHAN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Uzun soluklu bu tez çalışmasında bilgi ve tecrübelerinden çokça yararlandığım kıymetli hocam Sayın Prof.Dr. Mehmet CEBECİ'ye bilhassa teşekkür ederim.

Bu günlere gelmemde en büyük emeği harcayan başta Annem ve Babam olmak üzere aileme ve tez çalışması sırasında çoğu zaman ihmal ettiğim, sabırla bana destek olan sevgili eşime ve canım çocuklarıma teşekkür ederim.

Görüş, öneri ve bilgilerinden faydalandığım kıymetli arkadaşlarım, Yrd.Doç.Dr. Yavuz EROL'a, Öğr.Gör. Dr. Hakan ÇELİK'e, Yrd.Doç.Dr. Mehmet POLAT'a, Arş.Gör. Dr.Abuzer ÇALIŞKAN'a, Elektrik-Elektronik Müh. Güngör YILDIRIM'a ve Yrd.Doç.Dr. M.Ali ARSERİM'e teşekkür ederim. Prototipin kurulumunda katkı ve destekleri nedeniyle Sayın Mehmet PEKCOŞKUN'a teşekkür ederim.

Ayrıca Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne FÜBAP-MF.11.06 no.lu proje dâhilinde yaptığı desteklerden dolayı teşekkür ederim.

Mahmut Temel ÖZDEMİR

Elazığ-2012

İÇİNDEKİLER

	Numara
ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	X
SİMGELER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgi	1
1.2. ÇKHES'ler İle İlgili Yapılan Çalışmalar	2
1.3. Tezin Amacı	13
1.4. Tezin Yapısı	14
2. ÇKHES'LER İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ	15
2.1. Giriş	15
2.2. Hidrolik Türbinler	21
2.2.1 Temel Kavramlar	22
2.2.1.1. Bernoulli Denklemi	23
2.2.1.2. Suyun Çevirme Momenti ve Gücü	23
2.2.1.4. Euler Türbin Denklemi	25
2.2.2. Francis Türbini	28
2.2.3. Cross-Flow Türbini	29
2.2.4. Kaplan Türbini	30
2.2.5. Pelton Türbini	31
2.3. Generatörler	32
2.3.1. Asenkron Generatörler	34
2.3.2. Senkron Generatörler	36
2.4. Kontrol Sistemleri	38
2.4.1. Frekans Kontrolü	39
2.4.2. Gerilim Kontrolü	42
2.4.3. Senkronizasyon	45
2.5. ÇKHES'lerin Çevresel Etkileri	47
2.5.1. Doğrudan Etkileri	47
2.5.2. Dolaylı Etkileri	48
2.6. ÇKHES'lerin Ekonomisi	49
2.7. Yenilikçi Yaklaşımlar	53
3. KAPALI ÇEVİRİM BİR ÇKHES PROTOTİPİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	54
3.1. Giriş	54
3.2. Hidrolik Yapı	55
3.3. Elektromekanik Yapı	59
3.4. Kontrol ve Kumanda Yapısı	62
3.4.1. Sayısal Senkronoskop Devresi	65
3.4.1.1. Frekans Ölçümü	67
3.4.1.2. Gerilim Ölçümü	68

3.4.1.3. Faz Sırası Tespiti	69
3.4.1.4. Faz Farkının Tespiti.....	71
3.4.2. Doğru Akım Kısıyıcı Devresi	73
3.4.3. Doğrusal hareketlendirici Sürücü Devresi.....	74
4. ÇKHES'LERİN SAYISAL BENZETİMİ	76
4.1. Generatör Modeli.....	76
4.1. Hidrolik Türbin Modeli	78
5. PROTOTİP ÇKHES'DE FREKANS VE GERİLİM KONTROLÜ	84
5.1. Prototip ÇKHES'in Lokal Çalışması.....	84
5.1.1. Frekans-Gerilim Kontrolü	84
5.1.2. Frekans-Gerilim Kontrolünde Geliştirilen ve Kullanılan Teknikler	87
5.2. Deneysel Sonuçlar	96
5.2.1. Yöntem 1'e Göre Yapılan Frekans ve Gerilim Kontrolü	97
5.2.2. Yöntem 2'ye Göre Yapılan Frekans ve Gerilim Kontrolü	108
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	118
6.1. Sonuçlar	118
6.2. Öneriler.....	120
KAYNAKLAR.....	122
EKLER	133
EK 1 Kullanılan Cihazlara Ait Teknik Özellikler	133
Ek1.1 SKM 50/4'nın Teknik Özellikleri	133
Ek1.2 MAX3 Doğrusal Hareketlendiricinin Teknik Özellikleri	135
Ek1.3 UMG 96S Güç Analizörü'nün Teknik Özellikleri.....	137
Ek1.4 DWM 2000 Debimetresinin Teknik Özellikleri	140
Ek1.5 PA21R Basınç Sensörleri'nin Teknik Özellikleri.....	141
Ek1.6 RI 76TD Artımsal Hız Algılayıcısının Teknik Özellikleri	142
Ek1.7 EXB 840 IGBT Sürücüsünün Teknik Özellikleri	143
Ek1.8 IR210 MOSFET Sürücüsü'nün Teknik Özellikleri	144
EK 2 Basitleştirilmiş Pelton Türbin Denklemleri	146
EK 3 İmalat Resimleri	149
ÖZGEÇMİŞ.....	153

ÖZET

Yapılan bu çalışma ile, ülkemizin hali hazırda çok büyük bir kısmı değerlendirilememiş olan küçük su potansiyelinden yararlanarak elektrik üretimine katkı sağlamak üzere bir ÇKHES'in prototip tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan prototipin boyutlandırılmasında ve tasarımında, basitleştirilmiş hesaplamalar kullanılmıştır. Prototipin imalatı yerel imkânlarla yapılmıştır. Buradaki amaç, ÇKHES'lerin yerelde de yapılabilirliğini göstermek ve küçük sermayeli şirketlerin sektöre olan ilgisini arttırabilmektir.

Çalışmada, pelton türbinli HES'lerde bulunan hidrolik, mekanik ve elektriksel sistemin özelliklerini bünyesinde barındıran gerçeğe yakın esnek yapıya sahip bir ÇKHES oluşturulmuştur. Ayrıca pelton türbininin doğrusallaştırılmış modeli kullanılarak sayısal benzetimi yapılmış ve geliştirilen bir yöntemle gerçeğe daha yakın hale getirilmiştir.

Prototipin, lokal çalışma durumunda frekanstan bağımsız olarak adaptif gerilim kontrolü yapılmıştır. Adaptif kontrol yapısında PI ve PID parametreleri, bulanık mantık denetleyicisi ile hesaplanmıştır.

Frekans kontrolünde, geliştirilen Yüksek Eğimde Durdurma (YED) tekniği ile adaptif hale getirilen PI kontrolörlü bir yapı kullanılmıştır. Bu yapı bir adım daha geliştirilmiş ve bulanık mantık denetleyici ile adaptif hale getirilen bir kontrol yapısı oluşturulmuştur. Böylece frekans kontrolü, Bulanık Mantık Denetleyicili adaptif kontrolör ile, gerilim kontrolü ise hem PI hem de PID kontrolörleri ile yapılmıştır. Değişik yük şartlarında generatörün çalışması incelenmiş ve sonuçlar grafikler halinde alınmıştır. Sistemin kontrolünde PLC S7-300 kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çok Küçük Hidroelektrik Santraller, Gerilim Kontrolü, Frekans Kontrolü, Bulanık Mantık Denetleyici, Adaptif Kontrol, Hidrolik Türbin Modeli.

SUMMARY

Active and Reactive Power Control Based on Intelligent Controller at Micro Hydro Power Plant

There are many small water potential waiting for being used in our country and so by this study, a prototype micro hydro power plant design and production has been carried out to contribute in the electric production of the country by benefiting this potential. During the design and production of the system, simplified computations have been used. Construction of prototype was done by local facilities. The aim is to show the feasibility of these systems and to draw attention of the small company towards this way.

In this study, a micro hydro power plant which has hydraulic, mechanic and electrical features that are close to a real hydroelectric plant with a pelton turbine has been made up. Additionally, the numerical simulation of a pelton turbine has been done by nonlinear model and has been made by a method developed in close to reality.

For the local working state of the prototype, an adaptive voltage control that is independent of frequency has been made. The adaptive controller has been carried out by the parameters of PI and PID which are calculated by fuzzy logic controller.

The control of frequency has been done by a PI build which is rendered an adaptive state by the technique of High Gradient Stopping (HGS). Afterwards, this build has been improved one step further and adaptive control structure was implemented with fuzzy logic controller, the frequency control has been done by an adaptive controller with fuzzy logic controller, the voltage has been made by both PI and PID controller. The generator has been observed in different load states and the results have been obtained as graphic. PLC S7-300 has been used for the control of the system

Keywords: Micro Hydro Power Plant, Voltage Control, Frequency Control, Fuzzy Logic, Adaptive Control, Hydraulic Turbine Model

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Numara
Şekil 2.1. Klasik bir ÇKHES yapısı	19
Şekil 2.2. Mekanik enerji dönüştürücüleri	22
Şekil 2.3. Türbinin çevirme momenti ve çevirme kuvvetinin şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.4. 15 kW gücünde bir Francis Türbin-Generatör sistemi	28
Şekil 2.5. Cross-Flow türbininin genel görünüşü	29
Şekil 2.6. Kaplan-Uskur türbinleri	30
Şekil 2.7. Pelton türbini	31
Şekil 2.8. Pelton türbin tipleri.....	32
Şekil 2.9. Nozzle ve iğneler ile su jeti hızının ayarlanması.....	32
Şekil 2.10. Paket bir pelton türbin-generatör sistemi	32
Şekil 2.11. Batarya temelli ÇKHES'lerin genel yapısı	33
Şekil 2.12. Sincap kafesli asenkron generatörün bir kullanım şekli.....	34
Şekil 2.13. Rotoru sargılı asenkron generatörün bir kullanım şekli	35
Şekil 2.14. Çift beslemeli asenkron generatörün bir kullanım şekli.....	36
Şekil 2.15. Rotoru sargılı SG'ün kullanıldığı bir bağlantı şeması.....	37
Şekil 2.16. Sürekli mıknatıslı bir SG'ün kullanım şekli.....	38
Şekil 2.17. Değişken hızlı ÇKHES yapısı	38
Şekil 2.18. ÇKHES'lerde SG gerilim ve frekans çevrimi	39
Şekil 2.19. Debi ile yapılan frekans kontrolü	39
Şekil 2.20. Elektronik yük kontrolü genel gösterimi.....	41
Şekil 2.21. Elektronik yük kontrolündeki güç değişimleri.....	41
Şekil 2.22. Senkron Generatörün sınırlayıcıları	42
Şekil 2.23. Uyarım kontrol sisteminin blok gösterimi	43
Şekil 2.24. Fırçasız bir uyarım devresi	43
Şekil 2.25. Pilot uyarımlı fırçasız bir uyarım devresi	44
Şekil 2.26. ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre elektromekanik maliyetleri.....	49
Şekil 2.27. ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre türbin maliyetleri	50
Şekil 2.28. Kaplan türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri	51
Şekil 2.29. Francis türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri	51
Şekil 2.30. Francis türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri	52
Şekil 2.31. Pelton türbinli ÇKHES'lerin debiye göre maliyetleri	52
Şekil 3.1. Kapalı çevrim sisteminin genel görünümü.....	54
Şekil 3.2. Sistemin blok gösterimi.....	55
Şekil 3.3. Suyun kapalı çevrimdeki basınçları	56
Şekil 3.4. SKM 50/4 kademeli pompa.....	56
Şekil 3.5. Seçilen kademeli pompanın basınç, güç ve verim eğrileri.....	57
Şekil 3.6. ABB SAMI GS frekans konverteri	57
Şekil 3.7. Klasik bir su koçu (cebri borudaki basıncın ani değişimi).....	58
Şekil 3.8. RAF80 basınç sabitleyicisi.....	58
Şekil 3.9. DWM2000 debimetresi	58
Şekil 3.10. PA21R (Keller) basınç transmitteri.....	59
Şekil 3.11. Kapalı çevrim HES'in türbin-generatör kısmı	60
Şekil 3.12. Prototip sistemde kullanılan SG'ün uyarım şekilleri	62
Şekil 3.13. Prototip sistemin kontrol-kumanda elemanları	63
Şekil 3.14. Simatic Field PG, S7 300 ve operatör paneli	63

Şekil 3.15. Senkronoskop devresi	64
Şekil 3.16.UMG 96S güç analizörü ve akım-gerilim dönüştürücüleri	65
Şekil 3.17. RI76 Artımsal hız algılayıcısı	65
Şekil 3.18. Gerilim algılayıcı devre şeması	66
Şekil 3.19. Senkronoskopun ana programına ait akış diyagramı	66
Şekil 3.20. Giriş devresinin dalga şekilleri	67
Şekil 3.21. Karşılaştırmalı devre giriş ve çıkışları	67
Şekil 3.22. Frekans ölçme programının akış diyagramı	68
Şekil 3.23. Gerilim ölçme programının akış diyagramı	69
Şekil 3.24. Üç fazlı sistemin gerilim ve karşılaştırmalı çıkışı dalga şekilleri	70
Şekil 3.25. Generatör ve şebekenin faz sırası tespit programının akış diyagramı	70
Şekil 3.26. Generatör ve şebekenin faz farkı tespit	71
Şekil 3.27. Senkronizasyon öncesi, anı ve sonrasının dalga şekli	72
Şekil 3.28. Senkronizasyon öncesi faz farkları	72
Şekil 3.29. Senkronizasyon sonrası dalga şekli	73
Şekil 3.30. Uyarım akımını sağlayan DA kıyıcı devresinin şematik gösterimi	73
Şekil 3.31. PWM üretici ve DA kıyıcı devresi	74
Şekil 3.32. Elektrikli doğrusal hareketlendirici	74
Şekil 3.33. H-köprü prensip devresi ve sürücü kartı	75
Şekil 3.34. MAX3 doğrusal hareketlendiricisinin bağlantısı	75
Şekil 4.1. Hız kontrolü genel model	76
Şekil 4.2.Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresi	77
Şekil 4.3. Yuvarlak kutuplu senkron generatörün simulink modeli	78
Şekil 4.4.Generatörün tahriki anındaki gerilimlerin dalga şekli	78
Şekil 4.5.Enjektörü ile birlikte Pelton türbini ve kepeği	79
Şekil 4.6. Pelton türbinin giriş ve çıkış hız üçgeni	80
Şekil 4.7. Enjektör ve parametreleri	80
Şekil 4.8.Prototip ÇKHES'in Pelton türbininin deneysel verim eğrisi	82
Şekil 4.9. Prototip ÇKHES'in Pelton türbin modeli	82
Şekil 4.10. 10 bar basınçta yük atma deneyi (açık çevrim)	83
Şekil 4.11. 10 bar basınçta yük atma benzetimi (açık çevrim)	83
Şekil 4.12. 5 bar basınçta yük atma deneyi (açık çevrim)	83
Şekil 4.13. 5 bar basınçta yük atma benzetimi (açık çevrim)	83
Şekil 5.1.Lokal çalışma durumunda frekans ve gerilim çevrimi	84
Şekil 5.2.Gerilim ve frekans kontrolünün genel akış diyagramı	85
Şekil 5.3. PI ve PID olarak kullanılan FB 41 bloğunun iç yapısı	86
Şekil 5.4. Adaptif PI kontrol yapısı	87
Şekil 5.5. Hata ve hatanın türevinin giriş üyelik fonksiyonları	88
Şekil 5.6. K_p ve T_i 'nin çıkış üyelik fonksiyonları	88
Şekil 5.7. K_p ve T_i 'nin kural tabanı	88
Şekil 5.8. PI kontrolörün birim basamak cevabı	89
Şekil 5.9. Adaptif PI kontrolörün birim basamak cevabı	89
Şekil 5.10. Adaptif PID kontrol yapısı	89
Şekil 5.11. Hata ve hatanın türevinin giriş üyelik fonksiyonları	90
Şekil 5.12. Birim basamak cevabı	90
Şekil 5.13. Bulanık mantık denetleyicinin giriş ve çıkışlarının değişimi	90
Şekil 5.14. Gerilim kontrolünün akış diyagramı	91
Şekil 5.15. Basamak cevabındaki bölgeler	92
Şekil 5.16.Yüksek eğimde durdurma tekniği kontrol döngüleri	92

Şekil 5.17. Yüksek Eğitimde Durdurma tekniği akış diyagramı	93
Şekil 5.18. Frekansın adaptif yapılı kontrolü	94
Şekil 5.19. Frekansın adaptif yapılı kontrolüne ilişkin akış diyagramı	94
Şekil 5.20. frkns_hata değişkeninin üyelik fonksiyonu.....	95
Şekil 5.21. frkn_ht_tr değişkeninin üyelik fonksiyonları	95
Şekil 5.22. Adaptif kontrolöre ait kural tabanı	95
Şekil 5.23. fuzzy_cks değişkenine ait üyelik fonksiyonları	96
Şekil 5.24. Bulanık mantık denetleyicinin giriş-çıkış değişimi.....	96
Şekil 5.25. Klasik PI ile birim basamak frekans cevabı	97
Şekil 5.26. Yöntem-1 ile birim basamak frekans cevabı.....	97
Şekil 5.27. Yöntem-1 ile birim basamak gerilim cevabı	98
Şekil 5.28. 750 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1).....	98
Şekil 5.29. 750 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	98
Şekil 5.30. 750 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1).....	99
Şekil 5.31. 750 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	99
Şekil 5.32. 750 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	99
Şekil 5.33. 750 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	100
Şekil 5.34. 750 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	100
Şekil 5.35. 750 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	100
Şekil 5.36. 750 W-750 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	101
Şekil 5.37. 750 W-750 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1).....	101
Şekil 5.38. 750 W-750 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	101
Şekil 5.39. 750 W-750 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1).....	102
Şekil 5.40. 1500 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1).....	102
Şekil 5.41. 1500 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	102
Şekil 5.42. 1500 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1).....	103
Şekil 5.43. 1500 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	103
Şekil 5.44. 1500 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	103
Şekil 5.45. 1500 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	104
Şekil 5.46. 1500 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	104
Şekil 5.47. 1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)	104
Şekil 5.48. 1500 W-1500 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	105
Şekil 5.49. 1500 W-1500 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1).....	105
Şekil 5.50. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)	105
Şekil 5.51. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1).....	106
Şekil 5.52. Yöntem-2 ile birim basamak gerilim cevabı	108
Şekil 5.53. Yöntem-2 ile birim basamak frekans cevabı	108
Şekil 5.54. 750 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	108
Şekil 5.55. 750 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	109
Şekil 5.56. 750 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	109
Şekil 5.57. 750 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	109
Şekil 5.58. 750 VAr yüklenme durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	110
Şekil 5.59. 750 VAr yüklenme durumunda frekans cevabı (Yöntem-2).....	110
Şekil 5.60. 750 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	110
Şekil 5.61. 750 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	111
Şekil 5.62. 750 W-750 VAr yüklenme durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	111
Şekil 5.63. 750 W-750 VAr yüklenme durumunda frekans cevabı (Yöntem-2).....	111
Şekil 5.64. 750 W-750 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	112
Şekil 5.65. 750 W-750 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2).....	112

Şekil 5.66. 1500 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	112
Şekil 5.67. 1500 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	113
Şekil 5.68. 1500 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2).....	113
Şekil 5.69. 1500 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	113
Şekil 5.70. 1500 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	114
Şekil 5.71. 1500 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	114
Şekil 5.72. 1500 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	114
Şekil 5.73. 1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	115
Şekil 5.74. 1500 W-1500 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	115
Şekil 5.75. 1500 W-1500 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	115
Şekil 5.76. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)	116
Şekil 5.77. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)	116

TABLOLAR LİSTESİ

	Numara
Tablo 2.1. Hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması	19
Tablo 2.2. Hidrolik Türbin Tiplerinin Özgül Devir Sayıları	26
Tablo 2.3 Düşülerine göre türbinlerin kullanım yerleri.....	27
Tablo 2.4 Hidrolik türbinlerin verimleri	27
Tablo 2.5. ÇKHES’lede kullanılan generatörlerin güçlerine göre sınıflandırılması	33
Tablo 2.6 ÇKHES’lerde kullanılan türbin ve generatörlerin tipleri	33
Tablo 2.7 Batarya temelli ÇKHES’lerde kullanılan türbin-generatörlerin tipleri	33
Tablo 5.1. K_p , T_i , T_d ’ye ait kural tabanları.....	90
Tablo 5.2. Generatörün yükleme durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-1).....	106
Tablo 5.3. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-1)	106
Tablo 5.4. Generatörün yükleme durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-1)	106
Tablo 5.5. Generatörden yük kalkması durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-1)	107
Tablo 5.6. Generatörün yükleme durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2).....	116
Tablo 5.7. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2)	117
Tablo 5.8. Generatörün yükleme durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-2)	117
Tablo 5.9. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2)	117

SİMGELER LİSTESİ

H_n	: Net düşü
η_Q	: Debişel verim
η_I	: Türbin rotorunun iç verimi
η_M	: Mekaniksel verim
η_g	: Generatör verimi
η_T	: Genel verim
N	: Türbin gücü
C	: Suyun hızı
u	: Çevresel hız
p	: Basınç
g	: Yerçekimi ivmesi
γ	: Su yoğunluğu
$\dot{I}$	: Suyun döndürme kuvveti
T	: Teğetsel kuvvet
J	: Moment
M	: Döndürme momenti
n_s	: Türbin özgül hızı
n_s	: Türbin özgül hızı
B	: Çarka su veren ağzın yüksekliği
D	: Çarkın çapı
d_0	: Su jeti çapı
D_0	: Su jeti ekseninin teğet olduğu çark çapı
C_{pr}	: Toplam proje maliyeti
C_{EM}	: Toplam elektromekanik maliyeti
C_K	: Kaplan türbinli santral maliyeti
C_F	: Francis türbinli santral maliyeti
C_P	: Pelton türbinli santral maliyeti
d	: Su jeti çapı
b	: Kepçe genişliği
h	: Kepçe boyu
t	: Kepçe derinliği
Z	: Kepçe Sayısı
S	: Görünür güç
P	: Aktif güç
f	: Frekans
U_f	: Uyarım gerilimi
I_f	: Uyarım akımı
λ	: Akı bağı
R	: Direnç
T_e	: Moment
L_{ls}	: Stator sargısı kaçak indüktansı
L_{lfd}	: Uyarım sargısı kaçak indüktansı
B	: Sürtünme katsayısı
T_m	: Mekaniksel moment
T_e	: Elektriksel yük momenti

KISALTMALAR LİSTESİ

HES	: Hidroelektrik Santral
ÇKHES	: Çok Küçük Hidroelektrik Santral
EYK	: Elektronik Yük Kontrolü
PAT	: Pompa-Türbin
PI	: Oransal Integral Denetleyici
PID	: Oransal Integral Türev Denetleyici
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
SG	: Senkron Generatör
OGR	: Otomatik Gerilim Regülatörü
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolör
YED	: Yüksek Eğitimde Durdurma
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynağı
SCADA	: Uzaktan Kontrol ve Gözleme Sistemi (Supervisory Control And Data Acquisition)

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bilgi

Fosil yakıtların giderek azalması, bu yakıtlardan elde edilen enerjinin çevreye verdiği zararların fazla olması ve buna ek olarak enerji tüketiminin gittikçe artması, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimi arttırmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan hidroelektrik santraller (HES) Dünya'daki elektrik enerjisi gereksiniminin yaklaşık olarak %20'sini karşılamaktadır. Bu durum hali hazırda fazla değerlendirilmemiş olan çok küçük hidroelektrik santrallerin (ÇKHES) önemini arttırmıştır.

Genellikle akarsu santralleri şeklinde inşa edilen ÇKHES'lerde rezervuar yoktur. Bunun yerine sadece türbine giden cebri borunun akarsuya bağlandığı noktada su yüksekliğini düzenleyen bir yapı (yükleme havuzu) bulunmaktadır. Dolayısıyla ÇKHES'ler, büyük ölçekli HES'lerin oluşturduğu (yerleşim birimleri ve tarihi eserlerin su altında kalması, ekolojik yapının bozulması vb.) olumsuz çevre etkilerine neden olmamaktadırlar. ÇKHES'lerin gücü 5-100 kW arasında değişmektedir. 5 kW altındaki güçler ise en küçük HES sınıfına girmektedir. Bu sınıflandırma ülkelere göre farklılıklar göstermekle birlikte temel prensipler küçük ve büyük ölçekli HES'ler için aynıdır.

Enerji ve sulama amaçlı inşa edilmiş birkaç küçük baraj dışında, Türkiye'de HES alanındaki gerçek hareketlilik İkinci Dünya Savaşı sona erdikten sonra başlamıştır. O zamandan beri, baraj ve HES inşaatı elektrik talebine paralel bir seyir izlemiştir. O dönemlerdeki enerji talebine küçük hidroelektrik projelerin kafi gelmesi nedeni ile büyük ölçekli HES'lere yönelme olmamıştır. Daha sonra enerji talebinin hızla artmasıyla büyük HES'lere ağırlık verilmiş, bu defa da küçük HES'ler gözardı edilmiştir. Bugün Türkiye'nin büyük su potansiyelinin çoğunluğu değerlendirilmiştir. Dolayısıyla, önümüzdeki yıllarda hidroelektrik üretme kapasitesinde sadece mütevazı bir artış tahmin edilebilir.

Ülkemizdeki mevcut 26 havzada yapılan çalışmalara göre 126 TWh/yıl olarak bilinen hidroelektrik enerji potansiyeli, gelişen teknoloji ve ekonomik şartlar da göz önüne alınarak 193 TWh/yıl olarak belirlenmiştir. Ülkemiz, bu verilere göre Dünya'da % 1 ile 8. sırada, Avrupa'da ise %14 ile Rusya ve Norveç'ten sonra 3. sırada yer almaktadır [1]. Küçük, çok küçük ve en küçük HES potansiyeli, Türkiye'nin ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik potansiyelinin %15'i kadardır. Buna göre, 1 MW'ın altındaki değerlendirilebilir hidrolik potansiyel, 29 milyar kWh/yıl'dır.

1.2. ÇKHES'ler İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK), fosil yakıtlara kıyasla birçok üstünlüğü vardır. Hidrolik, rüzgar, güneş ve biyogaz gibi kaynaklar, küresel enerji ihtiyaçlarını karşılamak için potansiyel YEK adaylarıdır. Enerji üretiminde, çevreye etki bakımından fosil yakıtlı santrallere göre önemli olumlu etkilere sahip olan YEK'nın kullanılması, çevresel olumsuz etkilerin azalmasına neden olmuştur. YEK sadece Türkiye için değil, aynı zamanda dünyanın geleceği için önemli bir kaynak olarak kabul edilmektedir. İletim ve kontrolündeki avantajları nedeni ile küçük ve çok küçük güçlü HES'ler, yenilenebilir enerji teknolojisi arasında önemli bir yer tutmaktadır. Bu nedenle günümüzde ÇKHES'lere yönelik çalışmalar gittikçe artmıştır. Yapılan bilimsel çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Aslan ve arkadaşları [2], Kütahya'nın Tavşanlı ilçesinde 1987 yılında Türkiye (DSİ) Devlet Su İşleri tarafından sulama ve taşkın kontrolü amacıyla inşa edilen Kayaboğazı barajının, hidroelektrik enerji üretimi fizibilitesini incelemişlerdir. Değişik senaryolar dikkate alınarak, kurulu güç potansiyelinin 313 kW ile 5 MW arasında olabileceği hesaplanmıştır. Barros [3], Portekiz'deki HES'lerin gelişen teknoloji ile birlikte rehabilite edilmesi sonucunda ne gibi bir değişimlerin olacağı üzerinde durmuştur. Ciddi yatırımlar yapılarak revize edilen HES'lerin verimlerinin yükseleceği ve üretim miktarlarının artacağı dolayısı ile kurulu gün artacağı sonucuna varmıştır. Ogayar ve arkadaşları [4], eski santrallerin rehabilite edilmesi için ve yeni santrallerin maliyetlerinin yaklaşık olarak çıkarılabilmesi için bir ampirik formül ortaya koymuşlardır. Dorian ve arkadaşları [5], yaptıkları çalışmada, yer altı enerji kaynakları bakımından oldukça zengin olan Orta Asya ve Sincan Özerk bölgesinin hidrolik enerjisini özellikle ÇKHES durumunu incelemişlerdir. Bu bölgedeki ülkelerin birlikte çalışmalarının avantajlı olacağı ifade edilmiştir. Saket [6] yaptığı analiz ve uygulama çalışmasında, atık sulardan enerji üretimi üzerinde durmuştur. Yapılan pratik bir çalışma ile Banaras Hindu Üniversitesi Teknoloji Entitüsünün elektrik enerjisi ihtiyacı karşılanmıştır. Çalışmada Kaplan türbini ve asenkron generatör kullanılmıştır. Raman ve arkadaşları [7], Malezya'nın dağlık bir alanındaki 5-100 kW'lık ÇKHES potansiyelini incelemişler. Çalışmada öncelikle topoğrafik harita üzerinde yer, yükselti, saha vb. seçimi yapılmıştır. Daha sonra hidroloji çalışması için, sahadaki suların büyük çoğunluğunun kayıtlı verilerinin olmaması nedeni ile havza su dengesi yönetimine göre tahminler yapılmıştır. Bu verilere göre minimum düşü 50 metre olarak alındığında 109 farklı noktada 20,4 MW'lık bir potansiyel ortaya çıkacağını göstermişlerdir. İslam ve

arkadaşları[8], fosil enerji kaynakları az olan Bangladeş için yenilenebilir enerji kaynaklarını durumunu incelemiştir. Ülkenin dışa bağımlılığının azaltılabilmesi için bunların üzerinde özellikle durulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Yi ve arkadaşları [9], yaptıkları bu çalışmada Kore'nin HES potansiyelinin daha doğru değerlendirilmesi için coğrafi bilgi sistemlerini kullanmışlar. Klasik yöntemlere göre daha az zaman ve para gerektiren coğrafi bilgi sistem için destekli yer seçimi üzerinde durulmuştur. Güney Kore'de bir havza üzerinde teorik gerçekleştirilen araştırma, adım adım değişik kriterlere göre incelenmiş ve en uygun yer seçimi yapılmıştır. Wang ve arkadaşları [10], hidrolik potansiyelin değerlendirilmesini üst düzeye çıkarma düşüncesi ile sulama sistemleri üzerine kurulacak ÇKHES uygulamaları üzerine durmuşlardır. Kurulacak santrallerin sistem maliyetlerini başlangıçta arttıracak, ancak uzun vadede sistemi amorti edeceği ve ülke kaynaklarının verimli kullanılmasına katkı sağlayacağı ifade edilmiştir. Thornbloom ve arkadaşları yaptıkları çalışmada[11], Zaire'nin ÇKHES durumunu incelenmişler ve örnek olarak altı farklı nokta için cross-flow türbin parametrelerini hesaplamışlardır. Sonuçta, ÇKHES'lerin neredeyse tamamının yerel imkanlarla üretilebileceğini ve hem ülke ekonomisine hem de yerel firmaların gelişimine katkı sağlayacağını ifade etmişlerdir. Blanco ve arkadaşları [12], Brezilyanın Amazon bölgesinde elektrik enerjisi yaygın olarak kullanılmadığından, bu bölgenin kendi potansiyelinden elektrik enerjisi üretebilmesi durumunu ele almışlardır. Bölge için hidrolojik, topoğrafik, jeoteknik, çevre, enerji, ekonomik ve sosyal yönler göz önüne alınarak ÇKHES'lerin sürdürülebilirliği incelenmiştir. Çalışmada, iki türbinli sistem ile tek türbinli sistem arasında yapılan analizde, çift türbinli sistemin daha avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır. Schuster ve arkadaşları[13], içme suyu sistemlerinde kullanılacak bir ÇKHES önerisinde bulunmuşlardır. Ev uygulamaları için önerilen sistemde maliyet ve verim göz önünde bulundurularak asenkron generatör ve pelton türbini kullanılmıştır. Fangtong ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada [14], bir HES'in tasarımı ve parametre tahmini üzerinde çalışmışlardır. Santralde kullanılacak hidrolik türbin özyineli en küçük kareler tahmin (recursive least square estimation (RLES)) algoritması kullanılarak belirlenmiştir.

Mohibullah ve arkadaşları [15], Malezyada bir nehir için, Matlab kullanılarak 50 kW gücünde bir ÇKHES hesaplaması yapmıştır. Yapılan bu hesaplamalarda santralin üretim ve yük faktörleri, üretilen enerjinin maliyeti, inşaat ve santral maliyetleri vb.dikkate alınmıştır. Minott ve Delisser [16], küçük HES'lerin gelişimi için maliyet azaltma yöntemleri üzerinde çalışmışlardır. Bunun için, araştırma ve değerlendirme, hidroloji,

jeolojik etüt, mühendislik jeolojisi, haritalama, vb gibi ana görevler ifade edilmiştir. Gelişmekte olan ülkelerde sermaye maliyetleri azaltmanın yolu olarak sistemde PVC, ahşap, cam elyaf takviyeli polyester, polietilen ve asbestli çimento, vb kullanım durumları incelenmiştir. Kontrol sistemlerinin maliyetini azaltmak için ise türbin hız kontrolü yerine elektronik sensörlerinin kullanılmasını önermişlerdir. Yine türbin maliyetlerinin azaltılması için pompa olarak kullanabilecek türbinleri tavsiye etmişlerdir. Anagnostopoulos [17], biriktirmesiz bir santral için iki farklı türbin üzerinde durmuştur. Türbinlerin seçimi ve boyutlandırılmasında maliyet analizini gerçekleştirerek, en uygun türbin seçimini buna göre yapmıştır. Litifu ve arkadaşları [18], Japonya'nın doğal enerji kaynaklarının yetersiz olduğu bir bölgesinde hibrit sistem (Rüzgar-Hidroelektrik) kurmuşlar. Dağlık bölgede ÇKHES uygulamasının ulaşım probleminin yanı sıra bir çok avantajının da olduğu ve bunlardan en önemlisinin maksimum net düşü için fazla bir çalışma gerektirmemesi olarak ifade edilmiştir. Bu enerji üretim santrallerinin kurulumu ve işletiminde bölgedeki yabani hayvanlara olan etkilerinin göz önünde tutulması gerektiği vurgulanmıştır. Çalışmanın sonunda ekonomik analiz de yapılarak avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Nyabeze ve arkadaşları [19], Zimbabwe'nin ÇKHES potansiyeli üzerine yapılan çalışmada genel bir değerlendirme yapılmışlardır. Yine bu çalışmada 20 kW'lık bir ÇKHES'in 80.000 \$'ın altında bir maliyetle yapılabileceği ifade edilmiştir. Forouzbakhsh ve arkadaşları [20], orta ve küçük ölçekli HES'ler için ayrıntılı bir finans analizi yapmıştır. Ülke potansiyellerinin geliştirilmesinde devletin değil, özel sektörün eliyle yapılmasının daha verimli olacağı sonucuna varılmıştır. Yap-İşlet, Yap-İşlet-Devret gibi modeller ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Alexander ve Giddens [21], yaptıkları çalışmada Pelton türbinlerin kullanıldığı bir ÇKHES'te, cebri boruların toplam maliyete etkisi ve optimizasyonu üzerinde durmuşlardır. 2 m net düşünün altındaki santrallerde cebri boru maliyetinin neredeyse hiç bir etkisinin olmadığı ifade edilmiştir. Dudhani ve arkadaşları [22], küçük güçlü HES potansiyellerinin belirlenmesi için yerleşim düzenini, orman ve bitki örtüsünü, kar kapsama alanını, su kaynaklarını ve kullanıcıları göz önünde tutarak ve uydudan alınan verileri de işleyerek kapsamlı bir çalışma ortaya koymuşlardır. Tayland için benzer bir çalışma Rojanamon ve arkadaşları [23] tarafından coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Çalışmada bir havza için ÇKHES olarak değerlendirilebilir 20 farklı nokta tespit edilmiştir. Bunlar muhtemel debi, düşü, çevresel etki, maliyet analizi gibi birçok yönden olarak analiz edilerek, buralar için tasarımlar yapılmıştır. Montanari [24], yaptığı çalışmada ekonomik olarak ÇKHES'lerin nasıl ucuza mal edilebileceği üzerinde

durmuştur. Santralin çalışma süresi, işletme giderleri vb. durumlarını göz önüne alarak ekonomik analizini yapmış ve ilk yatırım maliyetleri yüksek olan Francis ve Kaplan yerine daha ucuza mal edilebilen Propeller ya da Michell-Banki türbinini tavsiye etmiştir. Aggidis ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada[25], küçük HES’lerde kullanılan Kaplan, Francis ve Pelton türbinlerinin ayrıntılı maliyet analizi verilmiştir. Analizler, daha önce yapılan çalışmalardaki ampirik formüller kullanılarak ve elektromekanik, düşü ve güç değerleri ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada bu 3 farklı türbin tipi, çark çaplarına göre analiz edilmiştir. Adhau ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [26], santrallerin birim maliyetlerinin tasarımıyla doğrudan alakalı olduğu ve kullanım sürelerinin uzunluğu ile maliyetlerin ters orantılı olduğu ifade edilmiştir. Bir santralin maliyet kalemleri ve oranları verilmiştir. Sonuç olarak iyi tasarımın önemine vurgu yapılmıştır. Sternberg yaptığı çalışmada [27], HES’lerin sosyal ve çevresel etkilerini çok boyutlu olarak incelemiştir. HES’lerin, enerji üretiminde, ekonomik gelişmede, insanların sosyo-kültürel yaşamında, kentlerin gelişiminde ve tarımda etkilerini irdelenmiştir. Sonuçta HES’lerin büyüklüklerine bağlı olarak her yönü ile etkilerinin de büyük olduğu ifade edilmiştir.

Alexander ve Giddens [28], 200 W ile 20 kW arasındaki HES’lerin tüm bileşenlerinin yerel imkanlarla elde edilmesi üzerinde durmuşlardır. Bunun için araştırmacılar tarafından bir modüler sistem tasarlanmış ve bu tür bir uygulamanın 3. dünya ülkelerindeki elektriksiz bölgeler için önemli bir adım olduğu ifade edilmiştir. Bilinen \$/kW maliyetinin çok aşağı çekileceği sonucuna varılmıştır. Nouni ve arkadaşları [29], Hindistan’da uzak yerlerdeki insanların yaşam kalitelerini arttırmak için ÇKHES projelerinin tekno-ekonomik fizibilite değerlendirmesini yapmıştır. ÇKHES projelerinin sermaye maliyeti üzerine bir analiz yapmışlardır. Çalışmada ÇKHES maliyetlerinin 2715–5095 \$/kW civarında olduğunu ve bu aralığın santralin çalışma süresine göre değişim göstereceği ifade edilmiştir. Ayrıca maliyet hesabında ulaşılması çok zor yerler baz alınmıştır. Yine maliyet hesabında tüketiciye kadar olan sistem göz önüne alınmıştır. Anup ve arkadaşları [30], Nepal’de elektrik bulunmayan evlerin kendi elektriklerini üretebilmesi için bir proje önermişlerdir. Proje, şebeke sularının sonuna bağlanacak bir pico pelton türbini ile evlerin en azından aydınlatmasının sağlanabileceğini ortaya koymaktadır.

Williams [31], ÇKHES’ler de PAT’lerin kullanılması fikrini ilk olarak ortaya atmıştır. ÇKHES’ler için farklı türde üç örnek PAT incelenmiştir. Çalışmada, PAT ile birlikte asenkron generator kullanılmıştır. Yapılan çalışmada senkron generatör de kullanılmış, ama asenkron generatörün PAT’lerle performansının daha iyi olduğu ve birbirlerini

tamamladıkları sonucuna varılmıştır. Nowicki ve arkadaşları [32], pompa-türbin (PAT) olarak kullanılabilecek yeni bir hidrolik makina modellemiş, tasarımını ve üretimini yapmıştır. Son zamanlarda kullanımı artan bu makinalar pompaj rezervuarlı HES'lerde kullanılmaktadır. Arriaga [33], 40-500 kişilik bir tüketici grubunun enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla, şebekeden izole bir bölge için ucuz enerji üretim yöntemi olarak PAT'lerin ayrıntılı analizini yapmış ve bunların kullanımını önermiştir. Bhattacharya [34], PAT'lerin multi-jet Pelton türbinleri, crossflow türbinleri ve küçük Francis türbinlerinin çalışma bölgesinde de kullanılabileceği sonucuna varmıştır. Joshi ve arkadaşları [35], net düşüsü 5,5 m ve gücü 25 kW olan ÇKHES için yüksek özgül hızlı pompa seçimine yönelik bir yöntem tanımlamışlardır. Santralde kullanılan türbinler ile PAT'lerin özgül hızları arasındaki ilişki ortaya çıkartılmıştır. Derakhshan ve Nourbakhsh [36] yaptıkları deneysel çalışma ile PAT'lerin maksimum verimli olduğu noktaları ortaya çıkarmışlar ve elde ettikleri sonuçları yayınlamıştır. Alexander ve arkadaşları [37], ÇKHES'lerde kullanılabilecek radyal ve karışık akımlı iki farklı türbin tasarlamıştır. En yüksek verim değeri %70 olan türbinlerin 2-50 net düşü bölgesinde uygun olduğu ifade edilmiştir.

Blyden ve Lee yaptıkları çalışmada [38], ÇKHES ve mikro gridleri Afrika özelinde incelemişler. Sonuçta kıtanın genel gelişmişliği de gözönüne alındığında büyük katkıları olacağı sonucuna varılmıştır. Lidula ve Rajapakse [39], mikrogridler üzerinde yapılan çalışmaları derlemiş ve konunun önemini farkederek bilimsel çalışmaların altyapısını oluşturan ülkeleri ve imkanlarını açıklamışlardır. Bu altyapıya sahip olan ülkelerdeki deneysel sistem adetleri; Japonya 5, Kanada, ABD, Almanya ve Yunanistan'da 2, İngiltere, Hollanda, İtalya ve Çin'de 1 olmak üzere, toplam 17 adettir. Kanase-Patil ve arkadaşları[40], elektriksiz yerleşim yerleri için birbiri ile entegre edilmiş yenilenebilir enerji kaynakları fikrini bir benzetim çalışması ile irdelenmişlerdir. Çalışmada, Hindistanın Uttarakhand eyaletindeki bir kırsal bölge için LINGO ve HOMER yazılımları kıyaslamalı kullanılarak hibrid bir sistemin analizi yapılmıştır. Ranjitkar ve arkadaşları[41], coğrafi özellikleri nedeni ile enerji (elektrik ve fosil yakıtlar) ulaşımının pahalı olduğu Kanada'da uzak yerleşim yerlerinin ÇKHES durumu incelemiştir. Ülkede ÇKHES'lerin büyük bir kısmının ulusal şebeke bağlantısı yoktur (off-grid). Kanada için ÇKHES'lerin avantajlı olduğu ve toplam güçleri etkisinde sera gazlarının azalmasına büyük katkı sağlayacağı ifade edilmiştir. Wang ve arkadaşları[42], kırsal kesimin daha güvenilir bir şekilde beslenebilmesi amacı ile ÇKHES'lerin mikro şebeke oluşturma durumunu ve gerilim-frekans kararlılığı konusunu incelemişlerdir.

Rajakaruna [43], değişken hızlı sistemlerde asenkron generatörün avantajlarını ortaya koymak amacı ile bir benzetim çalışması yapmıştır. Yaptığı benzetimde izole bir ÇKHES'te bu generatörü kullanmış ve sonuçlarını vermiştir. Ion [44], senkron ve asenkron generatörün kullanıldığı iki tane ÇKHES'den ibaret bir üretim sisteminin kontrolü üzerinde durmuştur. Böyle bir sistem üzerinde çalışmadaki amaç, üretilen enerji kalitesini ve hidrolik potansiyelden üretilen enerjinin miktarını arttırmaktır. Tamrakar ve arkadaşları[45], senkron generatör, asenkron generatör ve STATCOM'lu bir yapının benzetimi ve deneysel çalışmaları yapılmıştır. Böyle bir yapının tercih edilmesi ile hidrolik türbinle tahrik edilen generatörlerin daha kaliteli enerji üretilebileceğı dolayısı ile sistem kalitesini artırılabilceğı öngörülmüştür. Sonuçta sistemin genel performansının çok iyi olduğı ifade edilmiştir. Breban ve arkadaşları yaptıkları çalışmada[46], aynı türbin ile tahrik edilen kalıcı mıknatısiyetli senkron generatör ile çift beslemeli asenkron generatör ve inverterlerin bulunduğı bir sistem önermişlerdir. Sistemin benzetim sonuçları ve laboratuvar şartlarında elde edilmiş sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Marquez ve arkadaşlarının yaptıkları[47] benzetim çalışmasının amacı, kullanıcılara daha güvenli bir enerji aktarmaktır. Bu amaçla üretilen AA gerilim tam dalga köprü devresi ile doğrultulmuş ve Boost Converter ile gerilimi yükseltilmiştir. Bu gerilim üç seviyeli bir inverter ile AA'a çevrilmiş ve transformatör üzerinden sisteme verilmiştir. Ion ve Marinescu [48], senkron generatörlü bir ÇKHES ile asenkron generatörlü bir ÇKHES'in birbirlerine paralel bağlanması ve çalışması üzerinde durmuşlardır. Yapılan benzetim çalışmasında gerilim ve frekans kontrolünde ayarlanabilir kapasiteler ve omik yük bankaları kullanılmıştır. Mishra ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [49], çift beslemeli asenkron generatörün aktif ve reaktif güç kontrolünü bulanık mantık denetleyicisi ile gerçekleştirilmişlerdir. Bulanık mantık denetleyicileri PI parametrelerinin hesabında kullanılmıştır.

1980'li yıllarda elektronik yük kontrolü (EYK) uygulamaları ile HES'lerin güvenilirliği artırılmıştır. Paish [50], yaptığı değerlendirmede teknolojiye gelişmeleri de göz önüne alarak, ÇKHES'lerin gelişmiş ülkelerdeki maliyetinin 1000 \$/kWh'in altında olduğunu ifade etmiştir. Singh ve arkadaşları [51], değişken hızlı sistemlerde daha avantajlı olan asenkron generatörün kullanıldığı bir sistemde frekans kontrolü için EYK çalışması yapmıştır. Benzetimde Matlab ve deneysel çalışmada DSP kullanılmıştır. Şerban ve Marinescu [52], gerilim ve frekans kontrolünün güvenilirliğini arttırmak için rüzgar santralinde asenkron generatör ÇKHES'te senkron generatörün kullanıldığı bir dağıtık

Üretim sistemi (Distributed Generation System-DGS) zerinde çalışmışlardır. Böyle bir mikro şebekenin frekans kontrolü, EYK ile yapılmıştır. Çalışmada EYK'nın yanı sıra ak akü şarj birimleri de mevcuttur. Bu yapı ile enerji sadece ısı olarak harcanmamış aynı zamanda aküler şarj edilmiştir. Dolayısı ile elektrik enerjisi başka amaçlarda kullanılmak üzere depolanmıştır. Jarman ve Bryce [53], laboratuvar ortamında 40 kW'lık bir KHES prototipi elde etmişlerdir. Çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan Pelton türbininin debisi 121 lt/s ve düşüsü ise 15 m'dir. Elde edilen sistem ayrıca PSCAD yazılımı ile modellenmiş ve sonuçları kıyaslanmıştır. Çalışmadaki amaç KHES'lerde yaygın olarak kullanılan kendinden uyartımlı senkron generatörlerin lokal çalışmada aslında güvenli bir kaynak olmaması nedeni ile bunu geliştirmenin üzerinde durulmuştur. Farklı durumlarda sistem cevabı incelenmiştir. Murthy ve arkadaşları [54], inşaat yapı gereksinimi minimum olan bir en küçük HES sistemi elde etmişler. Sistemde kendinden uyartımlı bir asenkron generatör, pelton türbini ve tristör kontrollü EYK kullanılmıştır. Türbini 23 m net düşü ve 13 lt/s debi ile çalışmaktadır. Çalışmada, değişik yük durumlarına ait deneysel sonuçlar verilmiştir. Marinescu ve Ion [55], asenkron generatör kullanılan KHES'in gerilim ve frekans kontrolü için ısı dirençli ve akü şarj birimli iki farklı yöntemi önermişler ve bunun benzetimini yapmışlardır. Çalışmada ne sürülen yöntemler ile yükün besleme sürekliliği arttırılmıştır.

Lin ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [56], mikro şebekelerin senkronizasyonunda Isochronous, yani aktif güç akışı olmaksızın bir senkronizasyon yöntemi üzerinde durmuşlardır. Benzetimde, izole bir şebekedeki üretim sistemleri olarak HES ve termik santral ele alınmıştır. Paralele alma ya da senkronizasyon, literatürde uzun zamandan beri çalışılmakta olan bir konudur. Gorecki ve arkadaşları [57], özellikle hastaneler için enerji analizini yapabilecekleri ucuz bir sistem üzerinde çalışmışlardır. Yaptıkları alışmada DSP kullanarak adaptif bir ölçüm ve senkronizasyon sistemi gerçekleştirmişlerdir. Emam yapmış olduğu çalışmasında [58], PLC ile kontrolü yapılan bir sistemde gerilim ve frekans bilgilerinin hesaplanmasında PIC mikrodenetleyicisini kullanmıştır. Malik ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada[59], bir hidroelektrik santralde frekansın 886 Intel mikroışlemcisi vasıtası ile ölçümü ve hesaplanması yapılmıştır. Wilmschurst[60], kitabında mikrodenetleyiciler ile değişik frekans lme yöntemlerini ifade etmiştir. Dawei ve arkadaşları [61], bir g sisteminde fazör temelli frekans lme yöntemi üzerinde çalışmıştır. Zhou ve arkadaşları [62], dijital frekans lme teknikleri üzerine çalışmıştır. Yulan ve arkadaşları [63], güç sistemlerinde frekans ölümü

için yeni bir yöntem üzerine çalışmışlar ve sadece işaretin sıfır geçişlerini saymışlardır. Xiaoying ve arkadaşları[64], frekans ölçümünü lojik kapılar ve flip-floplar kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Kahraman[65], PIC mikrodenetleyicisini kullanarak 3 fazlı sistemin faz sırasının belirlenmesi ve frekans ölçümünü gerçekleştirmiştir.

Guzun ve arkadaşları [66], yerel imkanlarla alçak düşülerde kullanılan bir türbin tasarımı üzerinde durmuş ve bundaki önceliğin eğitim olduğunu özellikle vurgulamışlardır. Elde edilen türbinin verimi maksimum %60 civarındadır. Bu sistemle ÇKHES'leri daha iyi bilen öğrenciler yetiştirilecektir. Adhau [67] yaptığı çalışmada, ÇKHES uygulamasının yapılabileceği sekiz farklı yer için hidrolik ve ekonomik analizler yaparak komple bir sistem önermiştir. Ayrıca laboratuvar şartlarında en küçük (Piko HES) hidroelektrik model geliştirmiştir. Geliştirdiği bu modeldeki türbin çapı 20,3 cm ve generatörün çıkış gerilimi 1,8 V'tur. Dal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [68], laboratuvar ortamında 20 kW'lık bir ÇKHES oluşturmuştur. Çalışmada senkron ve asenkron generatörler kullanılmıştır. Sistem için iki farklı güçte Cross-Flow türbini tasarlanmıştır. Öztürk [69], ÇKHES'lerdeki gerilim ve frekans kontrolünü PLC kullanarak gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışmada türbin yerine DA motoru kullanılmıştır. Salhi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [70], 185 W gücünde pelton türbinin kullanıldığı bir HES prototipi kurmuşlardır. Yapılan çalışmada frekans kontrolü klasik PI ile yapılmış ve buna ait sonuçlar verilmiştir. Salhi ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [71], ÇKHES'lerde frekans kontrolünde bulanık mantık denetleyici kullanmışlardır. Çalışmada, sistemin genel güç üretimi, rezervuardaki su seviyesi gibi parametrelere göre belirli fiderleri devre dışı bırakan ya da alan bir fuzzy karar vericisi vardır. Böyle bir sistemin performansı üzerine yapılan çalışmada iyi sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan diğer çalışmalarda [72-73], hız röglatörü olarak elektrikli bir servomotorun avantajlı olacağı öne sürülmüş ve önerilmiştir. Hanmandlu ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında[74], ÇKHES'lerde frekans kontrolü üzerinde durmuşlardır. Bu çalışmada hız regülâtörü olarak elektrikli bir servomotor önerilmiştir. Çalışmada dört farklı algoritmanın dahil edildiği karmaşık bir yapı kullanılmış ve benzetimin çok iyi bir performansa sahip olduğu, sonuçlar ile gösterilmiştir.

Nand Kishor ve arkadaşları [75], hidrolik türbinler ve santrallerin modellenmesi konusundaki literatürü araştırmış ve bir derleme çalışması yapmışlardır. Modellerde sırası ile lineer, nonlineer ve modern yöntemler ele alınmıştır. Hidrolik türbinlerin modellenmesinde, çalışma bölgelerindeki zaman değişimleri ve nonlineerlikler nedeniyle büyük zorluklar yaşanmaktadır. Dolayısı ile böyle bir yapının kontrolünde de aynı

zorluklarla karşılaşılması muhtemeldir. Salhi ve arkadaşları [76], Takagi-Sugeno (TS) bulanık mantık denetleyiciyi böyle bir sistemin modellenmesinde ve kontrolünde kullanarak gerçeğe daha yakın ve iyi performansa sahip bir kontrolör elde edileceğini göstermişlerdir. Bu çalışmada hem benzetim hem de pratik uygulama yapılmıştır. Hidrolik Santralin modellenmesi hidrolik, mekanik ve elektriksel dönüşümü sağlayan türbin modeli ve hız regülatörü modeli olarak iki aşamada yapılmaktadır. Suyun cebri boru içindeki sürtünmesinden kaynaklanan hidrolik kayıplar çok düşük mertebelerde olmaktadır. Bu nedenle, bir kısım modellerde hidrolik kayıplar dikkate alınmaz. Bunlar doğrusal modellerdir. Literatürde, hidrolik sistem modellemesinde doğrusal model, doğrusal olmayan model, ilerleyen dalga teorisi ile doğrusal olmayan model, ilerleyen dalga teorisi ve denge bacası ile doğrusal olmayan model ve adaptif model gibi akışkanlar mekaniğinin uygulandığı, detaylı olarak incelenen bir çok model geliştirilmiştir [77-85].

Soygüder ve Alli yaptıkları çalışmada [86], ısıtma, havalandırma ve klima sisteminde kullanılan aktüvatörün konum kontrolü için adaptif fuzzy kontrol kullanmışlardır. Kontrol sisteminin yapısında bir fuzzy ve PID kontrolör bulunmaktadır. Fuzzy kontrolör K_p , K_i ve K_d parametrelerini hesaplayarak PID kontrolöre iletmekte ve sistemin kontrolü sağlanmaktadır. Liu ve Xie yaptıkları çalışmada [87], endüstriyel bir soğutma sistemi kontrolünde PID parametreleri fuzzy tarafında hesaplanan bir yapı üzerinde benzetim ve deneysel çalışma yapmışlardır. Pratik çalışmada PLC kullanılmıştır. Jingwen [88], endüstriyel bir uygulamadaki gerginlik kontrolünün adaptif fuzzy ile gerçekleştirilmesi üzerinde durmuştur. Benzetimde Matlab ve deneysel çalışmada ise PLC kullanılmıştır. Çalışmada PID parametreleri, fuzzy tarafında hesaplanmakta ve kontrolöre iletilmektedir. Fang ve arkadaşları[89], bir çok motor ve cihazın bulunduğu bir profibus ağının bulunduğu yapıda YSA ve adaptif Fuzzy PID kontrol algoritmaları kullanılmıştır. Bu çalışmada ana PLC ve motor kontrolü yapan profibus üzerinde uydu (slave) PLC'li bir yapı mevcuttur. Ana PLC'de YSA yardımcı PLC'lerde adaptif Fuzzy PID yapısı mevcuttur. Güç kalitesi, elektrik enerjisinin en vazgeçilmezidir. Bu kalitede en önemli faktör gerilim, dolayısı ile senkron generatörün uyartımıdır. Frigura-Iliasa ve arkadaşları yaptıkları çalışmada[90], Romanya için santrallerdeki uyartım durumlarını incelemiştir. Güç sisteminin kalitesinin artırılması noktasında PLC'li ikaz sistemleri önerilmiştir. Swidenbank ve arkadaşları [91] bir senkron generatörün gerilim ve frekans kontrolünü öz ayarlamalı PID kontrolörle gerçekleştirmiştir. Strath ve arkadaşları [92], yaptıkları benzetim çalışmasında PID kontrolörün parametrelerini, önerdikleri bir matematiksel yöntem ile hesaplamışlardır.

Kullanılan kontrolör öz ayarlamalıdır, yani kendi parametrelerini kendisi hesaplamaktadır. Ayrıca hız regülatörü olarak elektro-hidrolik sistem kullanılmıştır. Aydoğmuş [93], SCADA kullanılarak PLC ile gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyicisinin sıvı seviye kontrol uygulamasını yapmıştır. Yapılan çalışmada S7-200 PLC'si kullanılmış ve Fuzzy kontrolör, yazar tarafından yazılımla oluşturulmuştur. Yapılan benzetim ve deneysel çalışmada Fuzzy kontrolör performans sonuçlarının gayet iyi olduğu gösterilmiştir. Doğan tarafından yapılan çalışmada [94], Siemens PLC'ler için Öz Ayarlamalı PID Kontrolör kütüphanesi oluşturulmuştur. Kütüphane fonksiyonları Step-7 (Siemens S7-300 ve S7-400 PLC'leri programlama arayüzü) ve WinCC (Siemens SCADA-kullanıcı kontrol ve izleme programı) gibi gelişkin endüstriyel otomasyon yazılım ortamları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen tüm fonksiyonlar ayrı ayrı test edilmiş ve test sonuçları verilmiştir. Sonuç olarak, Ziegler-Nicholas Reaksiyon Eğrisi Metodu kullanılarak Öz Ayarlamalı PID kontrolörün PLC ortamında gerçekleştirilebileceği ve yapılan uygulamanın başarılı olduğu belirtilmiştir. Yersel, yapmış olduğu çalışmada [95], bir çift cidarlı reaktör tank sisteminin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonunu elde ederek PID ile kontrol etmiştir. PID katsayılarının belirlenmesinde Cohen-Coon, Ziegler-Nichols gibi ayar yöntemlerini kullanmış ve MATLAB ortamında incelenen kontrol sistemini PLC'ye aktarmış ve PID denetleyicisiyle elde edilen deneysel sonuçları sunmuştur. PLC'de yazılan program, kullanım rahatlığı olan ve endüstriyel uygulamalara uygun bir PID denetleyicisi sağlamıştır. Karakuzu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada [96], üç fazlı AA motor sürücü ve hız algılayıcısı ile gerçekleştirilmiş bulanık mantık tabanlı motor hız kontrolünü PLC'de gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlar ile sistemin referansı yakalamasında iyi bir performans sergilediğini göstermişlerdir. Lindh ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada [97], bir ÇKHES'in kontrol ve kumandasında PLC kullanılmış ve bu santralin uzaktan kontrol ve kumandası için gerekli SCADA arayüzü yazılmıştır.

Jing ve arkadaşları [98], hidrolik türbinin hız kontrolünde kullanılan PID'nin oransal katsayısının güncellenmesinde bulanık mantık denetleyicisi kullanmışlar ve performansının iyi olduğunu ortaya koymuşlardır. Cheng ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [99], hidrolik türbinin hız kontrolü için adaptif çözüm önermişlerdir. Önerilen yöntem, hatanın değerine göre kontrolör parametrelerini değiştirilmesi şeklindedir. Çalışmada parametre değişimi anahtarlama yapılarak gerçekleştirilmiş ve klasik kontrolörlere göre daha iyi sonuç elde edilmiştir. Chen ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [100], hidrolik türbinin hız kontrolünde

kullanılan PID'nin integral katsayısının güncellenmesinde bulanık mantık denetleyicisi kullanmışlar ve performansının iyi olduğunu ifade etmişlerdir. Zhang ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında [101], hız regülatörü kontrolünde üç konumlu hidrolik vana kullanmışlardır. Kontrol yöntemi ise, Fuzzy PID'dir. ABD Alaska'daki Bradley Gölü üzerinde kurulan santralin hız kontrolörünün performansını arttırmak üzere yapılan bir çalışmada, Wozniak ve arkadaşları [102], klasik sayısal PI kontrolör kullanmışlar ve eski katsayıların değişmesi gerektiği sonucunu bulmuşlardır. Yine aynı santral için Johnson ve arkadaşları [103], adaptif bir kontrolörle iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

Oonsivilai ve Pao-La-Or yaptıkları çalışmada [104], senkron generatörün uyarım kontrolünü IEEE standartlarına göre üç farklı yöntem ile yapmışlardır. Toplamda 19 farklı yapı incelenmiş ve adaptif Tabu Search algoritmasına göre bir kısım sonuçlar verilmiştir. Robert ve Planque yaptıkları çalışmada [105], senkron generatörün uç geriliminde AQR (Otomatik Reaktif Güç Regülatörü) yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemde generatörün uç geriliminin yanı sıra bara gerilimi de geri besleme olarak kullanılmıştır. Su ve arkadaşları [106], senkron generatörün gerilimini Bulanık Mantık Denetleyicisi ile kontrol etmiştir. Yapılan bu çalışmada kontrolörün daha dayanıklı olabilmesi için gerilim hatasının değerine göre farklı üyelik fonksiyonları bulunan bulanık mantık denetleyicileri seçilerek sistem daha iyileştirilmiştir. Sumina ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma[107], bir senkron generatörün basit bulanık mantık uyarım kontrol uygulanması üzerine odaklanmıştır. Gerilim kontrolü ve generatör kararlılığı için basit bir bulanık mantık kontrol düzeni bu uyarım kontrolü için dijital sistem içeren gerçek laboratuvar modeline oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada bulanık mantık uygulaması DSP ile gerçekleştirilmiş ve klasik kontrolörlere ile karşılaştırılmıştır. Arnalte tarafından yapılan çalışmada[108], senkron generatörün uyarımında bulanık mantık denetleyicisi kullanılmış ve performansının iyi olduğu sonucu elde edilmiştir. Yapılan çalışmada gerçek zamanlı bir yapı kullanılmış ve sistem C dili ile gerçekleştirilen bulanık mantık denetleyicisi ile bir bilgisayardan kontrol edilmiştir. Bu çalışmada aynı zamanda fuzzy kontrol tekniğinin güç sistemlerinde pratik olarak uygulanabilirliğinin de gösterildiği belirtilmiştir. Eker ve arkadaşları tarafından yapılan çalışma [109], tek başına çalışan bir senkron generatörün uyarımının bulanık mantık denetleyicisinin denetimi ile gerçekleştirilmesi üzerinedir. Yapılan uygulama değişik yük şartlarında çalıştırılmış ve klasik kontrolöre göre çok iyi bir performansa sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Janabi-Sharifi ve Jorjani yaptıkları çalışmada [110], ark fırınlarının modelleme ve kontrolünde adaptif yapı kullanılmıştır.

Modellemede YSA, kontrolde ise Fuzzy-PID'den yararlanılmıştır. Chen ve Yang yaptıkları çalışmada [111], paketleme sisteminde kullanılan servo motorun kontrolünde hem PID hem de Fuzzy-PID kullanmışlardır. Sistemin yapısında iki konumlu bir anahtar mevcuttur ve hatanın değerine göre ya klasik PID ya da Fuzzy-PID çalıştırılmaktadır. Böyle bir sistem aslında melez bir yapıdır. Yani klasik kontrolörün çevrim süre avantajı ile adaptif kontrolörün dayanıklılığından yararlanılmıştır. Mendes ve arkadaşları [112], endüstriyel ortamlarda kullanılan bir adaptif fuzzy üzerinde durulmuşlar. Sistemin adaptifliği, kural tabanının değişkenliği ile sağlanmıştır. Çalışmada, doğrudan uyarlamalı, dolaylı adaptif, ve kombine doğrudan/dolaylı uyarlanabilir olmak üzere üç farklı adaptif yapı ortaya konulmuştur. Bunların uygulaması bir DA motoru üzerinden yapılmıştır. Karasakal ve arkadaşları [113], Fuzzy PID kontrolörün adaptifliğini kural tabanının ağırlıklarının değişimi ile sağlamak için benzetim ve pratik bir çalışma yapmışlardır. Ağırlıkları değişen ve değişmeyen kontrolörlerin performansları kıyaslanmış ve önerilen yöntemin iyi sonuç verdiği ifade edilmiştir. Fadaei ve Salahshoor [114], proses kontrolü için bulanık mantık denetleyicisinin deneysel uygulamaları üzerinde durmuşlardır. Bulanık mantık denetleyicisini Hibrit Fuzzy-PI ve Fuzzy-PD olarak kullanmışlar ve iyi sonuçlar elde etmişlerdir.

1.3. Tezin Amacı

Yapılan literatür taramasından da görüldüğü gibi son yıllarda ÇKHES'ler üzerine yapılan çalışmalar gittikçe artmaktadır. Yapılan çalışmaların büyük bir kısmının benzetim olduğu görülmektedir. Ayrıca ÇKHES uygulaması olarak ifade edilen çalışmalar, ya güç değeri olarak bu sınıfa girmeyen ya da kullanılan türbinin uygun bölgede çalıştırılmadığı uygulamalardır. Bu bağlamda, gerçekleştirilecek bu tez çalışmasında,

- ❖ Öncelikli olarak laboratuvar ortamında gerçeğine yakın bir ÇKHES prototipi oluşturulması,
- ❖ Oluşturulan prototipin sayısal benzetiminde kullanılacak hidrolik türbin modellenmesinde nonlinear modelin kullanılması (Bu yaklaşımda oluşturulan model sürekli zaman analizine uygun olarak elde edilir. Yapılacak modellemede nonlinear modelin avantajlarından vazgeçmeden farklı bir model geliştirilecektir),
- ❖ Amaca uygun olarak oluşturulacak prototip çalışmasından sonra, ÇKHES'de frekans ve gerilim kontrolünün yapılması ve bunların dayanıklı hale getirilmesi,

- ❖ ÇKHES'lerin, lokal çalışmasındaki frekans kontrolünün dayanıklılığını arttırmak için yeni bir adaptif yapı geliştirilmesi, amaçlanmıştır.

1.4. Tezin Yapısı

Bu tez çalışması, 6 ana bölüm ve 3 ek bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, ÇKHES'lerin önemi vurgulanarak ülkemizin HES potansiyeli hakkında bilgi verilmiştir. ÇKHES'lerle ilgili kısa literatür özeti verilmiş ve sonrasında tezin hedefleri açıklanmıştır.

İkinci bölümde, ÇKHES üretim sistemlerinde kullanılan temel hidrolik kavramlar, hidrolik türbinler, generatörler, kontrol sistemleri, bunların çevresel etkileri, ekonomisi ve yenilikçi yaklaşımlar açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, laboratuvar ortamında tasarlanan ÇKHES prototipi hakkında bilgi verilmiştir. Geliştirilen ÇKHES prototipi; hidrolik, elektromekanik ve kontrol-kumanda kısımlarından oluşmuştur. Bu kısımlar hakkında ayrıntılı açıklamalar yapılmıştır.

Dördüncü bölümde, laboratuvar ortamında oluşturulan ÇKHES'in sayısal benzetimi yapılmıştır. Benzetim için adım adım senkron generatör ve pelton türbinine ait model denklemleri çıkartılmış ve sisteme ait açık çevrim sonuçları verilmiştir.

Beşinci bölümde, ÇKHES'lerin lokal çalışma durumunda gerilim ve frekans kontrolü hakkında bilgiler verilmiştir. Bu kontroller değişik yöntemlerle denenmiştir. Sistemin frekansı, adaptif kontrolör ile; gerilimi ise, hem PI hem de PID ile kontrol edilmiştir. Yapılan tüm kontrollere ilişkin sonuçlar, grafikler halinde verilmiştir.

Altıncı bölümde, gerçekleştirilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek ileride yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi tarafından FÜBAP-MF.11.06 no.lu proje ile desteklenmiştir.

2. ÇKHES'LER İLE ELEKTRİK ENERJİSİ ÜRETİMİ

2.1. Giriş

20. yüzyılın başından itibaren hızla gelişen teknoloji, enerji üretimi ve tüketiminin hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Gelişmelerin başlangıcında fosil kaynaklı birincil enerji kaynaklarının tükenir olmasına ve çevre kirliliği oluşturmaya karşın ucuz oluşu, bu enerji kaynaklarının kullanılmasına öncelik tanımıştır. Hidrolik kaynaklar ise, çevre kirliliği oluşturmaması ve yenilenebilir olmasına karşın ilk yatırım maliyetlerinin pahalı olması ve uzun süreli araştırmalar gerektirmesi nedeniyle gereken önemi kazanamamıştır.

Teknolojik açıdan gelişmiş ülkeler, gelişmemiş ülkelerin birinci enerji kaynaklarını ucuza temin etmişlerdir. Bu durum petrole dayalı enerji üretimini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu artış 1973-1974 yıllarına kadar sürmüştür. Bu yıllarda petrole yapılan yüksek zamlar bütün dünya ülkelerini bir enerji krizine sürüklemiştir. Bu olaydan sonra ülkeler kendi öz kaynaklarına dayalı enerji üretimine ağırlık vermeye başlamışlardır. Kalkınma planlarında dış ülkelere bağımlılığı azaltacak yönde tedbirler almışlardır. Bu çabaların sonucu olarak hidroelektrik enerjinin üretimi önemli ölçüde artmıştır. 1980 yılında Dünya elektrik enerjisi üretiminin % 23'ü ve toplam enerji kullanımının % 5'i hidrolik enerjiden karşılanmıştır.

Kırsal bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamak ve dolayısı ile bu bölgelerin sosyo-ekonomik gelişmelerini sağlamak ülkelerin temel hedefleri arasındadır. Kırsal bölgelerin enerji ihtiyacını karşılamada, alternatif enerji kaynakları arasında küçük akarsulardan elde edilen hidroelektrik enerji ön sırayı almaktadır. Maliyetlerinin yüksek olmamaları, çabuk hizmete girebilmeleri ve kısa sürede kendilerini amorti etmeleri ÇKHES'lerin tercih edilmelerini sağlamaktadır.

HES'lerin kurulması için temel iki unsur olan su debisi ile hidrolik düşü değerleri, santral kurulacak olan nehrin, yağış alanının büyüklüğüne ve bu yağış alanına düşen yıllık yağış miktarına göre azalır veya çoğalır. Bir akarsu üzerine kurulacak HES'in gücünün ve türbin generatör ünitelerinin sayısının tespitinde ortalama su debisinin iyi bir şekilde bilinmesi büyük bir önem taşır. Akarsu karakteristiğinin yanlış veya eksik bilinmesi, yapımı düşünülen HES için yanlış projelendirmeye neden olur.

Yılın yağışlı veya kurak geçmesine bağlı olarak su debisinin değişmesi sonucu su düşüşü de değişmektedir. Bu bilgileri elde edebilmek için de santral kurulacak alan

içerisinde uzun süre ön etütlerin ve gözlemlerin yapılması gerekir. Etütler neticesinde santralin kurulacak ünite adeti, gücü ve üretilebilecek olan güvenilir enerji miktarının tespiti yapılır.

Hidrolik düşü deyiminden iki su yüzeyi arasındaki yükseklik farkı anlaşılır. Bir hidrolik santral tesisindeki düşü ise üst su yüzeyi ile alt su yüzeyi arasındaki, yani su girişi ile su çıkışı arasındaki yükseklik farkıdır. Bu düşü, brüt hidrolik düşüdür.

Su iletim tesislerinde; yani kuvvet tünelleri, cebri borular gibi su iletim kanallarında su moleküllerinin sürtünmeleri nedeniyle kayıplar meydana gelir. Meydana gelen bu kayıpların toplamına ΣH_w ve tesisin brüt hidrolik düşüsüne H denilirse, net düşü; H_n aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$H_n = H - H_w \text{ (m)} \quad (2.1)$$

Hidrolik tesislerde düşü kayıpları haricinde de kayıplar oluşur. Bu da genel verim içinde gösterilir. İç kayıplar; suyun temas ettiği yüzeylere sürtünmesi, boru dirseklerinde ve türbin içinde yön değiştirmesi, akış kesitlerindeki değişimler gibi nedenler ile meydana gelmektedir.

Su debisi kayıpları, türbinlerde rotor dönme boşluklarından kaçan kaçak sular nedeniyle meydana gelmektedir. Türbin ayar kanatları arasından gelen su debisi Q ve rotorun çevresindeki dönme boşluklarından kaçan su debisi Q_c olduğuna göre türbin rotoru kanatları arasına giren tahrik suyunun debisi (Q_i)

$$Q_i = Q - Q_c = (1 - Q_c/Q)Q \quad (2.2)$$

kadardır. Q_c kaçak sular debisinin azaltılabilmesi için rotor dönme boşluklarının mümkün olduğu kadar küçük yapılması veya labirentler kullanılması yoluna gidilmektedir.

Hidrolik akım kayıpları, türbin ayar kanatlarının yerleştirildiği ayar kanatları çemberi kanalı, türbin rotoru kanatlarının aralıkları ve türbin emme borusu, hidrolik akım kayıplarının incelenmesi yönünden, düz bir boru donanımı ile kabaca mukayese edilebilirler. Bir türbinden geçen debi $Q=0$ ile $Q_{maks}=1,3Q_n$ değerleri arasında değişebilir. Su akımının ayar kanatları çemberi aralıkları ile ayar kanatlarında hızı artar, türbin rotoru kanatlarının aralıklarında hızı artar ve yönü değişir, emme borusunda ise hızı yavaşlar ve yönü değişir. Su akımının; ayar kanatları çemberi aralıklarında, ayar kanatları aralıklarında ve türbin rotoru kanatları aralıklarında, emme borusundaki sürtünmeler, yön değiştirmeler gibi nedenlerle meydana gelen hidrolik akım dirençlerini yenmesi gerekmektedir.

Türbinlerde meydana gelen sürtünme kayıpları ile dirsek kayıpları, genel olarak hidrolik akım sınır tabakasının kalınlığına bağlıdır. Bu sınır tabakası boru hatlarının iç yüzeylerinde ve türbinlerde ise suyun temas ederek geçtiği bütün yüzeylerde meydana gelmektedir. Bu sınır tabakasının değeri bilhassa hızlanan hidrolik akımların meydana geldiği yüzeylerin pürüzsüz hale gelmesi ile en aza indirgenebilir.

Çıkış kayıpları tanımından, artık bir daha kullanılmayacak olan su akımı ile türbin rotorunu terk eden akım enerjisi anlaşılmaktadır. Bu enerji, emme borusu bulunmayan pelton tipi hidrolik türbinlerde tamamen kaybolmaktadır. Fakat emme borusu bulunan Francis ve Cross-Flow tipi hidrolik türbinlerde ise bir kısmı geri kazanılmaktadır.

Türbin rotorunun alt gövdesi ile üst gövdesinin, dönme boşluklarından kaçan kaçak suların içinde dönmesi dolayısıyla meydana gelen sürtünme kayıpları ile türbin kılavuz yatağında ve türbin salmastralarında meydana gelen sürtünme kayıplarının sebep olduğu güç kayıplarına “dış kayıplar” adı verilmektedir.

η_Q debisel verim, η_I türbin rotorunun iç verimi, η_M mekaniksel verim, η_G generatör verimi ve η_T ise genel verim olmak üzere:

$$\eta_T = \eta_Q \cdot \eta_I \cdot \eta_M \cdot \eta_G \quad (2.3)$$

Bir su kuvvetinden elde edilebilecek olan güç aşağıdaki formül ile mekanik güç ve elektrik gücü cinsinden bulunabilir:

$$N = (Q \cdot \gamma \cdot H_n \cdot \eta_T) / 75 \text{ (HP)} \quad (2.4)$$

$$P = Q \cdot \gamma \cdot g \cdot H_n \cdot \eta_T \text{ (W)} \quad (2.5)$$

Denklem 2.4 ve Denklem 2.5’de kullanılan Q su debisi (m^3/s), γ suyun yoğunluğu (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi (m/s^2), H_n net düşü (m) ve η_T toplam verimi ifade etmektedir.

Brüt su potansiyeli, bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin üst sınırını belirtir. Mevcut debi ve düşüdeki akarsuyun bir yılda oluşturduğu su kuvveti potansiyelidir. Bu potansiyel, bölgenin topoğrafya ve hidrolojisinin fonksiyonu olmaktadır. Bu iki faktör yeterli duyarlılıkta değerlendirildiğinde, zamanla değişmeyen bir gösterge olmaktadır. Ülkemizin brüt su potansiyeli 430 TWh/yıl civarındadır.

Bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin teknolojik üst sınırını gösteren, teknik yönden değerlendirilebilir su potansiyeli, uygulanan teknolojiye bağlı olarak değişmektedir. Bu potansiyel, brüt potansiyelin bir fonksiyonudur ve çoğunlukla yüzde

olarak ifade edilmektedir. Su kuvveti teknolojisinde, yakın geçmişte ani değişimler olmadığı ve yine yakın gelecekte bu tür gelişmelerin beklenmediği dikkate alınır, teknik yönden değerlendirilebilir potansiyelin zamanla pek değişmediği kabul edilebilmektedir.

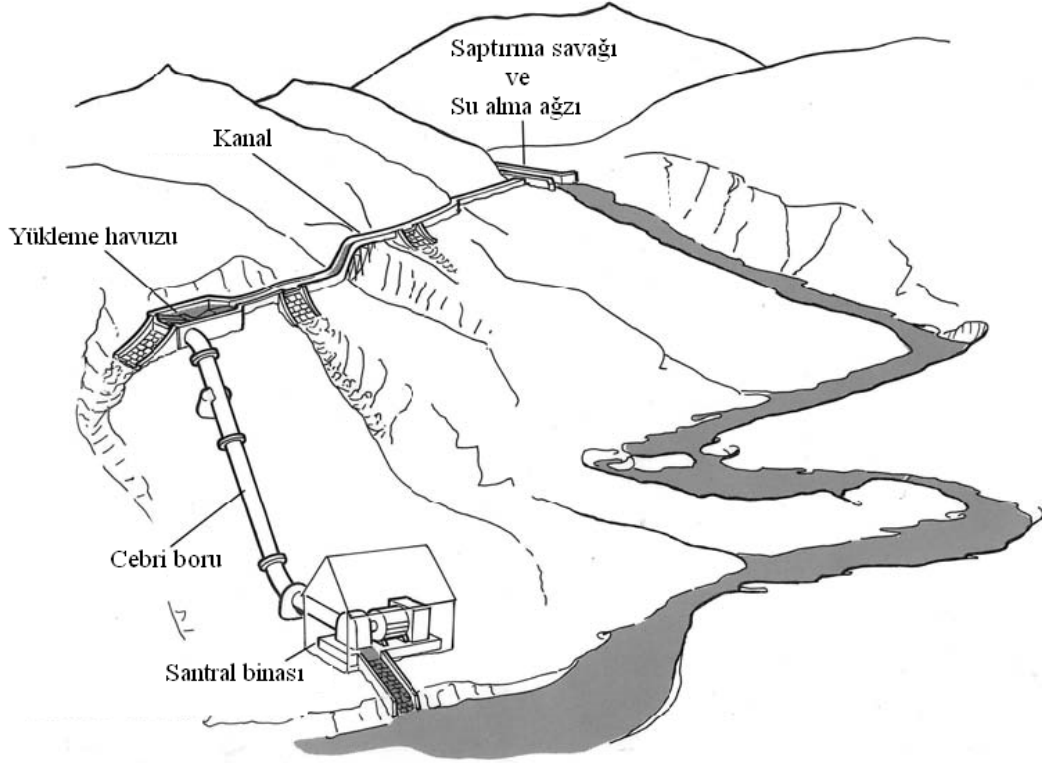
İletim kayıpları %70, türbin verimi %85 ve elektrik enerjisi sağlayan elemanların verimi de %80 alınır, kaçınılmaz kayıpların oluşturduğu etkinin değeri ortalama $(0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,8 = \%47,6)$ mertebesinde olacaktır. Bu duruma göre; teknik yönden değerlendirilebilir su kuvveti potansiyeli, brüt potansiyelin yaklaşık olarak yarısı kadardır. Bu açıdan yaklaşıldığında Türkiye'nin teknik yönden değerlendirilebilir su potansiyeli 215 TWh/yıl civarında olmaktadır.

Teknik yönden değerlendirilebilir olmakla beraber büyük yerleşim ve endüstri merkezlerini, geniş tarımsal arazileri sular altında bırakacak olan projeler hidrolik potansiyel değerlendirilmesinde hariç tutulmalıdır. Bu durum dikkate alınır, söz konusu potansiyel daha küçük bir değer olmaktadır. Bu doğrultuda yapılan son çalışmalarda, Türkiye için 193 TWh/yıl civarında sonuçlar bulunmuştur. Bu potansiyel bir akarsu havzasının hidroelektrik enerji üretiminin ekonomik olarak yararlanılabilir en üst sınır değerini gösteren, gerek teknik açıdan gerçekleştirilebilmesi mümkün ve gerekse ekonomik yönden tutarlı olan tüm su kuvveti projelerinin toplamı olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle ekonomik olarak yararlanılabilir hidroelektrik potansiyel, beklenen gelirleri, giderlerinden fazla olan hidroelektrik projelerin enerji üretimini göstermektedir. Bu potansiyelin master plan veya tercihen yapılabilirlik etüdü seviyesindeki havza gelişim planlarından belirlenmesi gerekmektedir.

Herhangi bir hidroelektrik tesisin geliştirilebilmesi için, gerçekleştirilebilir ekonomik bir potansiyeli, belirli bir enerji talebi ve uygun bir elektrik üretim fiyatı olmalıdır. Bu nedenle, bir akarsuyun ekonomik potansiyeli, sadece o nehir sistemi ve topografisine değil, aynı zamanda ekonomik şartlarına bağlı olarak bir ülkeden diğerine değişiklik arz etmektedir.

HES'lerin ekonomik olarak hesaplanabilmesi için, ulusal şebekede aynı enerjiyi üretecek kaynaklar gözden geçirilmekte ve en ucuz enerji kaynağı belirlenerek hidroelektrik santral projesi bu kaynakla mukayese edilmekte ve ancak daha ekonomik bulunursa, önerilmektedir. Ekonomik yönden değerlendirilebilir potansiyel içindeki tüm HES projeleri termik santrallere göre uygulama ve işletme bakımından daha üstün projelerdir.

HES'leri değişik kriterlere göre sınıflandırmak mümkündür. Ülkelerin ekonomik yapılarındaki ve hidrolik potansiyellerindeki özelliklerin farklılıklar göstermesi tüm ülkeler için standart bir sınıflandırma sistemine gitmeyi engellemektedir. Birçok ülkede olduğu gibi ülkemizde de küçük HES'lerin sınıflandırması santralin kurulu gücüne göre yapılmaktadır. Ancak ülkelerin ekonomik ve teknolojik özelliklerine göre küçük HES'lerin tesis gücünün sınırları değişik değerler almaktadır.



şekil 2.1. Klasik bir KHES yapısı

Tablo 2.1'de verilen sınıflandırma, Birleşmiş Milletler Sınai Kalkınma Teşkilatı (UNIDO) tarafından yapılmış olan sınıflandırmadır ve ülkemizde yaygın olarak kabul görmektedir [115].

Tablo 2.1. Hidroelektrik santrallerin sınıflandırılması

Büyüklüğü	Uygulama Yeri	G	Sınıfı
En küçük	Müstakil Ev	0-5 kW	Piko
Çok Küçük	Küçük yerleşim yerleri	5-100 kW	Mikro
Orta	Yerel ağlar veya ulusal şebeke	100 kW-5 MW	Mini
Büyük	Ulusal şebeke	5 MW ve zeri	Full-Scale

ÇKHES'ler toplam enerji üretimine katkılarının yanında politik ve sosyal açıdan da önemlidirler. Küçük yerleşim yerinin aydınlatılması ile birlikte enerjinin küçük sanayi tesislerinde, el sanatlarının geliştirilmesinde ve tarımda kullanılması sağlanarak bölgenin kalkınmasına büyük ölçüde katkıda bulunulması sözkonusudur.

Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler artan enerji ihtiyaçlarını karşılamak için küçük ve ÇKHES'lere özel bir önem vermektedirler. Bu ülkelerde ÇKHES'ler alternatifi olarak değil, tamamlayıcısı olarak düşünülmektedir. Kırsal kesim alanına giren köy, mahalle ve çiftlik gibi yerleşim ünitelerinin enerji ihtiyacının küçük akarsular üzerine kurulan ÇKHES'lerle sağlanması ve üretime yönelik olan bu yatırımların yapılması daha ekonomik olmaktadır.

Büyük enerji üretim projelerinde kullanılan her türlü donanımın ithal edilmesi, mali kaynakları zorlamakta ve bu durum ülke ekonomisini olumsuz yönde etkilemektedir. Halbuki çok kısa bir sürede inşa edilebilecek ve tamamen yerli imkanlarla gerçekleştirilebilecek olan bu santraller, derhal işletmeye açılarak üretime katkı sağlanabilir. ÇKHES'ler, elektrik enerjisi üretiminde alternatif değil, tamamlayıcı bir unsurdur. Bu santrallerin üstünlükleri ve zayıf yönleri aşağıda sıralanmıştır:

a) ÇKHES'lerin Olumlu Yönleri

1. Enerji konusu yurdumuz için hala güncelliğini korumakta ve daha uzun süre de koruyacak gözükmektedir. Bunun sebep olacağı olumsuz etkilerin giderilebilmesi için tüm enerji kaynaklarımızın değerlendirilmesi gereklidir. ÇKHES'ler bu konuda önemli bir açığı kapatabilirler.
2. Ulaşımı güç olan ve ulusal sistemden beslenemeyen kırsal bölgelerdeki köy ve diğer birimlerin enerji ihtiyacını karşılar. Böylece bu bölgelerin sosyo-ekonomik ve kültürel gelişimlerinin hızlanmasına yardım eder.
3. Kırsal bölgelerin yakıt bulma ve taşıma problemlerine çözüm getirir.
4. Fosil yakıtlı santrallere nazaran düşük işletme maliyeti ile elektrik enerjisi üretir.
5. Bakımları kolay, ucuz ve hizmet süreleri ise uzundur.
6. ÇKHES'ler üretilen enerji genellikle bölgede kullanıldığı için uzun iletim şebekelerine ihtiyaç yoktur. Bu durum iletim hatlarındaki enerji kayıplarını ortadan kaldırmaktadır.
7. Elektrik enerjisi üretim kaynaklarının neden olduğu çevre kirliliği, günümüzde önemli boyutlara ulaşmıştır. ÇKHES'lerin çevreye etkileri yok denecek kadar azdır.

8. ÇKHES'lerin türbin-generator gruplarının tipleştirilerek standart hale getirilmeleri kolaydır. Böylece makine yapımı ucuz olur. Bakım ve işletme sorunları en aza iner. Türbin-generator ve kontrolör sistemlerinin bir blok halinde ve otomatik işler şekilde yapılmasıyla aynı bölgedeki çok sayıda santral bir merkezden kontrol edilebilir. Bunun sonucu olarak işletme maliyeti azalır.
9. Su türbinleri yapımı ile ilgili endüstrinin gelişimi yeni yeni hareketlenmektedir. ÇKHES'lerdeki makine ve donanımların tümünün ülkemiz endüstri imkanlarıyla, döviz sarf etmeden inşa edilebileceği ispatlanmıştır. Küçük kapasiteli ünitelerin imal edilmesiyle bu konuda bilgi birikimi artacak ve yakın bir gelecekte daha büyük kapasiteli ünitelerin imalatı tamamen yerli imkanlarla gerçekleştirilebilecektir.
10. ÇKHES'lerde ortalama inşa süreleri 3 ay ile 1 yıl arasında değişmektedir. Toplam yatırım bedelleri büyük meblağ tutmadığından kısa sürede inşa edilebilirler.

b) ÇKHES'lerin Olumsuz Yönleri

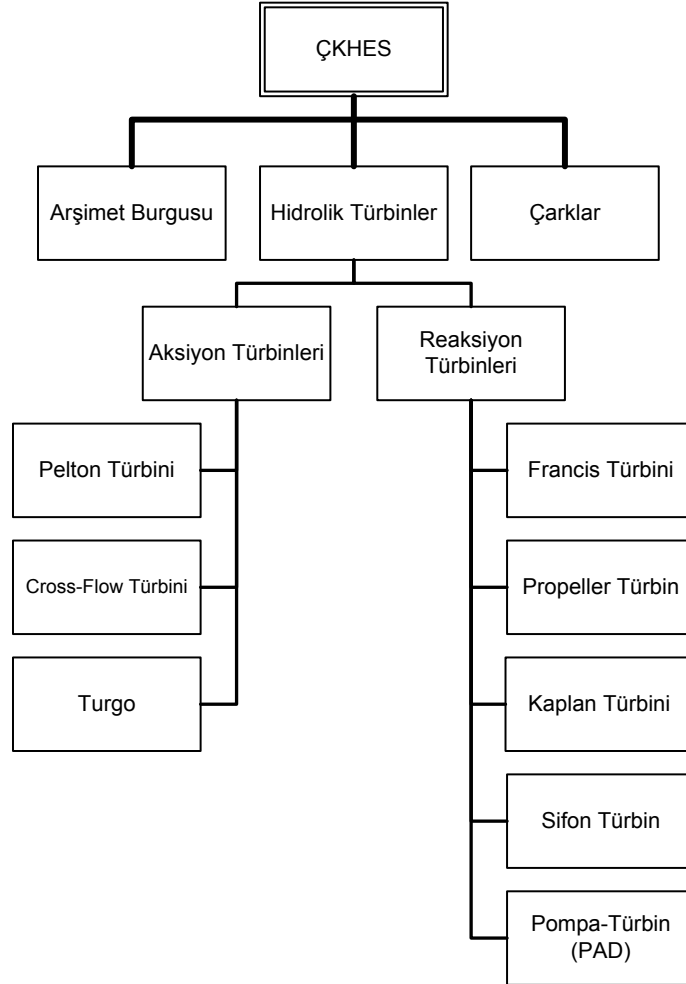
1. ÇKHES'lerde kW başına yatırım maliyeti, büyük santrallere göre oldukça yüksektir.
2. ÇKHES'lerde enerji üretimi meteorolojik ve mevsimsel değişikliklere bağlı olarak dalgalanmalar gösterir. Ayrıca hidroelektrik santralin beslediği bölgelerdeki enerji ihtiyacı günün çeşitli zamanlarında değişmektedir. Dolayısıyla ÇKHES'lerin genel verimleri düşük olmaktadır. Ancak son zamanlarda verimin yükseltilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmaktadır.
3. Yapılan yatırıma göre etütler için yapılan harcama masrafları fazladır. Bunu önlemek için tip projeler geliştirilmelidir.
4. Küçük güçte olduklarından gerilimin yükseltilmesi fizibil değildir. Bu nedenle tüketiciye ulaşana kadar iletim hatlarında kayıplar fazla olmaktadır.

2.2. Hidrolik Türbinler

ÇKHES'lerde kullanılan ve Arşimet Burgusu, Çarklar ve Hidrolik Türbinler olmak üzere üç ana başlıkta toplanan mekanik enerji dönüştürücülerine ilişkin sınıflandırma, Şekil 2.2'de verilmiştir.

Hidrolik türbinler, suyun akım enerjisini devamlı olarak dönen çarklar yardımı ile mekanik enerjiye çeviren döner hidrolik makinelerdir. Hidrolik türbinlerin kullanımı, takribi olarak 150 yıl öncelerine dayanmaktadır. 19. yüzyıl içinde Fourneyron, Jonval, Henschel, Schwamkruo, Zuppinger vs. tarafından geliştirilmiş olan basit ve küçük güçlü su

türbinleri çok çabuk yapılmış ve su türbinlerinin tahrik ettiği generatörlerde üretilen elektrik enerjisi, 1891 yılında Oscar von Miller tarafından enerji iletim hattı ile uzak yerlerdeki tüketim alanlarına nakledilmiştir.



Şekil 2.2. Mekanik enerji dönüştürücüleri

Su türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin iletim hatları yardımıyla uzak mesafelere iletilmesinden sonra daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan HES'ler kurulmaya başlanmıştır. Ancak modern anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarı yapılabilen hidrolik türbinler 1920'lerden itibaren yayılmaya başlamışlardır. Artık türbinler çok yaygın olarak kullanılmakta, günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %93-%95 mertebesine kadar yükselmiş bulunmaktadır.

2.2.1 Temel Kavramlar

Hidrolik makinalar konusunun daha iyi anlaşılması için bazı temel kavramların bilinmesi gerekmektedir. Bernoulli denklemi, Çevresel kuvvet, Euler Türbin Denklemi ve

Özgöl Devir Sayısı bunlardan bazılarıdır. Bu kavramlar aşağıdaki bölümlerde sırasıyla ele alınmıştır.

2.2.1.1. Bernoulli Denklemi

İncelenen bir kesitteki suyun hızı, zamana bağlı olarak değişmiyorsa ve sürtünmesiz bir akışsa, borunun her yerindeki yerel yükseklik, basınç yüksekliği ve hız yüksekliğinin toplamı her an aynı değerde sabittir. Genel ifadesi ise;

$$H_1 + \frac{P_1}{\gamma \cdot g} + \frac{C_1^2}{2 \cdot g} = H_2 + \frac{P_2}{\gamma \cdot g} + \frac{C_2^2}{2 \cdot g} \quad (2.7)$$

şeklindedir (H yükseklik, C hız, p basınç, g yerçekimi ivmesi, γ su yoğunluğu). İçerisinden sıvı geçirilen kapalı bir boru içerisine her iki ucu açık bükülmüş bir boru, sıvının akışına karşı yerleştirilmiş olsun. Diğer yandan borunun cidarına bir delik açılarak başka bir boru monte edilsin. Eklenen borulardaki sıvı seviyelerinin eşit olmadığı görülecektir. Bunlar arasındaki yükseklik farkı ΔH ise, suyun hızı aşağıdaki eşitlikten bulunabilir:

$$C = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta H} \quad (2.8)$$

2.2.1.2. Suyun Çevirme Momenti ve Gücü

Herhangi bir H_n net hidrolik düşüğü, bir türbinde mekanik işe çevirebilmek için bu H_n düşüsünde debisi Q (m^3/s) olan suyun türbin rotoruna çarptırılması veya türbin rotorunun kanatlarının aralarından geçebilmesi gerekmektedir. Böylece suyun türbin rotoruna çevresel yönde etkiyen kuvvetlerinin meydana getirdiği döndürme momenti ile mekanik bir iş yapılmış olur.

Bir hidrolik türbin rotoruna etkileyen su akımının çevresel kuvvetleri ve döndürme momenti, rotor kanatlarının arkalarındaki basınçlar hesaplanmaksızın, suyun çevirme momenti ve çevirme gücü eşitlikleri ile belirlenebilir.

Bir su akımının I çevirme kuvveti deyiminden, rotor kanatları arkalarında akan ve kütlesi $m = \gamma \cdot Q / g$ ve gerçek akış hızı C olan su miktarının birim zamanda yapmış olduğu iş miktarı anlaşılır. Birim zamanda (1 s) yapılan bu iş miktarı

$$i = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot C \quad (2.9)$$

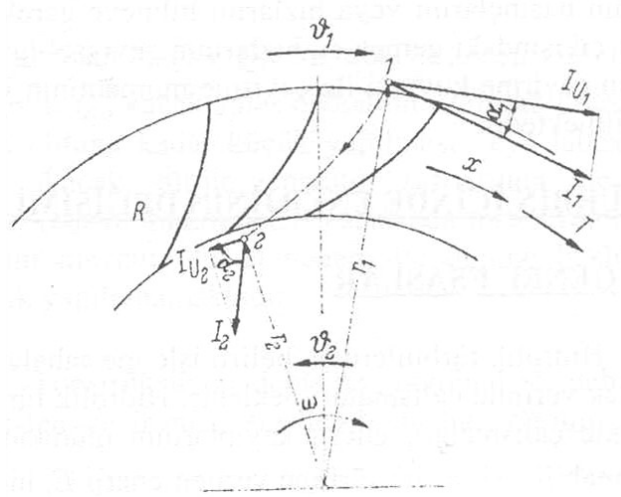
değerine eşittir. $\dot{I}$ 'nin birimi Kp (1 Kp=9,81 N) olup, bu $\dot{I}$ kuvvetinin yönü türbin rotorunun girişinde rotorun dönüş yönündedir ve türbin rotorunun çıkışında ise rotorun dönüş yönüne terstir.

Şekil 2.3.'de gösterilen hidrolik türbin rotorunun kanatlarının aralarından geçen su akımının 1 noktasındaki çevirme kuvveti:

$$\dot{I}_{U1} = \dot{I}_1 \cos \alpha_1 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_{U1} \quad (2.10)$$

2 noktasındaki çevirme kuvveti ise:

$$\dot{I}_{U2} = \dot{I}_2 \cos \alpha_2 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_2 \cdot \cos \alpha_2 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_{U2} \quad (2.11)$$



Şekil 2.3. Türbinin çevirme momenti ve çevirme kuvvetinin şematik gösterimi [116]

Ancak Denklem 2.10 ve Denklem 2.11'in yönleri birbirine ters olduğundan, türbin rotorunu döndürmeye çalışan T kuvvetinin değeri şöyle yazılır:

$$T = \dot{I}_{U2} - \dot{I}_{U1} = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_{U2} - C_{U1} \quad (2.12)$$

Yine Şekil 2.3 üzerinde gösterilen giriş ve çıkış noktalarının momentleri yazılırsa;

$$J_1 = \dot{I}_{u1} \cdot r_1 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_{U1} \cdot r_1 \quad (2.12)$$

$$J_2 = \dot{I}_{u2} \cdot r_2 = \frac{r \cdot Q}{g} \cdot C_{U2} \cdot r_2 \quad (2.13)$$

olur. Hidrolik akımın rotor girişinde ve çıkışındaki momentlerinin farkı, türbin rotorunu döndüren M_d döndürme momentidir. Bu durumda hidrolik akımın türbin rotorunu döndüren M_d döndürme momenti için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$M_d = J_1 - J_2 = \frac{\gamma \cdot Q}{g} \cdot (C_{U1} \cdot r_1 - C_{U2} \cdot r_2) \quad (2.14)$$

Şaftına M_d döndürme momenti etkiyen ve ω açısal hızı ile dönmekte olan bir hidrolik türbinin gücü,

$$N = M_d \cdot \omega \quad (2.15)$$

'dir. Görüldüğü gibi hidrolik akımın türbin rotorunu döndürmeye çalışan T kuvvetinin ve türbin rotorunu döndüren M_d döndürme momentinin değerlerini hesaplamak için rotor katlarının aralıklarındaki hidrolik akımın basınçlarının veya hızlarının bilinmesine gerek yoktur. Sadece rotor girişindeki ve rotor çıkışındaki gerçek su hızlarının çevresel hız yönündeki bileşenlerinin bilinmesi, suyun çevirme kuvveti ile çevirme momentinin ve gücünün hesaplanması için yeterli olabilmektedir.

$$U_1 = r_1 \cdot \omega \quad \omega = \frac{U_1}{r_1} \quad (2.16)$$

$$U_1 = r_2 \cdot \omega \quad \omega = \frac{U_1}{r_2} \quad (2.17)$$

olduğundan Denklem 2.15, Denklem 2.14, Denklem 2.16 ve Denklem 2.17 yardımı ile aşağıdaki şekle getirilebilir:

$$N = \frac{\gamma \cdot Q}{g} (C_{U1} \cdot U_1 - C_{U2} \cdot U_2) \quad (2.18)$$

2.2.1.4. Euler Türbin Denklemi

Euler türbin denklemi; giriş noktası 1 ve çıkış noktası 2 ile gösterilen bir türbinde, bu iki nokta arasından geçen suyun türbine ne kadar enerji bıraktığını ya da enerji biliniyorsa, bundan yararlanarak bilinmeyen diğer parametrelerin bulunmasını sağlayan denklemdir. Açısal hızı ω ve çevresel hızı da $u = D\pi n$ olan bir türbin milindeki güç;

$$P = Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot (r_1 C_{1u} - r_2 C_{2u}) \quad (2.19)$$

veya $u = \omega \cdot r$ değerleriyle,

$$P = Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot (u_1 C_{1u} - u_2 C_{2u}) \quad (2.20)$$

eşitliğinden hesaplanır. Eğer debi ve düşü biliniyorsa bir hidroelektrik santralin gücü denklem (2.16) ile bulunabilir. Denklem (2.16) ile denklem (2.19) birbirine eşitlenirse;

$$Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot H_n \cdot \eta_T = Q \cdot \gamma \cdot \omega \cdot (u_1 C_{1u} - u_2 C_{2u}) \quad (2.21)$$

$$g \cdot H_n \cdot \eta_T = u_1 C_{1u} - u_2 C_{2u} \quad (2.21)$$

denkleminde H çekildiğinde,

$$H_n = \frac{u_1 C_{1u} - u_2 C_{2u}}{g \cdot \eta_T} \quad (2.23)$$

sonucu bulunur. Bu son eşitlik, Euler Türbin Denklemi adını alır. Bu eşitlikte düşü ile çark kanatları arasında nasıl bir ilişki olduğu görülmektedir. Bu denklem, bağıl hızların cinsinden şu şekilde de yazılabilir:

$$H_n = \frac{w_{U1} \cdot U_1 - w_{U2} \cdot U_2}{g \cdot \eta_T} \quad (2.24)$$

Hidrolik türbinlerin anlaşılması ve boyut hesaplamalarında kullanılan önemli bir parametre de özgül hız'dır.

Özgül Hız kavramının iki farklı tanımı ve hesabı vardır. Bunlardan birincisi; $H_n=1$ m ve $Q=1$ m³/s olarak çalışan bir çarkın n_q devir sayısıdır. Diğeri ise $H_n=1$ m faydalı hidrolik düşüde, $N=1$ BG güç veren model bir türbin rotorunun devir sayısı olan n_s devir sayısıdır. Pratikte gerçekte çoğu kez n_s özgül devir sayısı tercih edilir. Bu devir sayılı türbin imal edilmek istenen esas türbin rotoruna geometrik olarak benzer olmaktadır. Gerek n_q özgül devir sayısı ve gerekse n_s özgül devir sayısı, hidrolik türbinin tipinin seçilmesi ve hidrolik türbinin proje değerleri olan Q_n , H_n ve n_n değerleri ile birlikte türbinin projesi için temel teşkil ederler.

Tablo 2.2. Hidrolik Türbin Tiplerinin Özgül Devir Sayıları

Türbinler	Özgül Devir Sayısı (n_q)
Pelton	1-30
Turgo	20-70
Cross-Flow	20-130
Francis	80-400
Uskur veya Kaplan	340-1000

$$n_q = n \cdot \frac{\bar{Q}}{H_n^3} \quad (2.24)$$

$$n_s = n \cdot \frac{\bar{N}}{H_n^5} \quad (2.25)$$

$$n = n_s \cdot \frac{H_n^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}} \quad (2.26)$$

Müsaade edilen maksimum düşü, çarktaki kanat sayısı, B/D oranı (B çarka su veren ağzın yüksekliği, D çark çapı), beklenen verim, işletme durumu ve diğer bilgiler hakkında karar verilmesinde en önemli etken n_q değerinin bilinmesidir. n_q büyük olursa kavitasyon ihtimali fazladır.

Tablo 2.3 Düşülerine göre türbinlerin kullanım yerleri [117]

Türbin	$H_n > 100\text{m}$	$20\text{m} > H_n > 100\text{m}$	$5\text{m} > H_n > 20\text{m}$	$5\text{m} > H_n$
Aksiyon	Pelton Turgo	Cross-Flow Turgo Multi-Jet Pelton	Cross-Flow Multi-Jet Pelton	Su çarkı
Reaksiyon	-	Francis Pompa-Türbin	Propeller Kaplan	Propeller Kaplan

Hidrolik türbinler, aksiyon tipi veya reaksiyon tipi türbinler olarak da sınıflandırılır. Aksiyon tipindeki Pelton ve Cross-Flow türbinlerinde su, hızı ile etki eder. Yani burada türbini girişi ile çıkışı arasındaki enerji farkı, esas itibarıyla kinetik enerji farkına tekabül etmektedir. Diğer bir deyişle bu türbinlerde giriş ve çıkış basınçları eşittir. Bu bakımdan reaksiyon derecesi sıfırdır. Bu türbinlerin özgül hızları küçük olup reaksiyon türbinlerine oranla yüksek düşülerde kullanılırlar. Buna karşılık debileri küçüktür. Cross-Flow hidrolik türbini, bir aksiyon türbin olarak tanımlanır. Ancak yapılan çalışmalar sonucunda reaksiyon derecesinin sıfır olmadığı görülmüş ve hem aksiyon hem de reaksiyon sınıflarına dahil edilmiştir.

Tablo 2.4 Hidrolik türbinlerin verimleri [118]

Türbin Tipi	Verim (%)
<u>Aksiyon:</u>	
Pelton	80-90
Turgo	80-95
Cross-Flow	65-85
<u>Reaksiyon:</u>	
Francis	80-90
Pompa-Türbin	60-90
Propeller	80-95
Kaplan	80-90

Reaksiyon tipi hidrolik türbinlerde, türbin rotor kanatlarının aralıklarında suyun giriş basıncında bir düşme meydana gelir ve bu düşme suyun ivmelenmesine yani hızlanmasına neden olur. Hızlanan su türbinden çıkarken bir kuvvet oluşturur ve türbin dönmeye başlar. Türbin, suyun oluşturduğu bu kuvvet ile çalışır.

2.2.2. Francis Türbini

Francis tipi hidrolik türbinler, ilk defa 1838 yılında Amerikalı Howd tarafından keşfedilmiş ve 1848 yılında yine Amerikalı Francis tarafından geliştirilerek, bugün en çok kullanılan türbin çeşidi durumuna gelmiştir. Bu tip türbinler orta düşülerde çalışmalarına karşılık, aynı zamanda büyük debilerde de kullanıldıklarından dolayı tek bir türbin ünitesinin çok büyük güçlerde imal edilebilmeleri mümkün olmaktadır.

Francis tipi hidrolik türbinler de üst basınç grubuna dahil olan türbinlerdir. Bu tip türbinler (40-200) m arasında değişen orta düşülerde, (2-800) MW arasındaki güçlerde ve (50-550) d/d arasındaki devirler için imal edilmektedirler.

Francis tipi dikey milli hidrolik türbinlerde mekanik enerji elde edebilmek için, potansiyel durumda olan su cebri borularda basınçlı kinetik enerji oluşturur ve salyangozda sabit kanatlardan ve türbin yüküne göre geçen su miktarını ayarlayan ayar kanatlarından geçerek yatay bir akışla türbin çarkı çevresine eşit basınç ile yönelir. ÇKHES’lerde kullanılan tipik dikey eksenli Francis türbini Şekil 2.4’te görülmektedir.



Şekil 2.4. 15 kW gücünde bir Francis Türbin-Generatör sistemi [119]

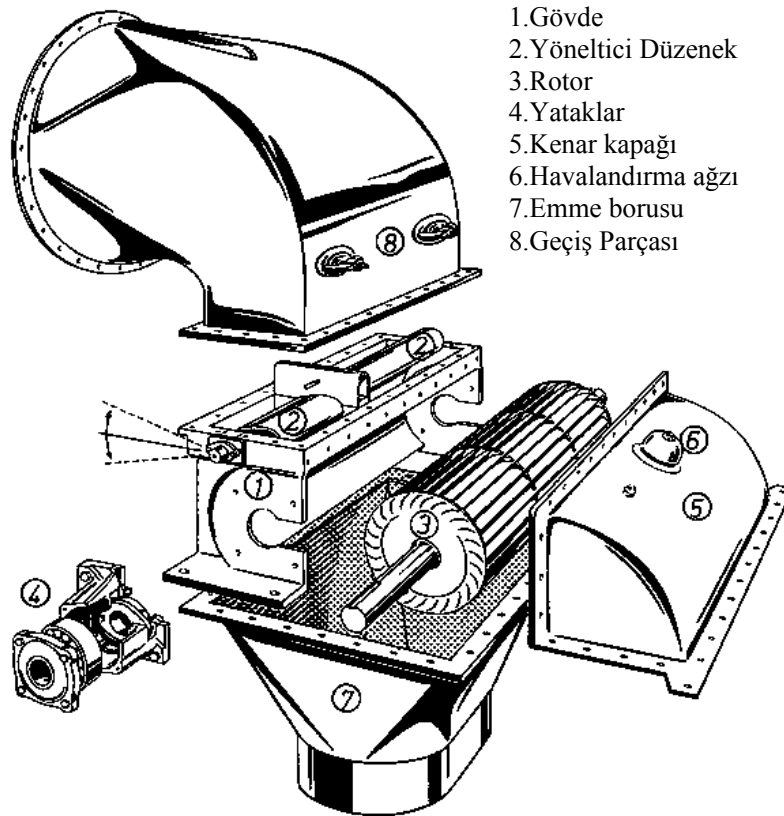
Suyun basınçlı kinetik enerjisi ile çarka çarpan su çarkı döndürerek, çarkın bağlı olduğu şaftta mekanik enerji oluşur. Oluşan bu mekanik enerji şaft vasıtası ile generatör rotorunu

çevirir. Görevini tamamlayan su 90° yön değiştirmiş olarak emme borusuna boşalır ve tekrar 90° yön değiştirerek emme borusunu terk edip mansaba (çıkış suyu) ulaşır. Francis tipi hidrolik türbinler genel olarak küçük güçlü santrallerde yatay, büyük güçlü santrallerde ise dikey eksenli olarak imal edilirler.

2.2.3. Cross-Flow Türbini

Küçük hidrolik tesisler için basitliği ve işletme özellikleri yüzünden halen klasik türbinler arasında kullanılan bir tiptir. Serbest su püskürtmeli hidrolik sınıfa giren bu türbin çeşidi, 1903 yılında Avusturyalı mühendis M.Michell tarafından ortaya atılmıştır. 1917’de Donat Banki tarafından türbinin teorisi kurulmuş ve Banki adına patent alınmıştır.

Diğer bütün çark ve türbinlerin aksine, su burada çarkı iki defa geçer. Şekil 2.5.’de görüldüğü gibi Cross-Flow (Michell-Banki, Çift Geçişli, Çapraz Akışlı) türbini, su jetlerini iyi bir şekilde işleyebilmek için iç içe iki silindir (tambur) şeklinde yapılmıştır.



Şekil 2.5. Cross-Flow türbininin genel görünüşü [120]

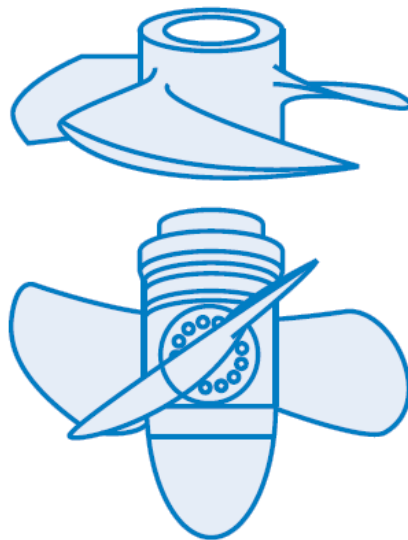
Cross-Flow tipi türbinler; su giriş borusu, su debisi ayar kanatları, türbin rotoru, türbin kapağı ve emme borusu gibi parçalardan meydana gelmektedir. Su debisi ayar kanatları, küçük ve basit bir hız regülatörü vasıtası ile ayarlanabildiği gibi el ile de ayarlanabilir.

2.2.4. Kaplan Türbini

Reaksiyon tipi türbin olarak bilinen Kaplan türbini, düşük düşme yüksekliği ve yüksek debiler için en uygun türbin tipidir. (2-80) m düşü yükseklikleri arasında verimlidirler. Şekil 2.6’da görüldüğü gibi; döner kısmını oluşturan rotoru, bir geminin uskur geometrisine sahip ve genellikle, alternatör şaftıyla birlikte dikey olarak yerleştirilirler. Ancak, yatay konumlandırıldığı durumlar da vardır.

Su akışı, şaft eksenini boyuncadır. Türbinin hareketi, Pelton türbininde olduğu gibi su jetlerinin sağladığı itme kuvvetinden değil, suyun rotor çıkışında ivmelenmesi sonucu oluşan tepki kuvvetiyle meydana gelir.

Düşen suyun miktarında, düşüş yüksekliğinde veya yük talebinde kayda değer değişiklikler yer aldığı takdirde, uskur geometrisine sahip türbinlerin verimi %75’in altına düşmektedir. Debi fazlalığına karşı önlem nisbeten kolaydır ve genellikle, ya giriş vanalarının yük talebini izleyen otomatik kontrolüyle sağlanır, ya da fazla su, yakın konumda inşa edilmiş olan denge bacası sayesinde normale getirilir. Düşüş yüksekliğindeki mevsimsel değişimlerin veya yük talebindeki oynamaların yol açtığı verim düşüklüğü sorunlarını aşmak için ise, Kaplan türbininde, rotor kanatlarının açıları ayarlanabilir hale getirilmiştir. Bu, yağ basıncıyla çalışan ve genellikle rotor gövdesi içine yerleştirilmiş bulunan bir servomotor aracılığıyla yapılır. O anki su akışına göre en uygun kanat açısı ayarı, keza bir pilot servomotor tarafından yapılır. Bu nitelikleriyle, suyun düşme yüksekliğindeki mevsimsel oynamalar sorun olmaktan çıkmaktadır.



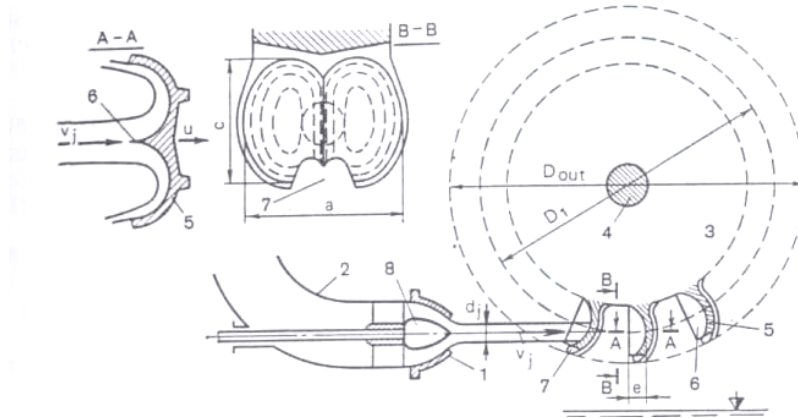
Şekil 2.6. Kaplan-Uskur türbinleri [119]

2.2.5. Pelton Türbini

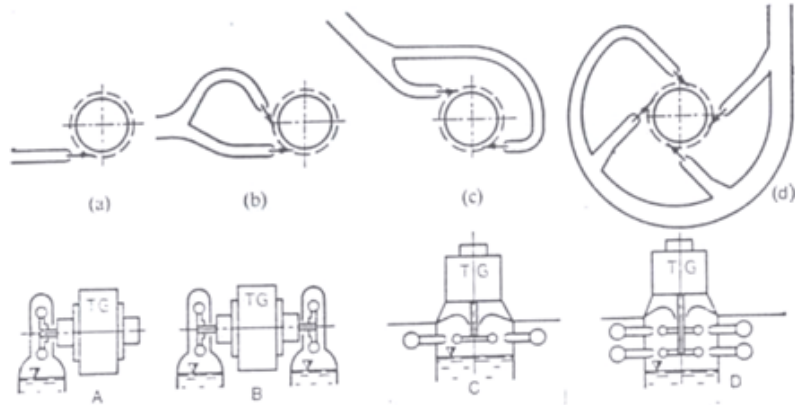
1880 yılında Lester Pelton tarafından ana prensipleri ortaya konulan ve patenti alınan pelton türbininin yapısı biraz değişerek günümüze kadar gelmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler serbest püskürtmeli türbinlerdir. Bu türbin, önce yüksek basınçlı suyu atmosfer basıncına püskürtmekte ve bu suretle elde edilen yüksek hızlı su jetinin kinetik enerjisini kepçeli olan çarkları vasıtası ile türbin miline aktarmaktadır.

Küçük güçlü Pelton türbinleri yatay eksenli ve tek/iki püskürtücülü olarak imal edilirler. Birçok hidrolik makinalar gibi Pelton türbini de karmaşık hesaplamalar ve model deneyler sonucunda üretilirler.

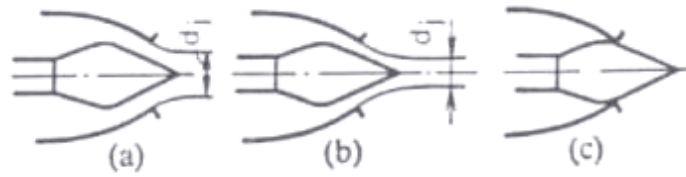
Bir pelton türbinini karakterize eden boyutlar; türbinin özgül hızı n_s , su jetinin çapı d_0 ve jet ekseninin teğet olduğu çark çapı D_0 değerleridir. Uygulamada d_0/D_0 oranı 1/100 ile 1/6 arasında değişen değerler alırlar. d_0 değeri küçük ve D_0 değeri büyük olursa, suyun püskürtücüden çıkış ile çark kepçesine giriş arasındaki kat edeceği mesafe büyüyecek ve jet dağılmaya başlayacaktır. Bu hal verim üzerinde negatif bir tesir oluşturacaktır. Aksine olarak, d_0/D_0 oranı çok küçük ise kepçeler içinde akış şartları, kepçe başına debinin büyük oluşu dolayısı ile verimi düşürecek. Birinci hal küçük n_s değerleri ve ikinci hal ise büyük n_s değerleri için mevcuttur. Pelton türbinlerinde en başarılı n_s değerleri (1-30) d/d arasındadır [116].



Şekil 2.7. Pelton türbini [116]



Şekil 2.8. Pelton türbin tipleri [116]



Şekil 2.9. Nozzle ve iğneler ile su jeti hızının ayarlanması [116]



Şekil 2.10. Paket bir pelton türbin-generatör sistemi [119]

2.3. Generatörler

ÇKHES'lerde elektrik enerjisi üretimi AA ya da DA olarak yapılmakta beraber genel kabul gören AA üretimdir. Alternatif gerilim üretiminde Asenkron ve Senkron generatörler kullanılmaktadır.

Tablo 2.5 ve Tablo 2.6'da ÇKHES'lerde kullanılan generatörler ve bunlarla birlikte kullanılan türbin tipleri güçlerine göre verilmiştir.

Tablo 2.5. ÇKHES’lerde kullanılan generatörlerin güçlerine göre sınıflandırılması [117]

Güç	<10 kW	10-15 kW	>15 kW
Generatör	Senkron/Asenkron	Senkron/Asenkron	Senkron
Faz	1 ya da 3 faz	3 faz	3 faz

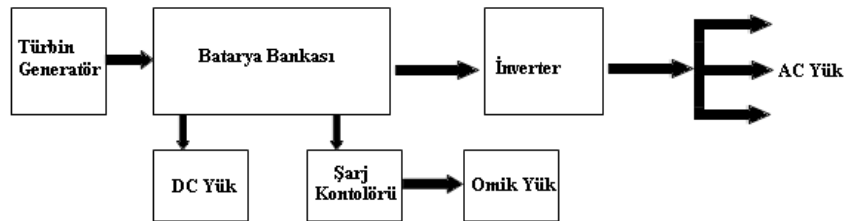
Tablo 2.6 ÇKHES’lerde kullanılan türbin ve generatörlerin tipleri [117]

Güç (W)	Net Düşü (m) Min./Maks.	Debi (lt/s) Min./Maks.	Türbin-Generatör
200-1000	1,5 en fazla	50/130	Propeller; Kalıcı Mıknatıslı AA Generatör
300-5000	2/5	28/120	Propeller; Asenkron Generatör
200-500	5/12	6/10	Turgo; Kalıcı Mıknatıslı AA Generatör
600-2000	8/17	20/30	Turgo; Asenkron Generatör
300-5500	12/34	5/28	Pelton; Asenkron Generatör
5000-8000	24/34	33/40	Turgo; Senkron Generatör
9000-16000	24/34	66/80	Pelton; Senkron Generatör
1500-5000	30/90	8/30	Pelton; Senkron -Asenkron Generatör

Çok yaygın olmamakla birlikte batarya temelli ÇKHES’ler de mevcuttur. Bu tip santrallerin güçlerine göre bir sınıflama yapıldığında düşü, debi, gerilim ve kullanılan Türbin-Generatör’ler genel itibari ile Tablo 2.7’de verildiği gibidir. Batarya temelli santrallerin genel gösterimi ise Şekil 2.11’de verilmiştir.

Tablo 2.7 Batarya temelli ÇKHES’lerde kullanılan türbin-generatörlerin tipleri [118]

Güç (W)	Net Düşü Min./Maks.	Debi Min./Maks.	Gerilim (V DA)	Türbin-Generatör
100-1000	1/3	30/65 lt/s	12/24/48/120	Propeller; Kalıcı Mıknatıslı DA Gen.
50-1600	3/60	0,6/10 lt/s	12/24/48/120	Turgo; Kalıcı Mıknatıslı DA Gen.
100-1500	6/180	0,25/16 lt/s	12/48	Pelton; Kalıcı Mıknatıslı DA Gen.



Şekil 2.11. Batarya temelli ÇKHES’lerin genel yapısı [117]

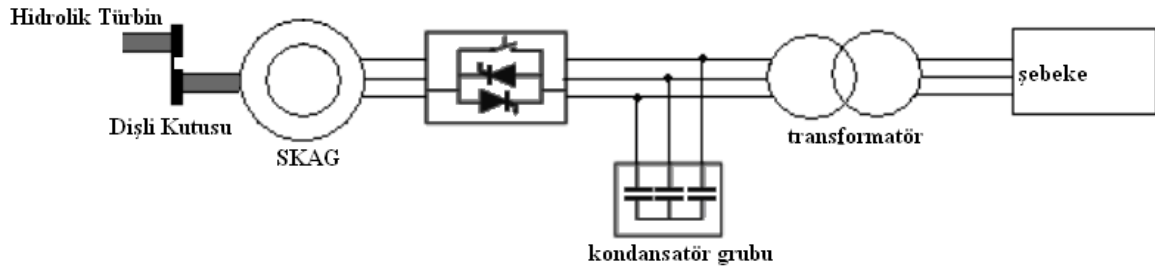
DA generatörlerin kullanımı genelde ÇKHES'lerin tanım bölgesinin alt eşik noktasına yakın yerlerdedir. Bu nedenle DA üretim yöntemleri incelenmeyecektir.

2.3.1. Asenkron Generatörler

Asenkron makinaların, sağlamlık, mekanik olarak basitlik, büyük tiplerde üretilmesi, fiyatının düşüklüğü gibi avantajları vardır. En büyük dezavantajı duran kısım statorun, reaktif mıknatıslanma akımına olan ihtiyacıdır. Ani mekanik hız artışlarında oluşan moment titreşimlerini azaltmada çok iyidir. Asenkron generatörler rotor yapılarındaki farklılığa göre ikiye ayrılırlar: Rotoru sincap kafesli (kısa devre çubuklu) asenkron generatör ve rotoru bilezikli (sargılı) asenkron generatör[121].

a. Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Sincap kafesli asenkron generatörler hem sabit hızlı hem de değişken hızlı sistemlerde kullanılır. Manyetik sesleri azaltmak ve iyi kalkınma momenti elde etmek için rotor olukları mile paralel olarak değil, eğimli olarak açılarak pres alüminyum döküm rotor sargısı elde edilir.

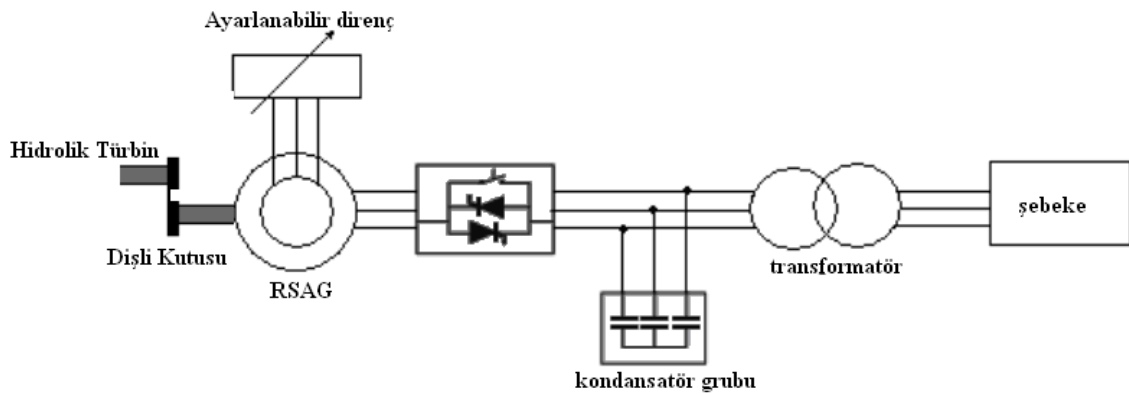


Şekil 2.12. Sincap kafesli asenkron generatörün bir kullanım şekli

Sincap kafesli asenkron makinalar, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar. Dezavantajları; generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşılaştırmasıdır. Moment-hız eğrisi lineerdir. Böylece rüzgar gücündeki dalgalanmalar direkt olarak şebekeye iletilir. Bu geçişler özellikle ÇKHES'lerin şebeke bağlantısı sırasında kritiktir. Bu noktalarda nominal akımdan 7-8 kat daha hızlı akım geçişi olur ki, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır.

b. Rotoru Sargılı (Bilezikli) Asenkron Generatör

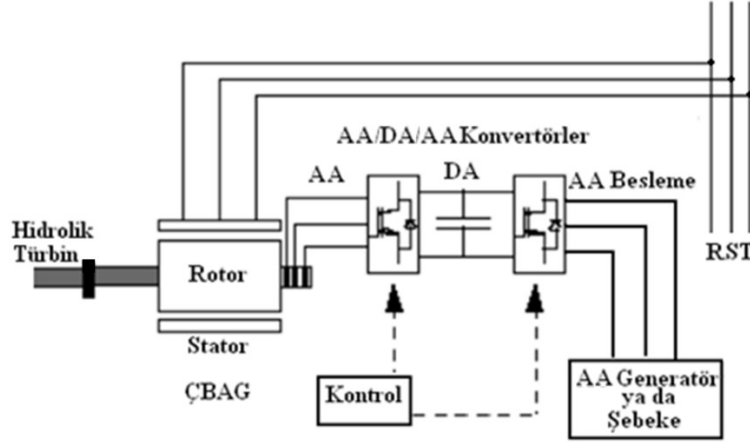
Bu tip generatörlerde rotorun elektriksel özellikleri dışarıdan kontrol edilebilir ve böylece rotor gerilimi değiştirilebilir. Rotor sargı uçları rotorla beraber dönen bileziklere bağlıdır. Bilezikler üzerinde sabit duran fırçalar yardımı ile, rotor sargıları üç fazlı bir yol verici direncine ya da dış kaynağa bağlanabilir. Böylece yol alma akımı sınırlandırıldığı gibi hız ayarı da yapılabilir. Dezavantajı ise pahalı olması ve sincap kafesliler kadar sağlam olmamasıdır.



Şekil 2.13. Rotoru sargılı asenkron generatörün bir kullanım şekli

c. Çift Beslemeli Asenkron Generatör

Çift beslemeli asenkron generatör stator sargıları direkt olarak sabit frekanslı 3 fazlı şebekeye bağlı bir rotoru sargılı asenkron generatör ile rotor sargılarına monte edilmiş iki yönlü back-to-back IGBT konvertörden meydana gelmiştir. Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve generatörün manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder. Bu generatörler değişken hız uygulamalarına imkan sağlar ve ÇKHES'lerde son zamanlarda gittikçe artan bir kullanımı mevcuttur. En büyük dezavantajı ise bilezik tertibatının düzenli bakıma olan ihtiyacıdır. Bu tür uygulamalar son zamanlarda yaygın olarak incelenmektedir.



Şekil 2.14. Çift beslemeli asenkron generatörün bir kullanım şekli

2.3.2. Senkron Generatörler

Senkron generatör, elektromıknatıslı veya küçük güçlerde olduğu gibi, kalıcı mıknatıslı bir rotor ile bir veya çok fazlı alternatif akım sargılı statoru bulunan, sabit bir hızla dönen, motor veya generatör olarak çalışabilen bir alternatif akım makinasıdır.

Senkron generatörler rotor şekillerine göre yuvarlak kutuplu ya da çıkık kutuplu olmak üzere iki çeşittir. Düşük hızlı senkron makinalarda rotor kutupları çıkık, yüksek hızlı senkron makinalarda da ise yuvarlak kutuplu olarak yapılır. Yuvarlak kutuplu senkron generatöre turbogeneratör de denir. Düşük hızlı senkron makinalarda kutup sayısı çok ve rotor çapı büyüktür. Yuvarlak kutuplu senkron makinalarda kutup sayısı genelde 2 ve 4 ve seyrek olarak 6 olup, rotor çapı küçük ve fakat rotor boyu uzundur. Senkron makinanın uyarım sargılarında harcanan güç %3-5 arasında değişmektedir. Rotor sargı dirençlerinin de küçük olduğu göz önüne alınırsa uyarım sargısından akan akımın genliği güce bağlı olarak büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu nedenle fırçasız uyarım şekilleri geliştirilmiştir.

Uyarım şekillerinin çok çeşitlenmesi ve belirli bir standardizasyonun olmaması nedeni ile IEEE bu konuda bir çalışma yapmış ve 3 farklı tip belirlemiştir[122]. Bunlar;

DA tip uyarım: Uyarım kaynağı olarak, komütatörlü bir doğru akım generatörü kullanılmaktadır. Güç kaynağı olarak ana generatör milinden ya da ayrı motor tarafından sürülen, ayrı ya da kendinden uyarımlı DA generatörler kullanılmaktadır. Eski sistemlerdendir ve 1960'lerden bu yana yavaşça ortadan kalkmıştır.

AA tip uyarım: Senkron makinanın alan sargısı için gerekli olan DA akımın üretilmesinde dönen ya da duran doğrultuculu alternatörler kullanılmaktadır. Güç kaynağı olarak genellikle türbin-generatörle aynı milde olan uyartıcı ile AA alternatörler

kullanılmaktadır. Uyarıcının AA çıkışı dönen ya da sabit olabilen (fırçasız uyarım sistemleri) kontrollü ya da kontrolsüz doğrultucular ile doğrultulmaktadır.

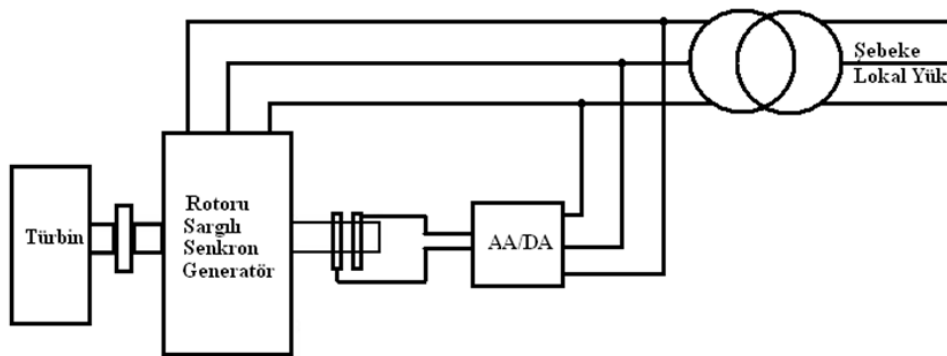
Statik tip uyarım: Uyarım kaynağı olarak transformatörleri veya yardımcı generatör sargıları ve doğrultucuları kullanmaktadır. Tüm bileşenler statiktir ve akım uyarım sargılarına bilezikler yoluyla aktarılmaktadır.

Alan sargısının akımının sağlandığı kaynak eğer senkron generatör ile aynı mil üzerinden tahrik edilirse ya da senkron generatörün çıkışından alınan gerilimle sağlanırsa frekans kontrolünde ek bozucu etkiler gösterecektir. Bu konu önemli bir dezavantajdır.

a. Rotoru Sargılı Senkron Generatör

Manyetik alan rotorda bulunan alan sargısında üretilir. Rotordaki kutup sargısı doğru akımla beslenerek hava aralığında zamana göre değişmeyen genliği sabit manyetik alan meydana getirir. Bu manyetik alan rotorun döndürülmesi ile statora yerleştirilmiş sargının düzlemlerinden değişik açılarda geçer ve gerilimi indükler. Bu sargıda oluşan gerilim alternatiftir, zamana göre değişir. Generatörün hızı, döner alanın frekansı ve kutup sayısına göre değişir.

Stator tarafındaki konverter elektromanyetik alanın düzgün ve düzenli oluşmasında kullanılır. Kullanılmalarındaki en büyük fayda, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir. Bu generatörlerin kutup eğimi asenkron makinalara göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusunu ortadan kaldırabilir.

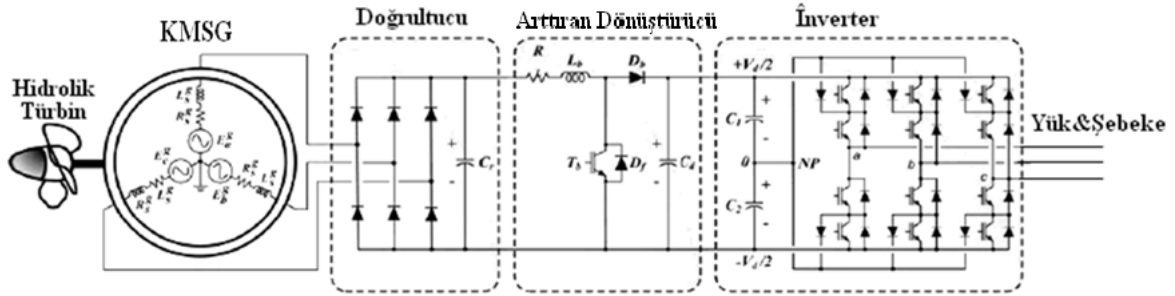


Şekil 2.15. Rotoru sargılı SG'nin kullanıldığı bir bağlantı şeması

b. Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör

Sürekli mıknatıslı senkron generatörler, herhangi bir harici enerji kaynağına gerek duymaksızın her hızda güç üretebilmektedirler. Bakım maliyeti düşüktür. Küçük ve hafif uygulamalar için uygundur. Generatör hızı herhangi dişli kutusuna gerek kalmadan kontrol

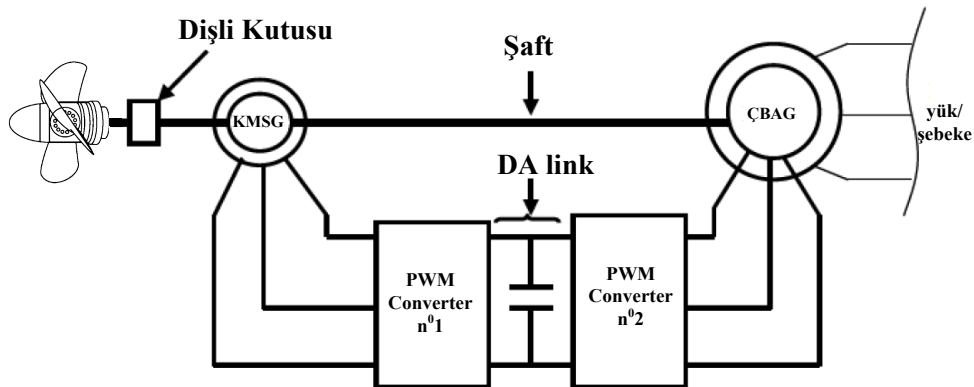
edilebilir. Sürekli mıknatıslı SG'ün statoru sargılıdır ve rotoruna sürekli mıknatıslar yerleştirilmiştir. Yaygın olarak kullanılanlar; radyal akılı, aksiyal akılı ve çapraz akılı tipindeki generatörlerdir. Şekil 2.16'da sürekli mıknatıslı SG'ün kullanıldığı bir yapı verilmiştir.



Şekil 2.16. Sürekli mıknatıslı bir SG'ün kullanım şekli

Kalıcı mıknatısların fiyatları çok yüksektir. Bir diğer dezavantajı ise mıknatısların manyetik özelliklerinin sıcaklıkla değişmesidir. Yüksek sıcaklıklarda ve kısa devre durumlarında mıknatısların manyetik özelliklerini kaybetmektedirler.

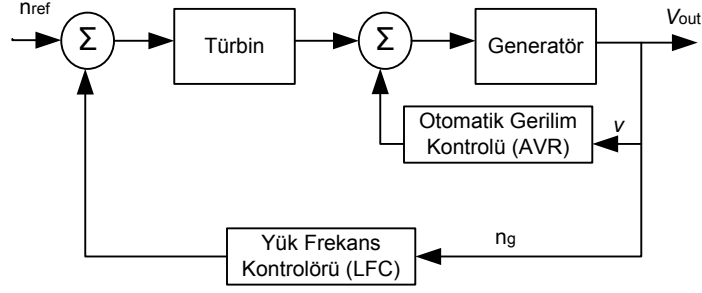
Bu generatörler son zamanlarda değişken hızlı ÇKHES'lerde çift beslemeli asenkron generatörlerle birlikte kullanılmaktadır. Şekil 2.17'de bu değişken hızlı ÇKHES'ler için örnek bir uygulama yapısı verilmiştir.



Şekil 2.17. Değişken hızlı ÇKHES yapısı

2.4. Kontrol Sistemleri

ÇKHES'lerde değişik generatörler kullanılabilir. ÇKHES'lerin şebeke bağlantısına göre ve burada kullanılan generatörün türüne göre gerilim ve frekans kontrol stratejisi değişmektedir. Çalışmada senkron generatörler dikkate alınarak kontrol şekilleri anlatılacaktır. Şekil 2.18'de SG'e ait genel frekans ve gerilimin kontrol çevrimi verilmiştir.

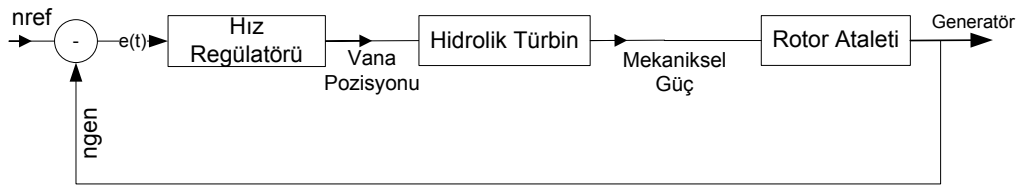


Şekil 2.18. ÇKHES’lerde SG gerilim ve frekans çevrimi

2.4.1. Frekans Kontrolü

HES’lerdeki hız yani frekans kontrolü iki temel mantıkla yapılmaktadır. Bunlardan ilki debi ayarı ile diğeri ise yük ayarı yapılarak kontroldür. Kullanılan türbinlerin hız kontrollerinde, türbin-generator şaftının devir sayısı veya bu devir sayısına uygun olan bir elektrik büyüklük, hız regülatörünün giriş büyüklüğü olarak değerlendirilir. Bazı hallerde de türbinin tahrik ettiği senkron generatorün frekans veya gerilimi hız regülatörünün giriş büyüklüğü olarak seçilebilmektedir.

Debi ayarı mantığı ile yapılan kontroldeki prensip, türbinin kumanda mekanizması özel servomotorlar vasıtası ile tahrik edilmesi ve türbin ayar kanatlarının veya türbin düzesi iğnesi ile saptırıcısının açıklıklarının değiştirilmesi ve dolayısıyla türbin gücünün değiştirilmesidir. Bu, Francis, Kaplan ve Cross-Flow tipi türbinlerde türbin ayar kanatları kumanda servomotoru ile yapılır. Pelton tipi türbinlerinde ise düzede 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. Debi ayarı ile yapılan frekans kontrolüne ait genel blok gösterim Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19. Debi ile yapılan frekans kontrolü

Türbin ayar kanatlarının ya da türbin düzesi iğnesi ile saptırıcısının açma-kapaması için kullanılan özel servomotorlara regülasyon kuvvetlendiricileri adı verilir. Bunlar klasik olarak hidrolik ya da pnömatik yapıya sahiptirler.

Türbin-generatör ünitesinin devir sayısının (frekansının) belirli ve istenilen sınırlar içinde sabit kalması ile birlikte türbin-generatör ünitesinin gücünün değişmesi için hız regülatörünce türbin ayar kanatlarının veya türbin düzesi iğnesi ile saptırıcılarının açıklıklarının değiştirilmesi olayına, yani türbinin su debisinin ayarlanması olayına, "regülasyon olayı" veya "regülasyon hareketleri" adı verilmektedir [116].

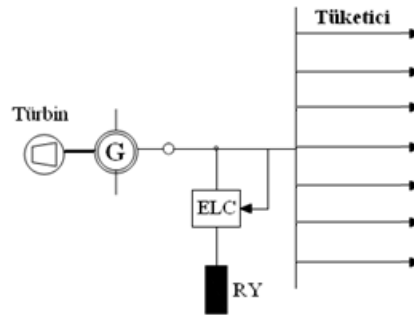
Meydana gelen regülasyon hareketleri ile su akımının ve su debisinin değişmesi sonucu cebri boru ve salyangoz gibi organlarda ani basınç değişiklikleri (ani basınç yükselmeleri - su koçu ve azalmaları) meydana gelir. Bu ani geçici basınç değişiklikleri regülasyon olayı üzerine kötü etkide bulunurlar, 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. Bilhassa 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.

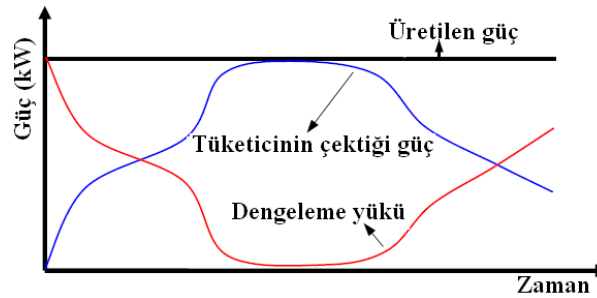
İzole bir sistemde çalışan bir türbinin devir sayısı regülasyon devresi ile gerilim regülasyonu devresi birbirleri ile bağımlı olarak çalışırlar. İzole bir şebekeye bağlı tüketicilerin beslenmesi halinde türbin hız regülatörü tüm izole şebekenin frekansını tayin eder. Böyle bir izole şebekede regülasyon olayında meydana gelecek olan sapmalar, tüketicilerin döndürme momenti-frekans karakteristik eğrisi üzerindeki çalışma noktasının yerinin değişmesine sebep olur ve yükte bir değişme meydana gelmesini mümkün kılar. Yükte meydana gelebilecek olan bu değişme izole şebekedeki tüketicilerin döndürme momenti-frekans karakteristik eğrisinin eğimine bağlıdır. Türbinin döndürme momentinde meydana gelecek bir değişiklik, yani güçte meydana gelecek bir değişiklik ile frekansta da buna uygun bir değişiklik meydana gelecektir. Bu olayların oluşması, regülasyon olayı

sayesinde gerçekleşir. Aynı zamanda tüketicilerin makinelerinin atalet momenti de türbinin tahrik ettiği senkron generatörün atalet momentine büyük ölçüde etkide bulunur.

ÇKHES’lerde su debisinin hiç değiştirilmediği ama frekans kontrolünün yapıldığı bir başka yöntem ise generatörden çekilen aktif gücün sürekli sabit olma prensibinin kullanıldığı bir yöntemdir. Bu yöntem, Elektronik Yük Kontrolü (EYK-Electronic Load Control (ELC)) denilmektedir. Şekil 2.20’de genel gösterimi verilen yöntemde, Şekil 2.21’den de görüldüğü gibi generatörden çekilen güç sürekli sabittir. Toplam yükü sabit tutabilmek için güç anahtarları kullanılarak rezisif yük hızla anahtarlanır. Elektriksel bir yöntem olduğu için tepki süresi daha kısadır ve frekans kontrolünün daha hızlı yapılmasına neden olur. Başlangıçta bu yöntemde suyun potansiyel enerjisi maksimum şekilde kullanılamamasına rağmen bu olumsuzluğunu azaltmak için üzerinde bir çok çalışma yapılmıştır. Tam olarak olmasa da önceki duruma göre daha verimli hale getirilmiştir.



Şekil 2.20. Elektronik yük kontrolü genel gösterimi



Şekil 2.21. Elektronik yük kontrolündeki güç değişimleri

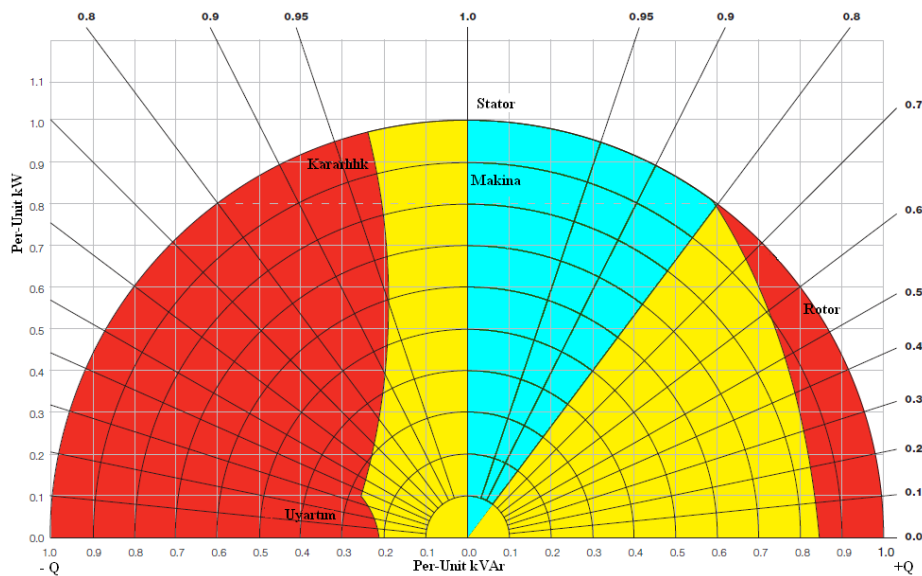
Ulusal şebeke ile paralel çalışma halinde ise hidrolik türbinin tahrik ettiği generatör rotoru, yani hidrolik türbin, şebeke frekansına uygun olan bir devir sayısı ile ve senkron döndürme momenti ile döner. Bir türbin hız regülatörünün görevi, belirli bir yükte şebekeyi besleyebilmek için yük-frekans (devir sayısı) karakteristik eğrisini el ile veya otomatik olarak aşağı-yukarı kaydırmak ve türbinin gücünü ayarlamaktır. Türbinin tahrik ettiği generatör ulusal şebekeden ayrılır ayrılmaz türbin ve generatör izole olarak

çalışmaya başlar. Böyle bir makine gurubunun devir sayısı-yük regülasyonu, izole bir şebekeyi besleyen bir makine gurubunun devir sayısı-yük regülasyonuna benzer.

2.4.2. Gerilim Kontrolü

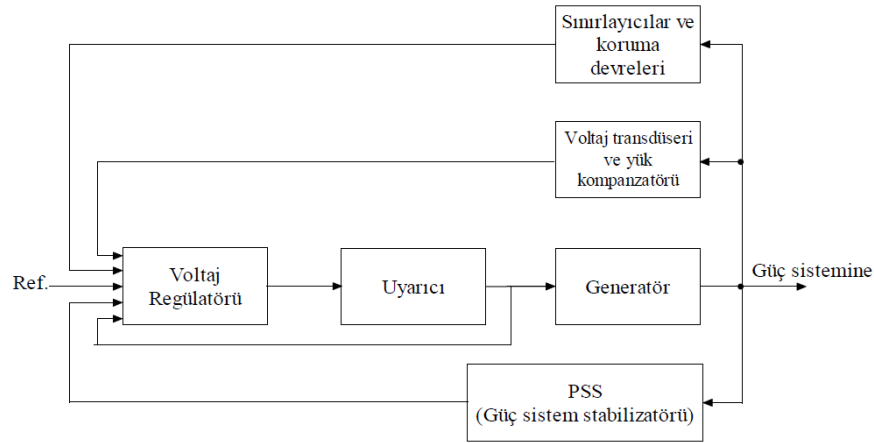
SG’lerde gerilim kontrolü uyarım şekline göre değişiklik arz etmektedir. Bu kalıcı mıknatısiyetli makinalarda herhangi bir kontrol yapısı mevcut değildir. Alan sargılı yapıda ise uyarım akımının kontrolü ile yapılmaktadır. Bu kontrolü yapan sistemlere Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) denilmektedir. Bunların temel fonksiyonu senkron makinanın çıkış geriliminin ve reaktif güç veya güç faktörünün düzgün bir şekilde kontrol edilmesidir. OGR’nin gerilim için bir referans değeri olur ve bu değeri sürekli olarak generatör çıkışından gelen gerilim değeriyle karşılaştırır ve hatanın ve değişimin miktarına göre uyarım akımının değerini değiştirir. Günümüzde bu işlem tamamen sayısal teknolojiye dayalı yapılır.

OGR’lerde belirli sınırlayıcılar mevcuttur. Bunlar uyarım sistemini koruma amaçlı kullanılmaktadır. 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 güç grafiği Şekil 2.22’de gösterilmiştir.

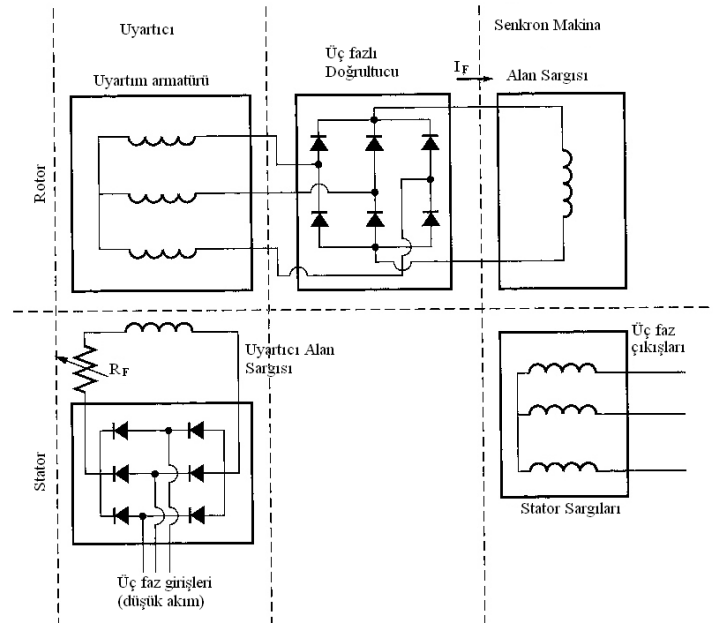


Şekil 2.22. Senkron Generatörün sınırlayıcıları

Şekil 2.22’de generatöre ait çalışma bölgesi yer almaktadır. Bu bölgede açık mavi renkli kısım, normal çalışma bölgesidir. Sarı bölge anormal bölgedir, ama makine zarar görmez. Kırmızı bölge ise, istenilmeyen çalışma bölgesidir ve makine zarar görebilir ya da kararsızlığa gidebilir. Şekil 2.23’de geleneksel uyarım kontrol sisteminin bloğu verilmiştir.

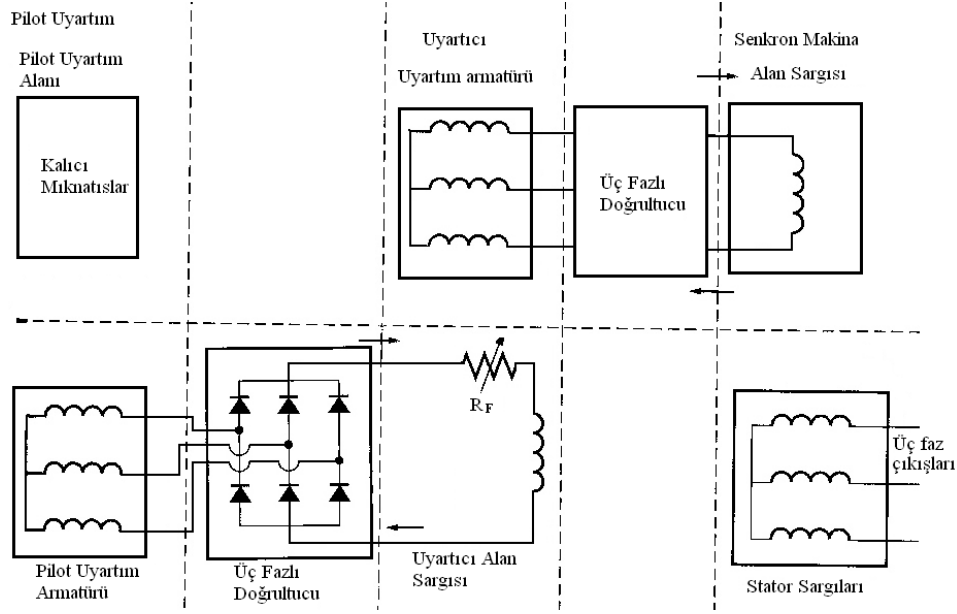


Şekil 2.23. Uyarım kontrol sisteminin blok gösterimi [85]



Şekil 2.24. Fırçasız bir uyarım devresi [121]

Şekil 2.24 ve Şekil 2.25’te fırçasız uyarım yapısına sahip iki farklı yapı verilmiştir. Bu yapıların kullanılmasındaki amaç; ana alan sargısının gerek duyduğu akımın bilezikli yapı kullanmadan sağlanmasıdır, yani bilezikli yapıdan kurtulmaktır.



Şekil 2.25. Pilot uyarımlı fırçasız bir uyarım devresi [121]

Rotordaki alan devresinden bir DA akım geçirildiğinden ve rotor döndüğünden, alan sargılarına DA gücünün aktarılabilmesi için özel bir yapıya ihtiyaç vardır. DA gücünü alan sargılarına aktarmak için iki yöntem mevcuttur. Bunlar; bilezik-fırçalı sistem ve fırçasız sistemlerdir. Bilezikler, makinanın milini tam olarak saran fakat milden izole edilmiş metal halkalardır. Uyarma sargısının uçları, SG'ün rotoru üzerindeki iki bilezik bir fırça ile irtibatlandırılır. Fırçalar düşük bir sürtünme ile elektrik akımını ileten karbon bileşik çubuklardır. Bu yapının dezavantajlarından önemli iki tanesi makinanın bakım gereksiniminin artması ve fırçalardaki gerilim düşümleridir. Bu problemlere rağmen küçük güçlü sistemlerde tercih edilir. Tercih sebeplerinden bazıları ise maliyet ve kontrol yapılarının yalınlığıdır.

Daha büyük generatörlerde, fırçasız uyarım sistemleri kullanılır. Fırçasız uyarıcı, alan sargısı stator üzerine ve endüvi sargısı rotor mili üzerine monte edilmiş olan küçük bir AA generatörüdür. Şekil 2.24 ve Şekil 2.25'te bu uyarım şekillerine ait örnek bağlantı devreleri verilmiştir. Uyarıcı generatörün üç faz çıkışı generatörün mili üzerine monte edilmiş üç fazlı bir doğrultucu devre ile doğru akıma dönüştürülür ve sonra ana DA alan sargısını besler. Ana alan sargısının akımı, uyarıcının küçük bir DA uyarım akımı ile kontrol edilmesini sağlar. Böyle bir yapının ek bakım maliyetleri çok azdır.

Generatörün uyarmasını herhangi bir harici güç kaynağından tamamen bağımsız yapmak için, çoğunlukla küçük bir pilot uyarıcı kullanılır. Şekil 2.25'de buna ait örnek bir devre verilmiştir. Bu uyarıcı rotorunda sürekli mıknatıslar ve statorunda üç fazlı sargılar

bulunan küçük bir AA generatörüdür. Bu generatör uyartıcının alan devresi için gerekli olan gücü üretir ve dolayısı ile ana alan sargısını kontrol eder.

2.4.3. Senkronizasyon

Bir generatörün başka bir generatöre ya da şebekeye paralel bağlanması işlemine senkronizasyon, bu işlemi yapan cihaza ise senkronoskop denir. Şebekeleri besleyen santrallerde bir ya da birden fazla generatör bulunur. Yük durumuna göre bu generatörler kendi aralarında veya o şebeke yani dolayısıyla şebekeye paralel çalışan diğer generatörler ile paralel bağlanırlar.

Paralel bağlanma şartları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

- 1- İki generatörün de etkin hat gerilimleri birbirine eşit olmalıdır.
- 2- İki generatörün de faz sıraları aynı olmalıdır.
- 3- İki generatörün de aynı fazlarının, faz açıları eşit olmalıdır.
- 4- İki generatörün de frekansları birbirlerine eşit olmalıdır. Sisteme paralel bağlanacak olan yeni generatöre “yaklaşan generatör” denilir ve bu generatörün frekansının, çalışan sistemin frekansından az daha büyük olması gerekmektedir [121].

Yukarıda yazılan paralellik şartlarına açıklık getirilirse;

Birinci şartta; iki gerilimin aynı olması için, kesinlikle faz gerilimlerinin efektif değerleri birbirlerine eşit olmalıdır. Gerilimler eşit olmadan, generatörler veya santraller paralel bağlanacak olursa büyük dengeleme (sirkülasyon) akımları meydana gelir. Bu sirkülasyon akımları ise generatörlerde termik ve dinamik zorlanmalara sebep olur. Fakat bir generatör, normal akımı ile ani olarak yüklenmeye ve ani olarak normal yükünün kaldırılmasına daima dayanıklı olması gerektiğinden generatörden anma akım mertebesindeki sirkülasyon akımlarının geçmesine müsaade edilebilir. Generatörün gerilimi şebeke geriliminden küçük ise reaktif akımı şebekeden çeker, büyükse şebekeye reaktif akım verir.

Generatörlerde, anma akım mertebesinde bir sirkülasyon akımı meydana getirecek gerilim farkı, takriben %10 kadardır. Buna göre, generatör gerilimi şebeke geriliminden %10 kadar farklı olduğu bir durumda, paralel bağlama gerçekleşirse generatörden nominal akımı mertebesinde bir sirkülasyon akımı geçer. Bu da zararlı değildir. Onun için paralel bağlama esnasında en fazla %10 kadar bir gerilim farkına müsaade edilir[121].

İkinci şart ise, iki generatörde de aynı büyüklükteki fazların tespitini, dolayısıyla faz sıralarının aynı olmasını sağlar. Eğer faz sıraları farklıysa, bir faz çiftinin gerilimleri aynı

fazda olsa bile diğer iki faz çiftinin gerilimleri arasında 120° şer faz farkı vardır. Eğer generatörler bu şekilde bağlanırsa, a fazında hiçbir problem yaşanmayacak fakat b ve c fazlarından akacak olan büyük akımlar, generatöre zarar verecektir. Faz sıraları şebekeninkine uygun olmayan bir generatörün şebekeye paralel bağlanması esnasında, her ne kadar faz gerilimlerinin mutlak değerleri, frekanslar ve herhangi bir faz gerilimine ait faz durumları eşit yapılmış ise de diğer fazlar arasında fazlar arası gerilime eşit bir potansiyel farkı oluşacağından büyük bir sirkülasyon akımı geçecek ve sonsuz şebeke olduğu düşünülürse bu sirkülasyon akımının tesiri ile generatör ters yönde döndürülmek istenecektir. Hâlbuki paralel bağlanacak generatör daha önceden bir tahrik makinası tarafından başlangıçtaki faz sırasına denk gelecek şekilde tahrik edildiğinden makine mili burulup zorlanacaktır.

Fakat genellikle gerilim farkının çok büyük olmasından ve geçen sirkülasyon akımının çok büyük olmasından dolayı makinenin daha fazla zorlanmasına izin verilmez, generatörü şebekeye bağlayan cihazlar devreyi keserler. Genelde alçak gerilim santrallerinde generatörler, otomatik anahtarlar üzerinden şebekeye bağlandığından, bu gibi bir yanlış bağlama neticesinde sirkülasyon akımı belli bir değere ulaşır ulaşmaz otomatik anahtar veya sigorta devreyi keser. Yüksek gerilim santrallerinde bu işi güç anahtarları görür.

Bu faz sırası problemini çözmek için basit bir yolla, makinelerden herhangi birinin üç fazından, ikisinin bağlantısı yer değiştirilerek sorun giderilir.

Üçüncü şartta, iki generatörün R_S ve R_G fazlarındaki gerilimlerin fazları, faz açıları ve genlikleri aynı kaldığı müddetçe R_S ve R_G fazlarındaki gerilim değerleri de her zaman aynı olacaktır. Aynı isimli fazlar arasındaki potansiyel farkı yani gerilimler arasındaki faz açısı sıfır olmadan, generatör şebekeye bağlanırsa ani olarak bir aktif sirkülasyon akımı meydana gelir ve paralel bağlanacak olan makinenin rotoruna bir darbe tesiri yaparak bunun hızını arttırmak ya da frenlemek suretiyle, kutupları faz bakımından uygun bir duruma getirmeye çalışır. Generatör nominal akımı mertebesinde bir akıma dayanıklı olduğundan belirli faz açısında generatörün paralel bağlanmasına müsaade edilir. Nominal akım mertebesinde bir sirkülasyon akımına neden olan faz farkı, generatörün cinsine göre 7° - 14° arasında değişir.

Dördüncü şart; İki makinenin de frekansları birbirine oldukça yakın olmalıdır. Fakat frekanslar tamamen aynı olamamaktadırlar. Frekansların birbirlerinden biraz farklı olmaları gerekmektedir. Öyle ki devreye yeni giren generatörün faz açısı, sistemin faz açısına yavaşça ulaşsın ki; gerilimler arasındaki açılar gözlenebilir olduğundan paralele

bağlayacak anahtarı da, sistem tam olarak aynı fazda iken, kapatılabilir. Eğer iki generatörün frekansları birbirlerine çok yakın değilse, generatörler birbirlerine bağlandıklarında, ortak bir frekansta kararlı duruma gelinceye kadar, generatörlerde büyük geçici güçler ortaya çıkacaktır. Şayet paralel bağlama anında generatör frekansı şebeke frekansından farklı ise frekans farkına bağlı olarak generatörden bir sirkülasyon akımı geçer. Fakat frekans farkının sebep olduğu bu akım aktif sirkülasyon akımıdır ve bu akım; paralel bağlı generatörün frekansı, şebeke frekansından küçük olduğu hallerde generatör grubunu senkronizme getirmek amacıyla generatörün dönen kısımlarının hızlandırılması için, aksi takdirde de frenlenmesi için kullanılır. Bu sebeple bu tür sirkülasyon akımı generatör mili üzerinde bir zorlama tesiri yapar ve mili kırabilir. Ayrıca sirkülasyon akımı generatör sargılarının da ısınmasına sebep olduğundan senkronizasyon anında frekansların eşit olmasına çok daha fazla dikkat edilmelidir.

Bununla beraber her senkron generatörün tam yükü ile ani olarak yüklenmesi olağan bir durum olduğundan, normal akım mertebesinde bir sirkülasyon akımı meydana getirecek bir frekans farkına müsaade edilebilir. Bu da normal değerin $\%(1-2)$ 'si kadardır. Frekans farkı $\%2$ kabul edilirse ve generatör frekansı şebeke frekansından yarım periyot az veya fazla iken (50 Hz'lik şebeke için, 49 veya 51 Hz) paralel bağlama işlemi yapılacak olursa, generatörlerden nominal akım mertebesinde bir aktif sirkülasyon akımı geçer, yani generatör ani olarak tam yükü ile yüklenmiş gibi bir etki altında kalır.

Paralel bağlanan generatörün devreye girer girmez, derhal bir miktar yükü üzerine alması isteniyorsa, generatörün frekansı şebeke frekansından $\%(0.5-1)$ kadar daha büyük yapılır [121].

2.5. ÇKHES'lerin Çevresel Etkileri

ÇKHES'lerin çevresel etkileri doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki türdür.

2.5.1. Doğrudan Etkileri

$\%1$ 'den az çözünmüş tuz içeren sulara tatlı su denir. Dünyada sular alan ve kütle olarak fazla olmasına karşı insanın kullanabileceği tatlı su miktarı oldukça azdır. Yeryüzündeki su kaynaklarının $\%97$ 'si denizlerin ve okyanusların tuzlu sularından oluşur. Su kaynaklarının $\%3$ 'ü kadarı tatlıdır. Tatlı suların $\%68$ 'den fazlası buzullar ve buzul dağlarında bulunur. $\%31,4$ 'ü yeraltı sularında $\%0,3$ 'ü ise yüzey sularıdır. Yüzey sularının da $\%87$ 'si göllerde, $\%11$ 'i bataklıklarda, $\%2$ 'si nehirlerde bulunmaktadır.

Suların çevreye doğrudan etkileri, geçtiği yerden çözdüğü mineralleri taşıyarak etrafındaki canlılara ulaştırması, atmosferden çözdüğü ve suda çözülen kimyasal ve biyolojik süreçlerden açığa çıkan oksijeni taşımasıdır.

ÇKHES'lerin suyun bu etkilerini nasıl değiştireceği konusunda öncelikle ÇKHES'lerin yapılarını göz önüne almak gerekir. ÇKHES'ler genel olarak biriktirmesiz tarzda yapılmaktadır. Bu nedenle su, ya yatağında kullanılarak ya da düşü elde etmek amacı ile bir miktar yatağından ayrı bir yerden su kanalı ve cebri boru ile taşınır sonra tekrar yatağına verilir. Bu iki durumda oluşabilecek sorunlar ve çıkış yolları aşağıdaki gibi olabilir:

Suyun kirlenmesi: Santralde kullanılan elektromekanik sistemlerden sızan yağların suyu kirlenmesi yaşanan durumlardandır. Bunun önüne geçmek için standartların yükseltilmesi ve kontrolün sıklaştırılması gereklidir.

Cansuyu problemi: Prensip olarak, derelerin doğal hayatının devamını sağlayacak can suyu (derelere bırakılması gereken minimum su miktarı) mevcut uygulamalarda kurak ve ıslak yılların yüzdesi olarak uygulanmaktadır. Şu ana kadar yapılan uygulamalarda can suyunun tayini ile ilgili herhangi bir mevzuat ve standart mevcut değildir. Can suyu miktarında özellikle küçük derelerde, dere ve mansap koşulları, o yörede yaşayan ve özellik arzeden canlı ve bitki türleri de göz önüne alınmalıdır. Ayrıca can sularının hidroelektrik santral inşaatları bittikten sonra denetlenmesi ve kontrolünün yapılmasının şartları ortaya net olarak konulmalıdır.

Ulaşım Problemleri: Güçlerinin küçük sayılarının büyük olacağı düşünüldüğünde ulaşım vb nedenlerden dolayı açılacak yolların çevresel etkileri büyük oranda arttıracığı bir gerçektir. Özellikle büyük ve çok büyük güçlü santrallerin kW başına etkilerini geçebilecektir.

2.5.2. Dolaylı Etkileri

Dolaylı etkilerini, elektrik enerjisinin temiz bir enerji kaynağı elde edilmesi nedeni ile bu üretilen gücün diğer kaynaklardan üretilmemesidir. ÇKHES'lerin ürettiği olduğu her MWh'lık enerji 1000 kg kömür, 800 kg benzin ya da 400 kg doğalgaz'dan üretilen enerji miktarına denktir. 100 kW'lık bir ÇKHES, yıllık yaklaşık olarak 700 ton CO₂ salınımına engel olmaktadır. ÇKHES'ler çevreyi kirlenmeyen ve sera gazı çıkışı olmayan enerji üretim santralleridir. "

2.6. ÇKHES'lerin Ekonomisi

Küçük ve çok küçük HES'lerin ayrıntılı maliyet analizi yapan Aggidis ve arkadaşları ampirik formüller kullanılarak konuyu irdelemişlerdir [25]. Bu çalışma 2010 yılında yapılmış ve formüller 2008 yılı itibari ile kurulan santrallerin maliyetleri incelenerek elde edilmiştir. Aşağıdaki denklemler çalışmanın yapıldığı zamana göre ₺'ye çevrilerek elde edilmiştir. Denklemlerde verilen P kW cinsinden güç, H_n m olarak net düşü, Q ise m³/s olarak debidir.

ÇKHES'lerin toplam proje maliyeti, güç ve net düşünün fonksiyonu olarak;

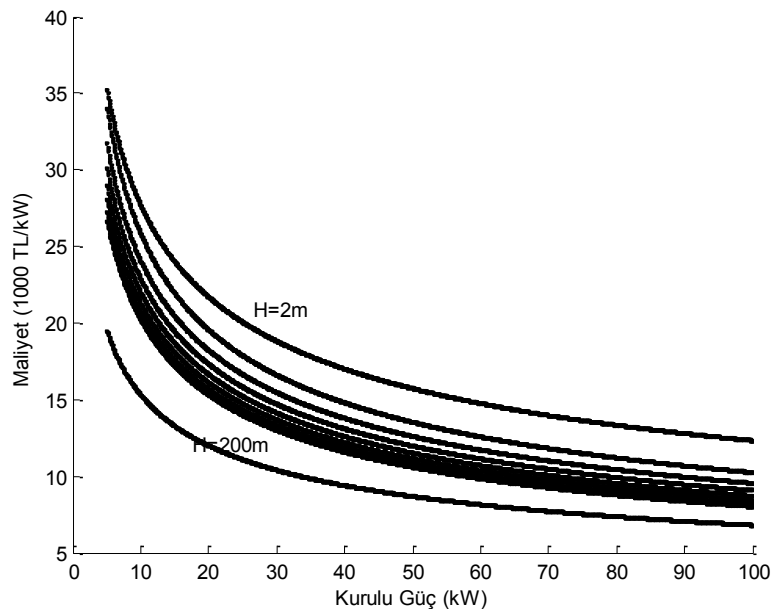
- $2 < H_n < 30$ için,

$$C_{Pr} = 72500. (P/H_n^{0,35})^{0,65} \quad (2.27)$$

- $30 < H_n < 200$ için,

$$C_{Pr} = 131950. (P/H_n^{0,3})^{0,6} \quad (2.28)$$

Denklem 2.27 ve Denklem 2.28'de ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.26'deki değişim elde edilir.



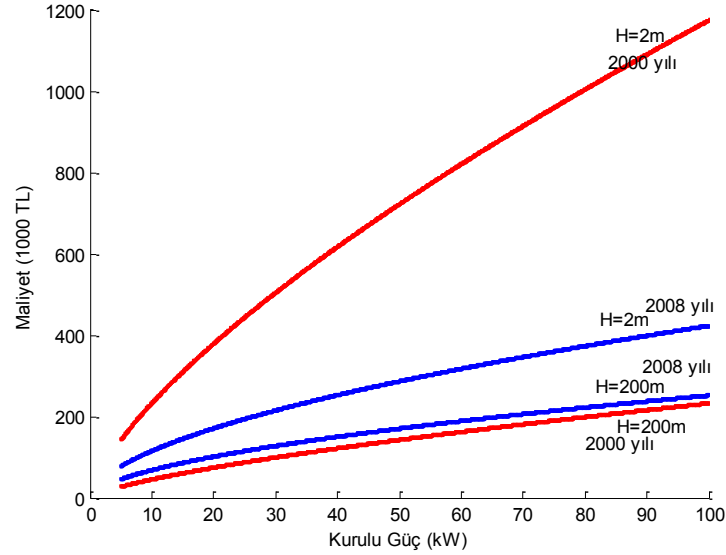
Şekil 2.26. ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre elektromekanik maliyetleri

Dünyadaki büyük elektromekanik üreticilerin (Alstom, Andritz, Gilbert Gilkes & Gordon Ltd, NHT ve Voith Siemens) 2000 ve 2008 yıllarındaki maliyet verilerinden yararlanılarak çıkarılan, güç ve net düşününün fonksiyonu olan ampirik formüller,

$$C_{EM} = 20570. P^{0,7} / H_n^{0,35} \text{ (2000)} \quad (2.29)$$

$$C_{EM} = 34800. (P/H_n^{0,2})^{0,65} \text{ (2008)} \quad (2.30)$$

olarak verilmiştir.



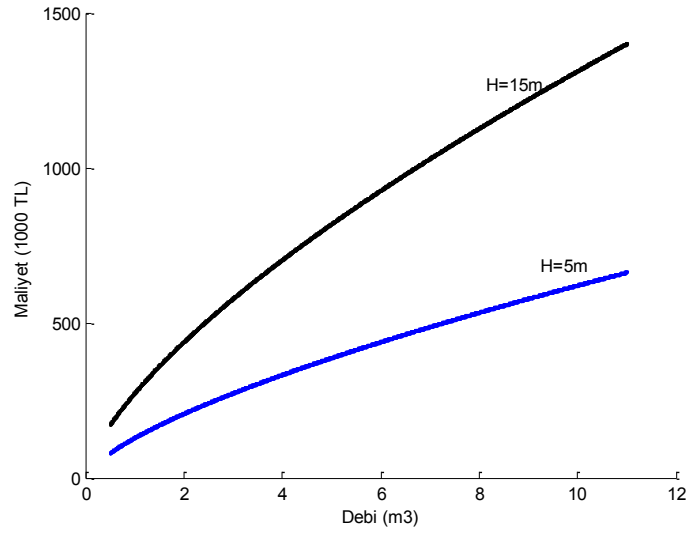
Şekil 2.27. ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre türbin maliyetleri

Denklem 2.29 2000 yılı verileri, Denklem 2.30 ise 2008 verilerine göre elde edilen denklemlerdir. Bu denklemler ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.27'deki değişim elde edilir.

$0,5 \text{ m}^3 < Q < 5 \text{ m}^3$ arasındaki kaplan türbinleri için düşü ve debinin fonksiyonu olarak elde edilen formül Denklem 2.31'de, sadece gücün fonksiyon olarak elde edilen formül ise Denklem 2.32'de verilmiştir. Bu denklemler ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.28'deki değişim elde edilir.

$$C_{K1} = 43500. (Q. H_n)^{0,68} \quad (2.31)$$

$$C_{K1} = 10150. (P)^{0,68} \quad (2.32)$$

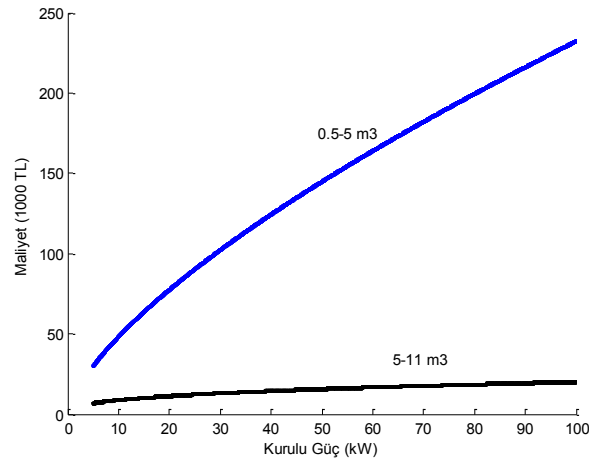


Şekil 2.28. Kaplan türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri

$0,5 \text{ m}^3 < Q < 2,5 \text{ m}^3$ arasındaki Francis türbinleri için için düşü ve debinin fonksiyonu olarak elde edilen formül Denklem 2.33'de, sadece gücün fonksiyon olarak elde edilen formül ise Denklem 2.34'de verilmiştir. Bu denklemler ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.29'daki değişim elde edilir.

$$C_{F1} = 411800. (Q. H_n^{0,5})^{0,07} \quad (2.33)$$

$$C_{F1} = 353800. (P/H_n^{0,5})^{0,07} \quad (2.34)$$



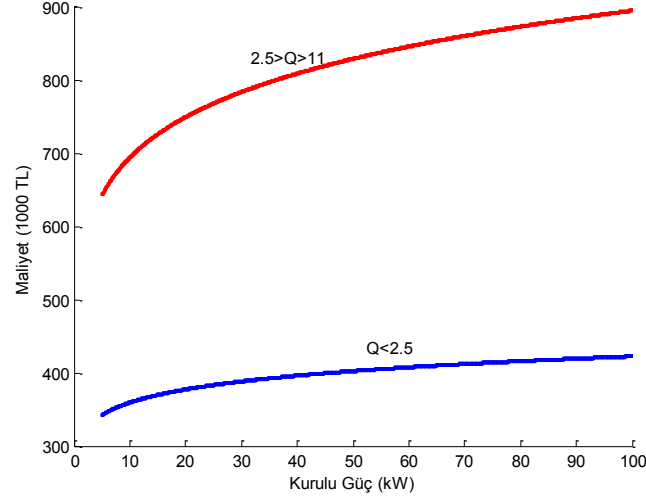
Şekil 2.29. Francis türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri

$2,5 \text{ m}^3 < Q < 10 \text{ m}^3$ arasındaki Francis türbinleri için

$$C_{F2} = 817800. (Q. H_n^{0,5})^{0,11} \quad (2.35)$$

$$C_{F2} = 646700. (P/H_n^{0,5})^{0,11} \quad (2.36)$$

Denklem 2.35 ve Denklem 2.36 ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.30'daki değişim elde edilir.



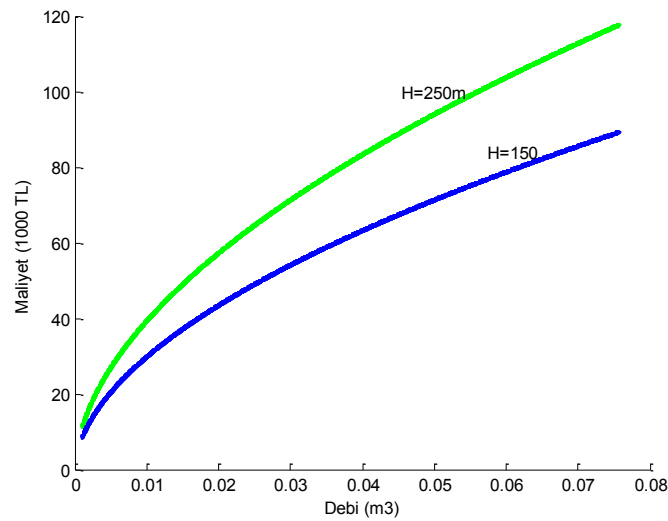
Şekil 2.30. Francis türbinli ÇKHES'lerin kurulu gücüne göre maliyetleri

Denklem 3.37'de Pelton türbinin net düşü ve debiye göre maliyet denklemi verilmiştir. Yine sistem gücünün maliyete göre değişimini ifade eden Denklem 2.3'dür.

$$C_p = 24070. (Q. H^{0,5})^{0,54} \quad (2.37)$$

$$C_p = 7540. (P)^{0,54} \quad (2.38)$$

Pelton türbinleri için Denklem 2.37 ve Denklem 2.38 ÇKHES çalışma bölgesine göre çizdirildiğinde Şekil 2.31'deki değişim elde edilir.



Şekil 2.31. Pelton türbinli ÇKHES'lerin debiye göre maliyetleri

2.7. Yenilikçi Yaklaşımlar

ÇKHES teknolojisini geliştirerek maliyetleri düşürmek fikri son zamanlarda üzerinde yoğunlaşmış bir konudur. Bu amaçla, maliyetleri aşağı çekebilecek bir takım gelişmelerden söz etmek gerekirse:

Standardizasyon: ÇKHES projelerinde mümkün oldukça ayrı ürün ve ayrı tasarım yerine belirli çalışma bölgeleri için standart sistem kullanmak.

İnşaat işlerinde yenilikçi yöntemler: İnşaat maliyetlerini dahada aşağı çekmek için şifonik türbin sistemleri gibi maliyetleri azaltan yapılara yönelmek.

Alçak düşülü türbinlerde değişken hızlı sistemler: Günümüz güç elektroniğindeki gelişmeler değişken hızlı sistemlerde bile 50 Hz sabit frekansla enerji üretimini mümkün kılmaktadır. Buna paralel olarak kaplan tipi türbin yerine basit Propeller (pervaneli) türbin kullanmak.

Elektronik kontrol ve uzaktan izleme: KHES’lerde insansız kontrol ve kumanda kullanmak.

Dalgıç turbo generatörler: Batık uygulamaları için mühürlü jeneratör ile bir Propeller türbin kullanmak.

Yeni malzemeler: Maliyeti daha düşük türbinler, cebri borular, yataklamalarda Plastik, yeni anti-korozyon maddeler, vb olanakları değerlendirmek.

Küçük sistemlerin bilgisayarla optimizasyonu: Kurulacak küçük sisteminlerin boyutlandırmasında ki ana parametre sadece üretilecek elektrik enerjinin en yüksek tutmak değilde, kurulum ve işletim maliyetlerine göre optimize edilerek çözüm üretmek.

Şişme bentler kullanmak: Bu teknolojiyi kullanarak düşüyü arttırmak. Sel suları geçmesine izin vermek için bent söndürülür.

Türbinlerde yenilikçilik: Varolan mevcut türbinleri geliştirmek, yeni tip türbinler araştırmak ya da türbin olarak kullanılan pompaların seri üretiminin yapılması.

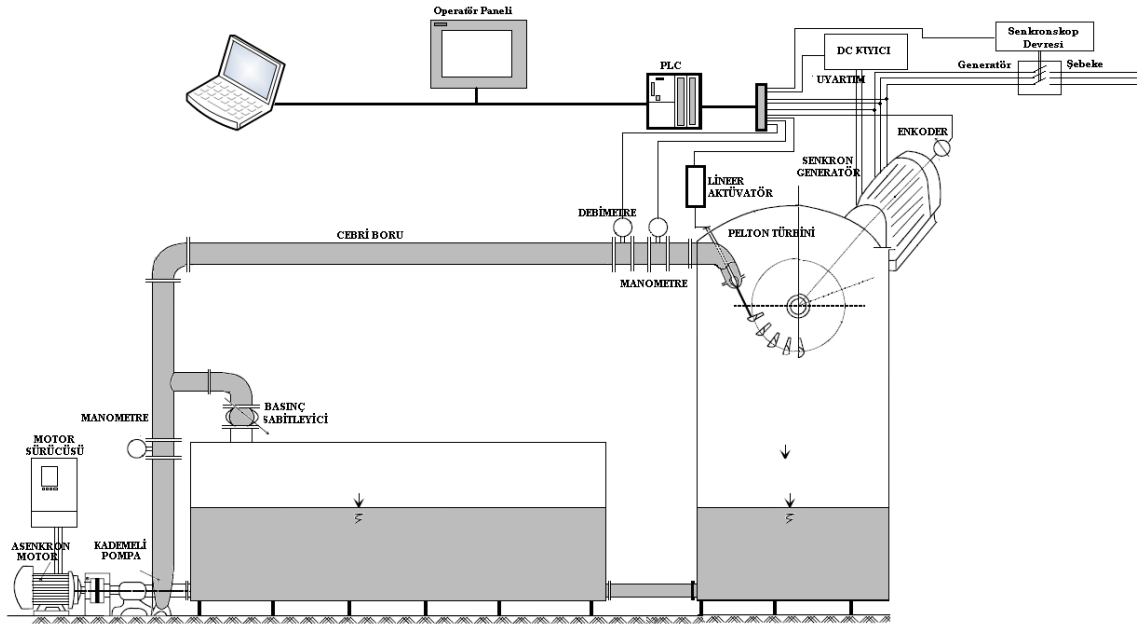
Günümüzde ÇKHES’lerin çevresel etkisi noktasında en çok itiraz edilen yönü balıklar üzerine etkileridir. Bunların hareketine engel olmamak için yeni balık merdivenleri fiziksel ya da ultrasonic tarama yöntemleri kullanarak maliyet düşürmede etkin olabilir.

3. KAPALI ÇEVİRİM BİR ÇKHES PROTOTİPİNİN TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

3.1. Giriş

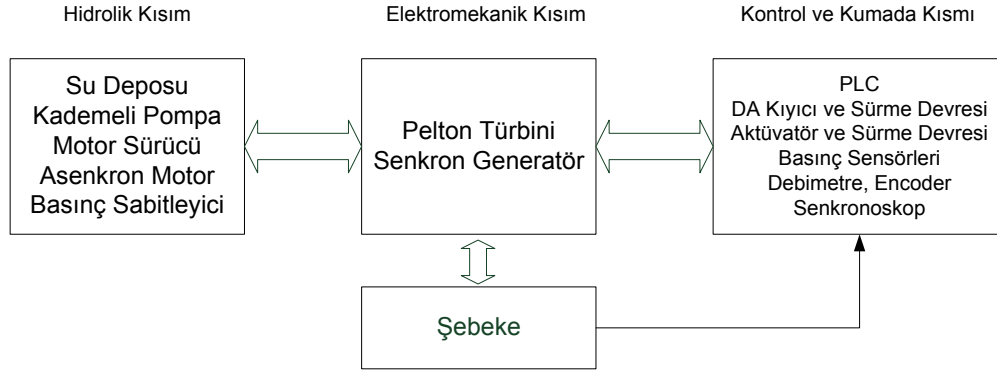
Bu çalışmada; laboratuvar şartlarında çalışabilecek, ancak gerçek bir santralin küçük bir modelini oluşturmak amacı ile bir ÇKHES prototipinin tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Oluşturulan prototipe ait gösterim Şekil 3.1’de verilmiştir. Prototipin çalışmasında, önce 1 tonluk su deposundan alınan su, kademeli pompa yardımı ile istenilen basınç değerine getirilerek cebri boruya verilir. Cebri boruda yüksek basınçla düşük hızlı hareket eden su, pelton türbinin kepçelerine çarparak SG’nin tahrik edilmesi sağlar ve su deposuna geri döner. SG’nin gerilimi, bir uyarım akım kaynağı ve buna ait devre ile kontrol edilmektedir. Generatörün frekansı, yani türbinin devir sayısı ise elektrikli doğrusal hareketlendirici (Electric Linear Actuator) ve sürücüsü ile yapılmaktadır. Tüm sistemin kontrol ve kumandası PLC ile gerçekleştirilmektedir. Sistemin tüm işleyişi ayrıntılı olarak ilerleyen bölümlerde verilecektir.

Sistemde kullanılan ana elemanların özellikleri EK 1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kapalı çevrim sisteminin genel görünümü

Şekil 3.2’de prototip sistemin blok gösterimi verilmiştir. Sistemin oluşturulması aşamalarında önce hidrolik kısım, sonra elektromekanik kısım daha sonra ise kontrolör kısmının hesabı, tasarımı ve üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Sistemin blok gösterimi

ÇKHES’ler üzerine yapılan pratik çalışmalarda genellikle belirli kısımlar ya hiç kullanılmaz ya da onun fonksiyonu başka bir elemanla yerine getirilmeye çalışılır. Bu bağlamda literatürde ÇKHES’ler üzerinde yapılan uygulama çalışmalarında kabul edilen yaklaşımları ifade etmek gerekirse; ÇKHES (mikro) olarak belirtilmesine rağmen gücün en küçük (piko) HES bölgesinde olması [64,70,85,11], kullanılan türbinin çalışma bölgesi dışında bir düşü ya da debi seçilmesi[79], bazı sistemlerde hiç türbin kullanılmaması, bunun yerine türbin yerine başka bir makinanın kullanılması[20,23,74], kurulan sistemde basınç ve/veya debi ayarının yapılmaması bunlardan bazılarıdır. Bu kabuller sayesinde ortaya çıkabilecek bir çok sorun önceden engellenmiş olmaktadır. Ancak gerçek sistemden de uzaklaşmaktadır. Çünkü her ne kadar cihaz, makina ya da olay gerçeğine yakın hale getirilmeye çalışılsa da aslında önemli eksikliklerin olduğu ve gerçek sistemin davranışlarını tam olarak yansıtamayacağı göz ardı edilemez.

3.2. Hidrolik Yapı

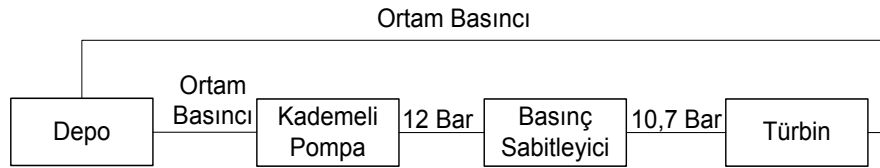
Laboratuvar ortamında kurulan sistemin hesaplamalardaki çalışma bölgesi $H=107$ m, ve $Q=7$ lt/s’dir ve bu değerlere göre belirli elemanların boyutlandırılması yapılmıştır. Belirtilen bu değerler hem elde edilebilir güç olarak ÇKHES çalışma bölgesinde olması, hem de kullanılan türbinin karakteristiğine uygun olması nedeni ile tercih edilmiştir.

Hidrolik kısmın gerçek santrallerdeki karşılığı, suyun yükleme havuzundan hidrolik türbine kadar olan kısmıdır. İlgili kısmın sisteme etkisi, türbine gerekli miktardaki suyu

istenilen basınçta sağlayabilmek, ani yüklenme ve yük atma durumlarında, cebri borudaki basınç değişimlerini gerçeğe yakın bir şekilde değiştirmektir.

HES’lerde kullanılan su belirli bir basınca ve debiye sahiptir. Sistemin bu kısmında; su deposu, kademeli pompa, bunu çalıştıran asenkron motor ve bu motorun kontrolü için kullanılan sürücü ve son olarak basınç sabitleyici yer almaktadır. Burada sürücü ile çalıştırılan asenkron motor kademeli pompayı tahrik ederek belirli bir basınçta suyu basınç sabitleyicisine iletir. Bu basınç, türbinin çalışma basıncının üzerinde bir basınçtır. Basınç sabitleyicisine gelen su, türbinin çalışması gereken basınca ayarlanarak istenilen düşü elde edilir. Buradaki basınç sabitleyicisinin görevi basınç değişimlerinin hidroelektrik santrallerdeki gibi olmasını sağlamaktır. Yani ani yük değişimlerinde oluşacak ani basınç değişimlerini modelleyebilmektir.

Tasarlanan sistemdeki su basıncının değişimi Şekil 3.3’de verilmiştir. Buradaki kapalı çevrimle sürekli olarak aynı basınç elde edilmekte ve istenilen debinin türbine aktarılması sağlanmaktadır.



Şekil 3.3. Suyun kapalı çevrimdeki basınçları

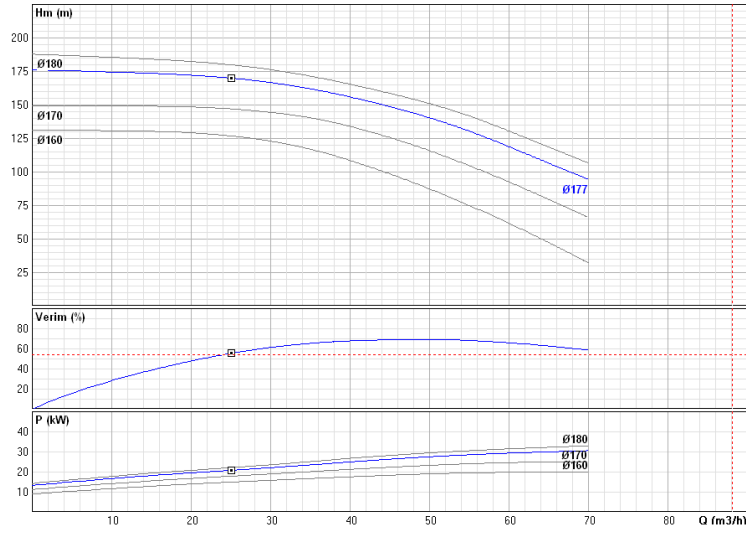
Prototipte suya gerekli enerjiyi aktarmak için kademeli pompa (SKM 50/4) seçilmiştir (Şekil 3.4). Pompanın giriş ve çıkış ağızları cebri boru çapına göre küçük olduğu için uygun ek bağlantısı ile birleştirilmiştir.



Şekil 3.4. SKM 50/4 kademeli pompa

Pompanın, çalışma bölgesindeki ölçülen büyüklükleri :

$\Sigma Q=25 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=120 \text{ mSS}$, $\eta=\% 55$, $P_{\text{elk}}=19,53 \text{ kW}$, $p=12 \text{ bar}$ olup, karakteristikleri Şekil 3.5’de verilmiştir.



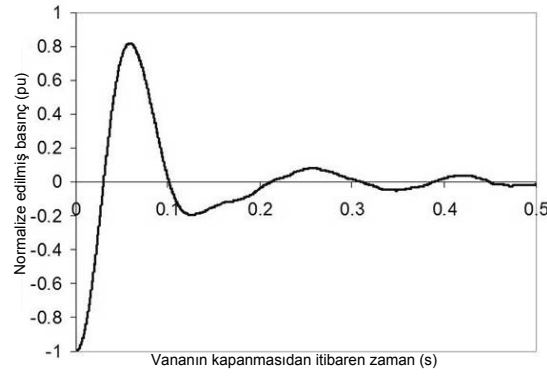
Şekil 3.5. Seçilen kademeli pompanın basınç, güç ve verim eğrileri

Şekil 3.6’da anma gücü 22 kW olan SKM 50/4 kademeli pompanın kontrolünde kullanılan frekans konverteri gösterilmektedir. Konverterin gücü asenkron makina gücünde, yani 22 kW’tır.



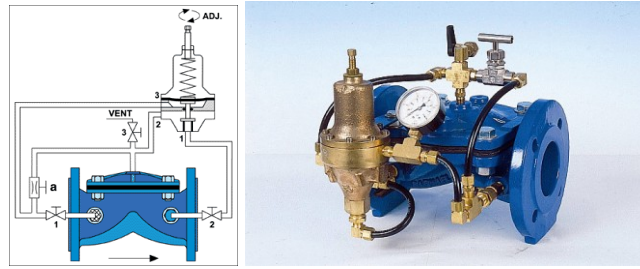
Şekil 3.6. ABB SAMI GS frekans konverteri

Şekil 3.7, sabit basınçlı kapalı bir boru içindeki suyun çıkış noktasındaki hızının azalması (kullanılan debinin hızlı bir şekilde azalması ya da tam kesilmesi) sonucu ortaya çıkan ani basınç değişiminin etkisini göstermektedir. Bu basınç değişimleri, yani su koçu etkisi, istenmeyen bir durumdur. Ama çalışmanın gerçeğe yakın hale getirilebilmesi için bu olumsuzluğun sisteme de eklenebilmesi gerekmektedir. Seçilen basınç sabitleyici su koçu etkisini sistemde gösterebilecektir.



Şekil 3.7. Klasik bir su koçu (cebri borudaki basıncın ani değışimi)

Cebri boruya ilişkin hesaplamalar ekonomik ve ampirik formüller dikkate alınarak yapılmıştır. Ancak cebri boru çapının küçük seçilmesi gerçek sistemin modellenmesinde sorun teşkil ettiğinden, büyük çap kullanılmıştır. Prototip çalışmada cebri boru seçimini sınırlayıcı faktörler, basınç-debi etkisini gösterecek pompanın ve basınç sabitleyicinin seçimleridir. Bu nedenlerle cebri boru çapı 4" olarak kullanılmış ve basınç sabitleyici vana olarak ise Şekil 3.8’de gösterilen **RAF80** tercih edilmiştir.



Şekil 3.8. RAF80 basınç sabitleyicisi

Şekil 3.9’da cebri borulardan geçen su miktarını ve hızını ölçme amacı ile kullanılan Krohne marka DWM2000 LCD’li model olan debimetre gösterilmektedir. Elektromanyetik olarak, en yüksek 25 Bar ölçme sınırı olan debimetre 1-8 m/s hız aralığında ölçüm yapabilmektedir. Çıkış bilgisi olarak 4-20 mA’lik akım vermektedir.



Şekil 3.9. DWM2000 debimetresi

Şekil 3.10’da cebri borulardaki basıncı ölçme amacı ile kullanılan transmitter gösterilmektedir. Transmitter, 0-16 Bar arasında ölçüm yapabilmekte ve 4-20 mA’lık bir çıkış verebilmektedir. Sistemde biri pompanın çıkışına diğeri ise türbinin girişine yakın olmak üzere iki tane basınç transmitteri kullanılmıştır.



Şekil 3.10. PA21R (Keller) basınç transmitteri

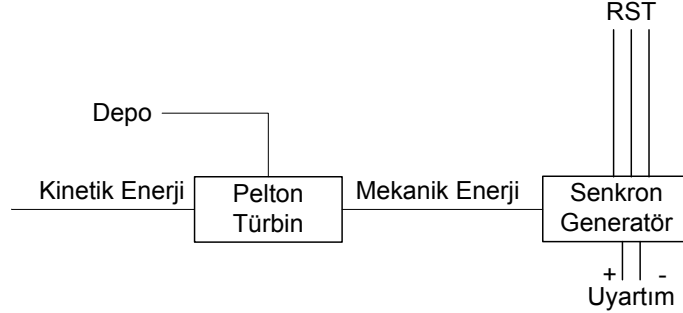
Su haznesinin boyutlandırması, sistemde olması gereken en az su miktarı ve muhtemel kayıplar göz önüne alınarak yapılmış ve su kapasitesi 1 ton olacak şekilde imal edilmiştir (100x200x50 cm).

3.3. Elektromekanik Yapı

Basınç sabitleyicisinden sonraki sistem, klasik bir hidroelektrik santral ile büyük oranda aynıdır. Şekil 3.11’de kapalı çevrim HES prototipinin elektromekanik kısmının ana elemanları verilmiştir. Basınç sabitleyicisinden geçen su, Pelton türbinine çarparak enerjisini mekanik enerji olarak türbine aktarır ve tekrar su deposuna geri döner. Böylece kapalı çevrim su döngüsü elde edilir. Bu mekanik enerji ile Pelton türbini senkron generatörü tahrik eder. Senkron generatörlerin çıkış geriliminin frekansı dönüş hızı ile orantılıdır. Dolayısı ile generatör frekansının kontrol edilebilmesi için debinin de kontrol edilebilir olması gerekmektedir.

Hidroelektrik santrallerde klasik olarak debi kontrolü için basınçlı sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada ÇKHES’ler için öne sürülen çözüm, klasik santrallere göre enerji sarfiyatının az olması ve kontrolünün kolaylığı nedeni ile doğrusal hareket eden elektrikli doğrusal hareketlendiricidir. Bu deneysel sistemde debi kontrolü, ucuna bir iğne bağlı olan elektrikli doğrusal hareketlendirici ile yapılmaktadır. Devir sayısındaki (frekans) bir değişime karşılık türbine verilecek suyun değiştirilmesi, iğnenin ileri ya da geri hareketi ile sağlanır.

Deneysel sistemde generatör frekansı iki farklı birim tarafından hesaplanmaktadır. İlki hız algılayıcısından alınan bilgi ile PLC tarafından, ikincisi ise gerilimin sıfır geçişlerinin sayma işini yapabilen mikrokontrolörlü senkronoskop devresince hesaplanır.



Şekil 3.11. Kapalı çevrim HES'in türbin-generator kısmı

Önceden belirtilen çalışma bölgesi için, sadeleştirilmiş hesaplama esaslarına (EK2) göre boyutlandırma yapılmış ve türbinin ana boyutları aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

Su jeti çapı	: $d=1,42\text{cm}$
Çevresel hız	: $U=20,61\text{ m/s}$
Su jeti mutlak hızı	: $C1=43,98\text{ m/s}$
Kepçe genişliği	: $b=4,41\text{ cm}$
Kepçe boyu	: $h= 3,41\text{ cm}$
Kepçe derinliği	: $t=1,28\text{ cm}$
Kepçe Sayısı	: $Z=43\text{ Adet}$
Çark çapı	: $D=39,38\text{ cm}$
Çarkın dış çapı	: $D_a=43,48\text{ cm}$
Türbin devir sayısı	: $n_t= 1000\text{ d/d}$

Çalışmada kullanılan Pelton türbini, yukarıda hesaplanan parametrelere bağlı olarak ve yerel imkanlarla üretilmiştir (EK 3'de imalat resimleri yer almaktadır).

Bir sonraki aşama, sistemde kullanılacak senkron generatörün parametrelerinin belirlenmesidir. Daha önce belirtilen çalışma bölgesi için Pelton türbinin üretebileceği mekanik güç göz önüne alındığında kullanılacak olan generatörün gücü yaklaşık olarak 5 kW'tır. Türbinle generatör akupple olduğundan mekanik hızları aynıdır. Generatör ulusal şebekeye paralel bağlanmak istendiğinden, frekansı 50 Hz olacaktır. Bu bilgiler ışığında senkron generatörün hem türü, hem de kutup sayısı ortaya çıkmıştır. Yüksek hızlı olduğu için yuvarlak rotorlu olması tercih sebebidir. Kutup sayısı 6 yani kutup çifti sayısı 3

olacaktır. Bu bilgilere göre üretimi yaptırılan generatörün bazı parametreleri aşağıda verilmiştir:

Görünür güç	: $S = 6,25 \text{ kVA}$
Aktif güç	: $P = 5 \text{ kW}$
Hat akımı	: $I = 9 \text{ A}$
Faz-nötr/Faz-faz gerilimi	: $U_F/U_H = 231/400 \text{ V}$
Devir sayısı	: $n_g = 1000 \text{ d/d}$
Frekans	: $f = 50 \text{ Hz}$
Kutup çifti sayısı	: $p = 3$
Güç faktörü	: $\cos \varphi = 0,8$

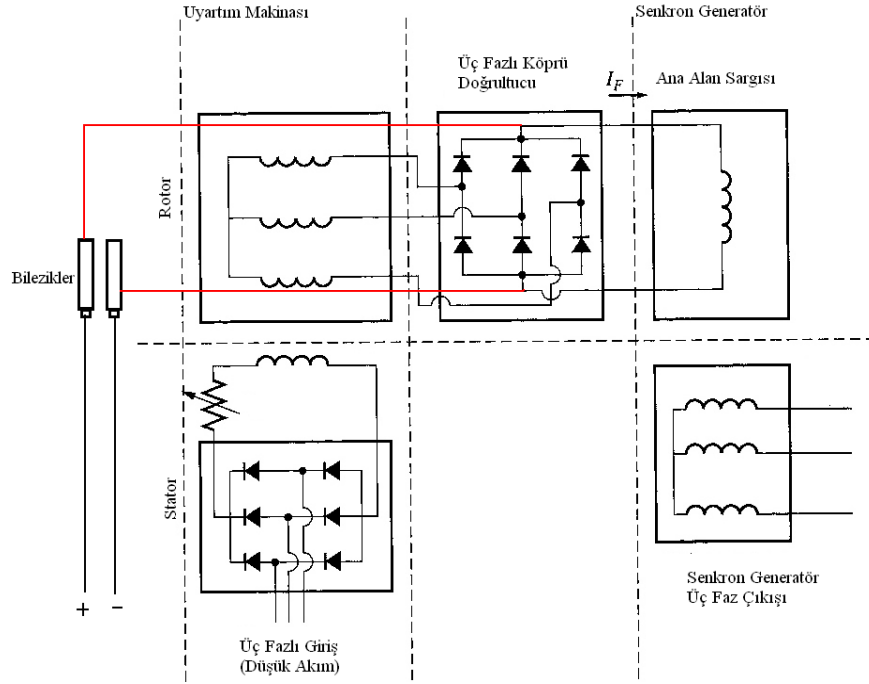
Döner Diyotlu Uyarım

Uyarım gerilimi	: $U_f = 39 \text{ V}$
Uyarım akımı	: $I_f = 3,2 \text{ A}$

Bilezikli Uyarım

Uyarım gerilimi	: $U_f = 12 \text{ V}$
Uyarım akımı	: $I_f = 30 \text{ A}$

ÇKHES’lerde kullanılan SG’lerin uyarım şekli, generatörün gücüne göre değişiklik arz etmektedir. Güç değeri büyüdükçe fırçasız uyarım yapısını kullanmak daha avantajlı olacaktır. Elde edilen sistemde iki yapının incelenebilmesi için üretimi yaptırılan generatör üzerinde fırçalı ve fırçasız olmak üzere iki farklı uyarım yapısı mevcuttur. SG’ün uyarımının bağlantısı Şekil 3.12’de verildiği gibidir.



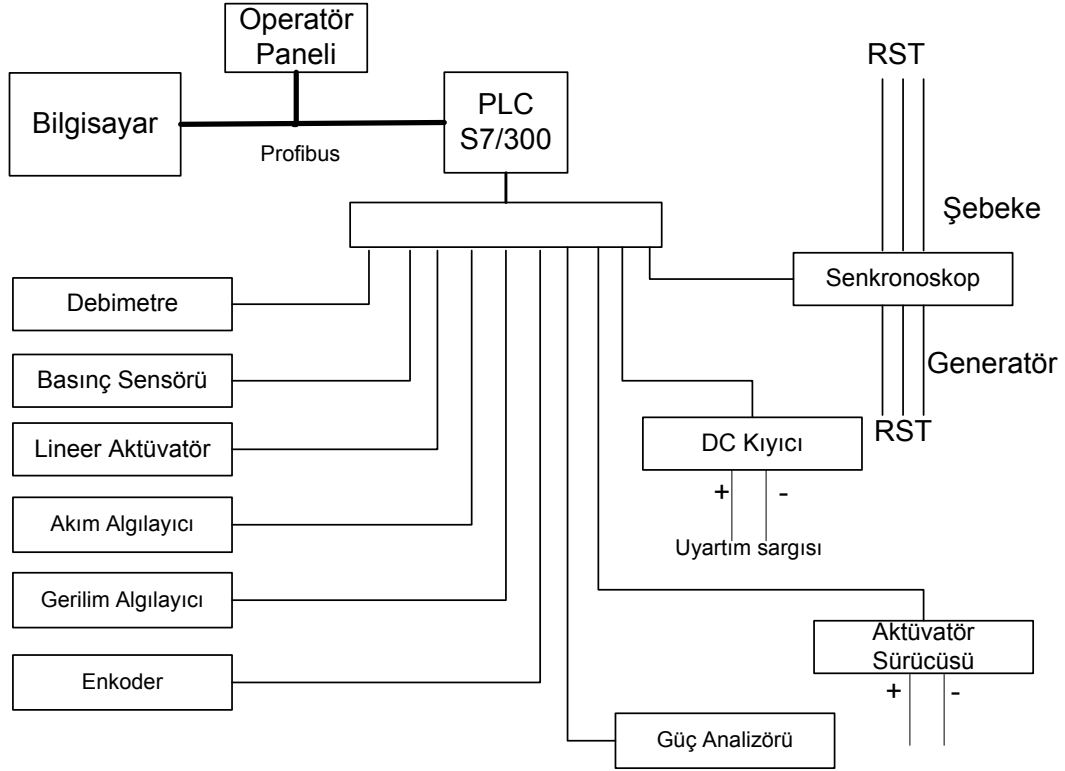
Şekil 3.12. Prototip sistemde kullanılan SG'nin uyarım şekilleri

3.4. Kontrol ve Kumanda Yapısı

Bu kısımda PLC, sistemdeki türbine iletilen suyun debisi ve düşüşünü, senkron jeneratörün üretmiş olduğu gerilimin genliğini, frekansını ve akım bilgilerini alarak sistemin kontrolü için gerekli hesaplamaları yapar. Jeneratörün üretmiş olduğu aktif güç talep edilen güce göre farklılık arz ettiğinde, jeneratör frekansında ve gerilimde bir değişme olacaktır. İlk olarak frekansını düzeltmek için doğrusal hareketlendirici devreye girerek en kısa sürede jeneratör devir sayısını istenen frekans değerine getirecek şekilde değiştirir.

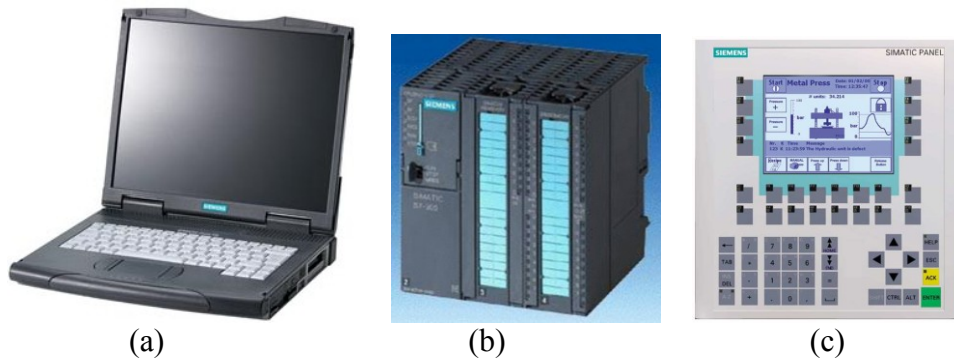
Jeneratörden çekilen reaktif güçte bir değişme olduğunda jeneratör gerilimi değişecektir. Bu durumda PLC ile kontrol edilen ayarlı gerilim kaynağı kullanılarak jeneratör uyarım akımı değiştirilir ve jeneratörün uç gerilimi istenen değere getirilir.

Şekil 3.13'te sisteme ait kumanda yapısı ve elemanları verilmiştir.



Şekil 3.13. Prototip sistemin kontrol-kumanda elemanları

Sistemde kullanılan bilgisayar endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilen bir üründür ve Şekil 3.14(a)'da verilmiştir. Bilgisayarda Siemens ürünlerinin sorunsuz programlanabilmesi için gerekli tüm donanım ve standart yazılımlar mevcut olup; Programların yazılması, yüklenmesi ve verilerin izlenmesinde kullanılmıştır.



Şekil 3.14. Simatic Field PG, S7 300 ve operatör paneli

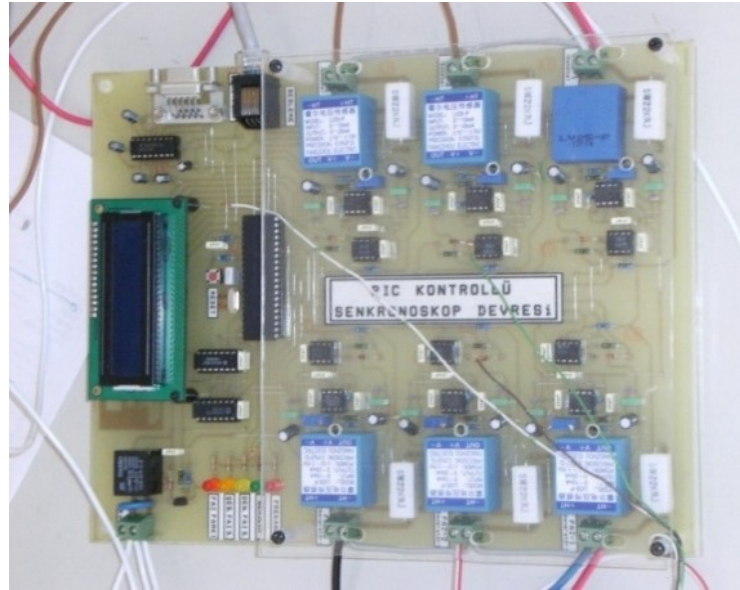
Sistem, klasik kontrol, bulanık mantık denetleyicisi ve yapay sinir ağı gibi uygulamaların da yapılabilmesine uygun olarak seçilmiş ve tasarlanmıştır. Bu amaçla, Şekil 3.14 (b)'de gösterilen S7/300 CPU 314C-2DP Compact PLC kullanılmıştır. 5 analog giriş, 2 analog çıkış, 24 sayısal giriş, 16 sayısal çıkış, MPI ve profibus desteği olan PLC,

bit işlemlerini 0,1-0,2 μ s, word işlemlerini 0,5 μ s, virgüllü işlemleri 15 μ s'de yapabilmektedir.

S7 300 PLC'lerin programlanmasında STEP 7 SIMATIC MANAGER yazılımı kullanılır. Donanımsal olarak bir araya getirilen modüller halindeki S7 300, STEP 7 nin Hardware kısmında yazılımsal olarakda bir araya getirilir. Programlaması ise deyim listesi (Statement List - STL), kontak planı (Ladder Diagram-LAD) ve Fonksiyon Şeması (Function Block Diagram - FBD) dillerinden herhangi biri ile yapılabilir.

Sistemdeki bilinmesi gereken tüm elektriksel ve diğer bilgilerin izlenebilmesi ve gerektiğinde müdahale edilebilmesi için sisteme profibus hattı üzerinden Şekil 3.14(c)'de gösterilen OP170B MONO operatör paneli eklenmiştir. Bunun programlaması Wincc Flexible ile yapılmıştır.

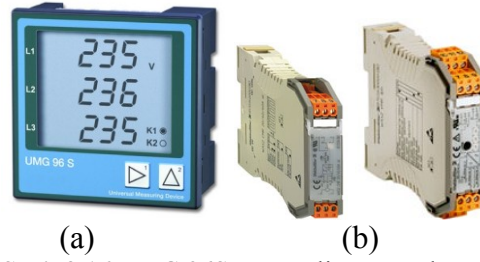
Şekil 3.15'deki senkronoskop devresi, generatörün ürettiği enerjiyi ulusal şebekeye aktarabilmesi için generatör ve şebekeyi izleyerek şartların uygun olması durumunda generatörü şebekeye paralel bağlayacak ve PLC'ye ilgili bilgiyi gönderebilecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3.15. Senkronoskop devresi

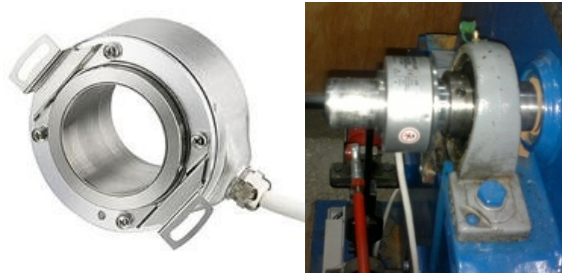
Güç Analizörü olarak olarak Şekil 3.16'da verilen ve PLC ile profibus üzerinde haberleşebilen UMG96S kullanılmıştır. Cihaz, tek/üç faz akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç bilgilerini, frekans ve güç faktörü bilgileri ile harmoniklerin ölçümünde kullanılacaktır.

Sistem güvenliği için yine sisteme ait belirli verilerin birkaç farklı yer ya da cihazdan okunması gerekmektedir. Bu amaçla Şekil 3.16’da gösterilen Weidmüller’in gerilim ve akım bilgilerini PLC’yi meşgul etmeden aktaran WAS1 akım, WAS2 gerilim dönüştürücü elemanları kullanılmıştır. Dönüştürücülerin çıkışları 0-10 V ya da 4-20 mA olarak seçilebilmektedir.



Şekil 3.16. UMG 96S güç analizörü ve akım-gerilim dönüştürücüleri

Sistemde hız bilgisinin alındığı bir diğer eleman olarak içi oyuk RI76 hız algılayıcısı türbin şaftına bağlı olarak monte edilmiştir. Şekil 3.17’de verilen hız algılayıcısı 24 V DA ile çalışmakta ve bir turunda 2048 pals üretmektedir.



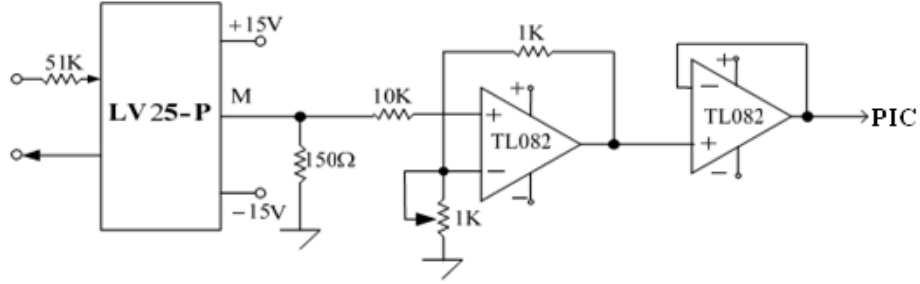
Şekil 3.17. RI76 Artımsal hız algılayıcısı

3.4.1. Sayısal Senkronoskop Devresi

Enerji üretim santrallerinde üretilen elektrik enerjisinin şebekeye verilmesi için santraldeki generatörün şebekeye paralel bağlanabilmesi gereklidir. Generatörün şebekeye paralel bağlanabilmesine senkronizasyon denilmektedir ve bunun olabilmesi için belirli şartları vardır. Bu şartların yerine getirilip getirilmediğinin tespitinde birçok klasik yöntem kullanılmaktadır. Son zamanlar da mikrodenetleyicilerin, hızla gelişimleri ile senkronizasyon işleminde kullanılmaya başlanmışlardır.

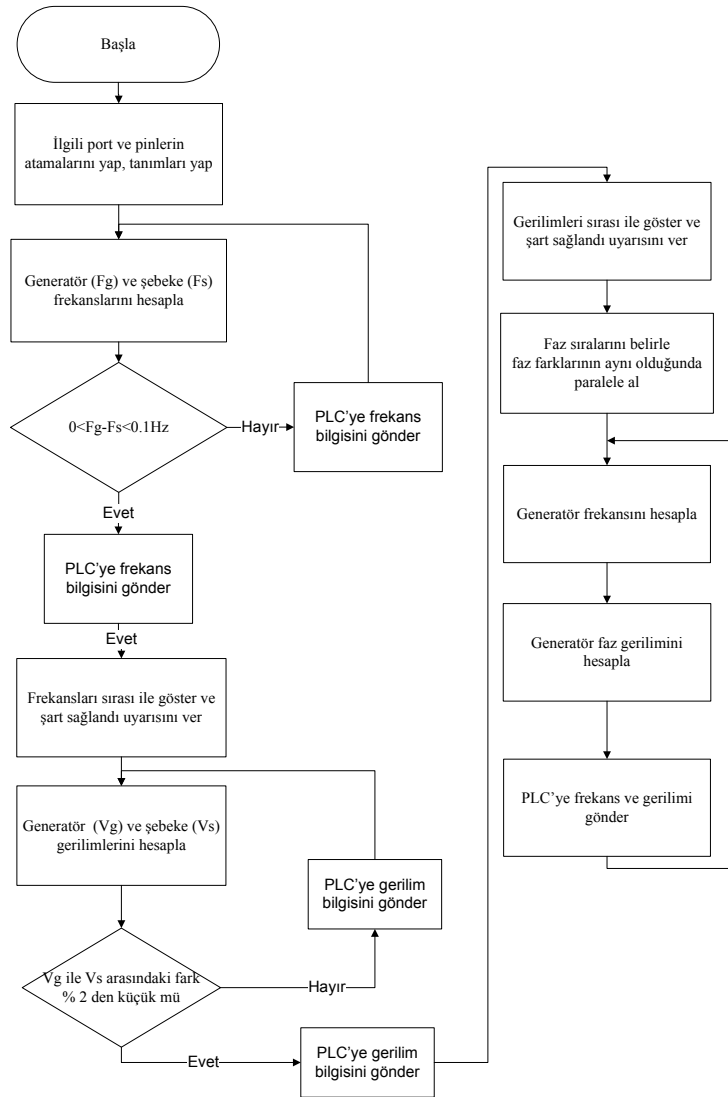
Senkronizasyon işleminde öncelikle frekans, gerilim, faz sıraları ve faz farklarının aynı olması gerekmektedir. Bu işlemlerin nasıl yapıldığı alt bölümlerde sırası ile açıklanmıştır. Gerilimlerin mikrodenetleyicinin algılayabileceği değere getirilmesinde gerilim dönüştürücüsü kullanılmıştır. Gerilim dönüştürücülerinden alınan analog değerler, PIC

mikrodenetleyicinin ilgili pinlerine giriş yapılır. Gerilim dönüştürücüsü olarak LEM firması tarafından üretilen ve ölçme aralığı 0-500 V olan LV25-P model gerilim dönüştürücüsü kullanılmıştır. Dönüştürücünün devre şeması Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Gerilim algılayıcı devre şeması

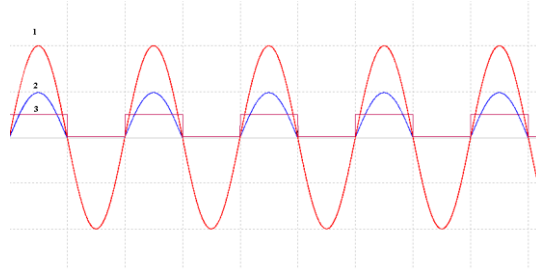
PIC 16F877 mikrodenetleyicisine yüklenen programın akış diyagramı ise Şekil 3.19’da verilmiştir.



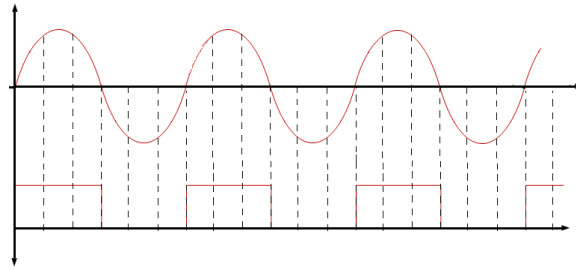
Şekil 3.19. Senkronoskopun ana programına ait akış diyagramı

3.4.1.1. Frekans Ölçümü

Şebeke ve generatör frekanslarının ölçümünde kullanılan işaretler, gerilimlerin karşılaştırıcı bir devreye verilmesi ile elde edilirler ve kare dalgadırlar. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de bu durumlar gösterilmiştir.



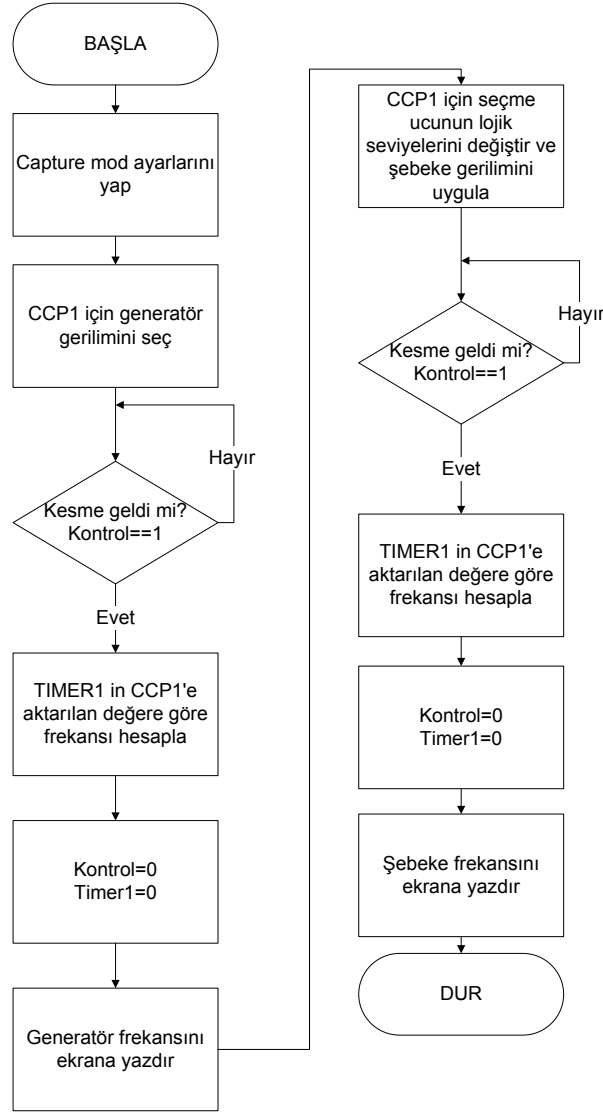
Şekil 3.20. Giriş devresinin dalga şekilleri



Şekil 3.21. Karşılaştırıcı devre giriş ve çıkışları

Mikrodenetleyicinin capture modu aktif edilir ve RC2’den alınan işaretle işleme başlanır. Her 4 yükselen kenarda bir CCP1 kesmesi aktif olur. Kesme aktif olduğunda CCP1’in içine, capture modunun aktif edilmesi ile çalışmaya başlayan ve ön ölçeklemesi 4’e ayarlanan TIMER1’in değeri atanır. Dolayısı ile periyodu bilinen bir işaretin frekansı kolaylıkla hesaplanır. Aynı işlem şebeke işareti için de yapılır. Tek bir pinden iki farklı işaretin frekansı hesaplanacağı için lojik kapılar kullanarak sırası ile frekansı hesaplanacak işaret seçilerek ilgili pine verilir.

Programa ilişkin akış diyagramı Şekil 3.22’de verilmiştir.

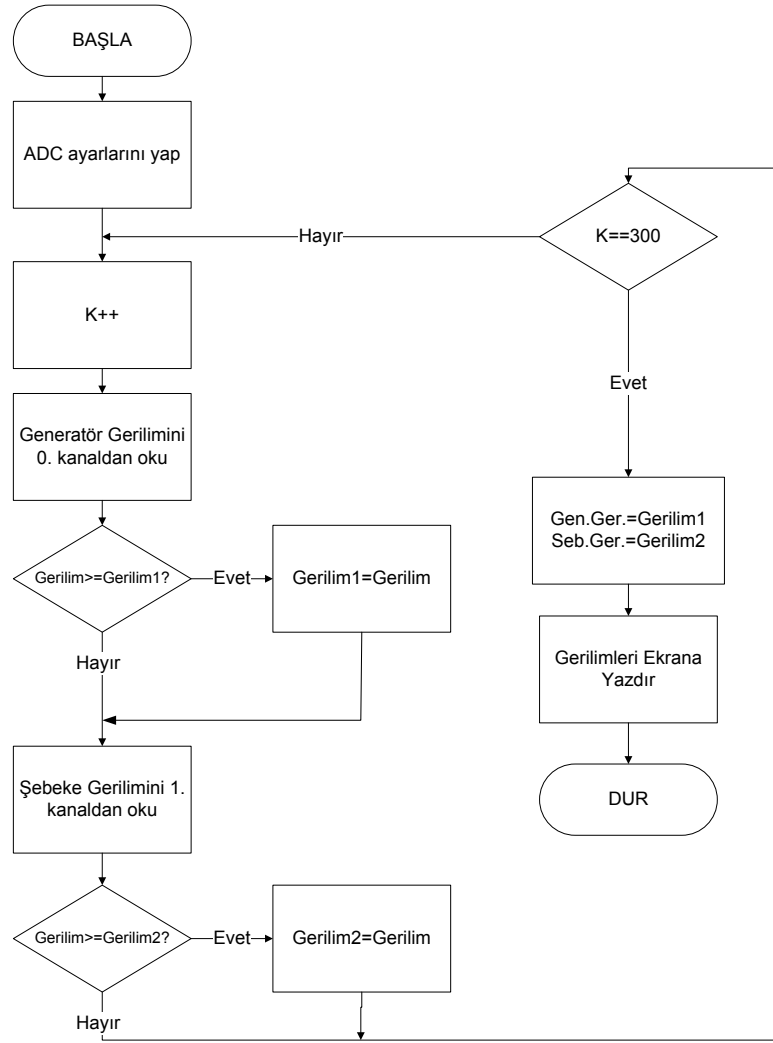


Şekil 3.22. Frekans ölçme programının akış diyagramı

3.4.1.2. Gerilim Ölçümü

Yarım dalga doğrultulup AN0 (RA0) ve AN1 (RA1)'e verilen işaretler bu portun özelliği gereği dijital bilgiye çevrilirler. Buradan sırası ile önce generatör sonra şebeke gerilimlerinden örnek alınır. Bu örnek bir sonraki örnekle karşılaştırılarak gerilimlerin tepe değerleri olabildiğince az hata ile ölçülmeye çalışılır. Şebeke ve generatörün gerilimleri hesaplanır ve eğer gerilimler arasındaki fark % 2'nin altında ise, bu aşamada “gerilim şartı sağlandı” ledi yanar ve bir sonraki aşamaya geçilir. Eğer şart sağlanmamış ise sistemin kontrolörüne gerilim bilgisi gönderilerek gerekli ayarlamaların yapılması sağlanır.

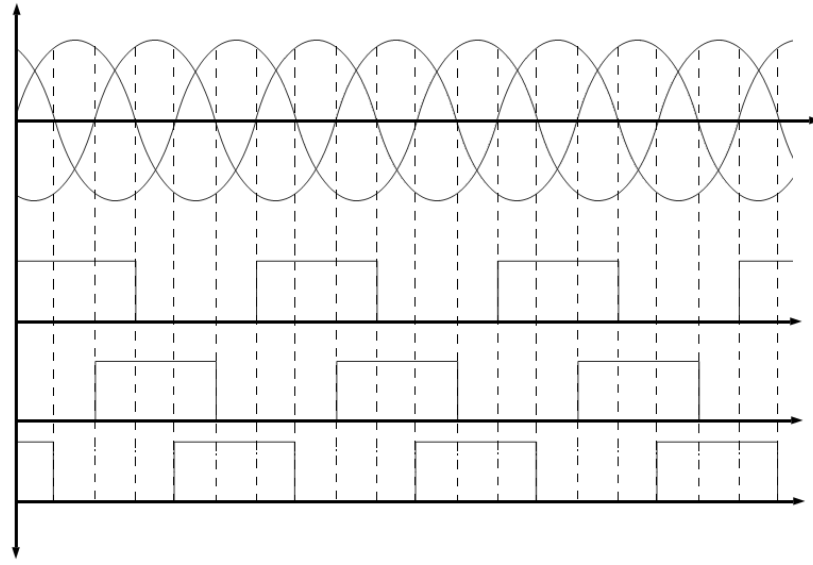
Bu işlemlere ilişkin akış diyagramı Şekil 3.23'de verilmiştir.



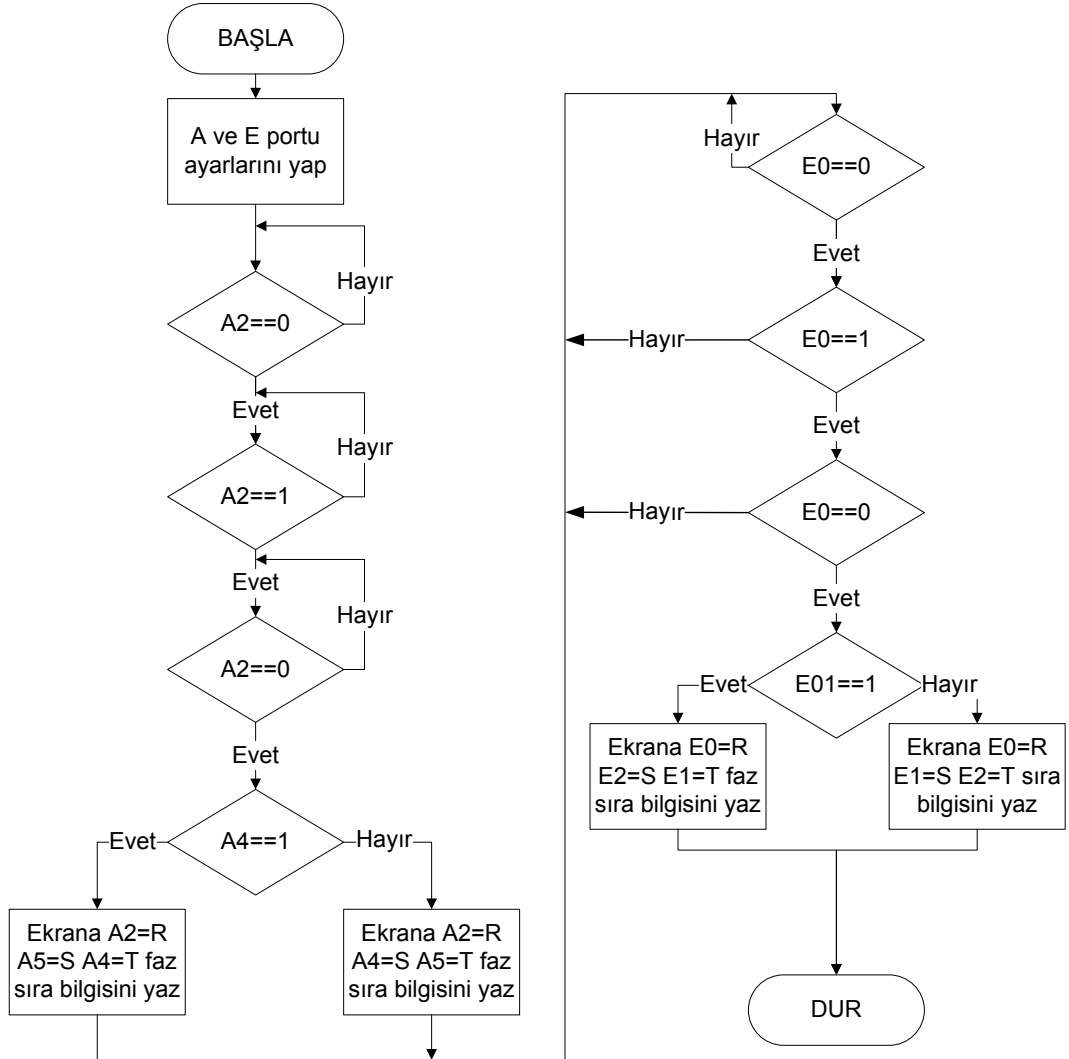
Şekil 3.23. Gerilim ölçme programının akış diyagramı

3.4.1.3. Faz Sırası Tespiti

Üç fazlı dengeli bir sistemde fazlar arasında 120° 'şer derece faz farkı bulunmaktadır. Şekil 3.24'de fazlar arasında 120° derece olan üç işaret ve bunlara ait kare dalgalar verilmiştir. Faz sırası tespitinde bu kare dalgalar kullanılacaktır. Baz olarak alınan ilk faz R kabul edilerek, bu ve diğer fazların kare dalgaları üzerinde sorgulama yapılır. İki işaretin belirli zamanlarda eş zamanlı olarak lojik 1 olduğu Şekil 3.24'den görülmektedir. Bu da sorgulamanın başlangıcına bağlı olarak işaretin 120° ileride ya da geride olacağını gösterir. Bu programa ilişkin akış diyagramı Şekil 3.25'de verilmiştir.



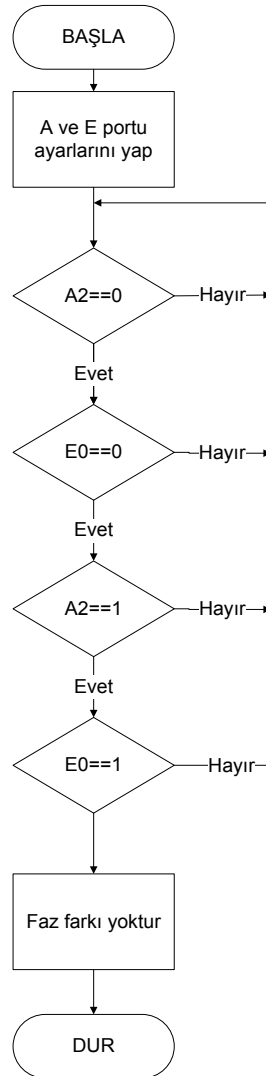
Şekil 3.24. Üç fazlı sistemin gerilim ve karşılaştırmalı çıkışı dalga şekilleri



Şekil 3.25. Generatör ve şebekenin faz sırası tespit programının akış diyagramı

3.4.1.4. Faz Farkının Tespiti

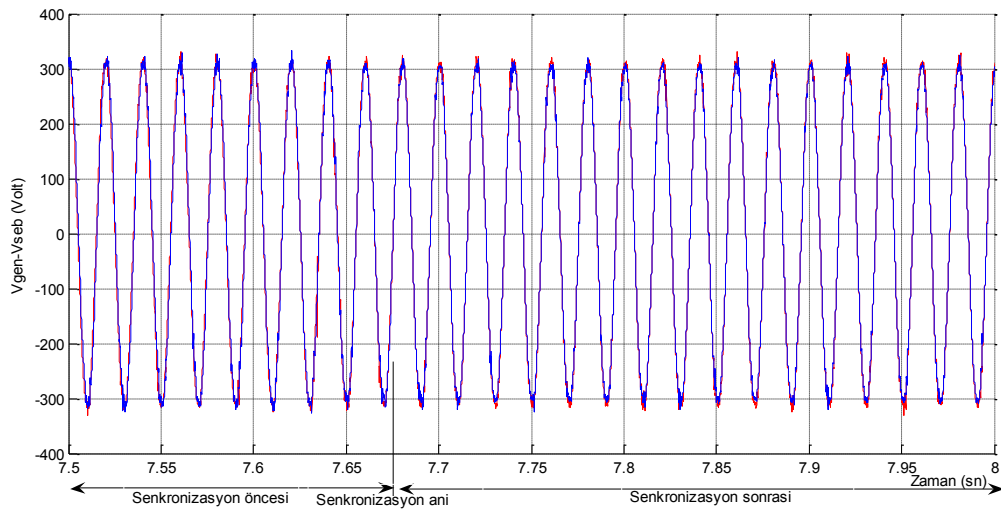
Faz sıraları tespit edilen işaretlerin baz alınan fazlarının üst üste geldiği anda generatör, şebekeye paralel bağlanmaya hazır demektir. Frekansları çok az farklı olan iki işarette bile faz farkının sürekli değişmesi normaldir. Burada yapılacak olan, iki işaretin aynı anda konum değiştirip değiştirmediğine bakmaktır. Eğer iki işaret aynı anda lojik olarak değişiyor ise bu iki işaret arasında faz farkı yoktur. Bu faz farkının olmadığı anı bulma işlemi zaman alabilir ama bir kaç periyot sonunda iki işaret olabilecek en düşük faz farkını oluştururlar. Bunu tespit etmek için yazılan programa ait akış diyagramı Şekil 3.26'da verilmiştir.



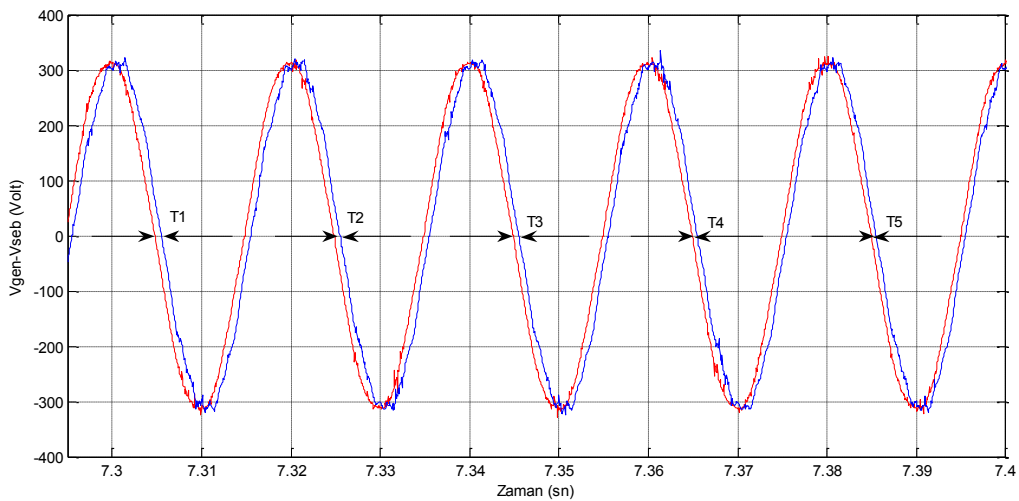
Şekil 3.26. Generatör ve şebekenin faz farkı tespit programının akış diyagramı

Yukarıda anlatılan modüllerin bir araya gelmesi ile oluşturulan sistem Şekil 3.15’de verilmiştir. PIC16F877, gerekli uyarıları ve bilgileri PortD, LCD ekran, röle ve ledler aracılığı ile dış ortama verir.

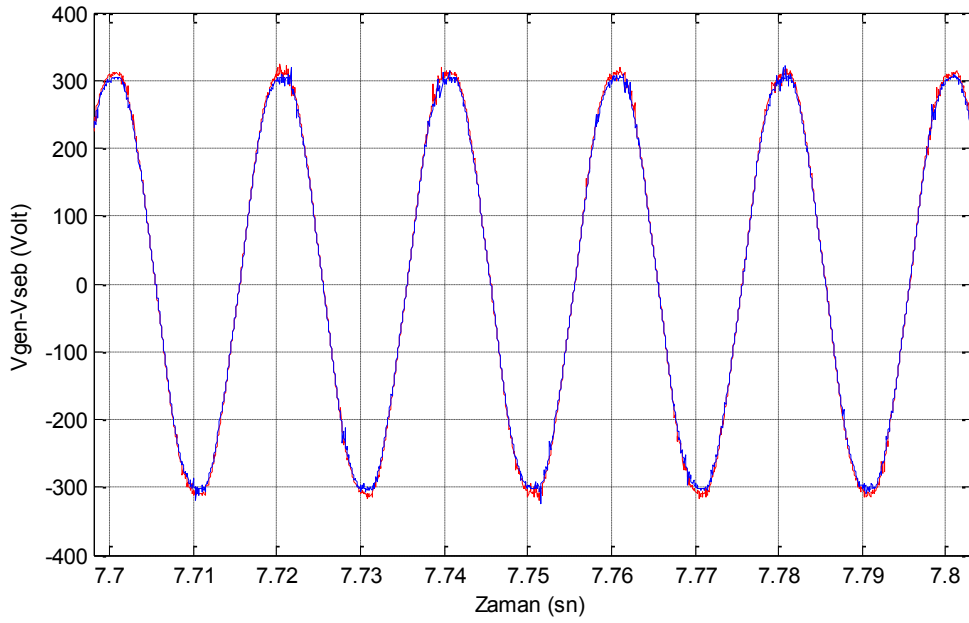
Şekil 3.27, Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da senkronoskop devresinin çalışmasını göstermek üzere, senkron generatörün şebekeye paralel bağlanması sürecinde generatör gerilimlerinin değişimleri gösterilmektedir. Şekil 3.28’de generatör ve şebeke gerilimleri arasındaki zaman farkları verilmiştir. İki işaret arasındaki süre 20 μ s’nin altına düştüğü ilk sıfır geçişinde senkronoskop, generatörü şebekeye paralel bağlamaktadır.



Şekil 3.27. Senkronizasyon öncesi, anı ve sonrasının dalga şekli



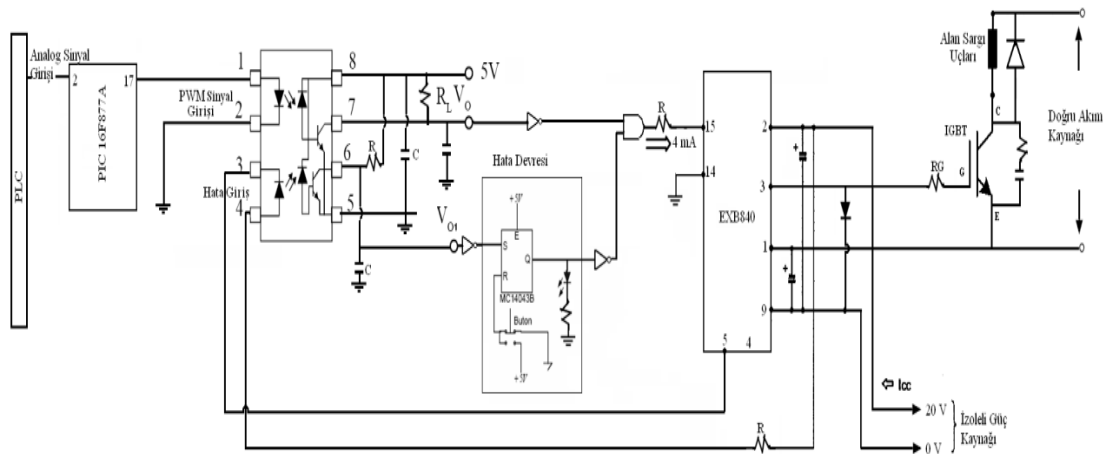
Şekil 3.28. Senkronizasyon öncesi faz farkları
(T1=700 μ s, T2=650 μ s, T3=600 μ s, T4=550 μ s, T5=500 μ s,)



Şekil 3.29. Senkronizasyon sonrası dalga şekli

3.4.2. Doğru Akım Kıyıcı Devresi

Senkron generatörün gerilim kontrolü için tasarlanan devreler Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’de verilmiştir. Burada, gerekli hesaplamalar PLC tarafından yapılır ve 0-5 V analog işarete çevrilmiş bir halde PIC mikrodenetleyicili ara devreye iletilir. Bu analog değere uygun (görev periyodu 0-1 arasında) PWM işaret üreten ara devre, bu işareti IGBT sürme devresine iletir. Sonuç olarak PLC’nin göndermiş olduğu değere göre uyartım devresine uygulanan gerilimin ortalama değeri değiştirilmiş olur. Kontrol edilebilen bu işaret alan sargılarına iletilir ve uyartım kontrolünde kullanılır.



Şekil 3.30. Uyartım akımını sağlayan DA kıyıcı devresinin şematik gösterimi

Bu kıyıcı devre, kıyılacak gerilimin değerine uygun bir kaynağın bağlanması ile iki farklı uyartım yapısı ile de uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Devrede, hızlı IGBT

olarak IXGK60N60C2D1, sürücüsü olarak EXB840 ve 16F877 PIC mikrodenetleyicisi kullanılmıştır.



Şekil 3.31. PWM üretici ve DA kıyıcı devresi

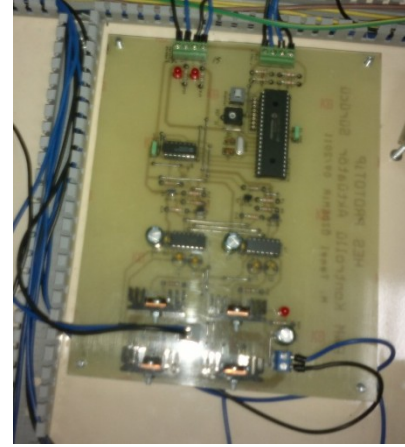
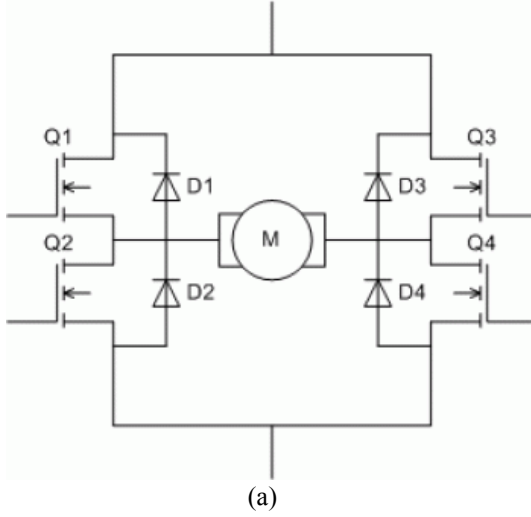
3.4.3. Doğrusal hareketlendirici Sürücü Devresi

Şekil 3.32’de Pelton türbininin hız ayarını yapan elektrikli doğrusal hareketlendirici hem bağlantısız hem de sistem üzerindeki hali verilmiştir. 24 V’luk bir besleme gerilimi, 15 cm’lik strok boyu ve 3000 N’luk itme-çekme kuvvetine sahip olan aktüvatörün elektriksiz olarak konumunu değiştirebilmek için yine 3000 N’luk bir güç gerekmektedir. Sistemde, pelton düzesindeki iğnenin bulunduğu alanda manevra yapabilmesi için en fazla 250 N’luk bir güç gereksinimi olmaktadır.



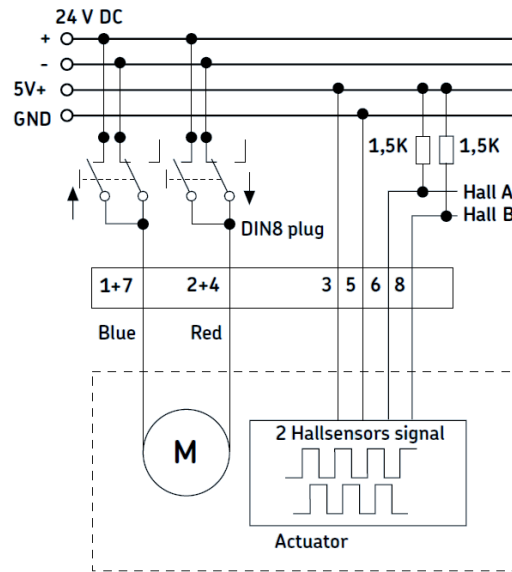
Şekil 3.32. Elektrikli doğrusal hareketlendirici

Senkron generatörün frekans kontrolü için tasarlanan devrelerin prensip şeması ve devresi Şekil 3.33’de ve bağlantı şekli ise Şekil 3.34’de verilmiştir. Burada, frekans farkına göre artma ya da azalma bilgisi yardımıyla hareket miktarı PLC tarafından hesaplanır ve PIC kontrollü ara devreye iletilir. Bu devre, gelen analog değere uygun (görev periyodu 0-1 arasında) olarak PWM işareti üreterek MOSFET sürme devresine iletir. Sonuç olarak PLC’nin göndermiş olduğu yön bilgisi ve analog değere göre doğrusal hareketlendirici sürülür ve debi ayarı yapılır.



Şekil 3.33. H-köprü prensip devresi ve sürücü kartı

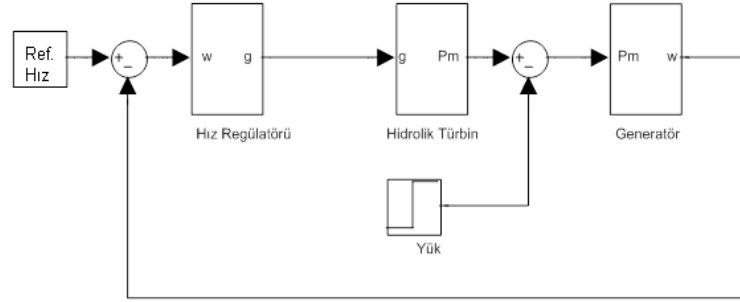
Tasarlanan devrede, IR2110 MOSFET H-Köprü Sürme entegresi, IRF540N/TO MOSFET'i ve 16F877A PIC entegreleri kullanılmıştır.



Şekil 3.34. MAX3 doğrusal hareketlendiricisinin bağlantısı[123]

4. ÇKHES'LERİN SAYISAL BENZETİMİ

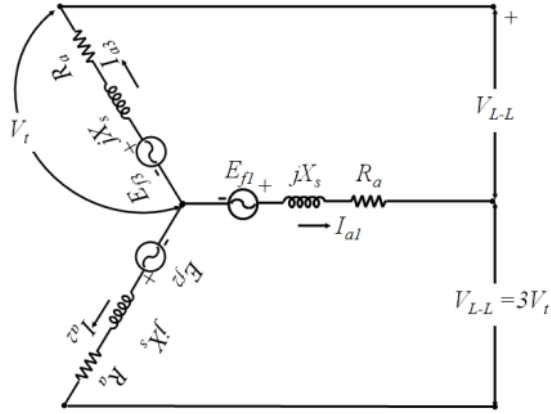
Hidrolik santralin modellenmesi; hidrolik, mekanik ve elektriksel dönüşümleri gözönüne alan, türbin-hız regülatörü modeli ve generatör modeli olarak iki aşamada yapılmaktadır. Hız regülatörü, geri besleme alarak sistem çıkış hızını sabit tutmaya çalışacaktır. Genel model Şekil 4.1' de verilmektedir.



Şekil 4.1. Hız kontrolü genel model

4.1. Generatör Modeli

Bir hidrolik türbin ile tahrik edilen generatör, dönmeye etki eden iki zıt momentli dönen bir büyük kütle gibi temsil edilebilir. Mekaniksel moment T_m dönüş hızının artmasını sağlarken, elektriksel moment T_e buna zıt yönde etki ederek bu artışa engel olur. T_m ve T_e büyüklük olarak eşit olduğu zaman dönüş hızı $\omega = \omega_0$ sabit olur. Elektriksel yük arttırılırsa, yani T_e , T_m 'den daha büyük olursa, tüm dönen sistem yavaşlamaya başlar. Aşırı yavaşlama sisteme zarar vereceğinden dengeyi sağlamak için mekanik momentini arttırmak gerekir. Bu işlem, dönüş hızını kabul edilebilir bir değere geri getirmek ve hız tekrar sabit kalacak şekilde momentlerin eşitliği sağlamakla mümkün olur. Bu işlemin sayısal olarak yapılabilmesi için generatör denklemleri, Şekil 4.2'deki eşdeğer devre göz önünde bulundurularak elde edilir.



Şekil 4.2. Yuvarlak kutuplu senkron generatörün eşdeğer devresi

Şekil 4.2’de eşdeğer devresi verilen yuvarlak kutuplu senkron generatörün iki eksen dönüşümü olarak adlandırılan d-q referans çatı dönüşümü esas alınacaktır. Rotor referans çatıdaki senkron generatör denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir [124].

Gerilim ifadeleri;

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_r \cdot \lambda_{ds} + p \cdot \lambda_{qs} \quad (4.1)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} - \omega_r \cdot \lambda_{qs} + p \cdot \lambda_{ds} \quad (4.2)$$

$$V_{fd} = R_{fd} \cdot I_{fd} + p \cdot \lambda_{qfd} \quad (4.3)$$

Akı bağı ifadeleri;

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qs} \quad (4.4)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} \cdot I_{qs} + L_m \cdot (I_{ds} + I_{fd}) \quad (4.5)$$

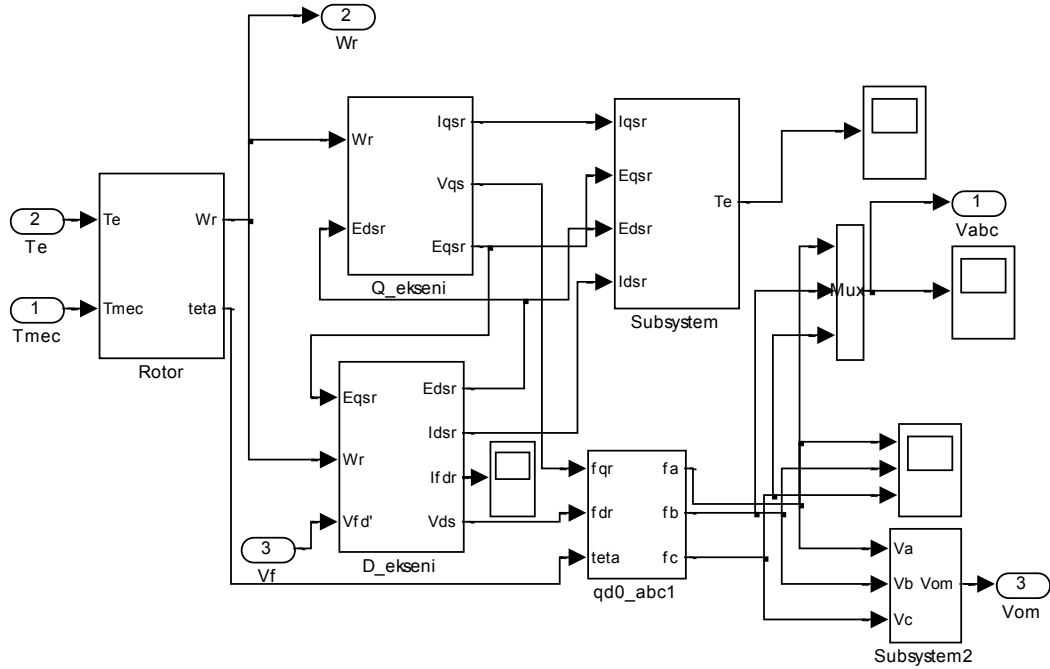
$$\lambda_{fd} = L_{lfd} \cdot I_{fd} + L_m \cdot (I_{ds} + I_{fd}) \quad (4.6)$$

Hareket denklemi;

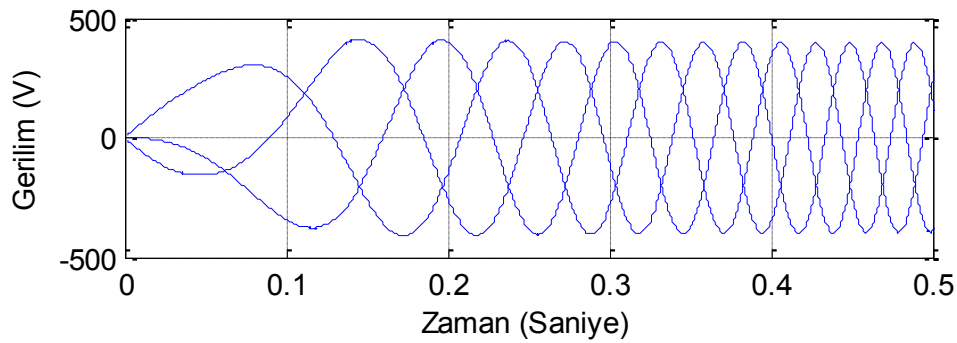
$$T_m = j \cdot \frac{2}{p} \cdot p \cdot \omega_r + T_e + B \cdot \omega_r \quad (4.7)$$

Buradaki denklemlerde s alt indisi stator sargısı, f alt indisi de uyarım sargısına ait büyüklükleri gösterir. V gerilim, I akım, λ akı bağı, R direnç, T_e moment, p kutup sayısını ifade eder. L_{ls} , L_{lfd} sırasıyla stator sargısı ve uyarım sargısı kaçak indüktanslarını gösterir. B sürtünme katsayısıdır. T_m ve T_e sırasıyla mekaniksel ve elektriksel yük momentlerini gösterir. Bu denklemlere göre elde edilen Matlab/Simulink modeli Şekil 4.3’de verilmiştir.

Şekil 4.4’de bu generatör modelinin yol alma anındaki gerilimlerinin dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Yuvarlak kutuplu senkron generatörün simulink modeli



Şekil 4.4. Generatörün tahriki anındaki gerilimlerin dalga şekli

4.1. Hidrolik Türbin Modeli

Hidrolik sistemin modellenmesinde, su haznesinden itibaren cebri boru içinde türbine kadar olan kısmı için akışkan mekaniği, su enerjisinin mekanik enerjiye ve türbin shaft hızına dönüşümünü sağlayan kısım için de türbin mekaniği dikkate alınacaktır. Suyun cebri borudaki sürtünmesinden kaynaklı oluşan hidrolik kayıplar sistem çözüm amacına uygun olarak çok düşük mertebelerde olmaktadır. Bu nedenle hidrolik kayıplar dikkate alınmayacaktır.

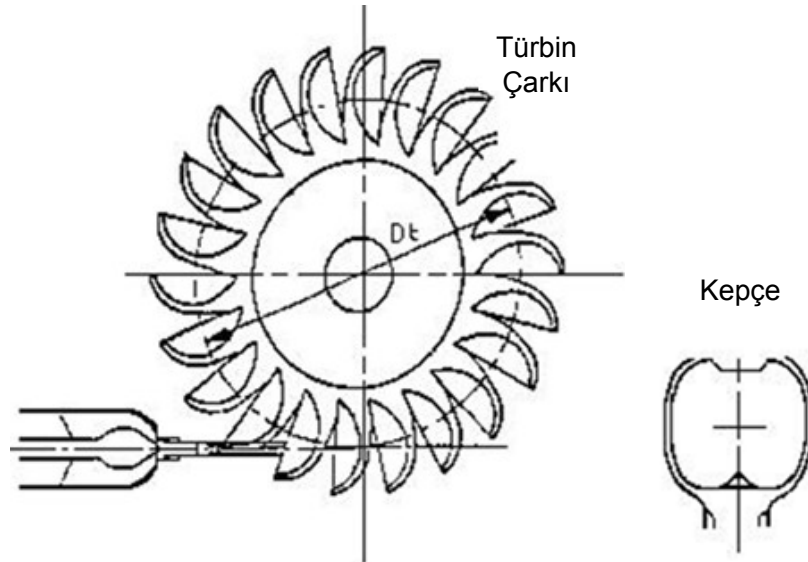
Suyun cebri boru içinde hareketi ve türbin kepeçlerine çarpması sırasında, suyun eylemsizliği, sıkıştırılabilirliği ve cebri borunun elastik yapıda olması doğal olarak aşırı su

dalgalarına neden olmaktadır. Bu olaya su koçu denir. Büyük güçlü santrallerde cebri boru boyunca ilerleyen aşırı su dalgalarının mekanik aksama zarar vermemesi için “denge bacası” kullanılır. Gelen dalgalar denge bacası içinde sönümlenir. Suyun hızının 2,5-7 m/s olması halinde denge bacası sadece uzun cebri borulu hidrolik santrallerde dikkate alınabilir.

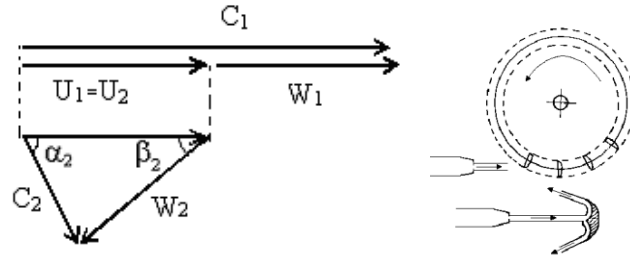
Hidrolik türbinler için çok farklı modeller kullanılabilir. Örneğin, doğrusal model, doğrusallaştırılmış model, ilerleyen dalga teorisi ile doğrusallaştırılmış model, ilerleyen dalga teorisi ve denge bacası ile doğrusallaştırılmış model gibi akışkan mekaniğinin çok detaylı olarak incelenebileceği modeller geliştirilebilir. Ancak, generatör hız kontrolü açısından sistem çözümünde çok fazla etkili olmayacağı için sadece doğrusal ve doğrusallaştırılmış modeller dikkate alınabilir.

Bu tezde benzetim çalışmalarında doğrusallaştırılmış modelleme kullanılmıştır. Doğrusallaştırılmış modellemede aşağıda belirtilen kabuller yapılır:

- ✓ Hidrolik direnç (hidrolik kayıplar) ihmal edilebilir.
- ✓ Cebri boru elastik yapıda değildir ve su sıkıştırılmaz.
- ✓ Suyun hızı, türbin iğne açıklığı ve net düşünün karekökü ile doğru orantılıdır.
- ✓ Türbin mekanik gücü, hidrolik düşü ve su hızının çarpımı ile doğru orantılıdır.



Şekil 4.5.Enjektörü ile birlikte Pelton türbini ve kepçesi



Şekil 4.6. Pelton türbinin giriş ve çıkış hız üçgeni

Bir su kuvvetinden elde edilebilecek olan güç daha önce Denklem 2.4’de verilmişti. Hidrolik türbinlerde genel itibari ile verim, Denklem 4.8’de verildiği gibidir. 1 indisi ile belirtilen değerler suyun türbine temas ettiği ilk noktadaki değerler, 2 indisi ile belirtilen değerler ise suyun türbini terk ettiği noktadaki değerleridir.

$$\eta_h = \frac{U_1 \cdot C_1 \cdot \cos \alpha_1 - U_2 \cdot C_2 \cdot \cos \alpha_2}{g \cdot H} \quad (4.8)$$

Denklem 2.4’den, hız üçgenleri göz önüne alınarak ve verim bir katsayı haline getirilerek net düşü çekilir ise,

$$H_n = k_v \frac{U}{g} c_1 - U_c \quad 1 + \vartheta \cos \beta \quad (4.9)$$

elde edilir. Buradan M_d döndürme momenti

$$M_d = \frac{N}{\omega} \quad (4.10)$$

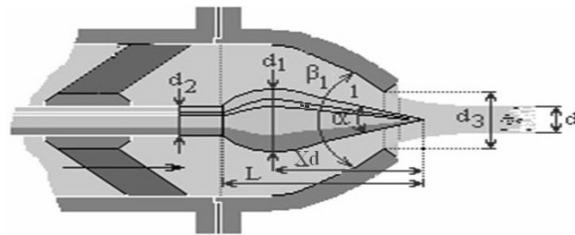
$$U_1 = \omega \cdot \frac{D}{2} \quad (4.11)$$

$$M_d = Q \cdot \gamma \cdot k_v \frac{U}{\omega} c_1 - \omega \cdot \frac{D}{2} \quad 1 + \vartheta \cos \beta \quad (4.12)$$

elde edilir. Su demetinin çıktığı alan S olarak gösterilirse, gerçek debi,

$$Q = S \cdot C_1 \quad (4.13)$$

olarak ifade edilebilir.



Şekil 4.7. Enjektör ve parametreleri

S alanı X_d 'ye bağılı olarak ifade edilirse,

$$S = \pi[d^2 - (X_d \tan \frac{\alpha}{2})^2] \quad (4.14)$$

Denklem 4.14, Denklem 4.13'de yerine yazılırsa,

$$Q = \pi[d^2 - (X_d \tan \frac{\alpha}{2})^2]. C_1 \quad (4.15)$$

olarak elde edilir.

$$C_1 = K_c \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{net}} \quad (4.16)$$

Denklem 4.16, Denklem 4.15'de yerine yazılırsa,

$$Q = \pi[d^2 - (X_d \tan \frac{\alpha}{2})^2]. K_c \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{net}} \quad (4.17)$$

olur. İğne açıklığına göre debi hesabı yapılır ve buradan da mekanik güce geçilir. Pelton türbinin sayısal benzetiminde kullanılan doğrusallaştırılmış model, gerçeğini tam olarak ifade etmesi için türbin nonlinearliğinin sisteme katılması gerekmektedir. Türbin nonlinearliğini doğrusallaştırılmış modele eklemek üzere literatürde, türbin parametrelerinin iğne açıklığına göre hesaplanarak adaptif bir yapı elde edilmesine yönelik yeni bir çalışma yapılmıştır [76].

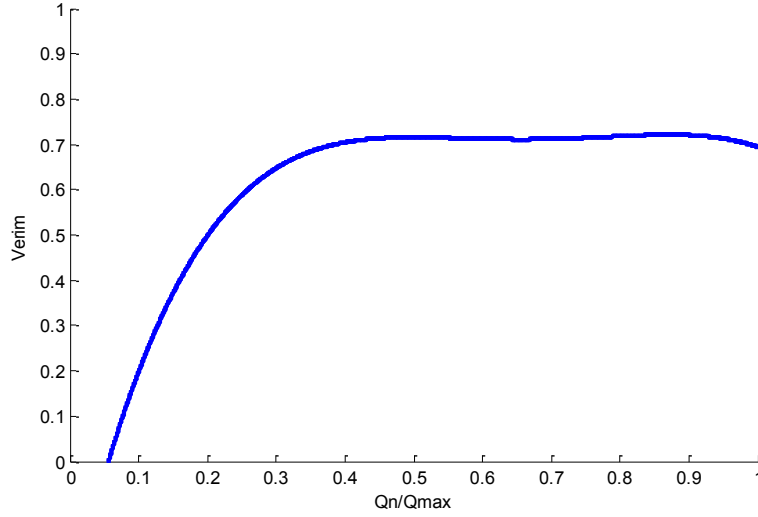
Nonlinearliğin sebebi türbinin kısmi debilerdeki çalışma performansı, yani verimidir. Elde edilebilecek bir verim eğrisi yardımıyla verim denklemi bu nonlinear sisteme dahil edilebilir ve herhangi bir parametrenin hesabına girmeden daha basit ve daha gerçekçi bir yapı elde edilebilir. Bu tez çalışmasında, türbin modellemesinde literatürde bir ilk olarak bu yapı kullanılmıştır.

Prototipte kullanılan türbinin verim eğrisi elde edilirken, değişik noktalardaki verim hesaplanmış ve türbinin genel karakteristiği göz önünde bulundurularak uygun şekilde birleştirilmiş ve Şekil 4.8'deki eğri elde edilmiştir. Bu eğriden yararlanılarak Denklem 4.18 çıkartılmıştır. Bu denklemin modele eklenmesi ile model, gerçeğe daha yakın bir hale gelecektir.

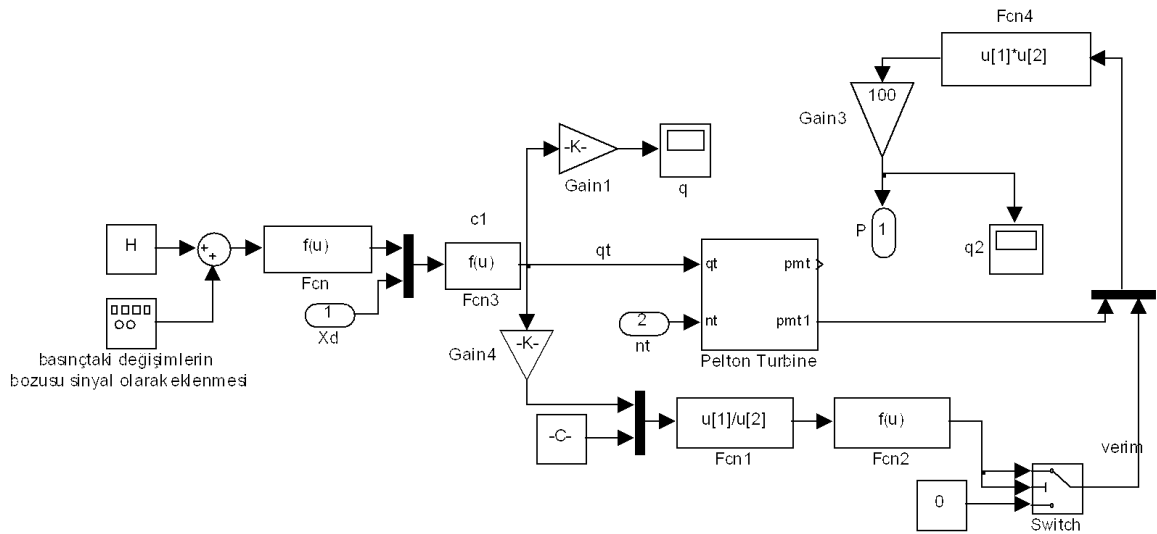
$$\eta = -1.4e-6 * Q_{pu}^4 + 8.1e-5 * Q_{pu}^3 - 1.6e-3 * Q_{pu}^2 + 1.5e-2 * Q_{pu} - 0.015 \quad (4.18)$$

Denklem 4.20'deki Q_{pu} , p_u cinsinden debinin değeridir. Prototipte istenilen net düşüyü elde etmek için basınç ayarı yapılmaktadır. Ayarlanan basınç değerinin belirli bir band

aralığında değiştiği görülmüş ve bu değişimi oluşturulan modele eklemek üzere net düşüye (dolaylı olarak basınca), rastgele fonksiyonlu bir işaret eklenmiştir.

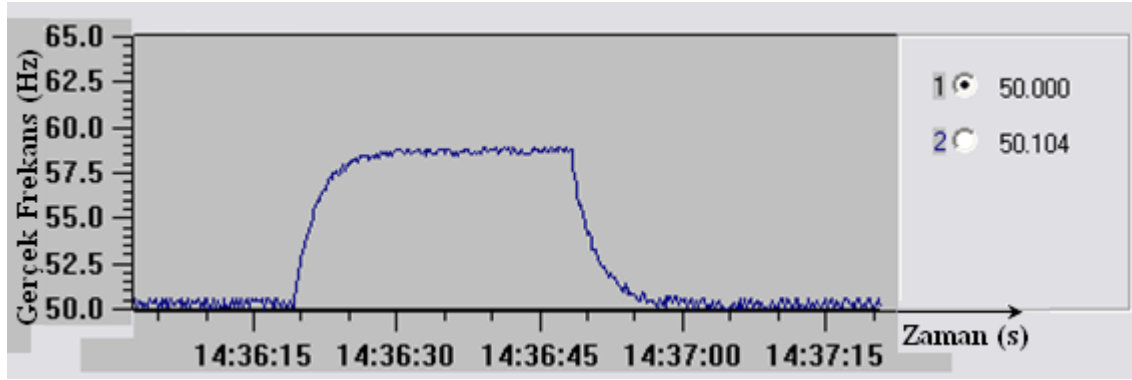


Şekil 4.8. Prototip ÇKHES'in Pelton türbininin deneysel verim eğrisi

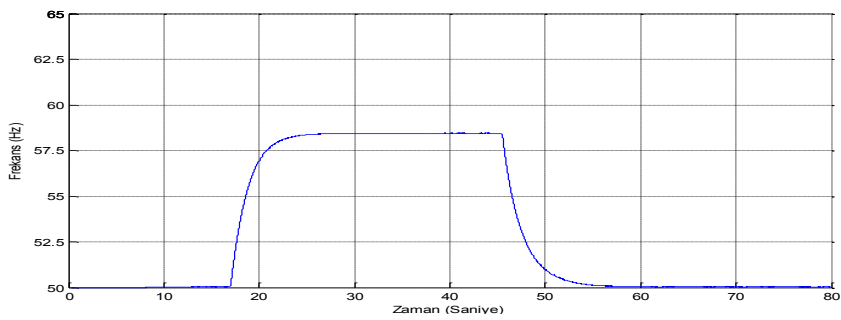


Şekil 4.9. Prototip ÇKHES'in Pelton türbin modeli

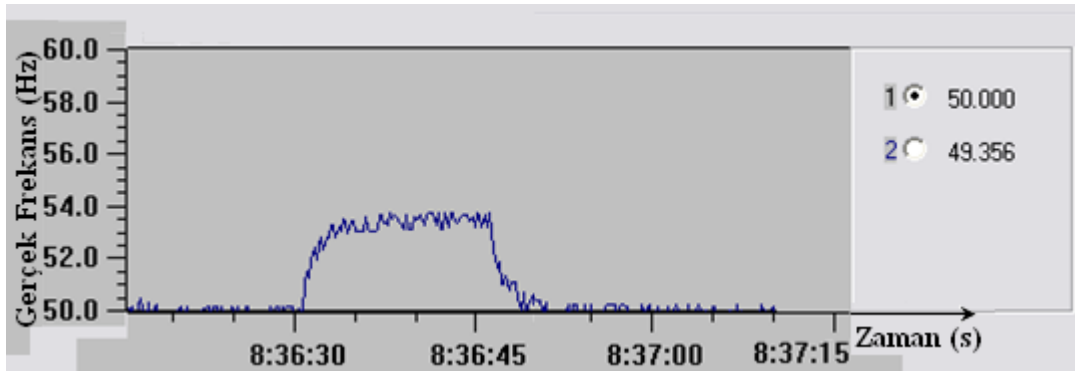
Şekil 4.10'da 10 barlık bir basınçta açık çevrim çalışan prototipin %30 yüklü durumda iken %15 yüklü duruma geçişini gösteren grafiksel sonuç verilmiştir. Şekil 4.11'de ise aynı şartlarda yapılan benzetime ait sonuç verilmiştir. Görüldüğü gibi oluşturulan model ile gerçek sistem sonuçları titreşim göz önünde tutulmaz ise neredeyse aynıdır. Şekil 4.12'de verilen sonuç 5 barlık bir basınçta açık çevrim çalışan prototipin %20 yüklü durumdayken %10 yüklü durumda çalışmasına ait sonuçtur. Şekil 4.13'de ise aynı şartlarda yapılan benzetime ait sonuç verilmiştir. Deneysel çalışmalarda yatay eksen gerçek zaman saati, düşey eksen ise frekans (Hz) eksenidir.



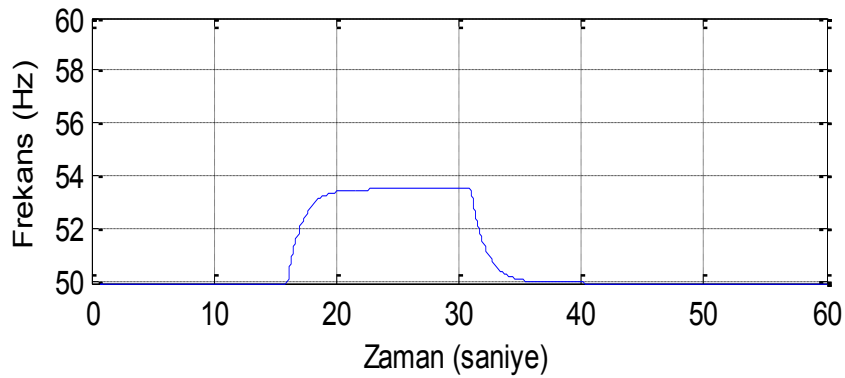
Şekil 4.10. 10 bar basınçta yük atma deneyi (açık çevrim)



Şekil 4.11. 10 bar basınçta yük atma benzetimi (açık çevrim)

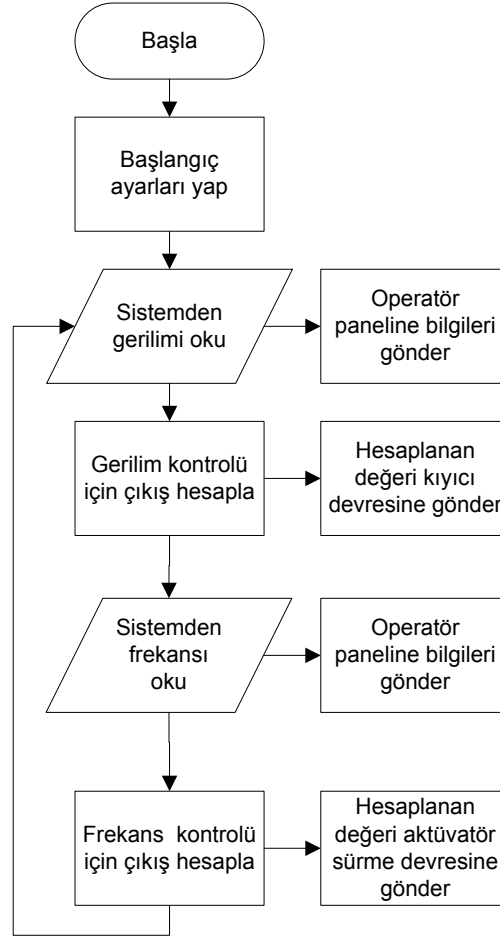


Şekil 4.12. 5 bar basınçta yük atma deneyi (açık çevrim)



Şekil 4.13. 5 bar basınçta yük atma benzetimi (açık çevrim)

Gerilim ve frekans kontrolüne ait programın genel akış diyagramı Şekil 5.2’de verildiği gibidir.



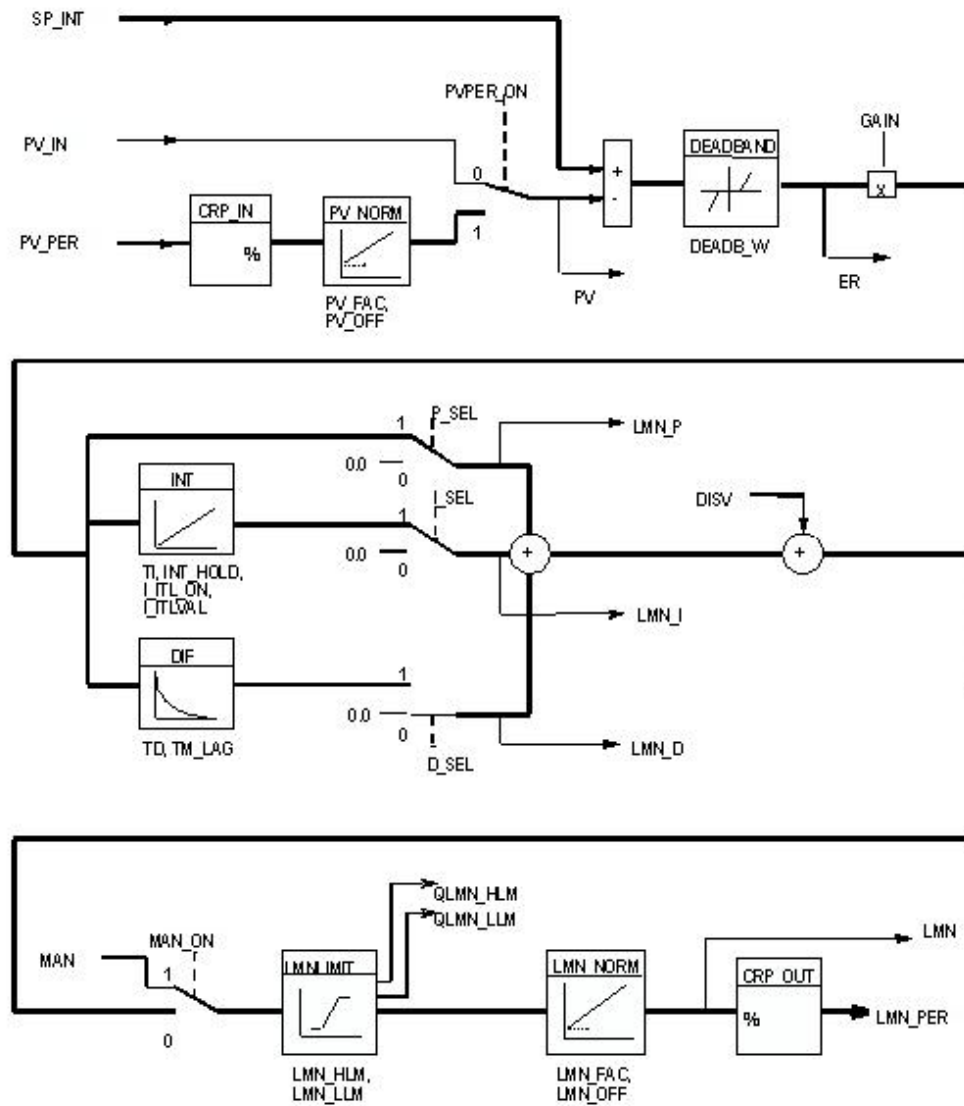
Şekil 5.2. Gerilim ve frekans kontrolünün genel akış diyagramı

Şekil 5.3’de ise endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan ve sistemdeki kontrol döngülerinde kullanılan klasik kontrolöre ait “Simatic Manager” programının standart kütüphanesinde bulunan “FB41 Continuous Control” fonksiyon bloğunun işlevsel uygulama şemasıdır. Bu bloğun ayarlamaları yapılarak PID ve bunun diğer versiyonları kontrolör olarak kullanılabilir.

FB41 kontrol bloğunda birçok özellik bulunmakla beraber tasarlanan kontrolörün sisteme uygulanması için bu özelliklerin hepsine gerek yoktur. Kullanılması gereken temel özellikler şu şekilde verilebilir.

SP_INT: Bu büyüklük -100.0 ile 100.0 arasında değişebilir ve referans değerdir. Buraya girilen değer yüzde olarak yazılır.

PVPER_ON: Sistemden gelen geri besleme doğrudan analog girişten alınacaksa, bu bit aktive edilir.



Şekil 5.3. PI ve PID olarak kullanılan FB 41 bloğunun iç yapısı[125]

P_SEL: Aktif olması durumunda kontrolörün kazanç ayağından gelen kontrol işaretinin tüm kontrol işaretine katılmasını sağlar.

I_SEL: Aktif olması durumunda kontrolörün integral ayağından gelen kontrol işaretinin tüm kontrol işaretine katılmasını sağlar.

MAN_ON: Aktif iken önceden belirlenen bir kontrol işareti sisteme otomatik olarak verilir. Kontrolör çıkışı yüklenen manuel değeri çıkışa verir. Sürekli bir kontrol işlemi yapılması için bu bit aktif olmamalıdır.

COM_RST: Aktifken, kontrolörün içindeki tüm değerleri resetler.

CYCLE: Kontrolörün örnekleme zamanı bu alana T#..MS şeklinde girilir ve bu değer 1 MS'den küçük olamaz.

PV_PER: Sistemden gelen geri besleme bilgisinin bulunduğu analog adres bu alana yazılır.

GAIN: Kontrolör kazancı buraya real sayı olarak ya da real formatında bir bellek alanı olarak yazılır.

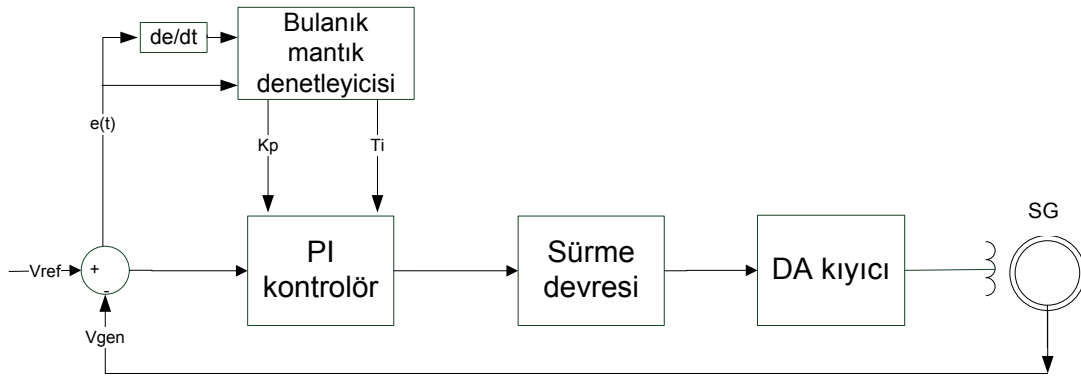
TI: İntegral zaman sabiti buraya zaman formatında girilmelidir. Eğer hesaplanan değer doğrudan gönderilmek istenirse, katsayı milisaniyeye çevrilip tam sayı haline getirilerek buraya yazılmalıdır.

LMN_PER: Kontrol işaretinin sisteme uygulanacağı analog adres bu alana yazılır.

5.1.2. Frekans-Gerilim Kontrolünde Geliştirilen ve Kullanılan Teknikler

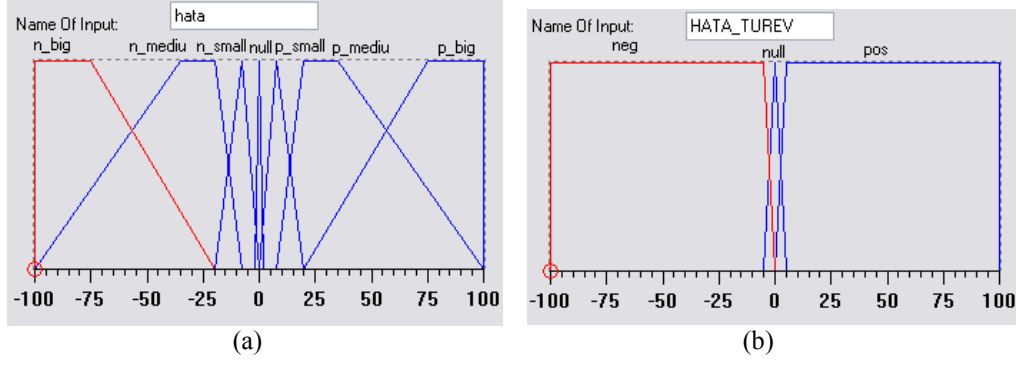
Prototip sistemdeki SG'ün gerilim kontrolü PI, PID, bulanık mantık denetleyicisi ile gerçekleştirilen Adaptif PI [126] ve Adaptif PID [127] olarak gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalarda uyarım, direkt olarak bileziklerden generatörün alan sargısına uygulanmıştır. Bilezikli uyarım kullanıldığında devir sayısında değişiklik fırçasız uyarımcılı devreye göre daha az olduğundan, kontrolörün tek başına performansı bu uyarım şekli ile daha net görülebileceğinden, bu uyarım şekli tercih edilmiştir.

Bulanık mantık denetleyicisi ile adaptif hale getirilen PI kontrolörlü gerilim kontrolü uygulamasına ait blok gösterim Şekil 5.4'de verilmiştir.

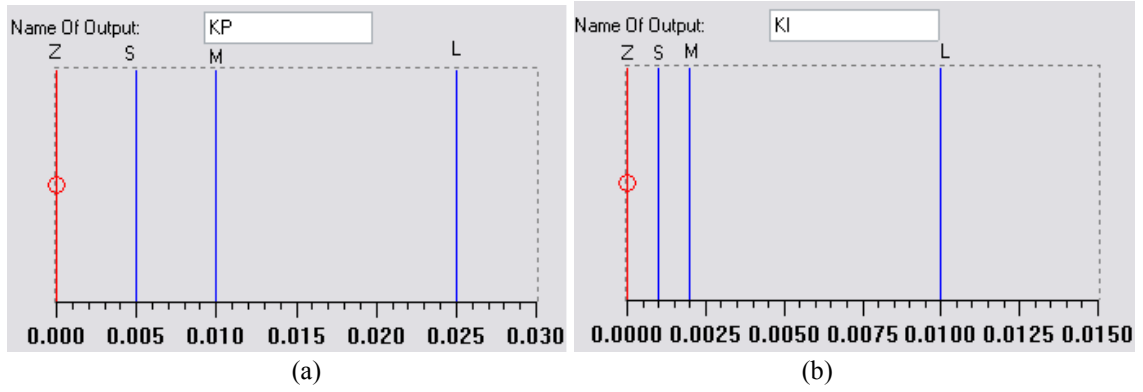


Şekil 5.4. Adaptif PI kontrol yapısı

Bulanık mantık denetleyicisinin girişi frekans hatası (hata) ve bunun türevi (HATA_TUREV) olmak üzere iki tanedir. Hata girişinin 7, hatanın türevinin ise 3 üyelik fonksiyonu mevcuttur. Bu fonksiyonlar Şekil 5.5 a,b'de verilmiştir. K_p ve T_i çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 5.6 a,b'de çıkışlara ait kural tabanları ise Şekil 5.7 a,b'de verilmiştir.



Şekil 5.5. Hata ve hatanın türevinin giriş üyelik fonksiyonları



Şekil 5.6. Kp ve Ti'nin çıkış üyelik fonksiyonları

hata		n_big	n_mediu	n_small	null	p_small	p_mediu	p_big
neg		L	M	S	Z	S	M	L
null		L	M	M		M	M	L
pos		L	M	L	Z	L	M	L

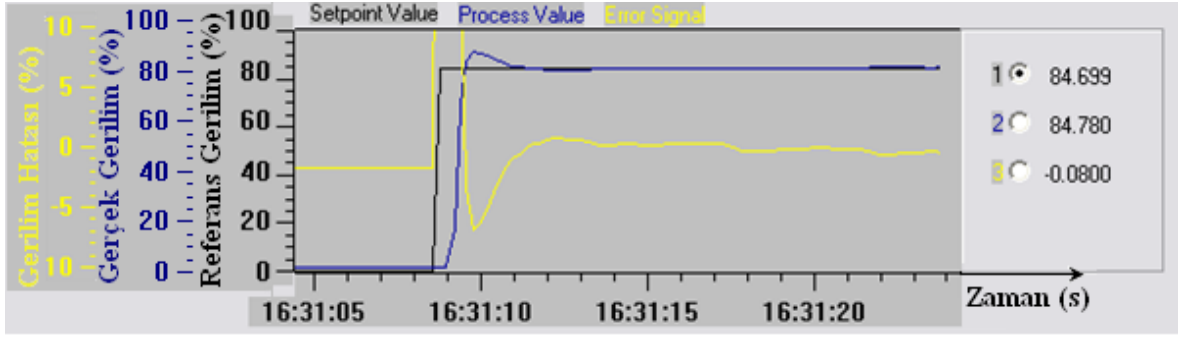
(a)

hata		n_big	n_mediu	n_small	null	p_small	p_mediu	p_big
neg		Z	S	M	L	M	S	Z
null		Z	S	Z		S	S	Z
pos		Z	M	L	L	L	M	Z

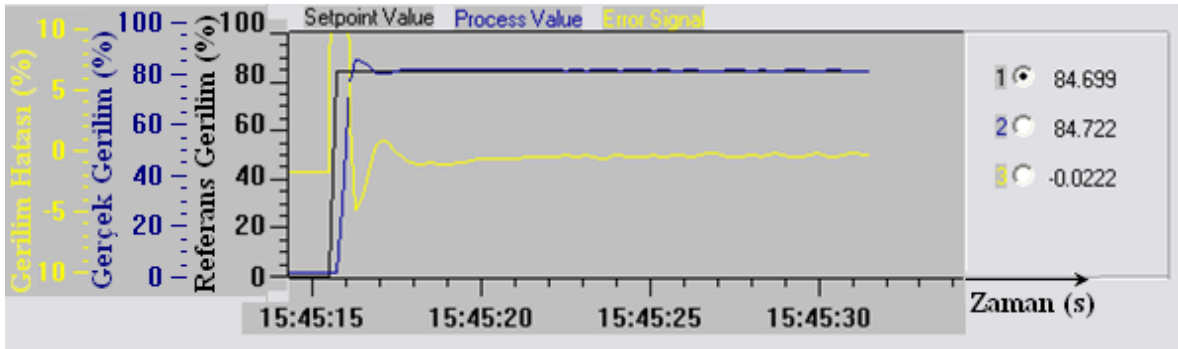
(b)

Şekil 5.7. Kp ve Ti'nin kural tabanı

Şekil 5.8'de klasik kontrolörlü yapının birim basamak cevabı, Şekil 5.9'da ise adaptif yapının birim basamak cevabı verilmiştir. Görüldüğü gibi adaptif sistemin maksimum aşma miktarı ile sürekli rejime ulaşma süresi klasik kontrolöre göre daha iyidir. Sonuçlar 448,7 V referansa göre % olarak görülmektedir. Bu değere göre % 84,7'nin karşılığı 380 V olmaktadır. Gerçek sonuçlarda, düşey eksenlerdeki sarı eksen % olarak hata değerinin değişimini (Erros Signal), mavi eksen % olarak gerçek gerilim değerini(Process Value), siyah eksen ise % olarak referans gerilimini (Setpoint Value) ve yatay eksen ise gerçek zaman saatini göstermektedir.

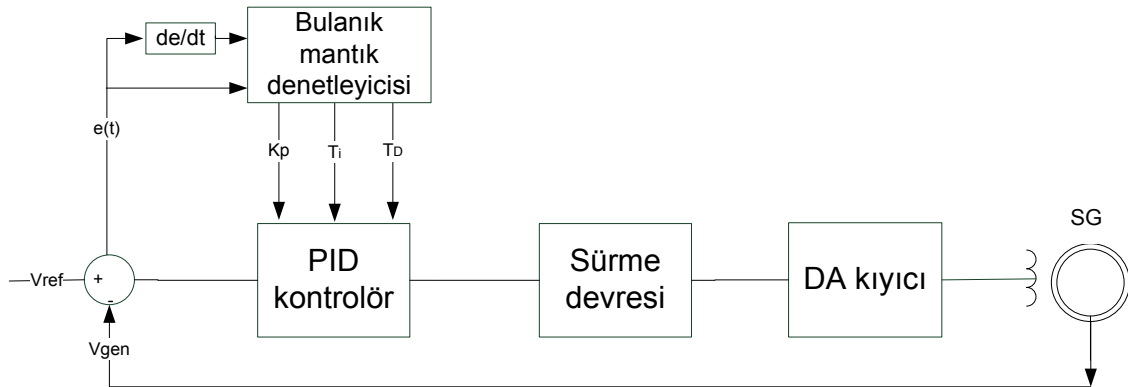


Şekil 5.8. PI kontrolörün birim basamak cevabı



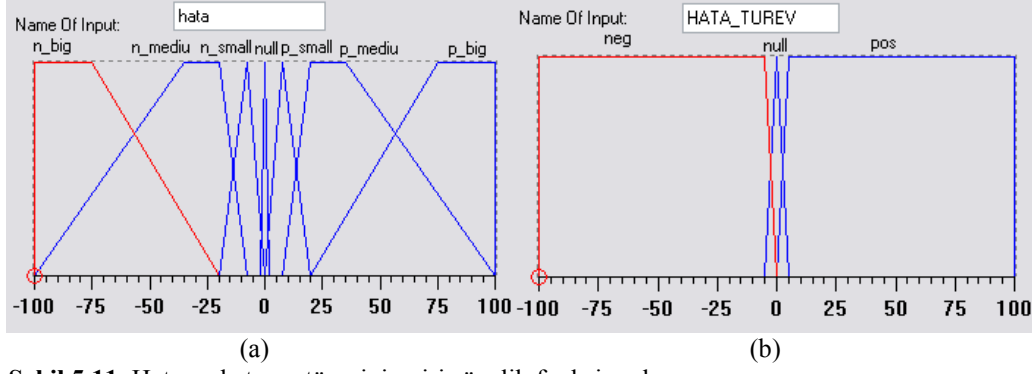
Şekil 5.9. Adaptif PI kontrolörün birim basamak cevabı

Şekil 5.10'da bulanık mantık denetleyicisi ile adaptif hale getirilen PID kontrolörlü gerilim kontrolü uygulamasına ait blok gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.10. Adaptif PID kontrol yapısı

Bulanık mantık denetleyicisinin girişi, frekans hatası (hata) ve bunun türevi (HATA_TUREV) olmak üzere iki tanedir. Hata girişinin 7, hatanın türevinin ise 3 üyelik fonksiyonu mevcuttur. Bu fonksiyonlar Şekil 5.11 a,b'de verilmiştir. K_p , T_i ve T_D çıkışlara ait kural tabanları Tablo 5.2'de verilmiştir.

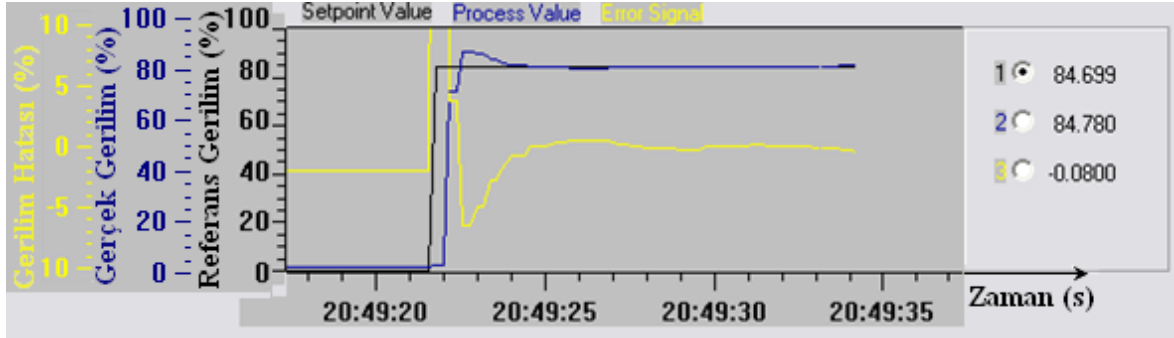


Şekil 5.11. Hata ve hatanın türevinin giriş üyelik fonksiyonları

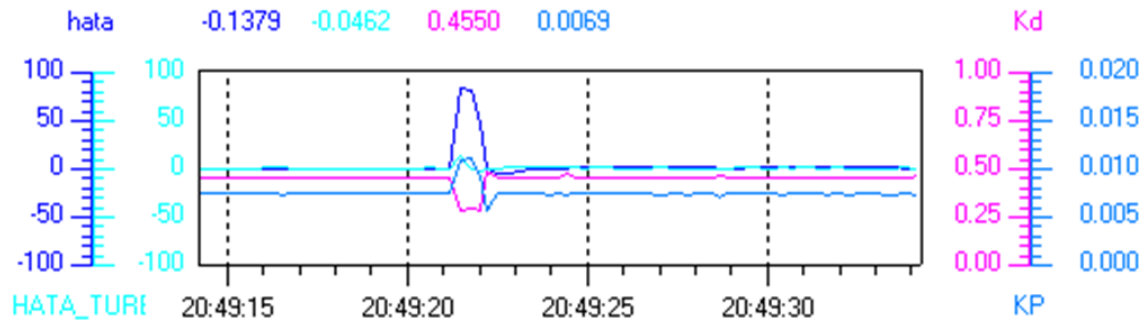
Şekil 5.12’de adaptif PID’li sistemin birim basamak cevabı verilmiştir. Şekil 5.13’de verilen grafik ise bulanık mantık denetleyicisinin çıkışlarını göstermektedir. Kontrolörün katsayılarının değiştiği, şekilden görülmektedir.

Tablo 5.1. K_p , T_i , T_d ’ye ait kural tabanları

e Δe	n_big	n_mediu	n_small	null	p_small	p_mediu	p_big
neg	L/Z/Z	M/S/S	S/M/M	Z/L/L	S/M/S	M/S/S	L/Z/Z
null	L/Z/S	M/S/M	M/Z/L		M/S/S	M/S/M	L/Z/S
pos	L/Z/Z	M/M/S	L/L/M	Z/L/L	L/L/M	M/M/S	L/Z/Z

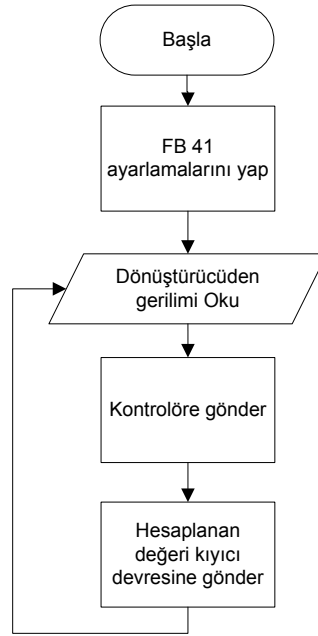


Şekil 5.12. Birim basamak cevabı



Şekil 5.13. Bulanık mantık denetleyicisinin giriş ve çıkışlarının değişimi

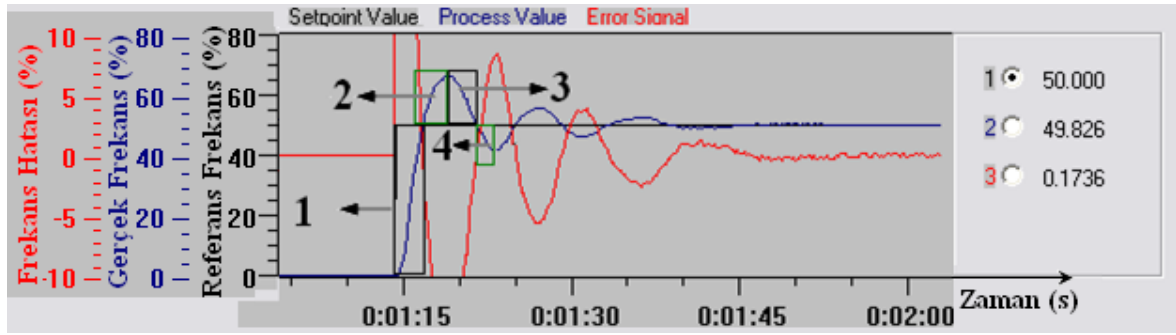
Yapılan bu adaptif kontrolörlü programın çevrim süresinin 11-13 ms olduğu görülmüştür. Gerilim kontrolünde kullanılan PI ve PID parametreleri Ziegler-Nichols metoduna göre bulunmuş ve bu değerler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak kontrolörde kullanılmıştır. Sonuçta, en iyi integratör değerinin 1 ms civarında olduğu görülmüştür. PLC'nin örnekleme zamanının en düşük 1 ms olduğu göz önüne alındığında ve böyle bir kontrolörde T_i parametresinin tahmin edilmesi ya da hesaplanmasının genel kontrol noktasında ciddi zaman gecikmesine neden olacağı için anlamsızlaşacağı görülmüştür. Bu nedenle gerilim kontrolünde klasik PI ve PID kontrolörler kullanılmıştır. Şekil 5.14'de gerilim kontrol çevriminin akış diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.14. Gerilim kontrolünün akış diyagramı

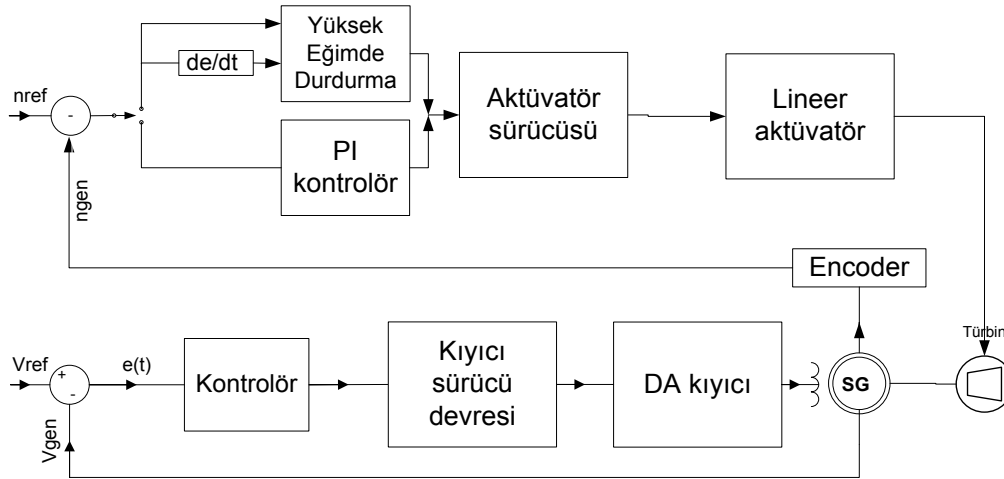
Oluşturulan sistemdeki generatörün frekans kontrolünde klasik kontrolör kullanmanın bir takım dezavantajları olduğu görülmüştür. Sistem klasik kontrol mantığına göre çalıştırılır ise hidrolik kısımdaki nonlineerliklerin etkisi ile sürekli rejime ulaşması ya çok yavaş ya da salınımlı olmaktadır. Bunun nedenlerinden birisi, Şekil 4.4'de belirtilen iğnenin α açısının küçültülmesi dolayısı ile aktif bölgenin artırılması ve nonlineerliği azaltmasıdır. Bu durum dikkate alınarak, başlangıçta $\alpha=52^\circ$ açısı ile imal edilen iğne, daha sonra $\alpha=28^\circ$ olacak şekilde tekrar imal edilmiştir. Yüksek α değerli duruma göre frekansta salınım miktarında azalma olmuş ama yine de tam ortadan kalkmamıştır. Bu salınımı daha da azaltmak gerekliliği doğmuştur. Her ne kadar iğnenin açısı azaltılsa da nonlineerlik tamamen ortadan kaldırılamaz. Bu nedenle frekanstaki salınım miktarını daha da azaltmak

için doğrusal hareketlendiricinin belirli bölgelerde durdurulması gerektiği belirlenmiştir. Çünkü sistem kendi ataleti ile belirli miktarda yine artma ya da azalmaya devam etmektedir. Dolayısı ile bu problemin çözümünün, daha sıfıra gelmeden doğrusal hareketlendiricinin durdurulması olduğu sonucuna varılmıştır. Doğrusal hareketlendiricinin durdurulması aslında kontrolörün o anda devre dışı bırakılması ve çıkışa sıfır gönderilmesi demektir. Çalışmada doğrusal hareketlendiricinin durdurma uygulaması, “Yüksek Eğimde Durdurma Tekniği (YED)” olarak ifade edilmiştir.



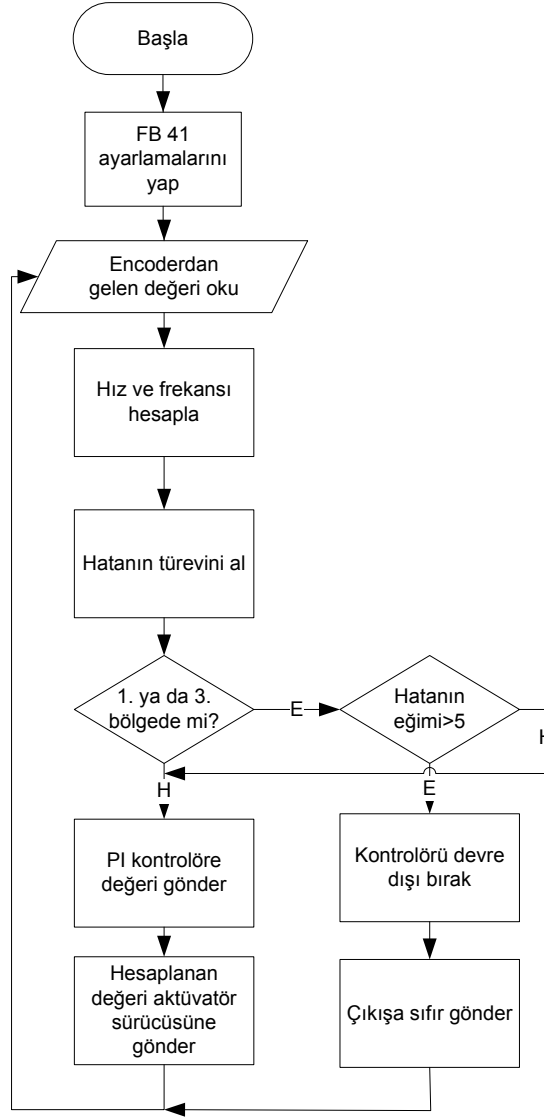
Şekil 5.15. Basamak cevabındaki bölgeler

YED tekniğinde, Şekil 5.15’de 1 ve 3 no.lu bölgelerde hatanın türevinin değerine göre doğrusal hareketlendirici durdurulmuştur. Bu mantıkla maksimum taşma miktarı ve salınım sayısı önemli oranda azaltılmıştır. YED tekniğinin de içinde bulunduğu kontrol yapısı Şekil 5.16’da verilmiştir.



Şekil 5.16. Yüksek eğimde durdurma tekniği kontrol döngüleri

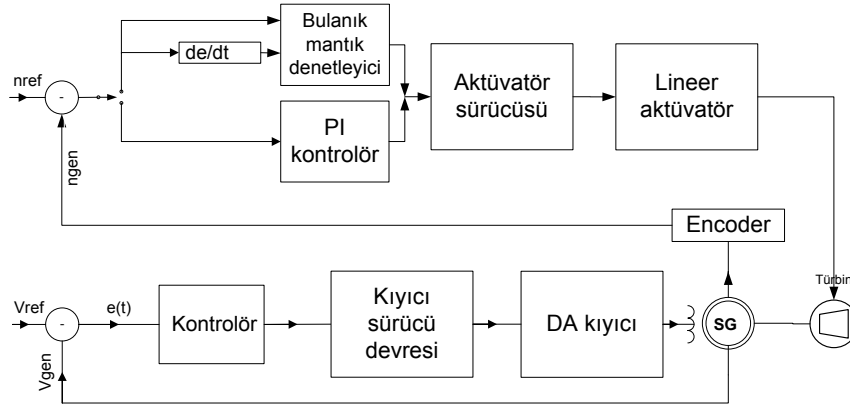
Şekil 5.17’de prototip sistemin frekans kontrolünde kullanılan YED tekniğine ait akış diyagramı verilmiştir. Tekniğe ait yapılan uygulamalarda hata eğiminin 5 olduğu, yani açının yaklaşık 78° olduğu durumda durdurma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.17. Yüksek Eğimde Durdurma tekniği akış diyagramı

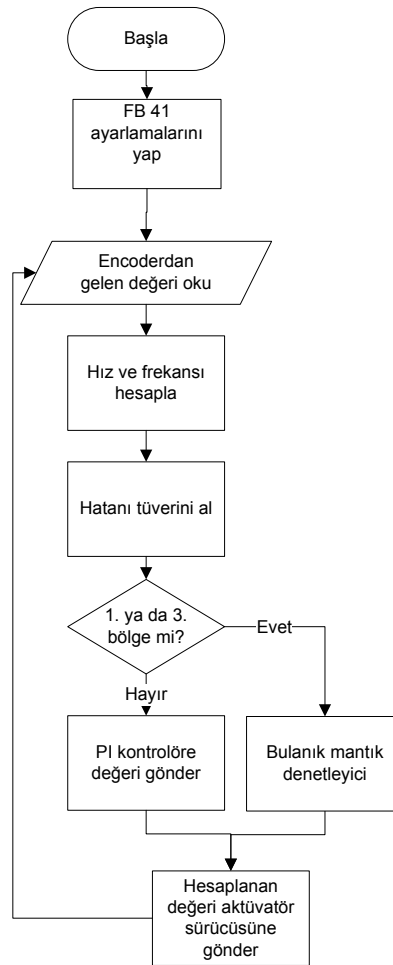
YED tekniğinin kullanılması halinde, generatörün yüklendikçe sürekli rejime ulaşma süresi uzamaktadır. Bu problemi çözebilmek için sadece sabit bir eğimde değil de, başka parametreler ile çözüm bulmak daha doğru olacaktır. Problemin türü, nonlineer yapısı ve ayrıca tecrübe bilgilerinin kullanılabilmesi, çözüm olarak bulanık mantık denetleyicisini göstermektedir. YED tekniğine bulanık mantık denetleyicisinin eklenmesi ile daha iyi sonuçlar elde edilmesi muhtemel olacaktır.

Öngörülen çözüme ek olarak 1. ve 3. bölgede doğrusal hareketlendiricinin durdurulması yerine, hata ve hatanın türevinin değerine göre çok küçük hareket etmesi sağlanmıştır. Öngörülen çözümün blok yapısı Şekil 5.18’de verilmiştir. Bu düzeltme ile referansı yakalama süresi daha da kısalmıştır.



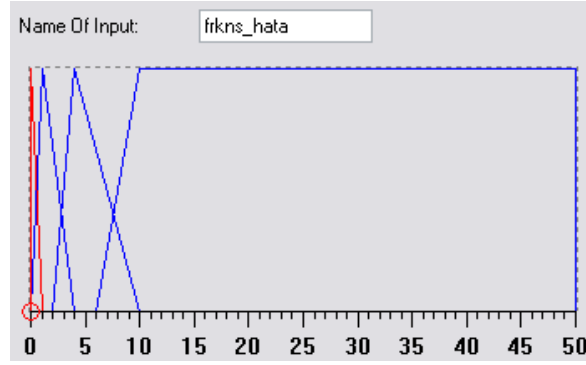
Şekil 5.18. Frekansın adaptif yapılı kontrolü

Şekil 5.19’da bulanık mantık destekli frekans kontrolünün akış diyagramı verilmiştir. Bu yapı ile birlikte çevrim sürelerinde önemli miktarda azalma görülmüştür.

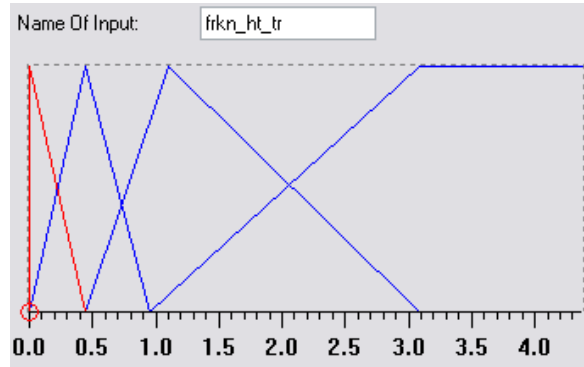


Şekil 5.19. Frekansın adaptif yapılı kontrolüne ilişkin akış diyagramı

Bulanık mantık denetleyicisinin girişi frekans hatası (frkns_hata) ve bunun türevi olmak (frkn_ht_tr) üzere iki tanedir. Bu girişlere ait 4'er tane üyelik fonksiyonu mevcuttur. Bu fonksiyonlar Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.20. frkns_hata değişkeninin üyelik fonksiyonu



Şekil 5.21. frkn_ht_tr değişkeninin üyelik fonksiyonları

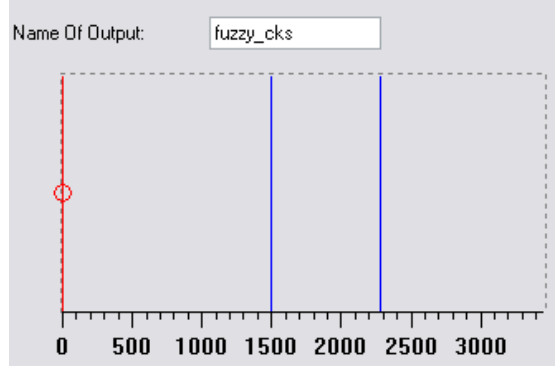
Girişi değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarına göre yazılan kural tabanı Şekil 5.22'de verilmiştir. Bölge seçimi yapıldığı için kural tablosu 4x4 şeklinde olmuştur. Bu da PLC'nin bulanık mantık denetleyiciden kaynaklanan işlem yükünü azaltmaktadır.

frkns_hata					
	ck_kck	kck	byk	ck_byk	
ck_kck	sfr	kck	byk	byk	
kck	sfr	kck	byk	byk	
byk	sfr	kck	kck	kck	
ck_byk	sfr	sfr	sfr	sfr	

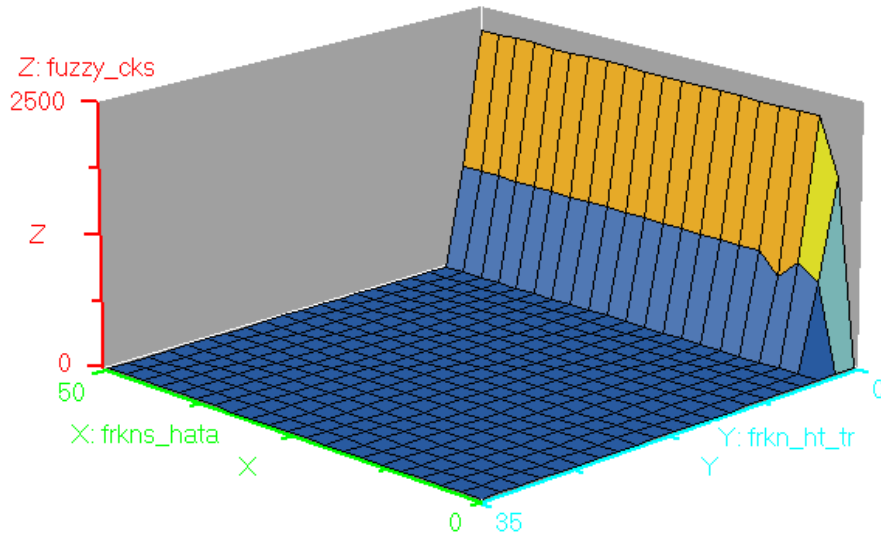
Şekil 5.22. Adaptif kontrolöre ait kural tabanı

Şekil 5.23 bulanık mantık denetleyicisinin çıkış üyelik fonksiyonunu, Şekil 5.24 ise giriş ve çıkış değişimlerini göstermektedir. PLC S7 300, çıkış için sadece Singletone üyelik

fonksiyonuna müsaade etmesi nedeni ile zorunlu olarak singleton olarak kullanılmıştır. Üyelik fonksiyonunun değerleri doğrusal hareketlendiriciyi harekete geçirecek eşik değerler göz önüne alınarak seçilmiştir. Hesaplanan bu değerler int formatına dönüştürülerek analog çıkışlara gönderilmektedir.



Şekil 5.23. fuzzy_cks değişkenine ait üyelik fonksiyonları



Şekil 5.24. Bulanık mantık denetleyicinin giriş-çıkış değişimi

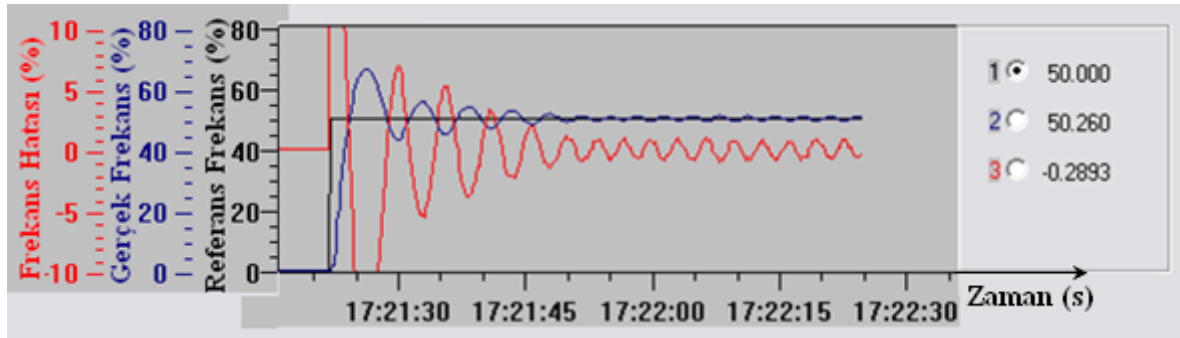
5.2. DeneySEL Sonuçlar

Prototip üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda yük olarak, TQ NE7026 3 kW'lık omik ve TQ NE7028 3 kVAr'lık indüktif yükler kullanılmıştır. Frekans kontrolünde PI-Bulanık Mantık Denetleyicili adaptif kontrolör, gerilimde ise PI ve PID kontrolörler kullanılmıştır. Sonuçlar; frekansın adaptif kontrolörle ve gerilimin PI ile kontrol edilmesi (Yöntem-1), frekansın adaptif kontrolörle ve gerilimin PID ile kontrol edilmesi (Yöntem-2) durumları için alınmıştır. Tüm klasik kontrolörlerin parametrelerinin belirlenmesinde Ziegler-Nichols ayar yöntemi kullanılmıştır.

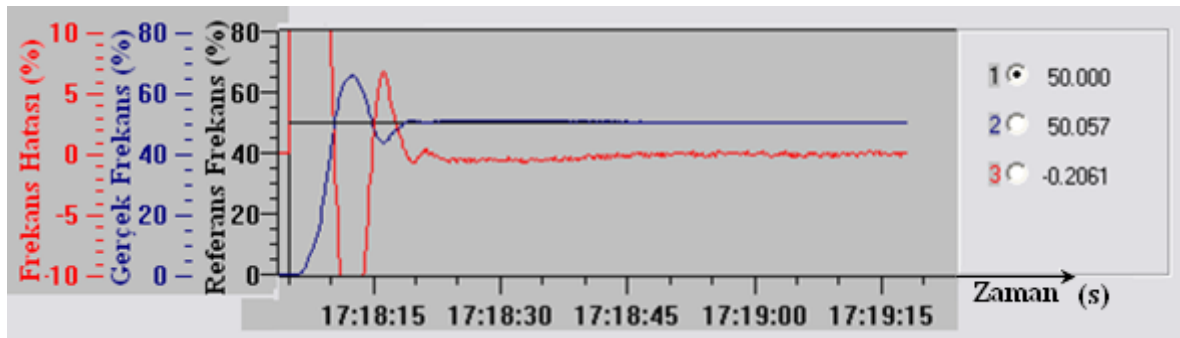
Gerçek sonuçlarda, düşey eksenlerdeki kırmızı eksen % olarak hata değerinin değişimini (Erros Signal), mavi eksen % olarak gerçek gerilim değerini(Process Value), siyah eksen ise % olarak referans gerilimini (Setpoint Value) ve yatay eksen ise gerçek zaman saatini göstermektedir.

5.2.1. Yöntem 1'e Göre Yapılan Frekans ve Gerilim Kontrolü

Şekil 5.25'de sadece klasik PI kontrolörün devrede olduğu durumdaki birim basamak cevabını gösteren sonuçlar verilmiştir. Görüldüğü gibi sürekli durumda bir salınım söz konusudur. Şekil 5.26'dan da görüldüğü gibi bu salınım adaptif denetleyicisinin devreye alınması ile ortadan kalkmıştır.

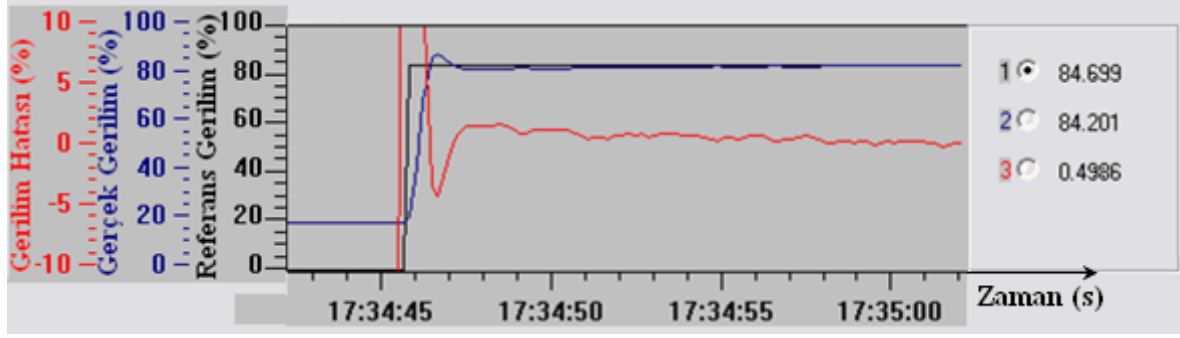


Şekil 5.25. Klasik PI ile birim basamak frekans cevabı



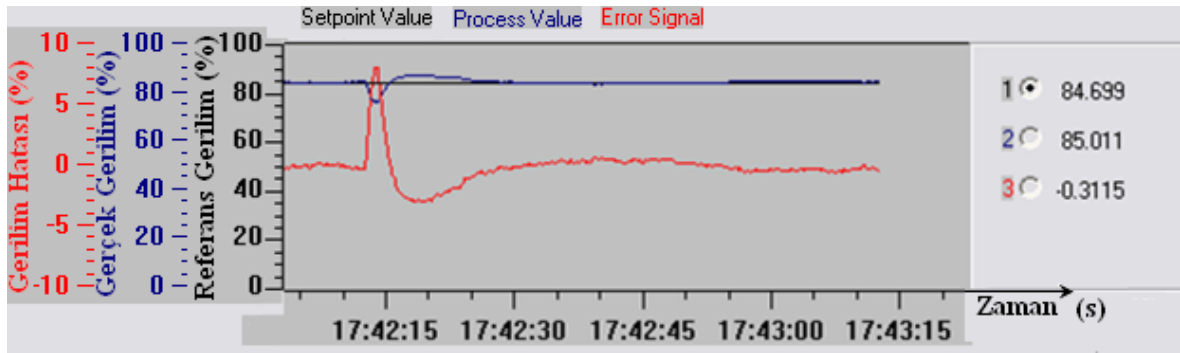
Şekil 5.26. Yöntem-1 ile birim basamak frekans cevabı

Şekil 5.27'de frekans adaptif kontrolörlü yapı ile kontrol edilirken birim basamak gerilim cevabı verilmiştir.

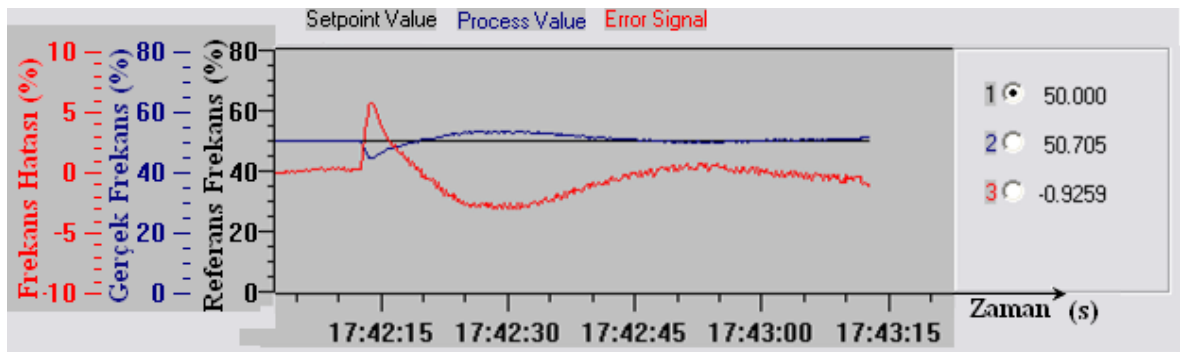


Şekil 5.27. Yöntem-1 ile birim basamak gerilim cevabı

Şekil 5.28’de SG’ün 750 W (nominal aktif güce oranı %15) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim, Şekil 5.29’da ise frekanstaki değişim verilmiştir. Gerilim değerinde 35,89 V (%9,45) ve frekansta ise 5,3 Hz (%10,6)’lık bir çökme görülmüştür. Generatöre omik yük bağlandığında hem gerilim ve hem de frekans etkilenmektedir.

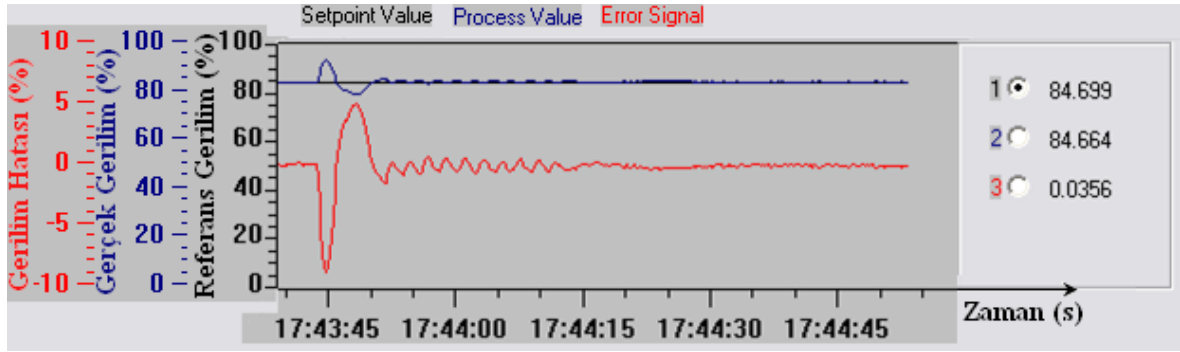


Şekil 5.28. 750 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

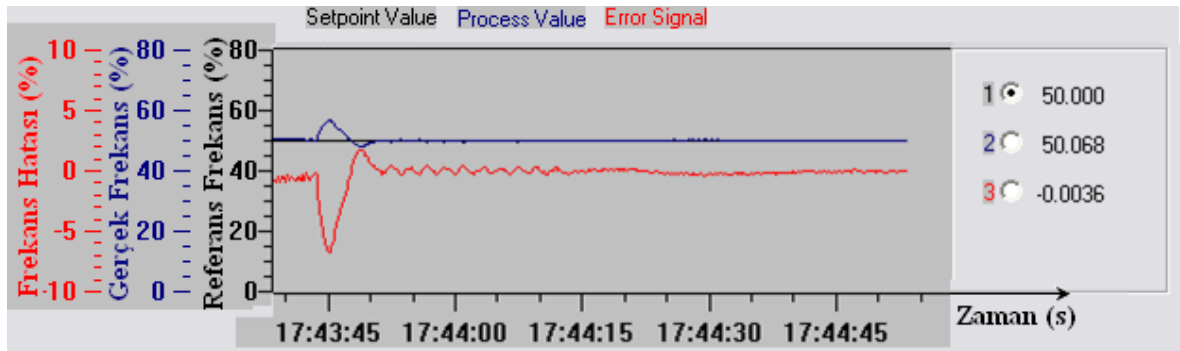


Şekil 5.29. 750 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

Şekil 5.30’de SG’den 750 W yük kalkması durumunda gerilimdeki değişim, Şekil 5.31’da ise frekanstaki değişim verilmiştir. Gerilim değerinde 39 V (%10,27) ve frekansta ise 6,4 Hz (%12,8)’lık bir aşma görülmüştür. Generatörden omik yük çıkması durumunda da hem gerilim ve hem de frekans etkilenmektedir.

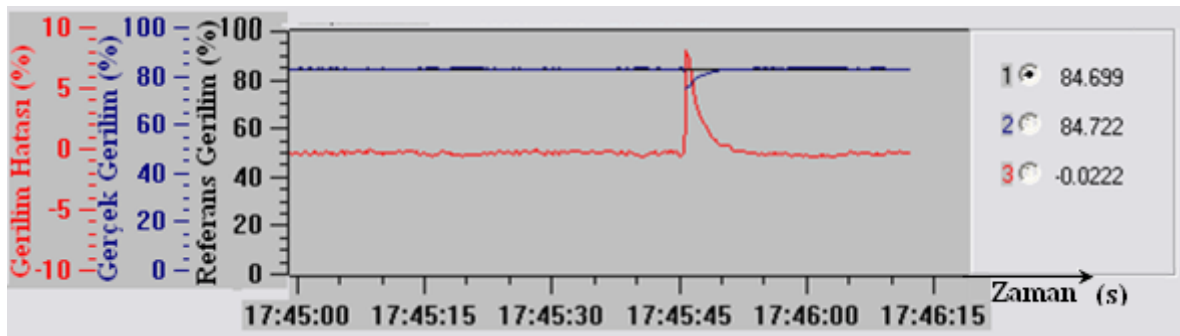


Şekil 5.30. 750 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

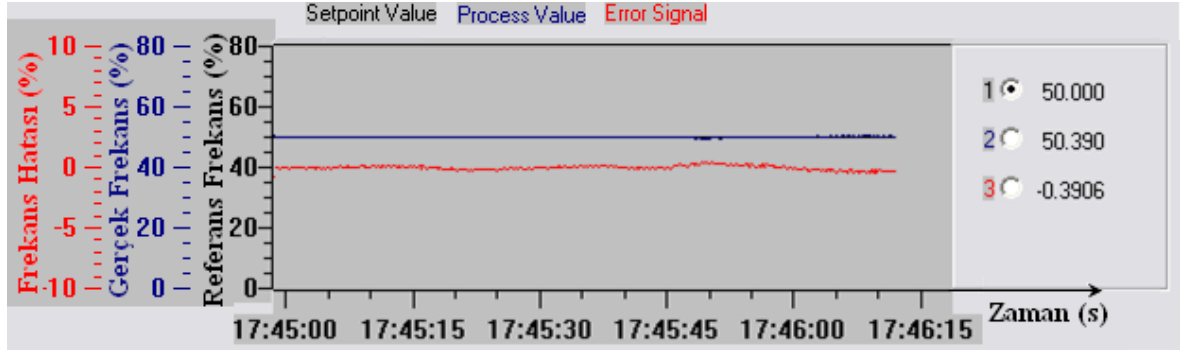


Şekil 5.31. 750 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

Şekil 5.32’de SG’ün 750 VAr (nominal reaktif güce oranı %20) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim, Şekil 5.33’de ise frekanstaki değişim verilmiştir. Gerilim değerinde düşme 35,89 V (%9,45) iken frekansta nerdeyse hiç değişim görülmemiştir. Yani generatöre indüktif yük bağlandığında sadece gerilim etkilenmektedir.

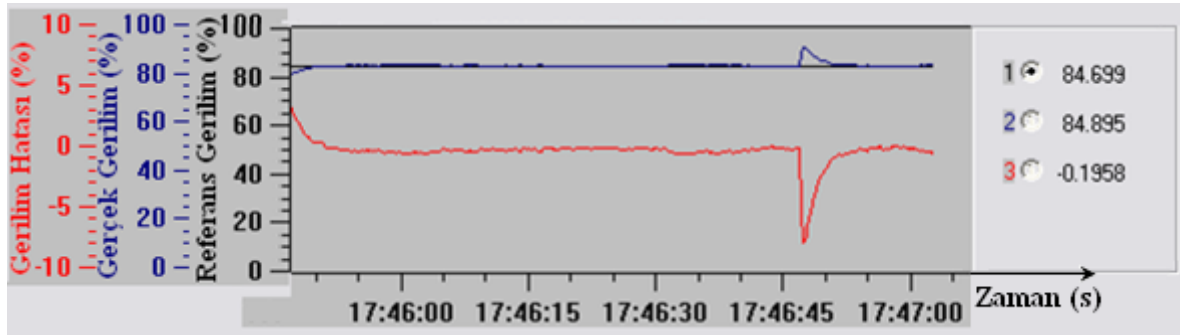


Şekil 5.32. 750 VAr yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

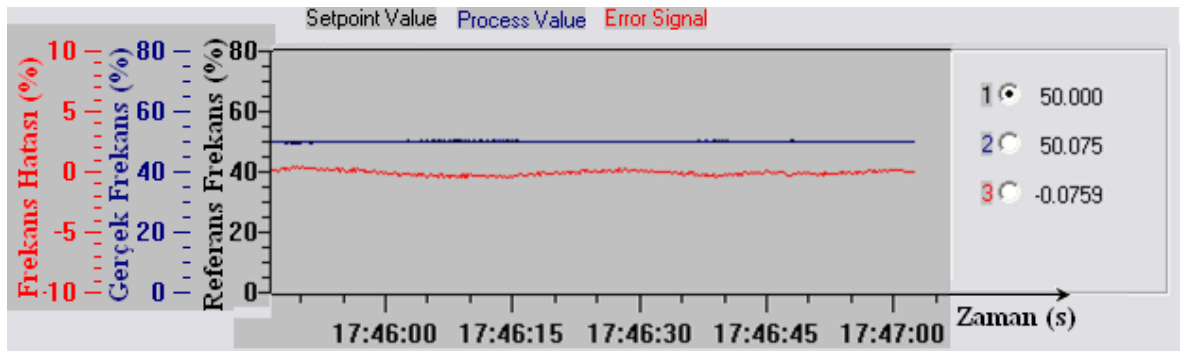


Şekil 5.33. 750 VAR yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

Şekil 5.34’de SG’den 750 Var’lık yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim, Şekil 5.35’de ise frekanstaki değişim verilmiştir. Gerilim değerinde 33,65 V (%8,85) aşma görülürken, frekansta ise neredeyse hiç değişim görülmemiştir. Generatörden indüktif yük çıktığında sadece gerilim etkilenmektedir.



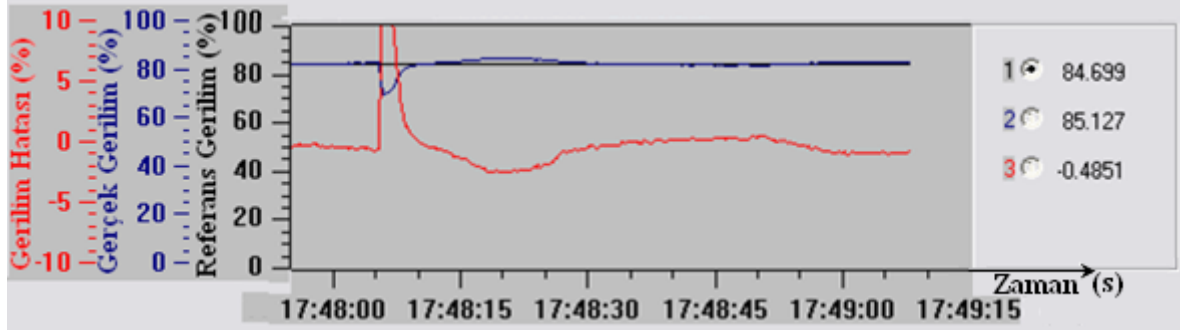
Şekil 5.34. 750 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)



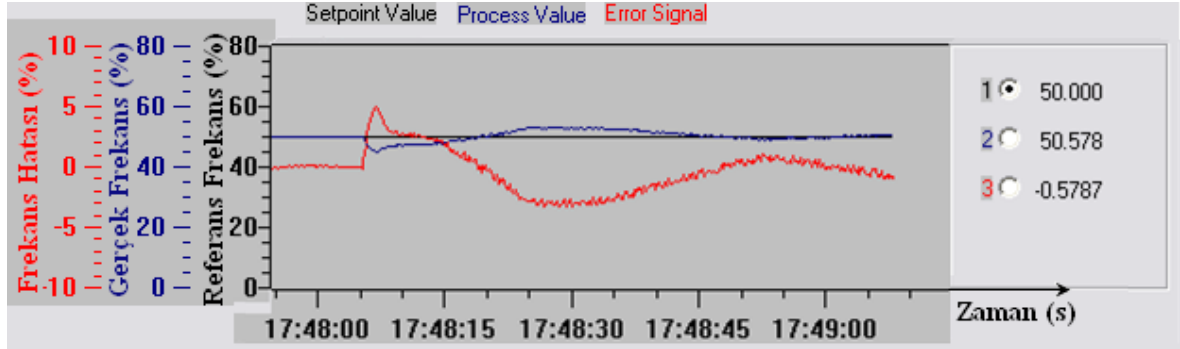
Şekil 5.35. 750 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

Şekil 5.36’de SG’ün 750 W ve 750 VAR (nominal görünür güce oranı %17) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim, Şekil 5.37’de ise frekanstaki değişim verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 53,84 V (%14,17) aşma ise 8,97 V (%2,36) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökmenin 4,8 Hz (%9,6), maksimum aşmanın

3 Hz (% 6) olduğu görülmüştür. Generatör omik indüktif yük ile yüklendiğinde hem gerilim ve hem de frekans etkilenmiştir.

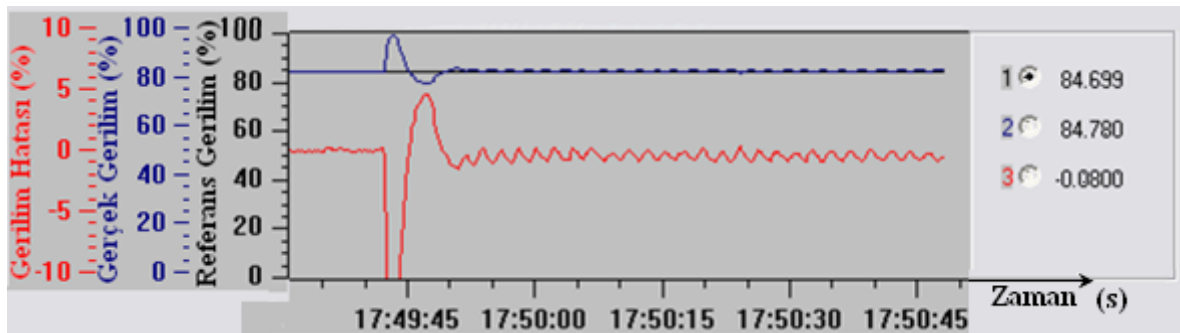


Şekil 5.36. 750 W-750 Var yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

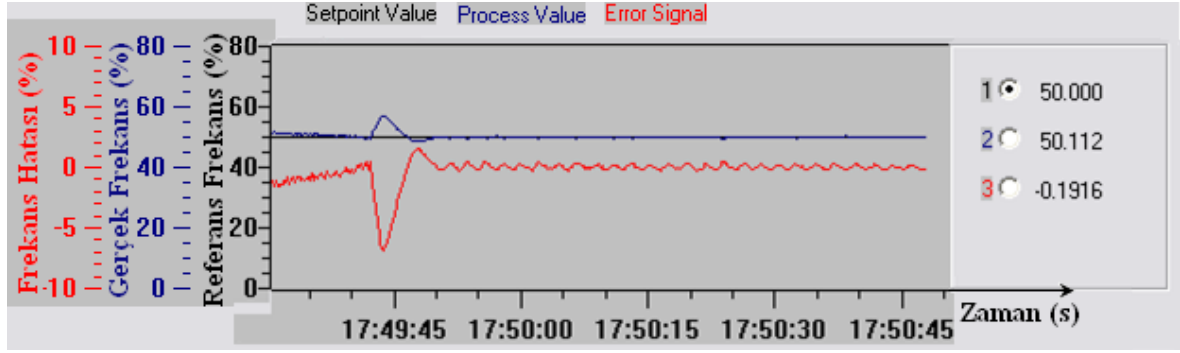


Şekil 5.37. 750 W-750 VAr yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'den 750 W ve 750 VAr yükün kalkması durumunda; gerilimdeki değişim, Şekil 5.38'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.39'da verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 71,78 V (%18,89), aşma ise 24,68 V (%6,49) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 6,5 Hz (%13), maksimum aşma 1,9 Hz (%3,8)'dir.

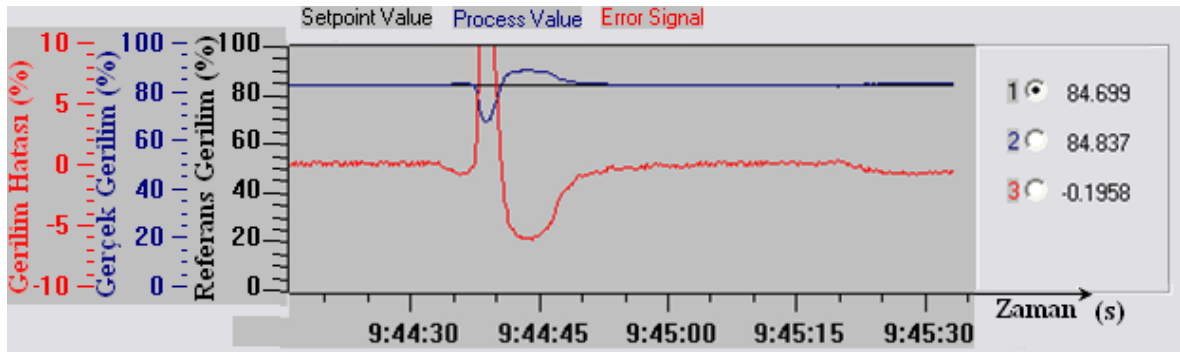


Şekil 5.38. 750 W-750 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

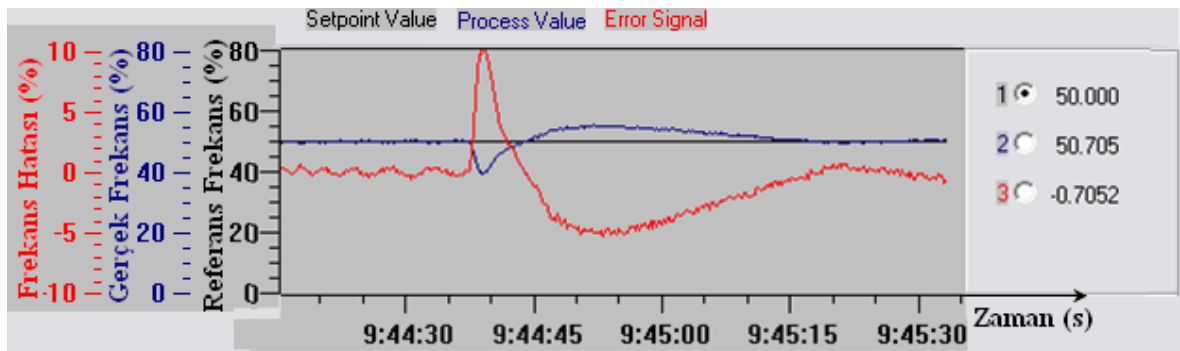


Şekil 5.39. 750 W-750 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'ün 1500 W (nominal aktif güce oranı %30) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.40'da, frekanstaki değişim ise Şekil 5.41'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 65,95 V (%17,36), aşma ise 26,02 V (%6,85) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 10 Hz (%20), maksimum aşma 5 Hz (%10)'dir.

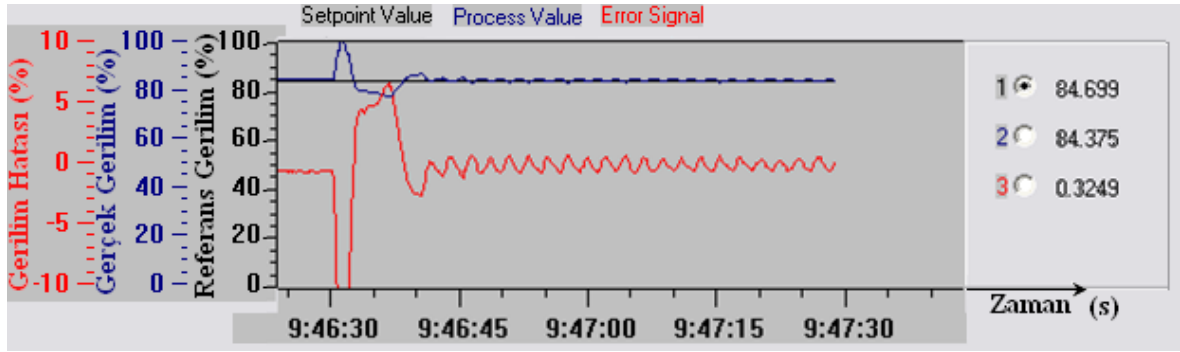


Şekil 5.40. 1500 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

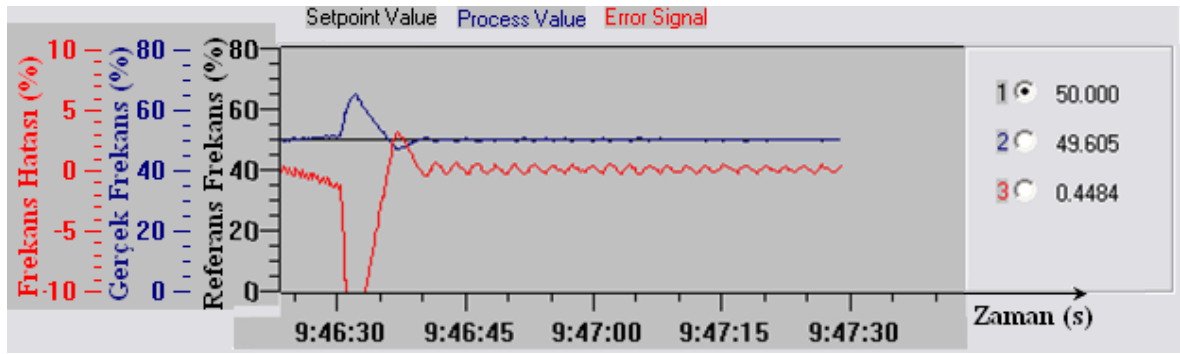


Şekil 5.41. 1500 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'den 1500 W yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.42'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.43'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 74,03 V (%19,48), aşma ise 30,96 V(% 8,15) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 15 Hz (%30), maksimum aşma 3,2 Hz (%6,4)'dir.

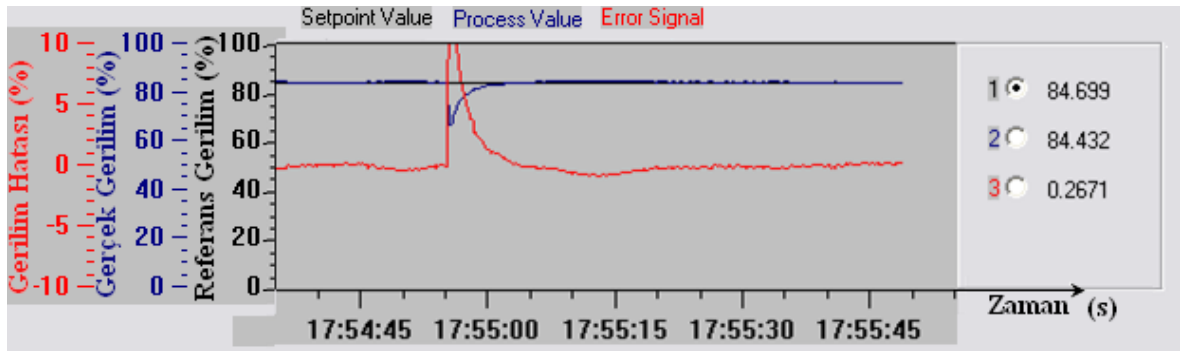


Şekil 5.42. 1500 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

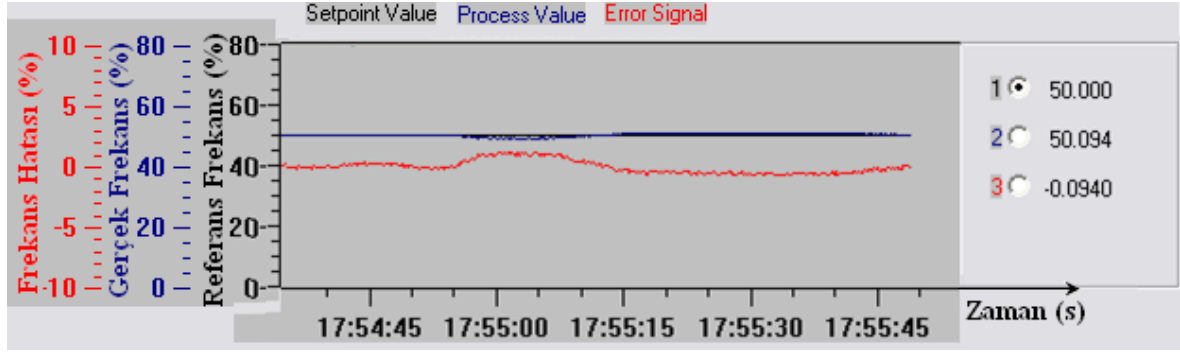


Şekil 5.43. 1500 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'ün 1500 VAR (nominal reaktif güce oranı %40) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.44'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.45'de verilmiştir. Gerilim değerinde çökme 65,95 V (%17,36) ve 26,02 V(%6,85)'luk bir aşma olmuş iken frekansta ise 1 Hz (%2)'lik değişim görülmüştür.

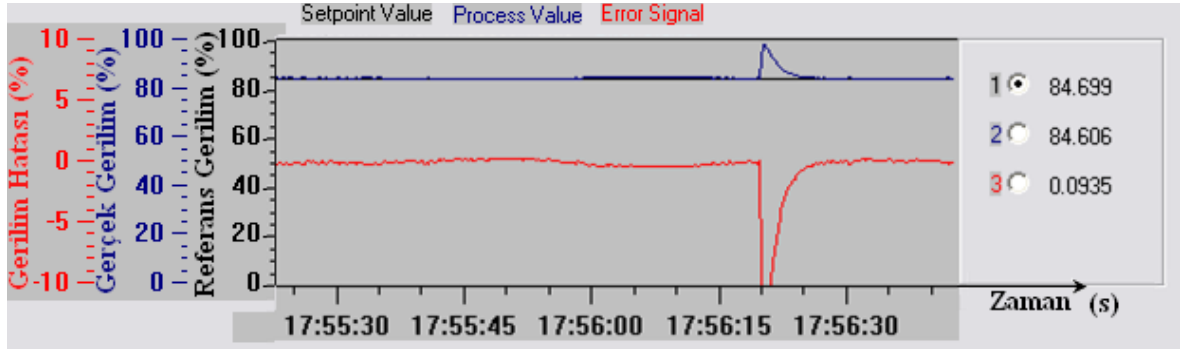


Şekil 5.44. 1500 VAR yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

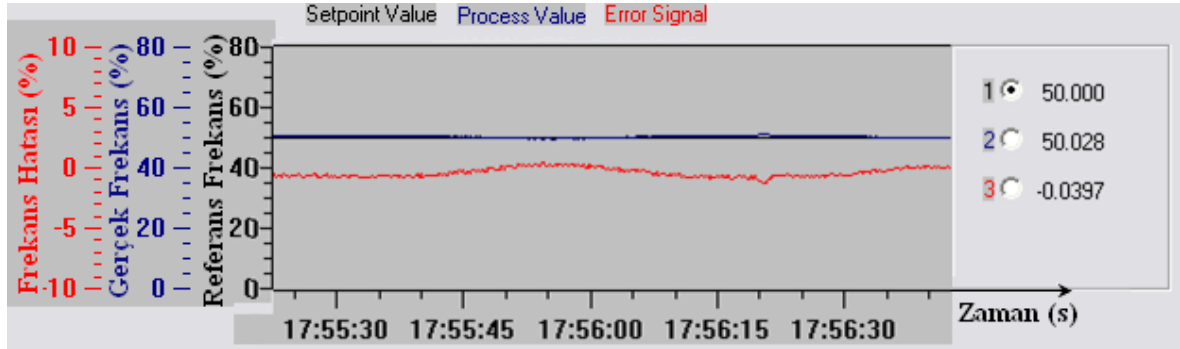


Şekil 5.45. 1500 VAR yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'den 1500 Var'lık yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.46'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.47'de verilmiştir. Gerilim değerinde 76,27 V (%20,07) aşma görülürken iken frekansta ise 1 Hz (%2)'lik bir dalgalanma görülmüştür.

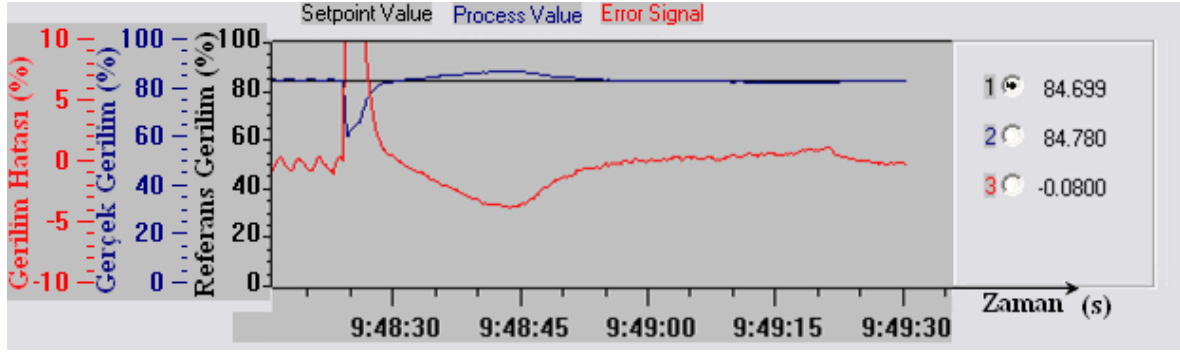


Şekil 5.46. 1500 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

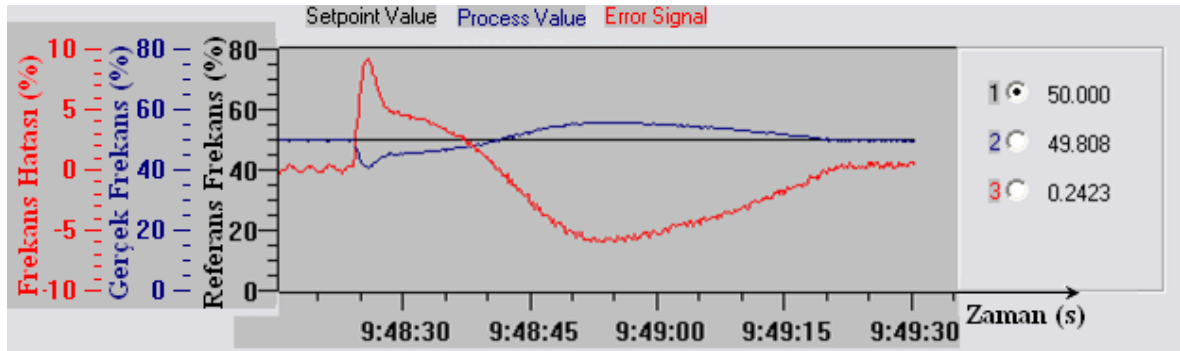


Şekil 5.47. 1500 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'ün 1500 W ve 1500 VAR (nominal görünür güce oranı %34) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.48'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.49'da verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 94,21 V (%24,79) aşma ise 14,36 V (%3,78) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 9 Hz (%18), maksimum aşma 5,8 Hz (%11,6) 'dir.

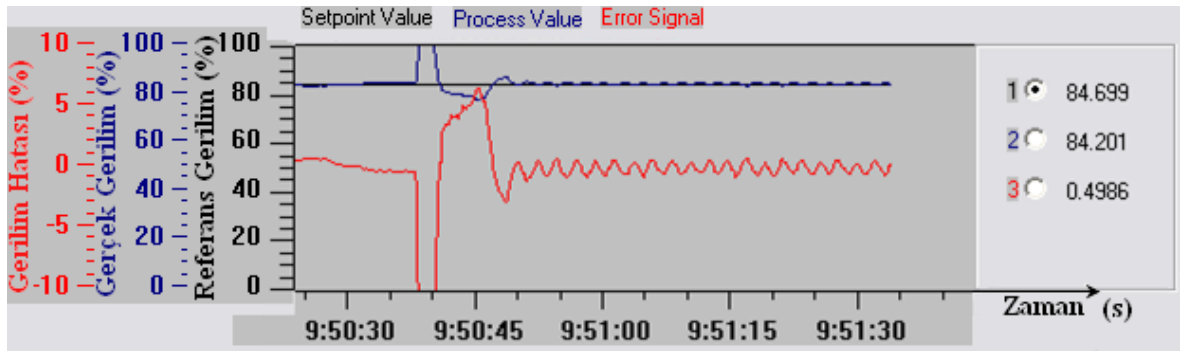


Şekil 5.48. 1500 W-1500 VAR yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)

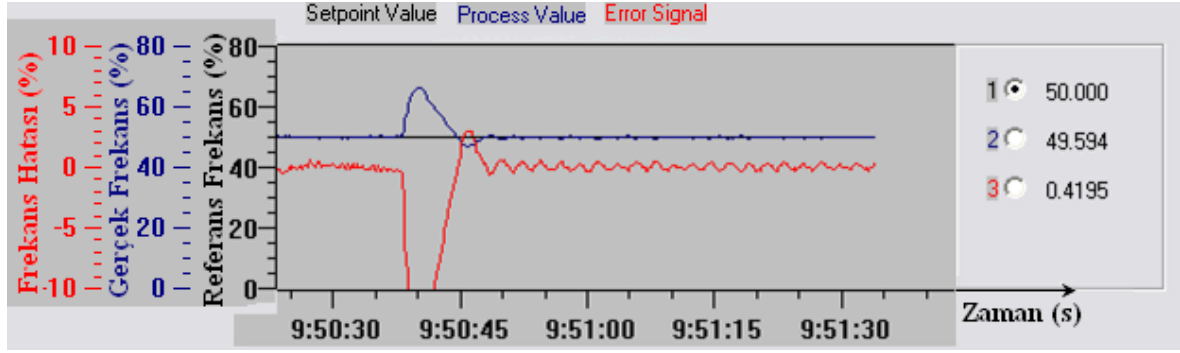


Şekil 5.49. 1500 W-1500 VAR yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

SG'den 1500 W ve 1500 VAR yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.50'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.51'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 27,82 V (%7,32), aşma ise 103,19 V (%27,15) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 3 Hz (%6), maksimum aşma 16 Hz (%32)'dir.



Şekil 5.50. 1500 W-1500 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-1)



Şekil 5.51. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-1)

Tablo 5.2. Generatörün yükleme durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-1)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	Hz	%	Hz	%
750 W	3	6	5.3	10.6
750 W-750 VAr	3	6	4.8	9.6
1500 W	5	10	10	20
1500 W-1500 VAr	5.8	11.6	9	18

Tablo 5.3. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-1)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	Hz	%	Hz	%
750 W	6.4	12.8	1.8	3.6
750 W-750 VAr	6.5	13	1.9	3.8
1500 W	15	30	3.2	6.4
1500 W-1500 VAr	16	32	3	6

Tablo 5.4. Generatörün yükleme durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-1)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	V	%	V	%
750 W	13.46	3.54	35.89	9.45
750 VAr	0.00	0.00	35.89	9.45
750 W-750 VAr	8.97	2.36	53.84	14.17
1500 W	26.02	6.85	65.95	17.36
1500 VAr	0.00	0.00	76.27	20.07
1500 W-1500 VAr	14.36	3.78	94.21	24.79

Tablo 5.5. Generatörden yük kalkması durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-1)

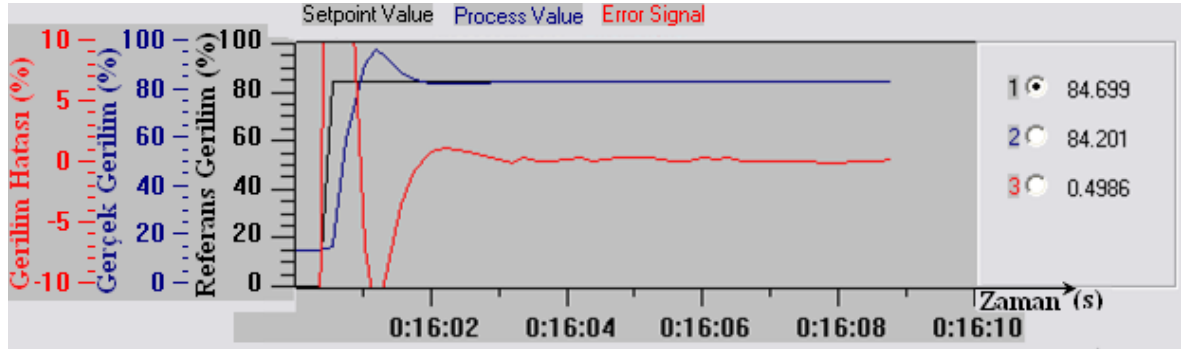
Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	V	%	V	%
750 W	39.03	10.27	22.43	5.90
750 VAr	33.65	8.85	0.00	0.00
750 W-750 VAr	71.78	18.89	24.68	6.49
1500 W	74.03	19.48	30.96	8.15
1500 VAr	76.27	20.07	0.00	0.00
1500 W-1500 VAr	103.19	27.15	27.82	7.32

Tablo 5.2’de generatörün yüklenmesi durumunda ve Tablo 5.3’de ise yük kalkması durumunda frekanstaki, maksimum aşma ve çökmeler toplu halde verilmiştir. Yine Tablo 5.4’de generatörün yüklenmesi durumunda ve Tablo 5.5’de ise yük kalkması durumunda gerilimdeki maksimum aşma ve çökmeler verilmiştir.

Tablolardan görüldüğü gibi omik yükün etkisi hem gerilim hem frekans üzerinde ciddi miktarda iken indüktif yükü etkin olarak büyük oranda gerilimi etkilemektedir. Generatörün uyartım akımı yardımcı uyartıcı ile sağlandığı için uyartım devresinin gücü milden elde edilmektedir. Bu da indüktif yükle yüklendikçe azda olsa frekansta bir etki oluşturmuştur. Eğer uyartım akımı harici bir kaynaktan bilezikler aracılığı ile asıl alan sargısına verilirse bu etki daha da düşecektir.

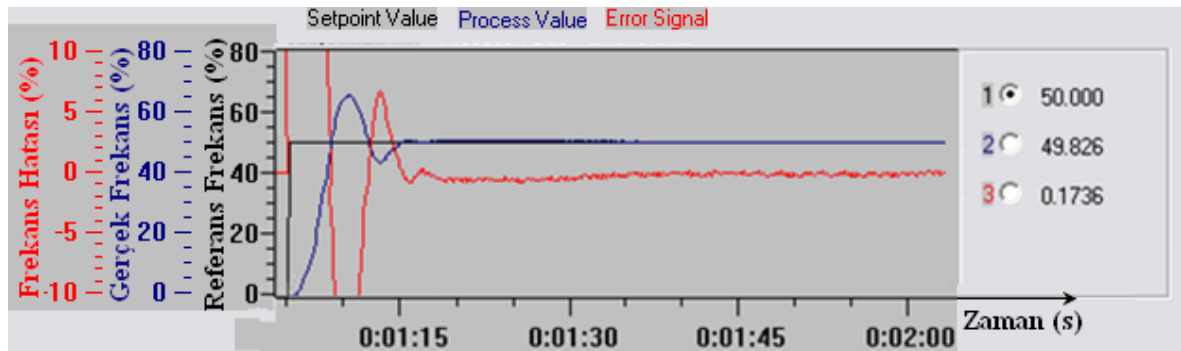
5.2.2. Yöntem 2'ye Göre Yapılan Frekans ve Gerilim Kontrolü

Şekil 5.52'de gerilim kontrolünün klasik PI ile yapıldığı durumda gerilim birim basamak cevabı verilmiştir.



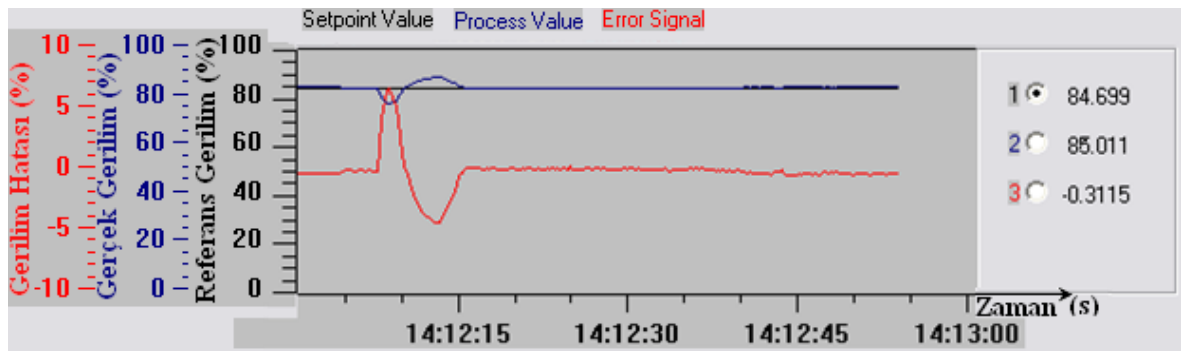
Şekil 5.52. Yöntem-2 ile birim basamak gerilim cevabı

Şekil 5.53'de ise adaptif kontrolörlü yapının frekans birim basamak cevabı verilmiştir.

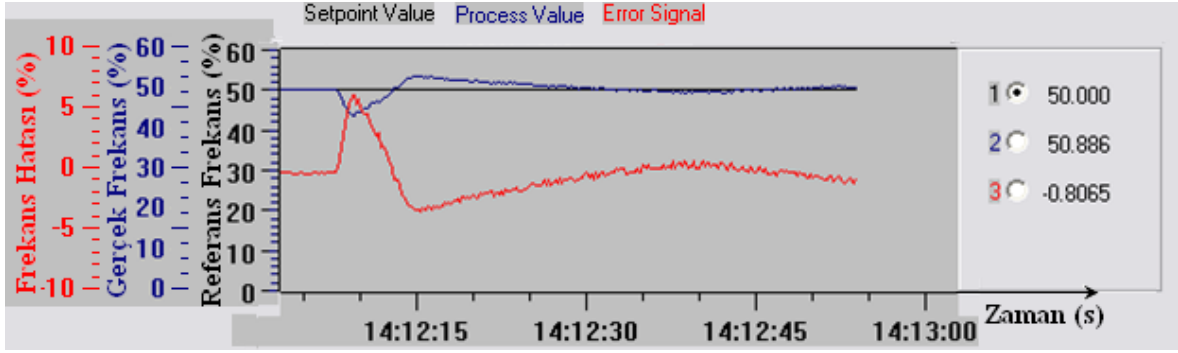


Şekil 5.53. Yöntem-2 ile birim basamak frekans cevabı

SG'ün 750 W (nominal aktif güce oranı %15) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.54'da, frekanstaki değişim ise Şekil 5.55'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 31,40 V (%8,26), aşma ise 17,95 V (%4,72) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 5,1 Hz (%10,2), maksimum aşma 2 Hz (%4)'dir.

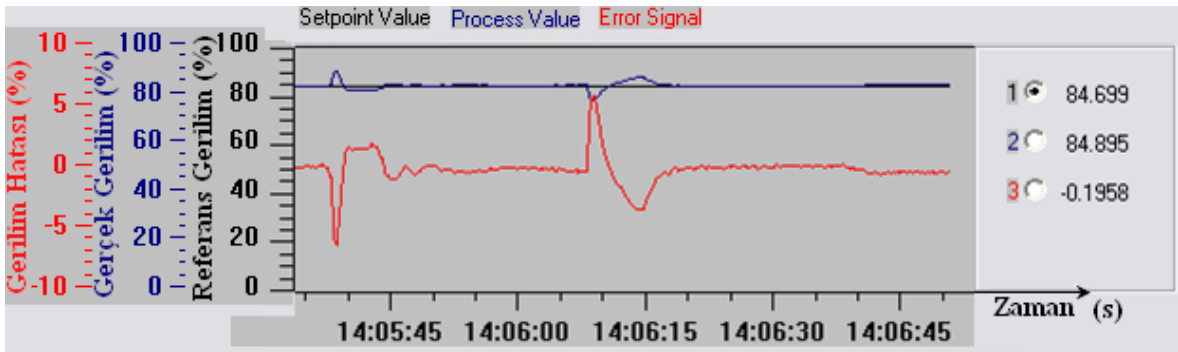


Şekil 5.54. 750 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

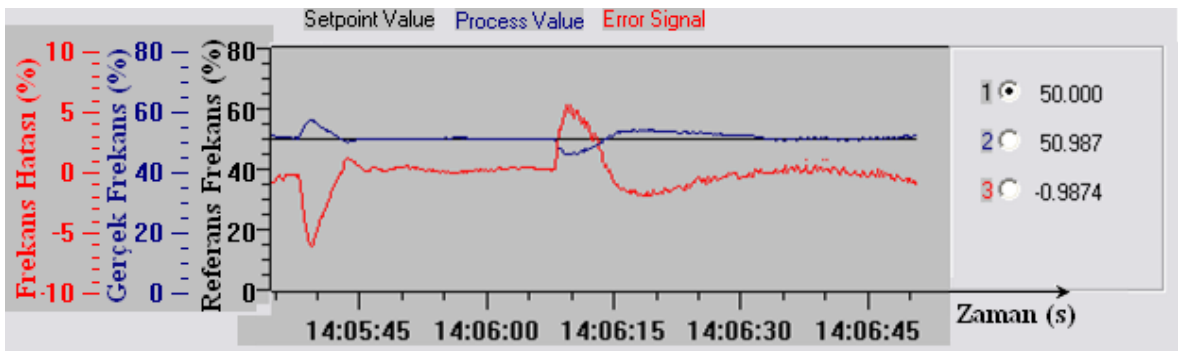


Şekil 5.55. 750 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 750 W yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.56'da, frekanstaki değişim ise Şekil 5.57'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 8,97 V (%2,36), aşma ise 26,92 V (%7,08) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 1 Hz (%2), maksimum aşma 6,2 Hz (%12,4) 'dir.

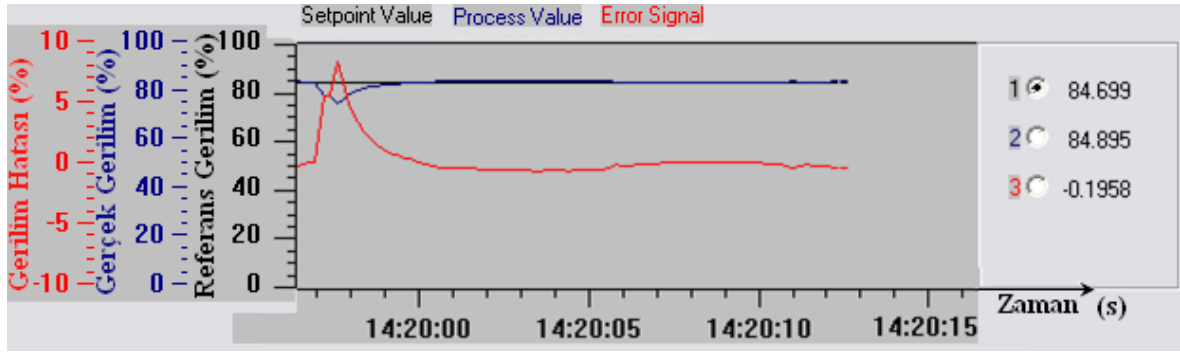


Şekil 5.56. 750 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

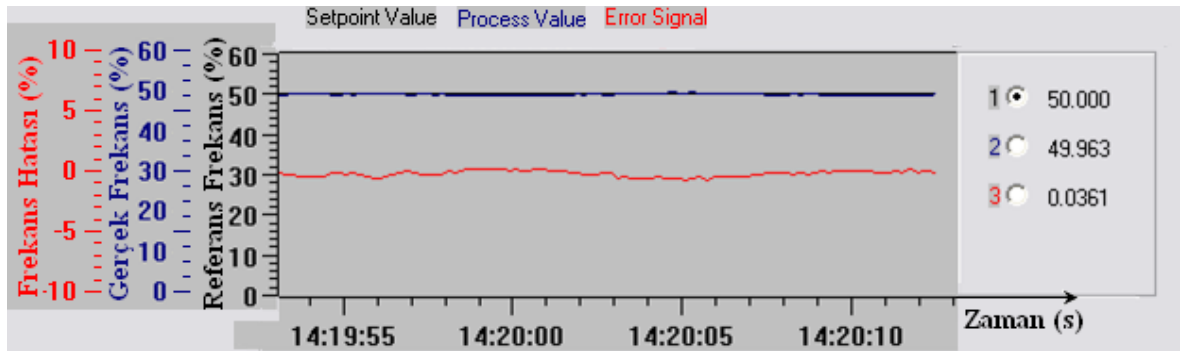


Şekil 5.57. 750 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'ün 750 VAR (nominal reaktif güce oranı %20) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.58'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.59'da verilmiştir. Gerilimde maksimum çökme 38,13 V (%10,04) ve 4,49 V (%1,18) aşma olmuştur. Frekansta ise nerdeyse hiç değişim görülmemiştir.

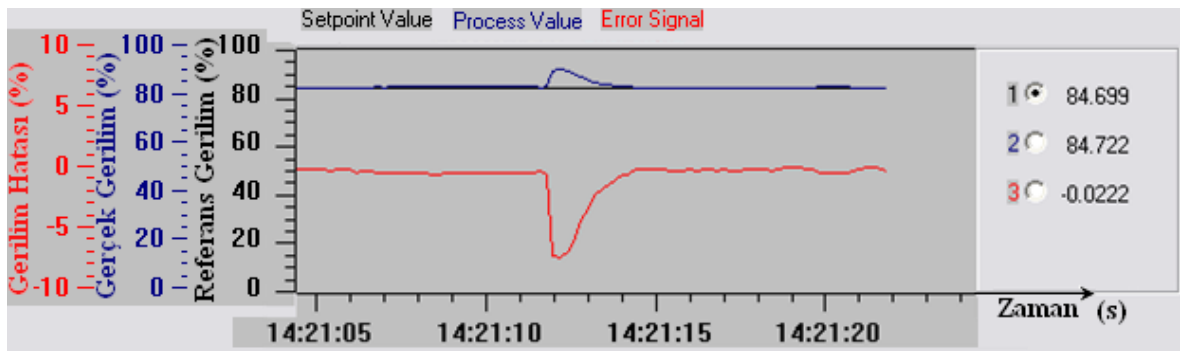


Şekil 5.58. 750 VAR yüklenme durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

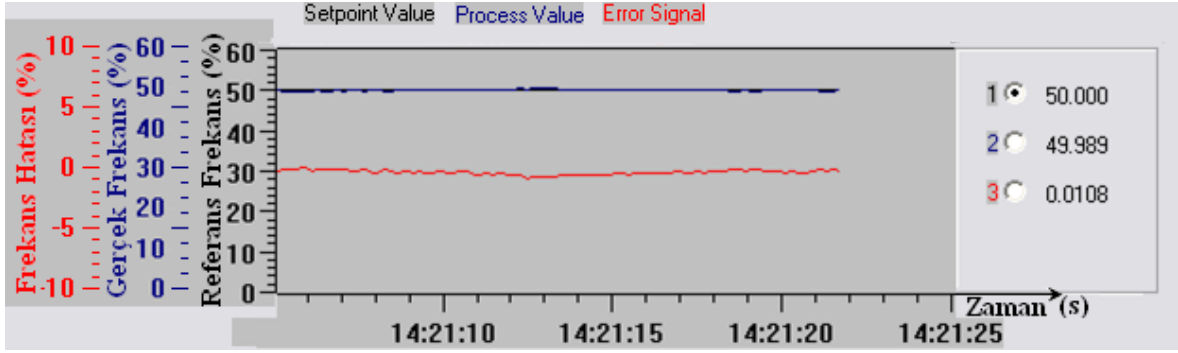


Şekil 5.59. 750 VAR yüklenme durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 750 Var'lık yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.60'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.61'de verilmiştir. Gerilim değerinde 31,40 V (%8,26) aşma görülürken, frekansta ise nerdeyse hiç değişim görülmemiştir.

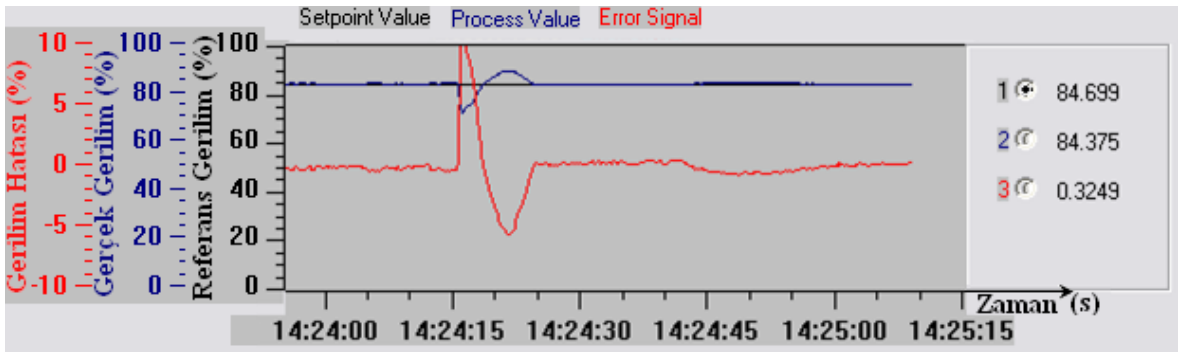


Şekil 5.60. 750 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

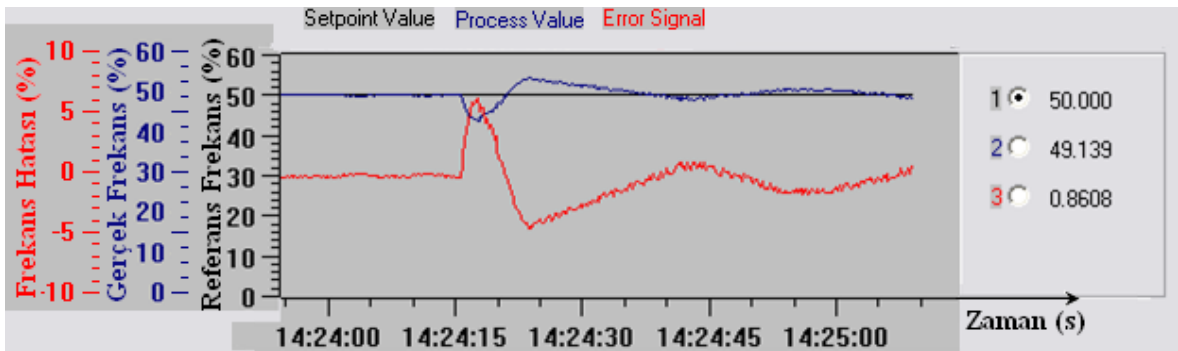


Şekil 5.61. 750 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'ün 750 W ve 750 VAR (nominal görünür güce oranı %17) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.62'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.63'de verilmiştir. Gerilim değerindeki hem maksimum çökme hemde aşma 22,43 V (%5,90) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 6,2 Hz (%12,4), maksimum aşmanın 3 Hz (%6)'dır.



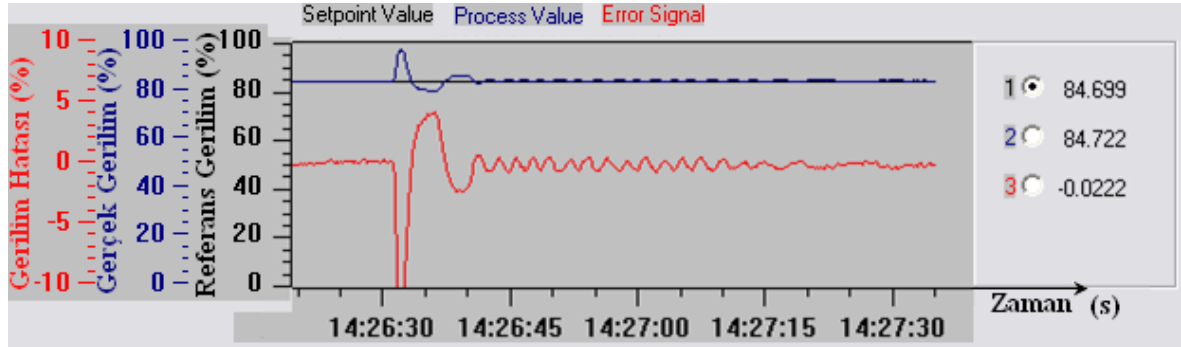
Şekil 5.62. 750 W-750 VAR yüklenme durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)



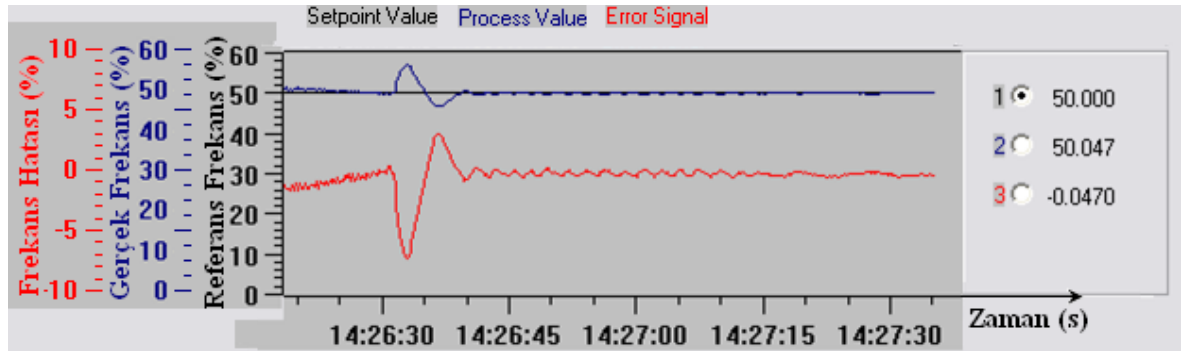
Şekil 5.63. 750 W-750 VAR yüklenme durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 750 W ve 750 VAR yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.64'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.65'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum

çökme 17,95 V (%4,72), aşma ise 47,11 V(%12,4) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 3 Hz (%6), maksimum aşmanın 7 Hz (%14)'dir.

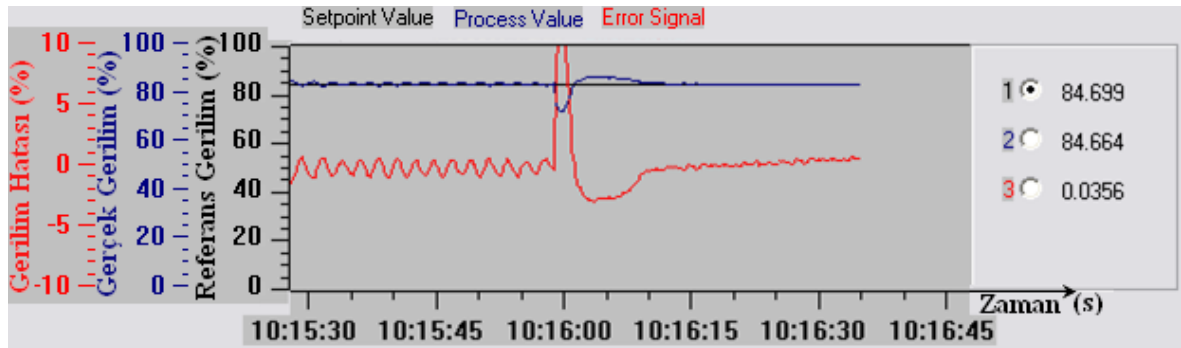


Şekil 5.64. 750 W-750 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

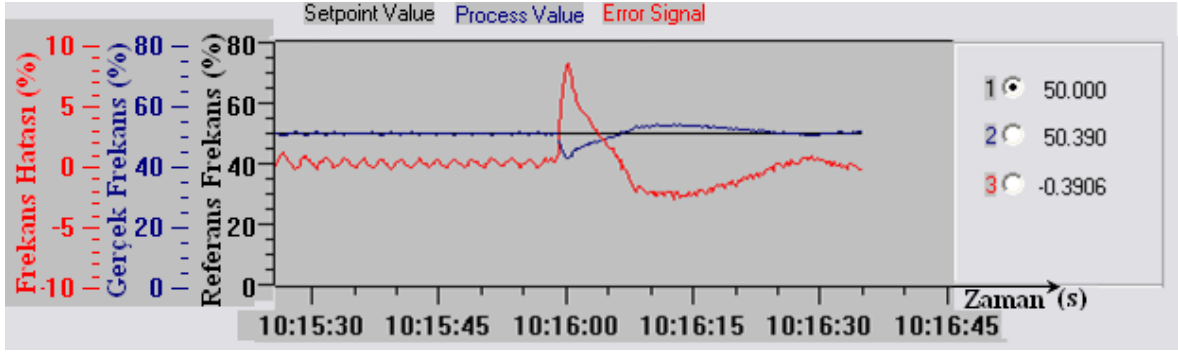


Şekil 5.65. 750 W-750 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'ün 1500 W (nominal aktif güce oranı %30) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.66'da, frekanstaki değişim ise Şekil 5.67'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 47,11 V (%12,4), aşma ise 11,12 V (%2,95) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 8,2 Hz (%16,4), maksimum aşmanın 4 Hz (% 8) 'dir.

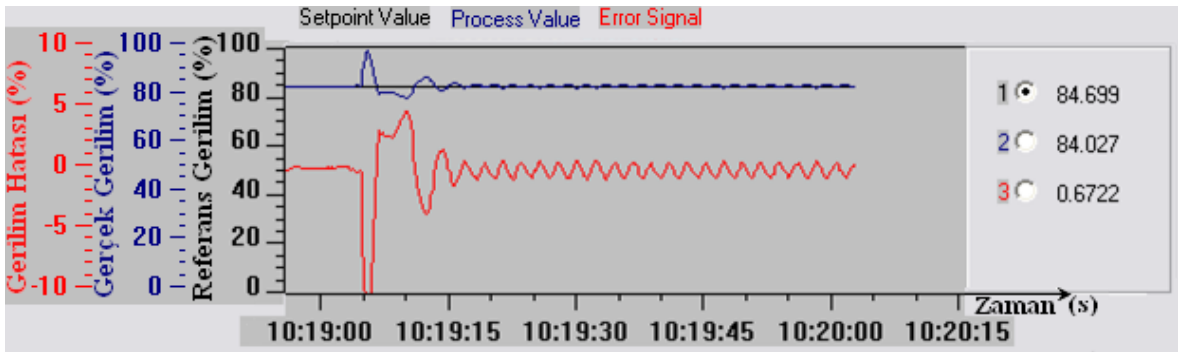


Şekil 5.66. 1500 W yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

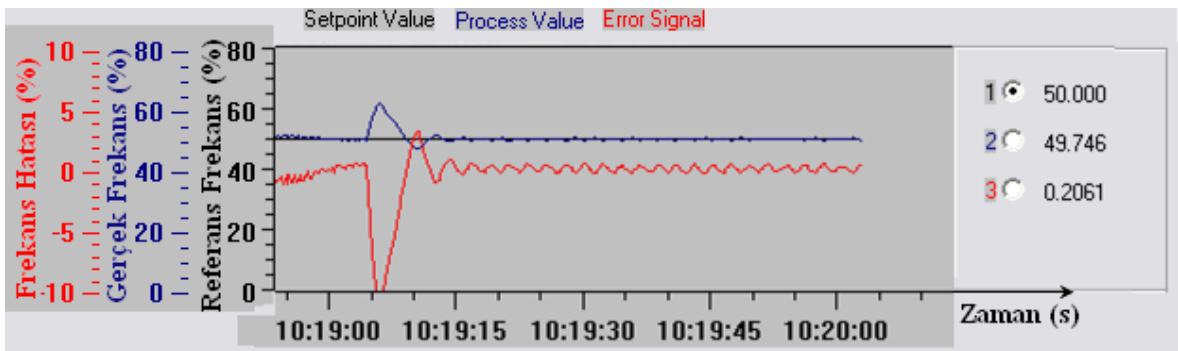


Şekil 5.67. 1500 W yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 1500 W yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.68'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.69'da verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 22,43 V (%5,9), aşma ise 49,35 V (%12,99) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 3 Hz (%6), maksimum aşmanın 10 Hz (%20)'dir.

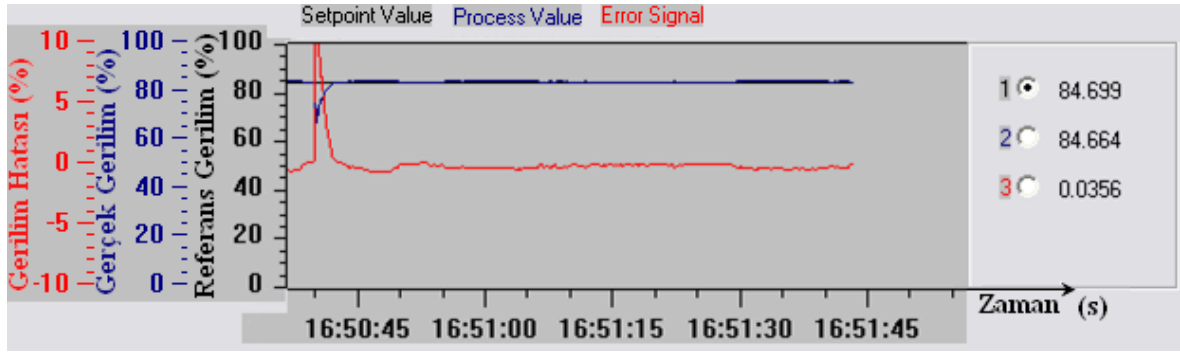


Şekil 5.68. 1500 W yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

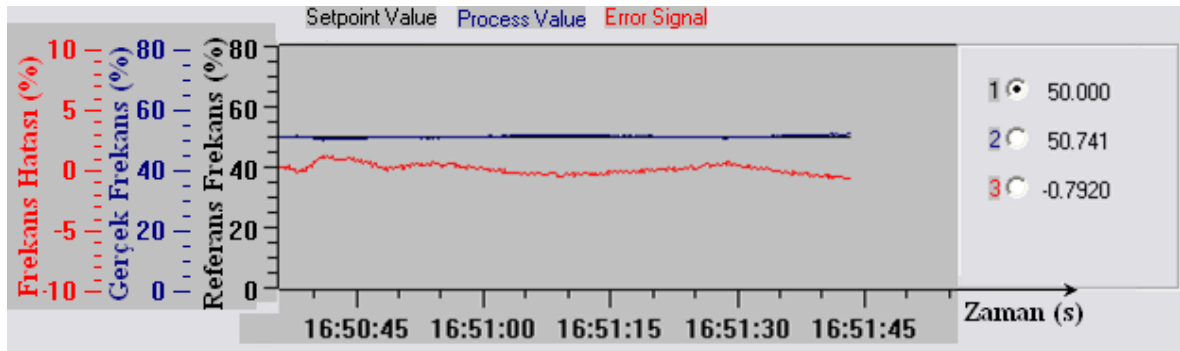


Şekil 5.69. 1500 W yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'ün 1500 VAR (nominal reaktif güce oranı %40) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.70'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.71'de verilmiştir. Gerilim değerinde çökme 58,32 V (%15,35) ve 2,24 V (%0,59)'luk bir aşma olmuş iken frekansta ise 1 Hz'lik (%2) değişim görülmüştür.

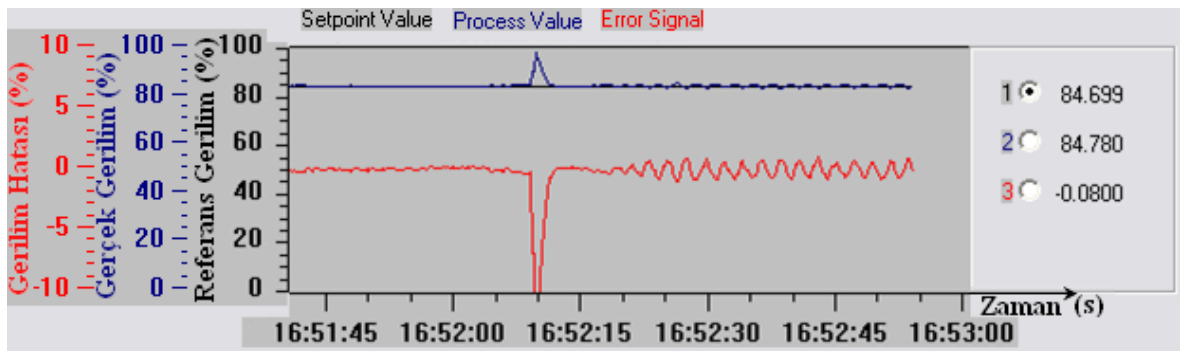


Şekil 5.70. 1500 VAR yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

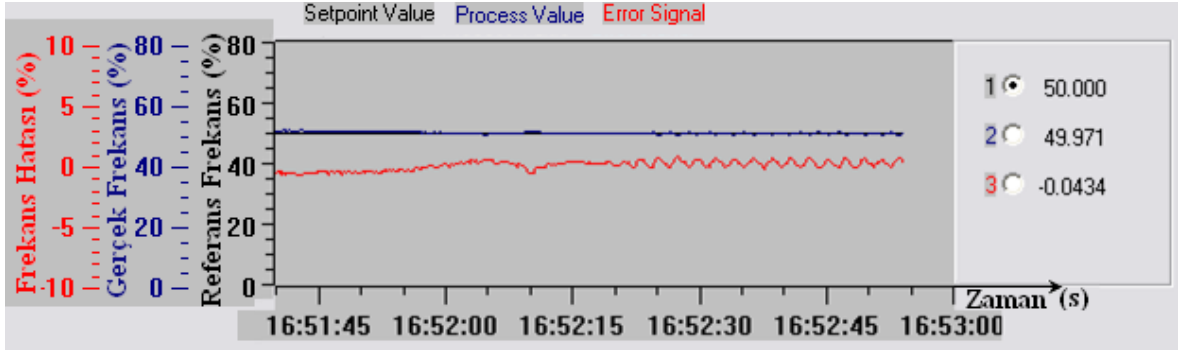


Şekil 5.71. 1500 VAR yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 1500 Var'lık yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.72'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.73'de verilmiştir. Gerilim değerinde 53,84 V (%14,17) aşma görülürken iken frekansta ise 1 Hz (%2)'lik bir dalgalanma görülmüştür.

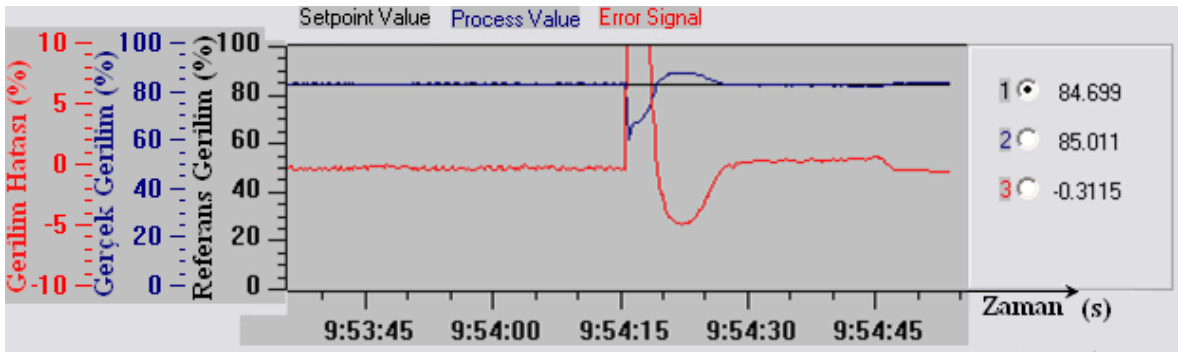


Şekil 5.72. 1500 VAR yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)

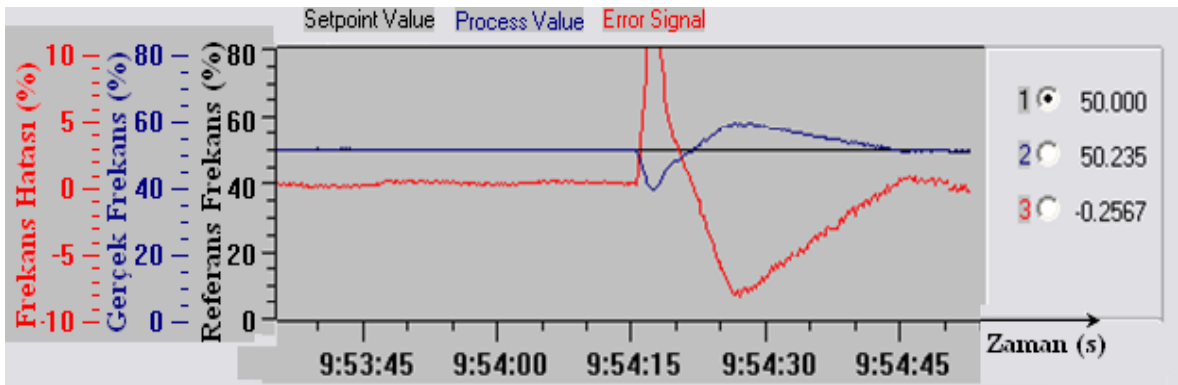


Şekil 5.73. 1500 VAR yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'ün 1500 W ve 1500 VAR (nominal görünür güce oranı % 34) ile yüklenmesi durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.74'te, frekanstaki değişim ise Şekil 5.75'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum çökme 89,73 V (%23,61) aşma ise 22,43 V (%5,9) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 12 Hz (%24), maksimum aşmanın 4,8 Hz (%9,6) 'dir.



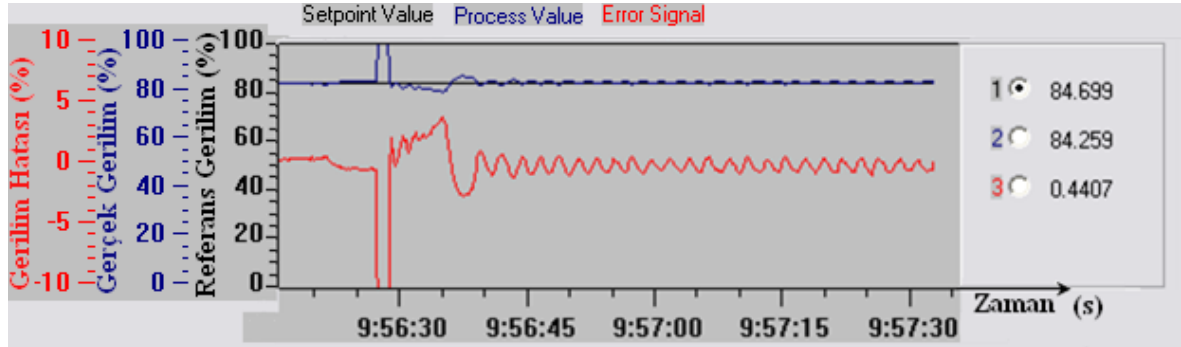
Şekil 5.74. 1500 W-1500 VAR yüklenmesi durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)



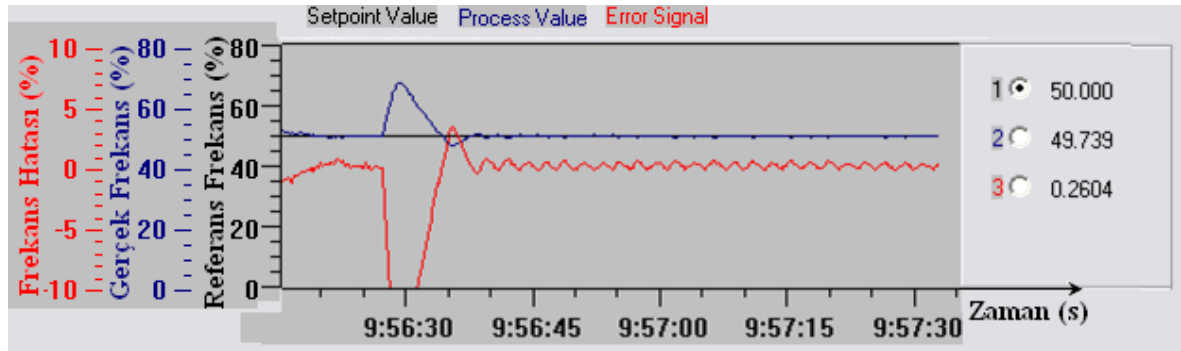
Şekil 5.75. 1500 W-1500 VAR yüklenmesi durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

SG'den 1500 W ve 1500 VAR yükün kalkması durumunda gerilimdeki değişim Şekil 5.76'de, frekanstaki değişim ise Şekil 5.78'de verilmiştir. Gerilim değerindeki maksimum

çökme 17,95 V (%4,72), aşma ise 112,16 V (%29,52) olmuştur. Frekansta ise maksimum çökme 3,5 Hz (%7), maksimum aşmanın 16 Hz (%32) 'dir.



Şekil 5.76. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda gerilim cevabı (Yöntem-2)



Şekil 5.77. 1500 W-1500 VAr yük kalkması durumunda frekans cevabı (Yöntem-2)

Tablo 5.6'de generatörün yüklenmesi durumunda ve Tablo 5.7'de ise yük kalkması durumunda frekanstaki, maksimum aşma ve çökmeler toplu halde verilmiştir. Yine Tablo 5.8'de generatörün yüklenmesi durumunda ve Tablo 5.9'de ise yük kalkması durumunda gerilimdeki maksimum aşma ve çökmeler verilmiştir.

Tablo 5.6. Generatörün yükleme durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	Hz	%	Hz	%
750 W	2	4	5.1	10.2
750 W-750 VAr	3	6	6.2	12.4
1500 W	4	8	8.2	16.4
1500 W-1500 VAr	4.8	9.6	12	24

Tablo 5.7. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	Hz	%	Hz	%
750 W	6.2	12.4	1	2
750 W-750 VAr	7	14	3	6
1500 W	10	20	3	6
1500 W-1500 VAr	16	32	3.5	7

Tablo 5.8. Generatörün yükleme durumları için gerilimdeki değişimler (Yöntem-2)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	V	%	V	%
750 W	17.95	4.72	31.40	8.26
750 VAr	4.49	1.18	38.13	10.04
750 W-750 VAr	22.43	5.90	22.43	5.90
1500 W	11.22	2.95	47.11	12.40
1500 VAr	2.24	0.59	58.32	15.35
1500 W-1500 VAr	22.43	5.90	89.73	23.61

Tablo 5.9. Generatörden yük kalkması durumları için frekanstaki değişimler (Yöntem-2)

Yük Miktarı	Maksimum Aşma		Maksimum Çökme	
	V	%	V	%
750 W	26.92	7.08	8.97	2.36
750 VAr	31.40	8.26	0.00	0.00
750 W-750 VAr	47.11	12.40	17.95	4.72
1500 W	49.35	12.99	22.43	5.90
1500 VAr	53.84	14.17	0.00	0.00
1500 W-1500 VAr	112.16	29.52	17.95	4.72

Tablolardan görüldüğü gibi omik yükün etkisi asıl olarak frekansa bunun etkisi nedeni ile gerilimdir. Ama indüktif yük etkin olarak büyük oranda gerilimi etkilemektedir. Generatörün uyarım akımı yardımcı uyarıcı ile sağlandığı için uyarım devresinin gücü milden elde edilmektedir. Bu da indüktif yükü yüklendikçe azda olsa frekansta bir etki oluşturmuştur. Generatör yüksüz duruma geçtiğinde frekansında bir salınım gözlenmektedir. Bunun sebebi, yüksüz durumdaki iğne açıklığı çok küçük bir değerdir ve sınır anahtara çok yakındır. Sınır anahtarların devreye girerek doğrusal hareketlendiriciyi durdurması ile bu salınım oluşmaktadır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Münferit olarak bakıldığında gücü az olan ÇKHES'lerin uygun her yerde rahatça kurulabilmesi nedeni ile sayıları oldukça yüksek olabilmektedir. Dolayısı ile bu santrallerden elde edilen toplam enerji miktarı da hatırı sayılır olacaktır. Bu nedenle ülkemizde de ÇKHES üzerinde ciddi durulmalıdır.

ÇKHES'lerin kullanımına uygun hidrolik enerji potansiyellerinin tam olarak değerlendirilmemiş olması ülkemiz ve dünyada yaygın bir durumdur. Bu tez çalışmasında, yeni yeni hukuki altyapısı oluşturulan bu konunun akademik olarak incelenmesi, bunların uygulanması ve kontrolü üzerinde durulmuştur.

Yapılan bu çalışmada, pelton türbinli HES'lerde bulunan hidrolik, mekanik ve elektriksel sistemin özelliklerini bünyesinde barındıran bir ÇKHES prototipi ile yeni kontrol sistemlerinin gerçekleştirilmesi mümkün olmuştur.

Gerçekleştirilen bu prototipte cebri boruya basınçlı suyu sağlayan kademeli pompa her ne kadar istenilen basıncı verecek şekilde çalışsa da basıncın değeri sabit olmamakta ve yaklaşık olarak ± 1 bar bandında değişmektedir. Bu da türbin miline etki eden kuvvette bir değişime neden olmakta ve frekans kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu basınç değişiminin etkisi basınç sabitleyici ile kısmen azaltılsa da tam olarak önlenememiştir. Böyle bir prototip üzerinde basınç sabitleyici kullanılmasının en temel nedeni olabilecek basınç değişimleri öngörüsü olmuştur. Sonuçta bu öngörünün doğruluğu ortaya çıkmıştır. Bu tür çalışmalarda basınç sabitleyici kullanmak bu çalışmanın özgünlüklerinden birisidir.

Ayrıca prototip sistemini ulusal şebekeye paralel bağlayacak olan senkronoskop cihazında kullanılan programlama mantığı ile neredeyse sıfır aktif güç akışı (Isochronous) ile paralele girme olayı gerçekleştirilebilmiştir.

SG'lerin frekans kontrolü üzerine yapılan benzetim çalışmalarında, frekans kontrolünün hidrolik, pnömatik ya da mekanik sistemle değil de elektriksel cihazlarla yapılmasının avantajlı olacağı önerilmiştir. Çalışma bölgesine uygun olarak oluşturulan prototip ÇKHES'te elektriksel olarak kontrol edilebilen doğrusal hareketlendirici kullanılarak literatürde benzetimlerle yapılan bu tip bir kontrol gerçekleştirilmiştir. Yalnız burada kullanılan cihazlar, zaten nonlineer bir yapısı olan sisteme daha fazla nonlineerlik katmamalıdır. Ayrıca, iğneyi hareket ettiren cihazın yenmesi gereken kuvvet iyi hesap

edilmeli ve buna göre seçilen cihazın kuvveti uygun seçilmeli çok büyük bir değer seçilmemlidir. Aksi takdirde zaten nonliner olan sisteme ek nonlineerlik katılır. Bu da kontrolü zorlaştırır. Kullanılacak olan cihazın hızının çok yüksek olması aslında avantaj gibi görölse de klasik kontrol uygulamalarında bu dezavantaja dönüşmektedir. Yeni kontrol stratejilerinde bu avantajdan yararlanabileceği ortaya çıkmıştır.

Kısmi olarak sayısal benzetimi gerçekleştirilen sistemde, Pelton türbinin nonlineer modeli kullanılmıştır. Literatürde hidrolik türbin nonlineerliğini ortadan kaldırmak ya da sisteme katmak için değişik yöntemler uygulanmaktadır. Gerçekleştirilen sayısal benzetim, literatürden farklı olarak türbinin verim eğrisinin modele eklenmesiyle herhangi bir parametre hesabına ya da varsayıma gerek duymaksızın gerçeğine en uygun hale getirilmiştir.

Gerçekleştirilen prototip ÇKHES'deki SG gerilim kontrolünü frekanstan bağımsız hale getirmek için bilezikli uyarımı kullanmanın daha iyi olduğu görölmüştür. Burada uyarım akımının büyüklüğü nedeni ile kıyıcı devresinde kullanılan güç anahtarının büyük akımlara dayanıklı seçilmesi gereklidir. Boşta çalışma durumu göz önüne alındığında, bilezikli uyarım kullanıldığında kaynaktan 105 W'lık bir güç çekilmektedir. Aynı durumda yardımcı uyarıcı devre kullanıldığında kaynaktan çekilen güç 31,8 W olmaktadır. Dolayısı ile tahrik sisteminden ciddi bir güç sağlanmaktadır. Yapılan çalışmada uyarım devresi için kullanılan kaynak, harici bir DA kaynaktır. Bu nedenle bilezikli uyarım ile yardımcı uyarıcılı kullanılması arasında mile etkiyen zıt moment aynı olmamaktadır. Yardımcı uyarıcılı sistemle kontrol yapıldığında hızda ciddi düşüşler olmaktadır. Eğer uyarım gücü generatörden sağlansa idi, sistem lokal çalışsa bile frekans kontrolüne etkisi aynı olacaktır. Uygulamada HES'lerde uyarım devresinin gücünü ayrı bir kaynaktan çekmek yerine generatörden sağlama yolu tercih edilmektedir. Dolayısı ile büyük akımları kıymak yerine küçük akımları kıymak daha uygun olacağından yardımcı uyarıcılı sistem tercih edilebilir.

Gerilim kontrolü, klasik PI ve PID ile bulanık mantık destekli adaptif PI ve PID, PLC ile gerçekleştirilmiştir. Klasik kontrolörlere göre adaptif kontrolün daha iyi sonuçlar verdiği görölmüştür. Gerçekleştirilen klasik kontrolde çevrim süresi 4-5 ms civarında iken, adaptif kontrolde 15-17 ms civarında olduğu görölmüştür. Bunun en önemli sebebi bulanık mantık denetleyicisinin sürekli klasik kontrolörle birlikte çalışmasıdır. Bu da çevrim süresini uzun olması sonucu doğurmakta ve kontrolör performansını olumsuz etkilemektedir.

Frekans kontrolünde elektrikli doğrusal hareketlendiricinin kullanılması ile birlikte iyi sonuçlar beklenirken, klasik kontrolde sistemde ciddi miktarda salınımlar olduğu görülmüştür. Bunun sistemdeki nonlineerlik ve sistem ataletinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Klasik kontrolör olarak PI ve PID denenmiştir. Basınçtaki değişim bandının momente, dolayısı ile hıza yani frekansa etki etmesi nedeni ile, böyle bir sistemde kontrolöre türev eklendiğinde kontrolör çok kötü bir cevap vermektedir. Bu nedenle frekans kontrolünde PID denenmiş, ama sonuçları alınmamıştır. PI kontrol PID ye göre daha iyi cevap verse de yeterli olmadığı görülmüştür. Dolayısı ile klasik kontrolün tek başına performansının iyi olmadığı, başka bir yöntem veya bu yöntemde düzeltme yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bunun üzerine ayrıntısı 5. bölümde anlatılan YED tekniği sisteme eklenmiş, sonuçlarda düzelme olduğu görülmüştür. Bu aşamadan sonra bulanık mantık denetleyicisinin kullanılmasının problemin ve sistemin özelliğine daha uygun olduğu görülmüş, klasik kontrole destek olarak bulanık mantık denetleyicisi sisteme eklenmiş ve kontrol yapısı adaptif hale getirilmiştir. Sonuçların ilk duruma göre çok düzeldiği görülmüş ve ilgili sonuçlar 5. bölümde verilmiştir. Ayrıca anahtarlama yapı kullanıldığı için hem gerilim hem frekans kontrolü yapılmasına rağmen, ortalama 6-9 ms civarında bir çevrim süresi ortaya çıkmıştır. Sistem adaptif bir yapıya kavuşurken çevrim süresinde klasik kontrole göre ciddi bir fark ortaya çıkmamıştır. Bu sürenin çok artmamasının bir diğer nedeni, bulanık mantık denetleyicisinin giriş üyelik fonksiyon sayısı ve kural tablosunun getirmiş olduğu yükün, hatanın mutlak değeri üzerinden işlem yapıldığı için yarı yarıya azaltılmış olmasıdır. Yapılan bu kontrollerde generatör yüklendikçe sistemdeki mekanik titreşimler artmakta, bu durum ise hız algılayıcısının hatalı ölçüm yapmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak bu da kontrolörün performansına olumsuz etki etmektedir.

6.2. Öneriler

Yapılan tez çalışması sürecinde ortaya çıkan ve sonraki çalışmalarda ele alınabilecek çeşitli araştırma ve iyileştirme konuları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Farklı disiplinleri (Makine Müh., Elektrik/-Elektronik Müh., Mekatronik Müh., vb.) ihtiva ettiği için ilgili disiplinlerden araştırmacılarla ortak çalışılmalıdır.
- Sistemdeki basınç değişimi daha dar bir bölgede tutularak kontrol ve kumanda kolaylaştırılabilir.

- İğne geometrisi daha da değiştirilerek nonlineerlik lineerliğe doğru yaklaştırılabilir.
- Elektrikli doğrusal hareketlendirici, çalışma basıncında yenmesi gereken kuvvete paralel bir kuvvete sahip olacak şekilde seçilmelidir. Düşük ya da çok yüksek seçilmesi performansı olumsuz etkilemektedir.
- Frekans kontrolünde olduğu gibi gerilim kontrolünde de anahtarlama adaptif yapı kullanılarak çevrim süresi kısaltılabilir.
- Yapay sinir ağı kullanılarak işlem yükü azaltılabilir.
- Daha gelişmiş bir PLC kullanılarak işlemlerde daha geniş hareket alanı oluşturulabilir. Mikrodenetleyici kaynaklı sınırlayıcılar asgariye indirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. **Ünsal, İ., 2003**, “Turkey’s Hydroelectric Potential And Energy Policies”, Stradigma E-Journal Of Strategy And Analysis, issue
- [2]. **Aslan, Y., Arslan, O., Yaşar, C., 2008**, "A sensitivity analysis for the design of small-scale hydro power plant: Kayabogazi case study", Renewable Energy, Vol.33, No.4, pp. 791-801.
- [3]. **Barros, C.B., 2008**, “Efficiency analysis of hydroelectric generating plants: A case study for Portugal”. Energy Economics, 30: 59-75.
- [4]. **Ogayar, B., Vidal, P.G., Hernandez. J.C., 2009**, Analysis of the cost for the refurbishment of small hydropower plants. Renewable Energy, 34(11):2501–9.
- [5]. **Dorian, J.P., Abbasovich, U.T., Tonkopy, M.S., 1999**, "Energy in central Asia and northwest China: major trends and opportunities for regional cooperation". Energy Policy, 27:281-297.
- [6]. **Saket, D.R., 2008**, Design, Development and Reliability Evaluation of Micro Hydro Power Generation System Based on Municipal Waste Water. IEEE Electrical Power & Energy Conference , 1-2.
- [7]. **Raman, N., Hussein, I., Palanisamy, K., 2009**, "Micro Hydro Potential in West Malaysia", International Conference on Energy and Environment, pp.348, Malacca, Malaysia.
- [8]. **Islam, M.R., Islam M.R., Beg, M.R.A., 2008**, “Renewable energy resources and technologies practice in Bangladesh”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 299-343
- [9]. **Yi, C., Lee, J., Shim, M., 2010**, Site location analysis for small hydropower using geo-spatial information system. Renewable Energy, 35(4), 852-861.
- [10]. **Wang, L., Lee, D.J., Liu, J.H., Chen, Z.Z., Kuo, Z.Y., Hsu, J.S., Chen, C.M., Chiu, S.S., Tsai, M.H., Lin, W.T., Lee, Y.-C., July 2008**, “Economic analysis of installing micro hydro power plants in Chia-Nan Irrigation Association of Taiwan using water of irrigation canals,” Paper 08GM0731, IEEE PES 2008 General Meeting, July 20-24 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- [11]. **Thornbloom, M., Debo Ngbangadia, Mambo Assama, 1997**, “Using Micro-Hydropower in the Zairian Village.” Solar Energy 59(1-3): 75-81.

- [12]. **Blanco, C.J.C., Secretan, Y., Mesquita, A.L.A., 2008,** Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective. *Energy for Sustainable Development*, 12, pp. 25–33.
- [13]. **Schuster, T., Dannerer, G., Krischan, K., 2010,**Design of small potable water power plants, with regard to grid connection and efficiency. - in: 20th Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation & Motion, SPEEDAM2010. Pisa am.
- [14]. **Fangtong Xu, Yonghua Li, Qijuan C., 1995,** Study of the modeling of hydroturbine generating set. In: *International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies*, 22-27 May, p. 644-647.
- [15]. **Mohibullah, M.R., Amran, M., Abdul Hakim, M.I., 2004,** Basic design aspects of micro hydro power plant and its potential development in Malaysia *Proceedings of the IEEE Conference on National Power & Energy* Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 220–223
- [16]. **Minott, D., Delisser, R., 1983,** “Cost reduction considerations in Small Hydropower Development. UNIDO, Third Workshop on Small Hydropower, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [17]. **Anagnostopoulos, J.S., Papantonis, D.E., 2007,** “Optimal Sizing of a Run-of-River Small Hydropower Plant,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 10, pp. 2663-2670.
- [18]. **Litifu, Z., Estoperez, N., 2005,**"Planning of micro-grid power supply based on the weak wind and hydro power generation," Higashi Koganei, Tokyo, TUAT,Tech.Rep.
- [19]. **Nyabeze, W.R., Chifamba, T., El Missiry, M.M., 1996,**"Remote area power supply: Nyafaru micro hydro power plant ",AFRICON, 1996., *IEEE AFRICON 4th* ,24-27, pp:1029 - 1031 vol.2
- [20]. **Forouzbakhsh, F., Hosseini, S.M.H., Vakilian, M., 2007,** An approach to the investment analysis of small and medium hydropower plants, *Energy Policy*,1013-1024.
- [21]. **Alexander, K.V., Giddens, E.P., 2008,** "Optimum penstocks for low head microhydro schemes", *Renewable Energy* 33, 507-519.
- [22]. **Dudhani, S., Sinha, A.K., Inamdar, S.S., 2006,** Assessment of small hydropower potential using remote sensing data for sustainable development in

India. Energy Policy;34(17):3195–205.

- [23]. **Rojanamon, P., Chaisomphob, T., Bureekul, T., 2009**, Application of Geographical Information System to Site Selection of Small Run-of-River Hydropower Project by Considering Engineering/Economic/Environmental Criteria and Social Impact. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(9), 2336-2348.
- [24]. **Montanari, R., 2003**, Criteria for the economic planning of a low power hydroelectric plant. Renew Energy, 28, pp. 2129–2145.
- [25]. **Aggidis, G.A., Luchinskaya, E., Rothschild, R., Howard, D.C., 2010**, The costs of small-scale hydropower production: impact on the development of existing potential. Renewable Energy, 35, pp. 2632–2638.
- [26]. **Adhau, S.P., Moharil, R.M., Adhau, P.G., 2010** , "Reassessment of irrigation potential for micro Hydro Power Generation", Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 IEEE International Conference, 6-9 Dec., pp:1 - 5
- [27]. **Sternberg, R., 2008**, Hydropower: Dimensions of social and environmental coexistence, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(6), pp.1588–1621.
- [28]. **Alexander, K.V., Giddens, E.P., 2007**, Microhydro: Cost-Effective, Modular Systems for Low Heads. Renewable Energy, 33(6), 1379-1391.
- [29]. **Nouni, M.R., Mullick, S.C., Kandpal, T.C., 2006**, Techno-economics of micro-hydro projects for decentralized power supply in India. Energy Policy;34(10): 1161–74.
- [30]. **Anup, K.C., Poudel, G., Poudel, S., Khadka, M., 2010**, "Hydro Home System - an inventory on rural electrification, Computer and Automation Engineering (ICCAE)", 2010 The 2nd Int. Conference on 26-28 Feb., PP:338 - 341
- [31]. **Arriaga, M., 2010**, Pump as turbine—a pico-hydro alternative in Lao. People's Democratic Republic Renewable Energy (Elsevier), 35, pp. 1109–1115
- [32]. **Williams, A.A., 1996**, Pump as turbines for low cost micro hydro power. Renewable Energy;9(1–4):1227–34.
- [33]. **Nowicki, P., Sallaberger, M., P. Bachman, P., 2009**, “Modern Design of Pump-Turbines” Proceedings of IEEE Electrical Power and Energy Conferences (EPEC 2009), pp:1-7, Montreal, Canada.
- [34]. **Alexander, K.V., Giddens, E.P. , Fuller, A.M., 2009**, Radial- and mixed-flow turbines for low head microhydro systems, Renewable Energy, 34: p. 1885-1894.

- [35]. **Bhattacharya, W., 1988,** Excitation balancing of a self-excited induction generator for a maximum output. *Proceedings of the IEEE*;135:88–97.
- [36]. **Joshi, S, Holloway, A.G.L., Chang, L.,2005,** Selecting a high specific speed pump for low head hydro-electric power generation. *IEEE Transactions*;603–6.
- [37]. **Derakhshan, S., Nourbakhsh, A., 2008,** Experimental study of characteristic curves of centrifugal pumps working as turbines in different specific speeds. *Experimental Thermal and Fluid Science*;32:800–7.
- [38]. **Blyden, B.K., Lee, W.J., 2006,** "Modified Microgrid Concept for Rural Electrification in Africa", in *Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Quebec: IEEE.
- [39]. **Lidula, N.W.A., Rajapakse, A.D., 2011,** Microgrids research: a review of experimental microgrids and test systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 186–202
- [40]. **Kanase-Patil, A.B., Saini, R.P., Sharma, M.P., 2010,** "Integrated Renewable Energy Systems For Off Grid Rural Electrification", *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 1342-1349,.
- [41]. **Ranjitkar, G.J., Huang Tung, T., 2006,** "Application of Micro-Hydropower Technology for Remote Regions", *EIC Climate Change Technology*, pp.1-10.
- [42]. **Wang, L., Lee, D.J., Chen, L.Y., Yu, J.Y., Jan, S.R., Chen, S.J., Lee, W.J., Tsai, M.H., Lin, W.T., Li, Y.C., Blyden, B.K., 2009,** "A micro hydro power generation system for sustainable microgrid development in rural electrification of Africa," Paper 09GM1424, accepted for presentation at the *IEEE PES 2009 General Meeting*, July 26-30, Calgary, Alberta, Canada.
- [43]. **Rajakaruna, A., Maw, N.N., 2005,** "Unregulated performance of an induction generator in an isolated micro hydro power plant," in *Proc. of 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005*, Nov. 29 - Dec. 2, pp. 1 - 6.
- [44]. **Ion, C.P., Marinescu, C., 2010,** "Control of parallel operating micro hydro power plants", *Proceedings of the 12th Int. Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, OPTIM 2010*, Brasov, Romania, pp: 1204-1209
- [45]. **Tamrakar, I., Shilpkar, L.B., Fernandes, B.G., Nilsen, R., 2007,** "Voltage and frequency control of parallel operated synchronous generator and induction generator with STATCOM in micro hydro scheme," in *Proc IET - Genet: Transm. Distrib*, vol. 1, no. 5, pp 743-750.

- [46]. **Breban, S., Radulescu, M.M., Robyns, B., 2010**, "Direct Active and Reactive Power Control of Variable-Speed Doubly-Fed Induction Generator on Micro-Hydro Energy Conversion System", XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome,,pp:1 - 6
- [47]. **Marquez, J.L., Molina, M.G., Pacas, J.M., 2010**, "Dynamic modeling, simulation and control design of an advanced micro-hydro power plant for distributed generation applications", Int. Journal of Hydrogen Energy, nr. 35, pp: 5772-5777
- [48]. **Marinescu, C., Ion, C.P., 2009**, Optimum control for an autonomous micro hydro power plant with induction generator, IEEE Bucharest PowerTech; p.1-6
- [49]. **Singh, B., Rajagopal, V., Chandra, A., Haddad, K., 2010**, "Development of Electronic Load Controller for IAG Based Standalone Hydro Power Generation," IEEE Conf. INDICON-2010, Dec.17 - Dec 19, pp. 1-6.
- [50]. **Mishra, J.P., Hore, D., Rahman, A., 2011**, "Fuzzy logic based improved active and reactive power control operation of DFIG for wind power generation", Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), 2011 IEEE 8th Int.Conference on, On page(s): 654 - 661, Volume: Issue: , May 30-June 3 2011
- [51]. **Paish, O., 2002**, "Small Hydro power: technology and current status", Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol.6, pp. 537-556.
- [52]. **Şerban, I., Marinescu, C., 2011**, "Aggregate load-frequency control of a wind-hydro autonomous microgrid", Renewable Energy, Vol.36, Iss.12, pp.3345, ISSN: 09601481
- [53]. **Jarman, R., Bryce, P., 2007**, Experimental investigation and modelling of the interaction between an AVR and ballast load frequency controller in a stand-alone micro-hydroelectric system, Science Direct, Renewable Energy, 32/9, pp.1525/2543
- [54]. **Murthy, S.S., Singh, B., Kulkarni, A., Sivarajan, R., Gupta, S., 2003**, "Field Experiences on A Novel Pico-Hydel System using Self-Excited Induction Generator and Electronic load controller" IEEE proceeding, pp842-847.
- [55]. **Marinescu, C., Ion C.P., 2009**, Optimum control for an autonomous micro hydro power plant with induction generator. In: IEEE Bucharest PowerTech; p. 1–6
- [56]. **Lin, G., Junrong, X., Yiping, D., 2010**, Analysis of power system frequency responses with hydro turbines incorporating load shedding, the 5th IEEE

- Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). 2010. p. 893–7.
- [57]. **Gorecki, K., Szmajda, M., Mroczka, J., 2007**, Adaptive digital synchronization of measuring window in low-cost DSP power quality measurement systems, Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU 2007. 9th International Conference on 9-11, Page(s):1 - 4
 - [58]. **Emam, S.E.A., 2004**, Automatic digital synchronization, Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC '04. International Conference, Page(s):778 – 784
 - [59]. **Malik, O.P., Hope, G.S., Hancock, G.C., Zhaohui, L., Luqing, Y., Shouping, W., 1991**, Frequency measurement for use with a microprocessor-based water turbine governor, Energy Conversion, IEEE Transaction on Volume 6, Issue 3, p.:361-366
 - [60]. **Wilmschurst, T., 2007**, Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers Principles and Applications, Elsevier, UK
 - [61]. **Dawei, F., Centeno, V., 2010**, Phasor-Based Synchronized Frequency Measurement in Power Systems Power Delivery, IEEE Transactions on Volume 22, Issue 4, Oct. 2007 Page(s):2016
 - [62]. **Zhou, W., Xuan, Z., Yu, J., 1995**, Some new developments of precision frequency measurement technique, Frequency Control Symposium, 1995. 49th., Proceedings of the 1995 IEEE Int., 31 May-2 June, Page(s):354 – 359
 - [63]. **Yulan, C., Cunyang, F., 2007**, A New Method Of Frequency Measurement Of Power System Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2007. 2nd IEEE Conference on 23-25 May 2007 Page(s):2522 – 2525
 - [64]. **Xiaoying, Z., Cunlu, D., Jian, Y., Chongpeng, J., 2007**, Frequency Measurement of the Automatic Generator Quasi-synchronizer Based on SCM and CPLD, Electronic Measurement and Instruments, ICEMI '07. 8th International Conference on Aug. 16 2007-July 18 2007 Page(s):4-768 - 4-772
 - [65]. **Kahraman, A., 2004**, Mikrodenetleyici ile 3 fazlı sistemin faz sırasının belirlenmesi ve frekans ölçümü, Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
 - [66]. **Guzun, D.B., Cazacu, M.D., Nistor, N., Guzun, R., 2007**, "Multiple purpose micro hydro electric power station ", Bulk Power System Dynamics and Control-VII. Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symp. 19-24 Aug., pp:1-8

- [67]. **Adhau, S.P., 2009**, "A Comparative Study of Micro Hydro Power Schemes Promoting Self Sustained Rural Areas", in Proc. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09, pp. 1-6, Apr.
- [68]. **Dal, M., Kaya, A.M., Aksit, M.F., Yigit, S.K., Kandemir, I., Yuksel, E., 2010**, "A hardware test setup for grid connected and island operation of micro hydro power generation systems", Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International, 18-22 Dec., pp:624 – 629
- [69]. **Öztürk, D., 2003**, "Küçük Güçlü Hidroelektrik Santrallerde PLC ile Otomatik Kontrol", Yüksek Lisans Tezi, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [70]. **Salhi, I., Chennani, M., Doubabi, S., Ezziani, N., 2008**, "Modeling and Regulation of a Micro Hydroelectric Power Plant", IEEE International Symposium on Industrial Electronics. pp: 1639-1644. July., Cambridge - UK.
- [71]. **Salhi, I., Doubabi, S., Essounbouli, N., 2006** , "Design and simulation of fuzzy controller and supervisor for a micro-hydro power plant", Control & Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference, 23-25 June 2010, pp:1401 - 1406
- [72]. **Hanmandlu, M., Goyal, H., Kothari, D.P., 2006**, "An Advanced Control Scheme for Micro Hydro Power Plants" Power Electronics, Drives and Energy Systems, 2006. PEDES'06. International Conference on Vol. Issue, 12-15 Page(s):1-7.
- [73]. **Andersson, P.M., Fouad, A.A., 2003**, Power System Control & Stability, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 111, River Street, Hoboken, NJ., IEEE Series on Power Engineering.
- [74]. **Hanmandlu, M., Goyal, H., Kothari, D.P., 2006**, "An Advanced Control Scheme for Micro Hydro Power Plants" Power Electronics, Drives and Energy Systems. PEDES'06. Int. Conference on Volume, Issue, 12-15 Dec 2006 Page(s):1-7.
- [75]. **Kishor, N., Saini, R.P., Singh, S.P., 2007**, A review on hydropower plant models and control. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, pp. 776–796
- [76]. **Salhi, I., Doubabi, S., Essounbouli, N., Hamzaoui, A., 2010** "Application of multi-model control with fuzzy switching to a micro hydro-electrical power plant", Renewable Energy 35, 2071-2079.
- [77]. **Hovey, L.M., 1962**, "Optimum adjustment of hydro governors on Manitoba hydro system", AIEE Trans Power Apparatus and Systems, 81:581–7.
- [78]. **Eke, İ., 2004**, Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek

Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [79]. **Blair, P., Wozniak, L., 1976**, Non-linear simulation of hydraulic turbine governor system. *Water Power and Dam Construction*.
- [80]. **Sanathanan, C.K., 1987**, Accurate low order model for hydraulic turbine-penstock. *IEEE Trans on Energy Conversion*;2:196–200.
- [81]. **Sanathanan, C.K.,1988**, A Frequency domain method for tuning hydro governors. *IEEE Trans on Energy Conversion*;3:14–7.
- [82]. **Vournas, C.D.,1990**, Second order hydraulic turbine models for multimachine stability studies. *IEEE Trans on Energy Conversion* 1990;5:239–44.
- [83]. **Vournas, C.D., Zaharakis, A., 1993**, Hydro turbine transfer functions with hydraulic coupling. *IEEE Trans on Energy Conversion*; 8:527–32.
- [84]. **Hannett, L.N., Feltes, J.W., Fardanesh, B., Crean, W., 1999**, Modeling and control tuning of a hydro station with units sharing a common penstock section. *IEEE Trans on Power Systems*;14:1407–14.
- [85]. **Kundur, P., 1994**, Power system stability and control. New York: Mc Graw-Hill.
- [86]. **Soyguder S., Alli, H., 2010**,Fuzzy adaptive control for the actuators position control and modeling of an expert system. *Expert Systems with Applications*, 27 3, pp. 2072–2080
- [87]. **Liu, W., Xie, Z., 2010**,"Research and simulation test based on fuzzy self-adaptive PID for secondary cooling control system during continuous casting",*Future Computer and Communication (ICFCC)*, 2nd International Conference,21-24 May 2010 ,V3-461 - V3-464
- [88]. **Jingwen, C., 2010**," Re-winder tension control based on fuzzy adaptive PID algorithm", *Proceedings of the 29th Chinese Control Conference*, p 3353-3357
- [89]. **He, F., Tong, W., Wang, Q., 2007**,"Synchronization Control Strategy of Multi-motor System Based on Profibus Network," *IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 3029-3034.
- [90]. **Frigura-Iliasa, F.M., Vatau, D., Vuc, G., Greconici, M., Vartosu, A., 2011**, "Hydrogenerators Refurbishment within Romanian Power System",*Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES)*, 2011 IEEE 3rd International Symposium,11-12 March 2011 ,pp:139 – 142
- [91]. **Swidenbank, E, Brown, M.D., Flynn, D.,1999**, "Self-tuning turbine generator control for power plant", *Mechatronics* 9:513-537

- [92]. **Strath, B., Kuljaca, O., Vukic, Z., 2005**, "Speed and active power control of hydro turbine unit", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, p.424.
- [93]. **Aydoğmuş, Z., 2009**, "Implementation of a Fuzzy-based Level Control Using SCADA", Expert Systems with Applications, Vol.36, No: 3, pp. 6593-6597.
- [94]. **Doğan, M., 2006**, Özayarlama PID Kontrolör (PLC Uygulaması), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 36 s.
- [95]. **Yersel, M.A., 2007**, PID Yönteminin PLC’de Yazılarak Gerçeklenmesi: Çift Cidarlı Reaktör Tank Sıcaklık Kontrolü Örneği, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 62 s .
- [96]. **Karakuzu, C., Öztür, S., 2005**, PLC ile Bulanık Mantık Tabanlı Hata Düzeltmeli Üç Fazlı Motor Hız Kontrolü, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi Ve Fuarı, S: 474-477, İstanbul, 22-25 Eylül 2005.S 78-81.,
- [97]. **Lindh, T., Ahola, J., Partanen, J., Pirttiniemi, H., 2002**, Communication Possibilities for Remote Control and Condition Monitoring of Small-Scale Hydro Power Plant,2002, Proceedings, Copenhagen, Denmark, 5 p.
- [98]. **Jing, L., Ye, L., Malik, O.P., Zeng, Y., 1998**, An intelligent discontinuous control strategy for hydroelectric generating unit. IEEE Trans Energy Conv;13:84–9.
- [99]. **Cheng, Y.C., Lu-Q, Y., Fu, C., Cai, W.Y.,2002**, Anthropomorphic intelligent PID control and its application in the hydro turbine governor. In: 1st International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 1, pp. 391–395.
- [100]. **Chen G-Da, Cai W-You, Xu H-Ke, Huang M-Hua, 2002**, The application of intelligent integral realized by fuzzy logic for hydroturbine governing system. In: 1st Int.Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 2, pp. 674–678.
- [101]. **Zhang, Z., Huo, Z., Xiao, Z., 2002**, "PID control with fuzzy compensation for hydroelectric generating unit.", Int.Conf. on Power System Technology, vol. 4, pp. 2348–2352.
- [102]. **Wozniak, L., Collier, F., Foster, J., 1991**, Digital simulation of an impulse turbine: The Bradley Lake project. IEEE Trans Energy Conv; 6:39–46.
- [103]. **Johnson, R.M., Chow, J.H., Dillon, M.V., 2004**, Pelton turbine deflector overspeed control for a small power system. IEEE Trans Power Syst;19:1032
- [104]. **Oonsivilai, A., Pao-La-Or. P., 2008**, Application of adaptive tabu search for optimum PID controller tuning AVR system, WSEAS Transactions On Power

Systems, Vol.3, pp. 495-506.

- [105]. **Robert, Q., Planque, J.L., 2007**, "Robust Digital Automatic Reactive Power Regulator for Hydro Power Plants", ICCEP 07 Conference, IEEE PSCE, paper 453,
- [106]. **Su, A., Hwung, H., Lii, G., 1997**, "Fuzzy logic based voltage control for a synchronous generator", Electric Power Syst. Res., vol. 41, no. 3, pp.225 - 231.
- [107]. **Sumina, D., Erceg, G., Idzotic, T., 2005**, "Excitation control of a synchronous generator using fuzzy logic stabilizing controller", Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on Publication, 6 pp.-P.6
- [108]. **Arnalte, S., 2000**, Fuzzy logic-based voltage control of a synchronous generator, International Journal of Electrical Engineering Education, Volume 37 Issue 4, pp 333-343
- [109]. **Eker, M.K., Altas, İ.H., 2007**, A Fuzzy Voltage Regulator (FVR) for a Stand-alone Synchronous Generator, journal Electric Power Components and Systems, Volume 35, Issue 4, pages 429 - 443
- [110]. **Janabi-Sharifi, F., Jorjani, G., 2009**, "An Adaptive System for Modeling and Simulation of Electrical Arc Furnaces," Control Engineering Practice 17, Elsevier, pp. 1202-1219.
- [111]. **Chen, W., Yang, X., 2007**, "An Application of Adaptive Fuzzy PID Controller in Packing Industry ", Machine Learning and Cybernetics, 2007 International Conference, pp:651 - 654
- [112]. **Ion, C.P., Marinescu, C., 2011**, "Parallel operation of micro hydro power plants "Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2011 7th International Symposium, pp:1-6
- [113]. **Karasakal, O., Güzelkaya, M., Eksin, İ., Yeşil, E., 2011**, An error-based on-line rule weight adjustment method for fuzzy PID controllers, Expert Systems with Applications, 38 (8), 10124-10132.
- [114]. **Fadaei, A., Salahshoor, K., 2008**, Design and implementation of a new fuzzy PID controller for networked control systems. ISA Transactions, 474, 351–361
- [115]. **UNIDO, 1984**, "Small Hydro Power", Bulletin.
- [116]. **Başıme, H., 2003**, Hidroelektrik Santrallar ve Hidroelektrik Santral Tesisleri, EÜAŞ Ankara.
- [117]. **Natural Resources Canada, 2004**, Micro-Hydropower Systems - A Buyer's

Guide.

- [118]. **Chitrakar, P., 2004**, Micro-Hydropower Design Aids Manual. Kathmandu: Small Hydropower Promotion Project (SHPP/GTZ) and Mini-Grid Support Programme (MGSP/AEPC-ESAP).
- [119]. <http://www.hydro-turbines.com/>
- [120]. **Olgun, H., 1990**, Banki (Cross-Flow) Türbini Tasarım Parametrelerinin İncelenmesi, Trabzon, KTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- [121]. **Chapman, S.J., Çev. E., Akın, A., Orhan, 2007**, Elektrik Makinalarının Temelleri, Çağlayan Kitabevi, İstanbul
- [122]. **IEEE Std 421.5-2005**, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421. 5- (Revision of IEEE Std 421.5-1992), pp. 0 1-85, 2006.
- [123] http://www.skf.com/portal/skf_mec/home/products?contentId=883836#Label2
- [124]. **Krause, P.C., 1986**, "Analysis of electric machinery", McGraw-Hill Book Company, London.
- [125]. http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINUMERIK_SINAMICS_04_2010_E/S7_SFC.pdf?p=1
- [126]. **Özdemir, M.T., Orhan, A., 2012**, "The Application of Fuzzy Adaptive PI Control for Micro Hydro Power Plants", 1st Taibah University International Conference on Computing and Information Technology, ICCIT 2012, Al-Madinah Al-Munawwarah, Saudi Arabia, p:745-750
- [127]. **Özdemir, M.T., Orhan, A., 2012**, "An Experimental System For Electrical And Mechanical Education: Micro Hydro Power Plant Prototype", Cyprus International Conference on Educational Research, CY-ICER, Middle East Technical University North Cyprus Campus, 08-10 February 2012.

EKLER

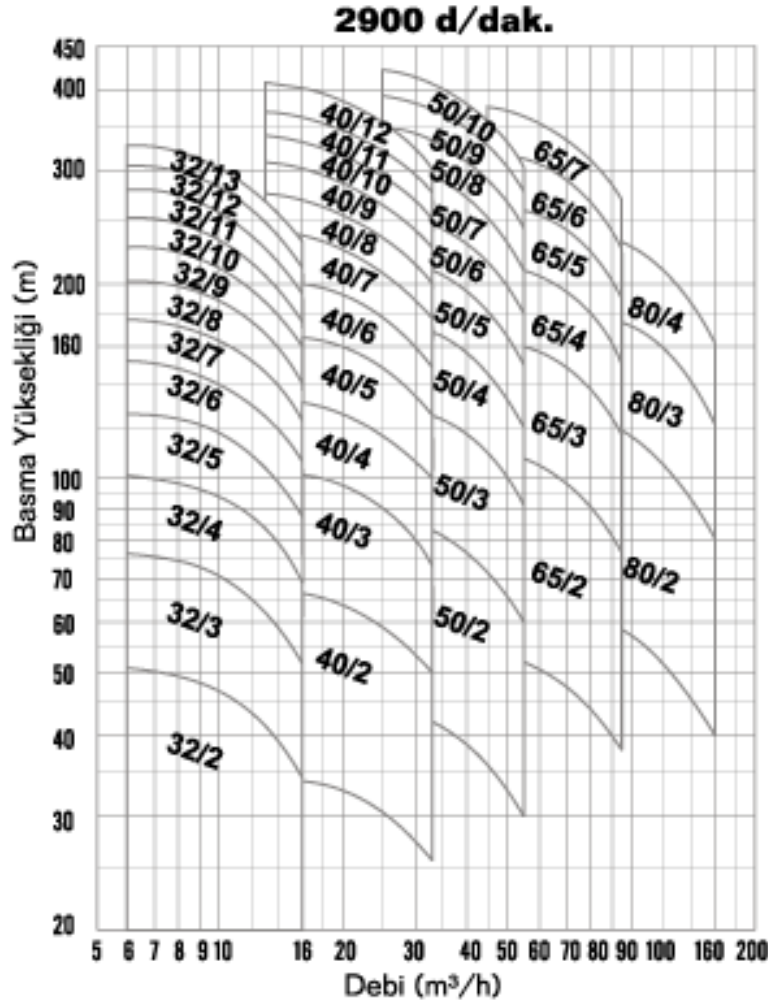
EK 1 Kullanılan Cihazlara Ait Teknik Özellikler

Ek1.1 SKM 50/4'nın Teknik Özellikleri

SKM 50/4- Standart Yatay Milli Çok Kademeli Santrifuj Pompa
Teknik Özellikleri

- * Basma Flanşı : DN 32 - 200mm
- * Debi (max) : 700 m³/h
- * Basma Yüksekliği : 400 m (maks.)
- * Hız (devir) : 1450 - 2900 d/dk
- * Çalışma Sıcaklığı : -10 oC'den +110 oC
- * Gövde Basıncı (Pmax) : 30 bar (50 bar)*

* (Pmax = Emme Basıncı + Kapalı Vanadaki Basma Yüksekliği)



(SKM) ÇOK KADEMELİ NORM SANTRİFÜJ POMPALAR

KARAKTERİSTİK EĞRİLER KESİT RESİMLERİ TEKNİK BİLGİLER FLANŞ ÖLÇÜLERİ VE POZİSYONLARI

Ek1.2 MAX3 Doğrusal Hareketlendiricinin Teknik Özellikleri

Matrix 3

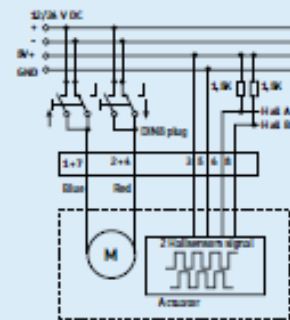
Linear actuators DC versions

Suitable control units and accessories

Control units		SCU 1	SCU 5	SCU 9	VOU 5	VOU 8	VOU 9	BCU 5	BCU 8	MOU
MAX 3		•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	EW1	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	EW3	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	STU	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	STA	•	•	•	•	•	•	•	•	•
•	STE	•	•	•	•	•	•	•	•	•

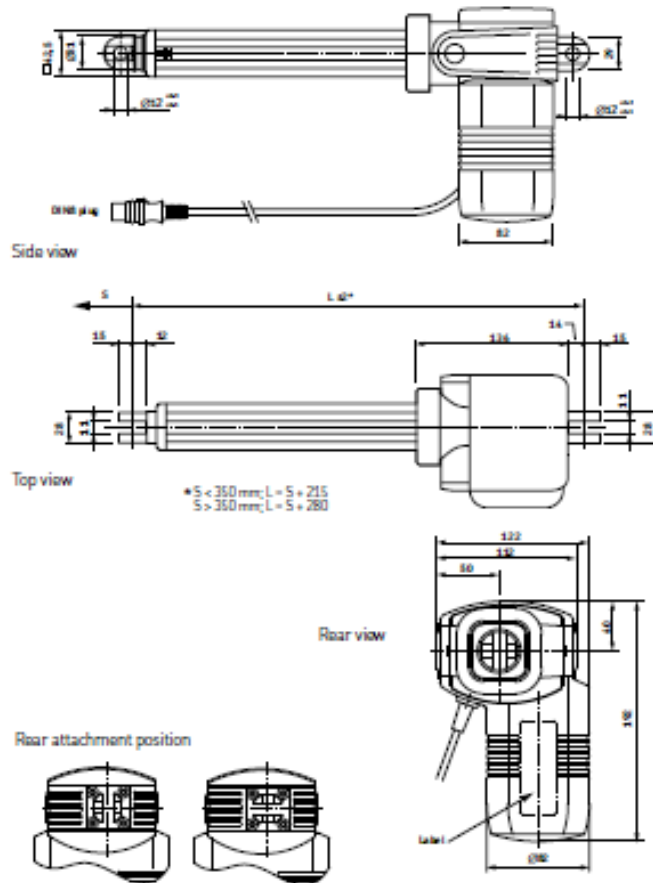
• Remote control
 • Position sensor
 • Drive sensor

Connecting diagram*



* Only valid for MAX 31. MAX 30 must be operated by a BCU, MOU, SCU or VOU control unit.

Dimensional drawing



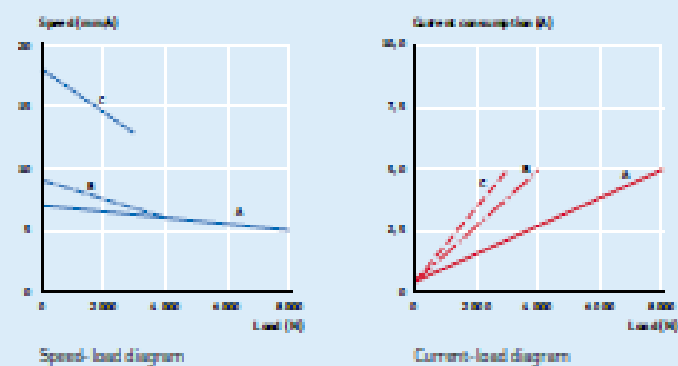
Technical data

	Unit	MAX 3...A..	MAX 3...B..	MAX 3...C..
Rated push load	N	8 000	4 000	3 000
Rated pull load	N	6 000 ¹⁾	4 000	3 000
Speed (full load to no load)	mm/s	5 to 7	6 to 9	12,7 to 18
Stroke	mm	50 to 700	50 to 700	50 to 700
Retracted length	mm	$S + 215/280$ ²⁾	$S + 215/280$ ²⁾	$S + 215/280$ ²⁾
Voltage	V DC	12 or 24	12 or 24	12 or 24
Power consumption	W	120	120	120
Current consumption	A	5,0	5,0	5,0
Duty cycle	%	10 (1/9)	10 (1/9)	10 (1/9)
Ambient temperature	°C	0 to +40	0 to +40	0 to +40
Type of protection	IP	66S	66S	66S
Weight (at 200 mm stroke)	kg	4,5	4,2	4,0
Color	—	Gray	Gray	Gray

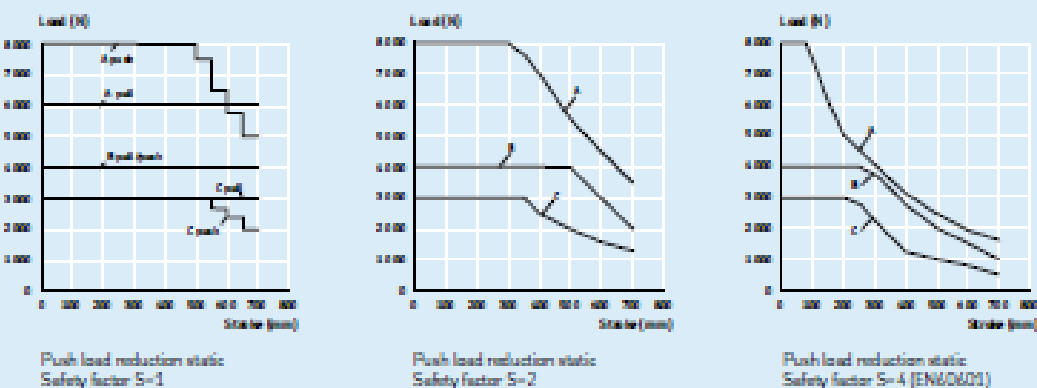
¹⁾ Max load for medical application is 5 000 N

²⁾ $S < 350 \text{ mm}; L = S + 215$
 $S > 350 \text{ mm}; L = S + 280$

Performance diagrams



Safety factor load conditions



Ek1.3 UMG 96S Güç Analizörü'nün Teknik Özellikleri

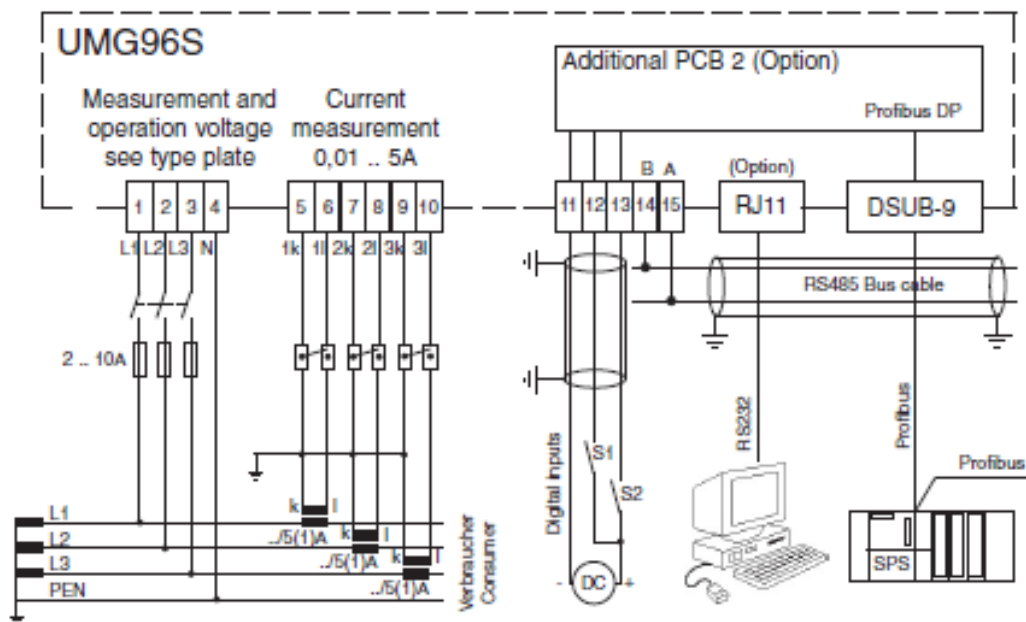
To measure and monitor electrical quantities. The device has an RS485 interface as the Modbus fieldbus, and Profibus DP are available. In addition, the device possesses 2 transistor outputs, which either serve as pulse outputs for active and reactive power and / or can be configured as limit contacts.

Technical data

Display	LCD
Positions	999
Assembly dim.	90 x 90 mm
Display range	0 - 999
Dimensions	(W x H x D) 96 x 96 x 48 mm
Measurement range	I, U, kW, kVA, kvar, Wh, varh, F and power factor
Interfaces	1x RS 485
Type	UMG 96S Profibus/Modbus
Weight	250 g
Degree of protection	IP50/terminals: IP20

Other customers also searched for:

Janitza;52.13.025;UMG 96S Profibus/Modbus;Power indicator.Voltage display.Panel instrumentPanel measuring devices;

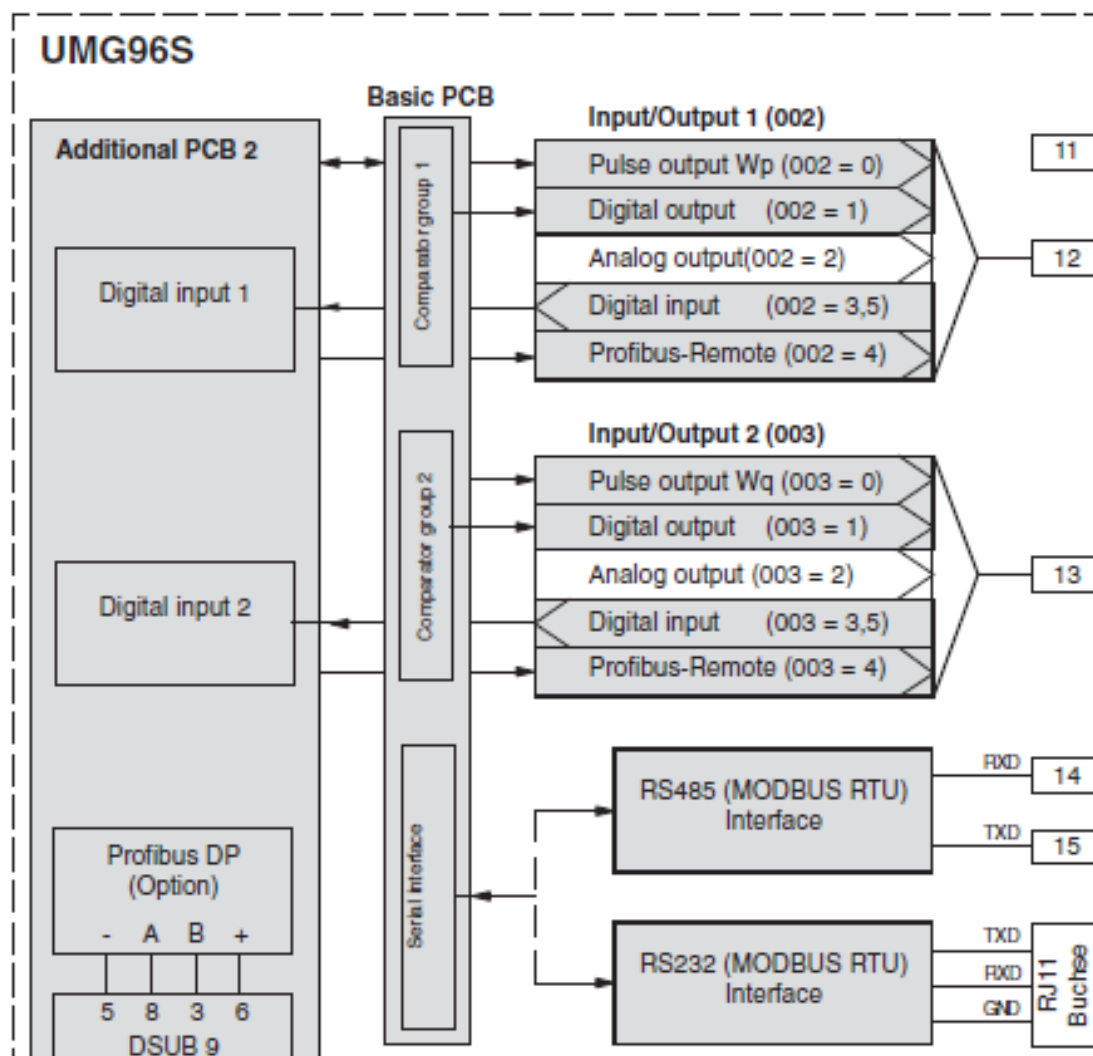
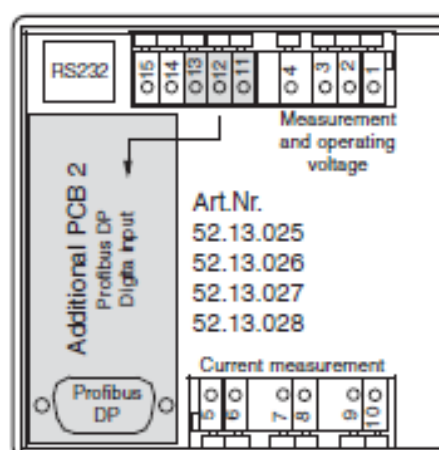


Diagr. UMG96S with digital inputs, RS232 and Profibus.

Version 7

Version 7 contains the following functional groups:

- RS232 (MODBUS RTU)
- RS485 (MODBUS RTU)
- Profibus DP
- Input/Output
 - Pulse output 1 (Wp=real energy)
 - Pulse output 2 (Wq=reactive energy)
 - Digital output 1
 - Digital output 2
 - Digital input 1
 - Digital input 2



Lists "Profibus profiles", integer size

Profibus profile No.1

Value	Bytes
Q1	2
Q2	2
Q3	2
S1	2
S2	2
S3	2
Frequency	2
Uln L1	2
Uln L2	2
Uln L3	2
UL1-L2	2
UL2-L3	2
UL1-L3	2
IL1	2
IL2	2
IL3	2
P1	2
P2	2
P3	2
Cos-phi L1	2
Cos-phi L2	2
Cos-phi L3	2
thd_u_L1	2
thd_u_L2	2
thd_u_L3	2
thd_i_L1	2
thd_i_L2	2
thd_i_L3	2
Sum	56Bytes

Profibus profile No.2

Value	Bytes
Uln L1	2
Uln L2	2
Uln L3	2
UL1-L2	2
UL2-L3	2
UL1-L3	2
IL1	2
IL2	2
IL3	2
P1	2
P2	2
P3	2
Cos-phi L1	2
Cos-phi L2	2
Cos-phi L3	2
Frequency	2
P_sum	2
Q_sum	2
S_sum	2
Cos_phi_sum	2
I_sum	2
Real ener. (Adr.416)	4
Reactive energy	4
thd_u_L1	2
thd_u_L2	2
thd_u_L3	2
thd_i_L1	2
thd_i_L2	2
thd_i_L3	2
Sum	62Bytes

Profibus profile No.3

Value	Bytes
eeeprom_timer	4
Comp_timer_1	4
Comp_timer_2	4
Comp_timer_3	4
Comp_timer_4	4
Comp_timer_5	4
Comp_timer_6	4
Sum	28Bytes

Profibus profile No.5

Values	Bytes
P_sum	2
Q_sum	2
S_sum	2
Cos_phi_sum	2
I_sum	2
Real ener. (Adr.422)	4
Real ener. (Adr.424)	4
React.enrg.(Adr.418)	4
Real enr. ²⁾ (Adr.416)	4
Scheinarbeit ¹⁾	4
Sum	30 Bytes

Profibus profile No.7

Values	Bytes
Real ener. (Adr.422)	4
Real ener. (Adr.424)	4
React.enrg.(Adr.418)	4
eeeprom_timer	4
Real enr. ²⁾ (Adr.416)	4
Scheinarbeit ¹⁾	4
Sum	24Bytes

Profibus profile No.4

Value	Bytes
I_mean_L1	2
I_mean_L2	2
I_mean_L3	2
P_mean_L1	2
P_mean_L2	2
P_mean_L3	2
Q_mean_L1	2
Q_mean_L2	2
Q_mean_L3	2
S_mean_L1	2
S_mean_L2	2
S_mean_L3	2
P_sum_mean	2
Q_sum_mean	2
I_sum_mean	2
S_sum_mean	2
phi_sum_mean	2
Sum	34Bytes

Profibus profile No.6

Value	Bytes
ct_prim	2
ct_sec	2
vt_prim	2
vt_sec	2
Field rotation	2
eeeprom_timer	4
Comp_timer_1	4
Comp_timer_2	4
Comp_timer_3	4
Comp_timer_4	4
Comp_timer_5	4
Comp_timer_6	4
Sum	38Bytes

Messwert	Format					
	Integer			Float		
	resolution	unit		resolution	unit	
Current	1	mA		0,01	0,01	A
Voltage	0,1	V		0,1		V
Real power	0,1	W		0,1	1(x10)	W
Apparent power	0,1	VA		0,1	1(x10)	VA
Reactive power	0,1	var		0,1	1(x10)	var
Energie	1	Wh/varh			0,01(x10)	kWh/kvarh
CosPhi	0,01	-kap/+ind		0,01	0,01	-kap/+ind
THD I	0,1	%		0,1	0,1	%
THD U	0,1	%		0,1	0,1	%
Frequency	0,01	Hz		0,1	0,1	Hz



Measured values in integer format do not respect the transformer ratio. Measured values in floating point format contain the transformer ratio. (value in the UMG 96S display = transformer ratio PLC x solution)

In the Profibus profiles no. 33, 35, 36, 38, 43 and 47, the measured values real energy, reactive energy, Psum, Qsum and Ssum are given reduced by a factor 10. No specific profiles can be assembled.

¹⁾ Ab Firmware Rel.1.09

²⁾ Wirkarbeit ohne Rücklaufsperr.

Ek1.4 DWM 2000 Debimetresinin Teknik Özellikleri



DWM 2000

The DWM 2000 flow meter is an insertion-type instrument. Full scale range is adjustable from 1...8 m/s or 3.3...26.2 ft/s.

The DWM 2000 has an optional liquid crystal display. Other remote display options are available [096 Cl].

A welding socket is supplied as standard for welding the DWM 2000 directly onto process pipes. It is suitable for pipe diameters DN50...400. An optional spool piece can be used to install the instrument without a welding operation.

Technical data

	DWM 1000	DWM 2000
--	----------	----------

Functions

Description	2-wire flow switch	Flow meter with 4...20 mA output
Function	For monitoring flow velocity in pipes or open channels	
User interface		
Options	Flashing LED	None; 2-line LCD indicator with 4-button keypad
Interface languages	-	English, French or German
Display units, 1st line	-	m/s
Display units, 2nd line (optional)	-	m³/h

Measurement accuracy

Repeatability	±1% of the switching point	±1% of the measured value
Accuracy		
when $v > 1$ m/s or 3.3 ft/s	±5% of the switching point	±5% of the measured value (± 2% if calibrated onsite)
when $v < 1$ m/s or 3.3 ft/s	±3 cm/s / ±1.2 in./s ±2% of the switching point	±3 cm/s / ±1.2 in./s ±2% of the measured value
Reference temperature	+20°C ±5°C / +70°F ±10°F	
Reference pressure	1013 mbar abs. ±20 mbar / 14.69 psig ±0.29 psig	
Reference relative humidity	60% ±15%	
Full-scale range	0.1...9.9 m/s / 0.3...32.5 ft/s, adjustable threshold	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, or 8 m/s / 3.3, 6.6, 9.9, 13.1, 16.4, 19.6, 22.9, or 26.2 ft/s, programmable
Hysteresis	8%, when flow velocity decreases	-

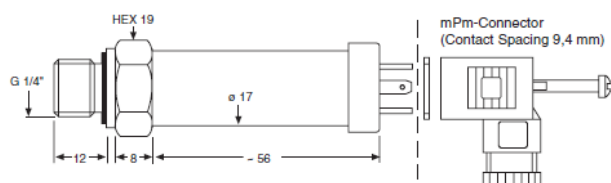
	DWM 1000	DWM 2000
--	----------	----------

Power supply

Instrument terminal	48...250 VAC or VDC	12 / 24 VDC
Relay options for instrument terminal	230 / 110 / 48 VAC; 110 / 48 VDC	-
Power consumption	200 mA max.	50 mA max.
Protective earthing load ①	<10 Ohms	
Cable entry	PG 13.5	
Cable tightening capacity	1.5 mm² or 16 AWG	
Length of cable for stainless steel housing (IP68) option	10 m / 32½ ft ②	
Time constant	5 / 8 / 10 s	5 s ③

Ek1.5 PA21R Basınç Sensörleri'nin Teknik Özellikleri

Series 21 R / 21 SR / 21 MR: with plug



	2-Wire	3-Wire	4-Wire
1	OUT/GND	GND	GND
2		+OUT	+OUT
3	+Vcc	+Vcc	+Vcc
4			-OUT

SPECIFICATIONS

Series 21 R / 21 SR / 21 MR

PR 21 R/SR/MR ¹⁾	0,5	1	2	5	10	16										bar	vented gauge
PAA 21 R/SR/MR		1	2	5	10	16										bar	absolute
PA 21 R/SR/MR ²⁾		1	2	5	10	16	30	50	100	160	200	400	600			bar	sealed gauge
Over Range	2	3	4	10	20	25	50	75	150	250	300	500	700			bar	

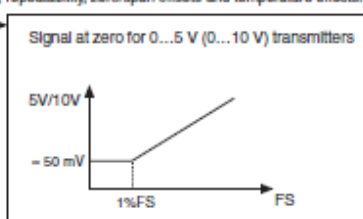
¹⁾ mPm connector only, not cable

²⁾ Zero at 1000 mbar abs.

Signal Output	4...20 mA	0...5 Vdc	1...6 Vdc	0...10 Vdc	0...100 mV	
Supply Voltage	8...28 Vdc	9...28 Vdc		13...28 Vdc	8...28 Vdc	10 Vdc
Current required	max. 25 mA	4 mA max.				2 mA max.
Zero/Span Tolerance	0,5 %FS	0,5 %FS ³⁾	0,5 %FS	0,5 %FS ³⁾	± 0,1 %FS	
Configuration	2-Wire	3-Wire			4-Wire	
Electrical Connection: mPm 193 or cable 2 m, 4 core	OUT/GND:	GND: Pin 1 / Green			GND: Pin 1 / White	
	Pin 1 / White	+OUT: Pin 2 / White			+OUT: Pin 2 / Red	
	+Vcc: Pin 3/Brown	+Vcc: Pin 3 / Brown			+Vcc: Pin 3 / Black	
					-OUT: Blue	
Linearity	± 0,2 % typ. / ± 0,5 % max.					
Total Error Band ³⁾ +18...+22 °C	± 0,5 % typ. / ± 1 % max.					
Total Error Band ³⁾ 0...+50 °C	± 1 % typ. / ± 2 % max.					
Total Error Band ³⁾ -20...+80 °C	± 2,5 % typ. / ± 4 % max.					

³⁾ Total error band includes linearity, hysteresis, repeatability, zero/span offsets and temperature effects.

⁴⁾ Signal at zero = 50 mV



Operating Temperature

-20...+80 °C (on demand -40...100 °C)

Pressure Port

G 1/4" male

Pressure Media

Compatible with 316L stainless steel

Weight

≈ 75 g

Electromagnetic Compatibility

CE marked: Fully tested to EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4

Enclosure Protection

IP 65

Insulation

> 100 MΩ / 500 Vdc

Ek1.6 RI 76TD Artımsal Hız Algılayıcısının Teknik Özellikleri

Incremental Encoder RI 76TD

General design	as per DIN EN 61010-1, protection class III, contamination level 2, overvoltage class II
Supply voltage ¹	RS422 + Sense (T): DC 5 V $\pm$ 10 % RS422 + Alarm (R): $\pm$ 10% DC 5 V or DC 10 - 30 V Push-pull (K), Push-pull antivalent (I): DC 10-30 V
Max. current w/o load	60 mA (DC 5 V), 60 mA (DC 10 V), 35 mA (DC 24 V)
Max. pulse frequency	RS422: 300 kHz Push-pull: 200 kHz
Standard output versions	RS422 + Alarm (R): A, B, N, $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{N}$, $\overline{Alarm}$ RS422 + Sense (T): A, B, N, $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{N}$, Sense Push-pull (K): A, B, N, $\overline{Alarm}$ Push-pull complementary (I): A, B, N, $\overline{A}$, $\overline{B}$, $\overline{N}$, $\overline{Alarm}$
Pulse width error	$\pm$ max. 25° electrical
Number of pulses	1 ... 10 000
Alarm output	NPN-O.C., max. 5 mA
Pulse shape	Square wave
Pulse duty factor	1:1

¹ Pole protection with supply voltage DC 10 - 30 V

Ek1.7 EXB 840 IGBT Sürücüsünün Teknik Özellikleri

■ Electrical characteristics

(Ta = 25°C)

Item	Symbol	Condition	Rating						Unit
			EXB840, EXB841 (High speed)			EXB850, EXB851 (Medium speed)			
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Turn-on time 1	t on	V cc = 20 V, IF = 5 mA			1.5			2.0	μsec
Turn-on time 2	t off	V cc = 20 V, IF = 5 mA			1.5			4.0	μsec
Overcurrent protection voltage	Vocp	V cc = 20 V, IF = 5 mA		8.5			8.5		V
Overcurrent protection delay	t ocp	V cc = 20 V, IF = 5 mA			10			10	μsec
Alarm delay	t ALM	V cc = 20 V, IF = 5 mA			1			1	μsec
Reverse bias power supply voltage	V RB	V cc = 20 V		5			5		V

Note: EXB851 and EXB850 (medium speed) require IF overdrive shown in the application circuit.

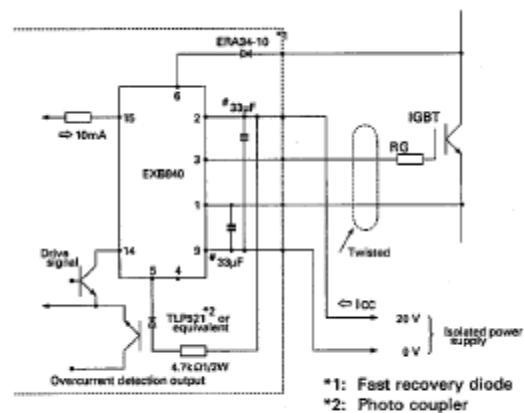
3 EXB840 Application Circuits

EXB840 is a hybrid IC capable of driving up to 150A for 600 V IGBT and up to 75A for a 1200 V IGBT. Since the signal delay in the drive circuit is 1 μ s or less, the hybrid IC is suitable for switching at up to about 40 kHz.

Note the following when using the hybrid IC:

- The IGBT's gate-emitter drive loop wiring must be shorter than one meter.
- The IGBT's gate-emitter drive wiring should be twisted.
- If a large voltage spike is generated at the collector of the IGBT, increase the IGBT's gate series resistor(R_G).
- The 33 μF (#) capacitor absorbs changes in the supply voltage caused by the power supply wiring impedance. It is not a power supply filter capacitor.

Control circuit PC board



Recommended gate resistance and current consumption

IGBT rating	600 V	10 A	15 A	30 A	50 A	75 A	100 A	150 A
	1200 V	—	8 A	15 A	25 A	—	50 A	75 A
RG		250 Ω	150 Ω	82 Ω	50 Ω	33 Ω	25 Ω	15 Ω
I cc	5 kHz	17 mA		17 mA			19 mA	
	10 kHz			18 mA			22 mA	
	15 kHz	18 mA		20 mA			25 mA	

Ek1.8 IR210 MOSFET Sürücüsü'nün Teknik Özellikleri

International
IR Rectifier

Data Sheet No. PD60147 rev.U

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground $\pm 5V$ offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

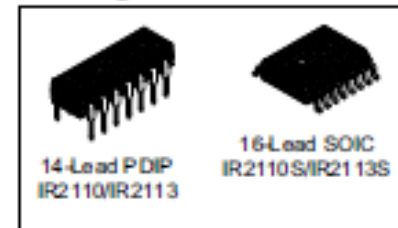
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{O+/-}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{on/off}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

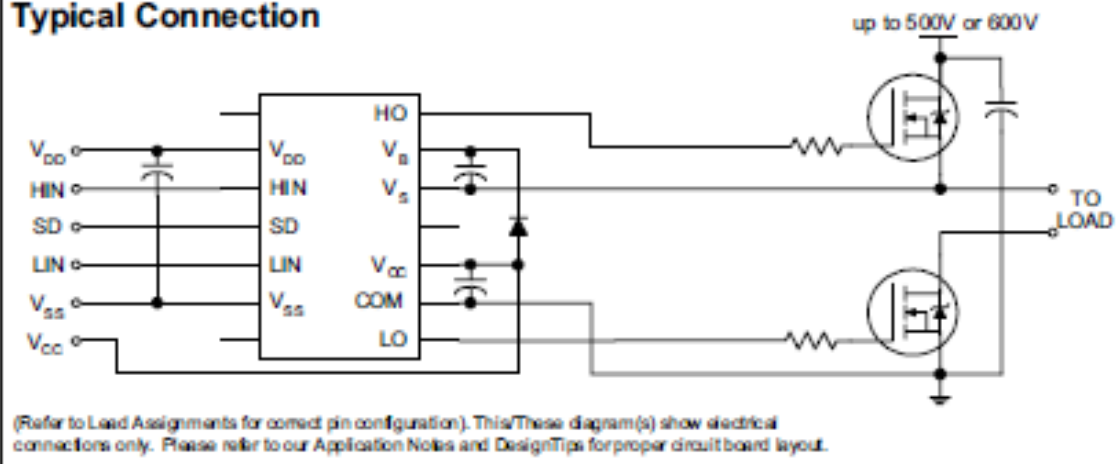
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V
	(IR2113)	-0.3	625	
V_S	High side floating supply offset voltage	$V_B - 25$	$V_B + 0.3$	
V_{HO}	High side floating output voltage	$V_S - 0.3$	$V_B + 0.3$	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25	
V_{LO}	Low side output voltage	-0.3	$V_{CC} + 0.3$	
V_{DD}	Logic supply voltage	-0.3	$V_{SS} + 25$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	$V_{CC} - 25$	$V_{CC} + 0.3$	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	$V_{SS} - 0.3$	$V_{DD} + 0.3$	
dV_G/dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50	V/ns
P_D	Package power dissipation @ $T_A \leq +25^\circ\text{C}$ (14 lead DIP)	—	1.6	W
	(16 lead SOIC)	—	1.25	
$R_{\theta JA}$	Thermal resistance, junction to ambient (14 lead DIP)	—	75	$^\circ\text{C/W}$
	(16 lead SOIC)	—	100	
T_J	Junction temperature	—	150	$^\circ\text{C}$
T_S	Storage temperature	-55	150	
T_L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300	

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V_B	High side floating supply absolute voltage	$V_S + 10$	$V_S + 20$	V
V_S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V_{HO}	High side floating output voltage	V_S	V_B	
V_{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V_{LO}	Low side output voltage	0	V_{CC}	
V_{DD}	Logic supply voltage	$V_{SS} + 3$	$V_{SS} + 20$	
V_{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V_{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V_{SS}	V_{DD}	
T_A	Ambient temperature	-40	125	$^\circ\text{C}$

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to $-V_{BS}$. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When $V_{DD} < 5V$, the minimum V_{SS} offset is limited to $-V_{DD}$.

EK 2 Basitleştirilmiş Pelton Türbin Denklemleri

Türbin tasarımını daha kolay ve kısa olarak yapabilmek için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır. Şekil Ek-2.1 ve Şekil Ek-2.2'deki büyüklüklerin hesaplamalarında kullanılacak formüller:

$$C_1 = K_c \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (\text{EK-2.1})$$

C_1 (m/s) su jetinin mutlak hızı,

$$K_c = 0,96 \dots 0,98 \quad (\text{EK-2.2})$$

arasında değişmekte olan bir katsayı, g (m/s²) yerçekimi ivmesi ve H (m) ise net düşüktür [1,2,4,8].

$$d_0 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot C_1} \quad (\text{EK-2.3})$$

d_0 (m) optimal jet yapısı ve Q su debisidir.

$$U_1 = K_u \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (\text{EK-2.4})$$

U_1 (m/s) optimal çevresel hız,

$$K_u = 0,45 \dots 0,49 \quad (\text{EK-2.5})$$

arasında değişmekte olan bir katsayıdır [1,2,4,8].

$$b = 2,5 \dots 3,2 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.6})$$

b (m) kepçe genişliğidir.

$$h = 2,1 \dots 2,7 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.7})$$

h kepçe uzunluğudur.

$$h_1 = 0 \dots 0,35 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.8})$$

$$h_2 = 0,85 \dots 1,5 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.9})$$

h_1 ve h_2 Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

$$t \approx 0,9 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.10})$$

t (m) kepçe derinliğidir.

$$D = \frac{60 \cdot U_1 \cdot i}{\pi \cdot n} \quad (\text{EK-2.11})$$

D (m) çark çapı, i iletim oranı (türbin, generatöre direk akupla bağlı ise 1 alınır) ve n (d/d) türbin devir sayısıdır.

$$n = \frac{60 \cdot U_1 \cdot i}{\pi \cdot D} \quad (\text{EK-2.12})$$

$$a = 1,2 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.13})$$

a (m) kepçenin uç açıklık genişliğidir.

$$K = 0,1 \dots 0,17 \cdot d_0 \quad (\text{EK-2.14})$$

K (m) ke çenin ofsetidir.

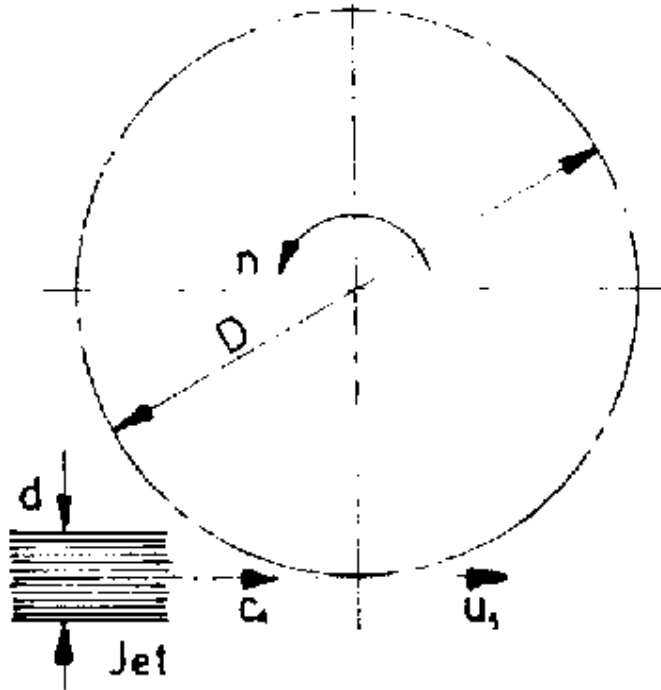
$$Z = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot d_0} \quad (\text{EK-2.15})$$

$$D_a = D + 1,2 \cdot h \quad (\text{EK-2.16})$$

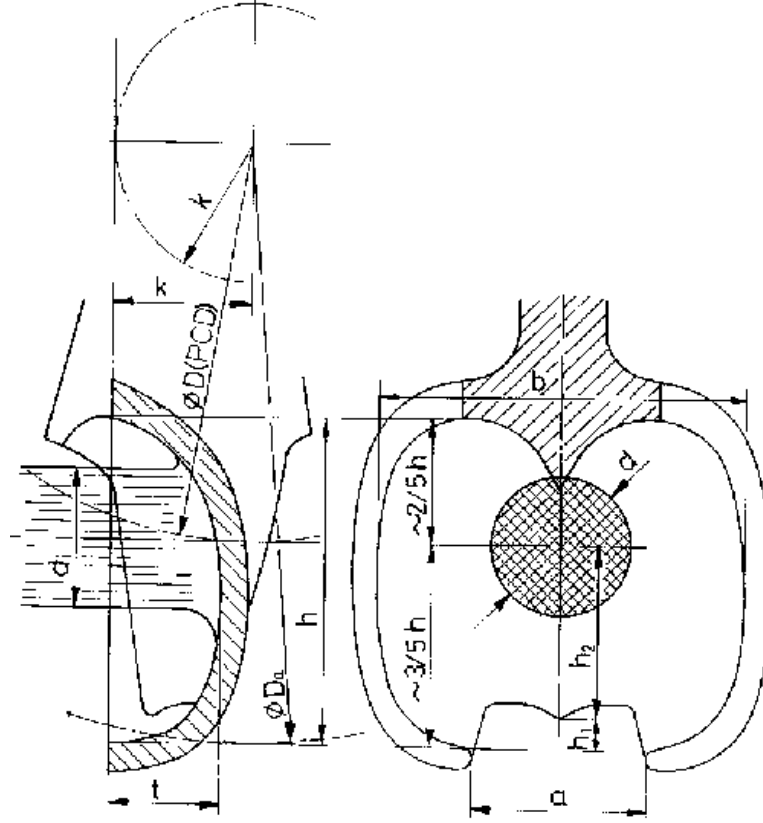
D_a (m)  arkın dış çapıdır.

$$P = Q \cdot H_e \cdot g \cdot \rho \cdot \eta \cdot \frac{1}{1000} \quad (\text{EK-2.17})$$

P (kW)  ıkış gücü, ρ (kg/m³) su yoğunluğu ve η ise verimdir.



Şekil Ek 2.1. Pelton türbin hesabı için prensip  ema



Şekil Ek 2.2. Pelton türbini kepçesinin hesaplarında kullanılan prensip şekil

Kepçelerin dayanabileceği maksimum kuvvetler için; püskürtücüsünden fışkıran suyun C hızının kepçeye girişte çevresel hız yönündeki bileşenin değeri $C_{u1} = C_0 = 0,98 \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ ve nominal debi değeri $Q_n = \pi \cdot \frac{d_0^2}{4} \cdot C_0$ (m^3/s) olarak alınarak. Denklem EK-3.17’de yerine yazıldığında aşağıdaki ifadeler elde edilmiş olur.

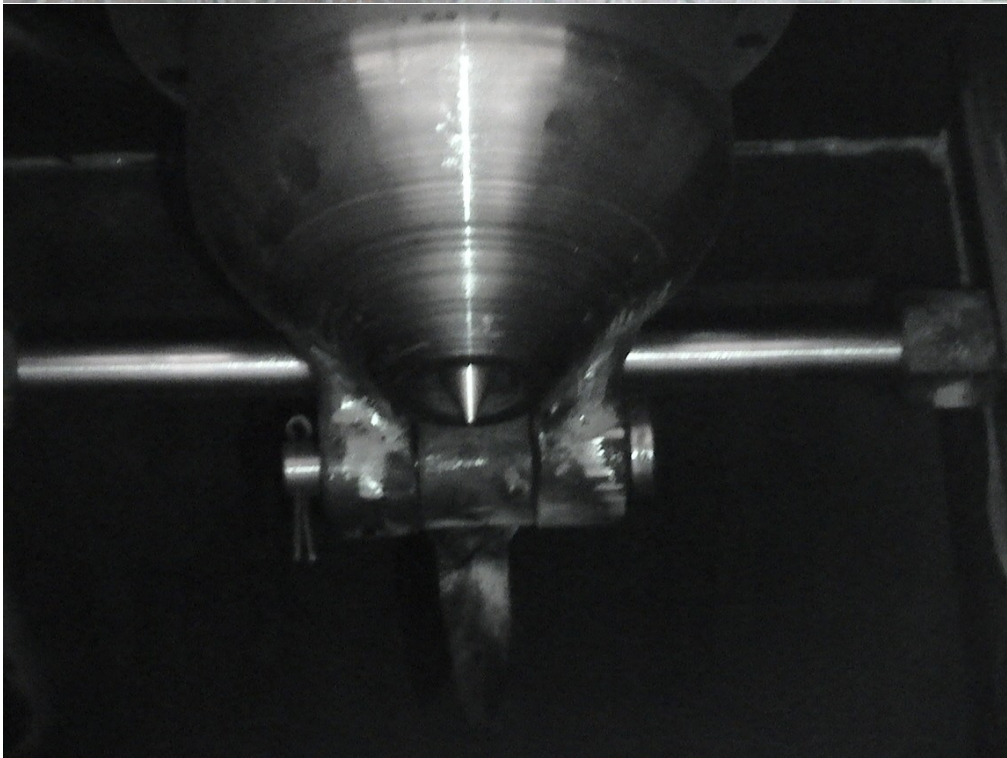
$$P_{Smaks} \cong 1000 \cdot d_0^2 \cdot H_e \quad (kp) \quad (EK-2.18)$$

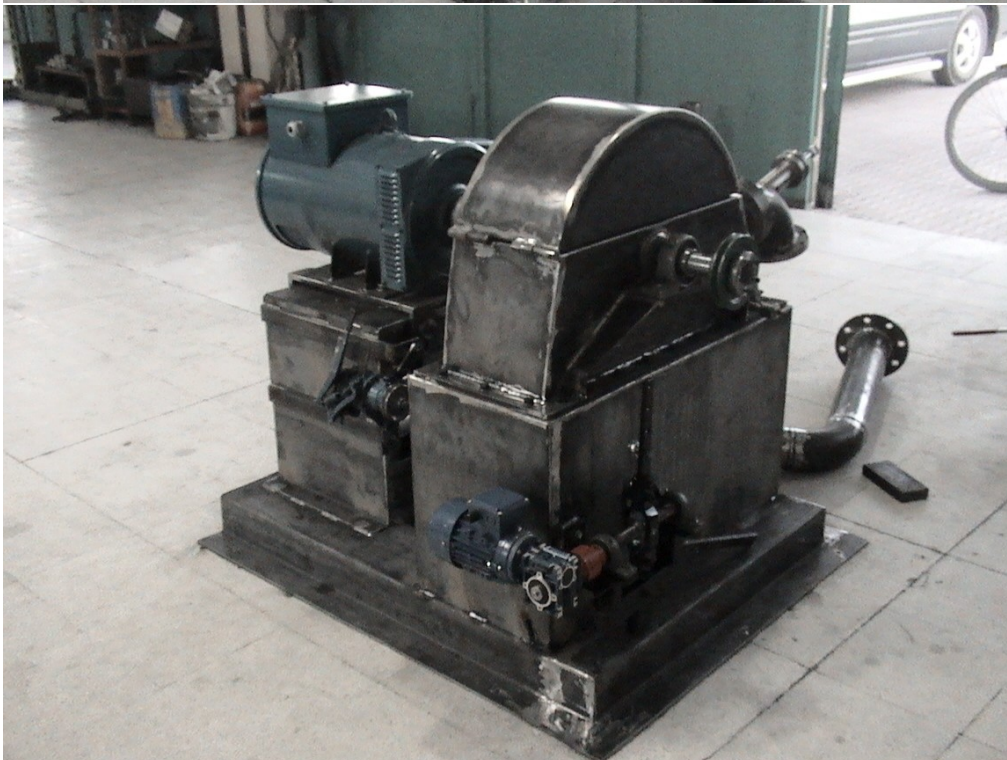
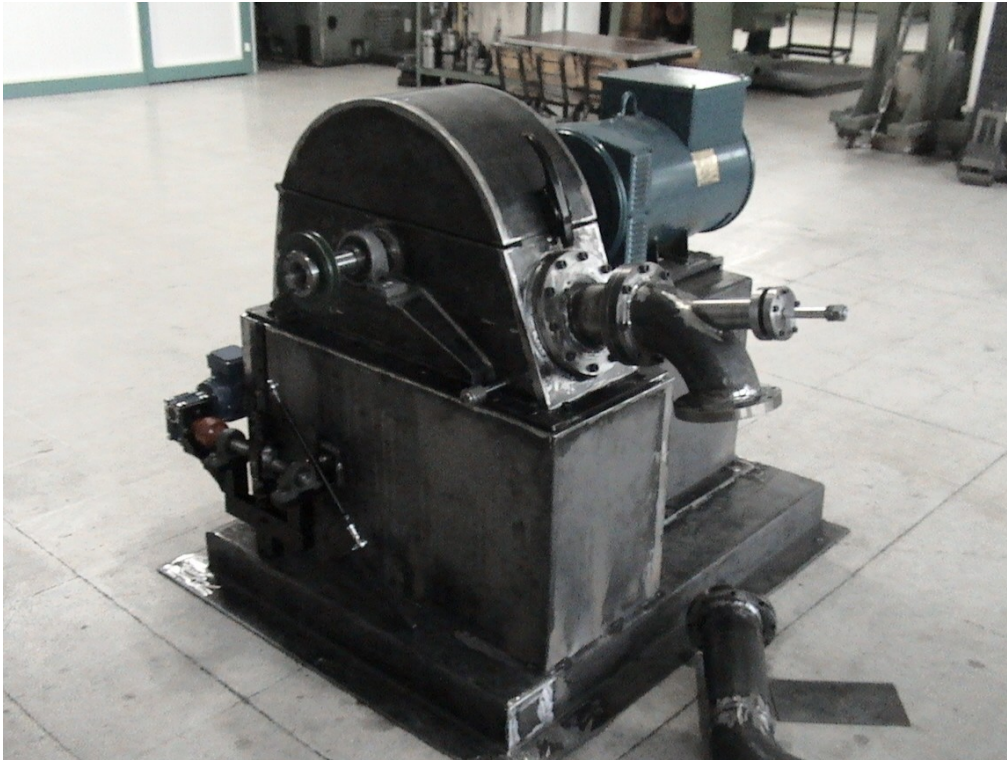
$$P_{Ssn} \cong 500 \cdot d_0^2 \cdot H_e \quad (kp) \quad (EK-2.19)$$

değerleri bulunur.

EK 3 İmalat Resimleri









ÖZGEÇMİŞ

Mahmut Temel ÖZDEMİR

Fırat Üniversitesi

Mühendislik Fakültesi

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Elazığ

0 424 237 0000/5238

E-posta: mto@firat.edu.tr

- 1977 : Tokat /Reşadiye’de doğdu.
- 1991-1994 : Reşadiye Lisesi’ni bitirdi.
- 1995-1999 : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik–Elektronik Bölümünden mezun oldu.
- 2000-... : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik–Elektronik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.
- 2000-2003 : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Ana Bilim Dalı Elektrik Tesisleri Bilim Dalında Yüksek Lisansını tamamladı.
- 2007-... : Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik–Elektronik Ana Bilim Dalı Elektrik Makinaları Bilim Dalında Doktora başladı.