

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

**PEMBELİK BARAJI VE HİDROELEKTRİK SANTRALİNDE PRİMER
FREKANS KONTROLÜNÜN UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed SOMUNKIRAN

142135110

Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 15 Nisan 2019

TEMMUZ - 2019

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

**PEMBELİK BARAJI VE HİDROELEKTRİK SANTRALİNDE PRİMER
FREKANS KONTROLÜNÜN UYGULANMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed SOMUNKIRAN

(142135110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16.04.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 20.06.2019

Tez Danışmanı:
Diğer Jüri Üyeleri:

Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ (F.Ü)

Prof. Dr. Sami EKİCİ (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ÜSTÜNDAĞ (B.Ü)

TEMMUZ-2019

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince bilgi, tecrübe ve yönlendirmeleriyle desteğini hiçbir vakit esirgemeyen danışmanım saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Aydın DİKİCİ'ye, yıllardır birlik ve beraberlik içerisinde uyumla çalıştığımız Pembelik Barajı ve HES İşletme Müdürlüğünün, İşletme Müdürü Fethi DEMİREL'e, Muhasebe Şefi Murat CAVLI'ya, Satın Alma personeli İbrahim Halil KOCA'ya ve değerli tüm çalışma ekibi arkadaşlarıma, Pembelik Barajı ve HES projesinin kurulum ve devreye alma sürecinde, birlikte güzel çalışmalar yaptığımız Andritz Hydro süpervizörü Jakub KALFUS'a, Darenhes Elektrik Üretim A.Ş. şirketine, şirketin tüm yönetici kadrosu ve çalışma arkadaşlarıma saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez süresince ve hayatın her aşamasında yanımda olan gerek teknik bilgisiyle gerek de manen hiçbir desteğini esirgemeyen değerli eşim Hilal GÖLEN SOMUNKIRAN'a ve aileme sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın amacına uygun bir şekilde, Vatana ve Millete faydalı olabilmesi dileğiyle,

Muhammed SOMUNKIRAN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
TABLolar LİSTESİ	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. ENERJİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ.....	3
3. ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİ VE YÜK FREKANS KONTROLÜ....	7
3.1. EnterkonnekteGüç Sistemi	7
3.2. Enterkonnekte Sistemde YükFrekans Kontrolü	9
4. PRİMER (BİRİNCİL) FREKANS KONTROLÜ	11
4.1. Primer Frekans Kontrol Performans Testleri	14
4.1.1. Primer Frekans Kontrol Rezerv Testi.....	16
4.1.2. Primer Frekans Kontrol Hassasiyet Testi	21
4.1.3. 24 Saat Doğrulama Testi	22
5. PEMBELİK BARAJI VE HES PRİMER (BİRİNCİL) FREKANS KONTROLÜ PERFORMANS TESTLERİ.....	24
5.1. Pembelik Barajı ve HES için Teknik Veriler	24
5.1.1. Ölü Bant	27
5.1.2. Hız Eğimi (Speed–Droop).....	27
5.2. Pembelik Barajı ve HES PFK Rezerv Testleri	27
5.2.1. Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri.....	28

5.2.1.1. Ünite-1 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri	28
5.2.1.2. Ünite-2 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri	31
5.2.2. Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri.....	34
5.2.2.1. Ünite-1 Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri.....	34
5.2.2.2. Ünite-2 Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri.....	37
5.3. Pembelik Barajı ve HES PFK Hassasiyet Testleri	40
5.3.1. Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testleri	40
6.3.1.1. Ünite-1 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi	40
5.3.1.2. Ünite-2 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi	41
5.3.2. Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testleri	42
5.3.2.1 Ünite-1 Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi	42
5.3.2.2. Ünite-2 Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi	43
5.4. Pembelik Barajı ve HES PFK 24 Saatlik Doğrulama Testi	44
5.4.1. Ünite-1 İçin 24 Saatlik Doğrulama Testi	44
5.4.2. Ünite-2 İçin 24 Saatlik Doğrulama Testi	47
6. SONUÇ	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	56

ÖZET

Yenilenebilir elektrik enerjisi üretiminde, hidroelektrik santralleri büyük bir öneme sahiptir. Hidroelektrik santrallerinin enterkonnekte şebekeye bağlandıktan sonra, önemli hususlardan biri olan üretilen enerjinin frekans kalitesi ve kararlılığı, frekans kontrolünün önemini ortaya koymaktadır.

Enerji şebekelerinin kararlılığını sağlamak için, şebeke frekansının belirli değerler arasında tutulması operasyonuna "Yük Frekans Kontrolü" denir.

Yük-Frekans kontrolü, Primer (Birincil) Frekans Kontrolü, Sekonder (İkincil) Frekans Kontrolü ve Tersiyer Frekans Kontrolü olmak üzere 3 aşamalı olarak gerçekleştirilir.

Bu tezde, Pembelik Hidroelektrik santralinde Primer (Birincil) Frekans Kontrolü performansı hakkında bilgi verilecektir.

Primer Frekans Kontrol Testleri ünitelerin ENTSO-E (UCTE) kriterlerine uygunluğunun tespiti amacıyla, "Primer Frekans Kontrol Rezerv Testi", "Primer Frekans Kontrol Hassasiyet Testi" ve "Primer Frekans Kontrol 24 saat Doğrulama Testi" olarak 3 aşamadan oluşmaktadır.

Bu tez çalışmasında Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Ağı (ENTSO-E) kriterleri dikkate alınmıştır. Pembelik Barajı ve Hidroelektrik Santralinin bu kriterlere uygunluğu incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik santralleri, Yük frekans kontrolü, Primer frekans kontrolü,

SUMMARY

Application of Primary Frequency Control in Pembelik Dam and Hydroelectric Power Plant

In the production of renewable electricity, hydroelectric power plants have a great proposition. The frequency and stability of the generated energy, which is one of the important issues of hydroelectric power plants after interconnection grid.

To ensure the stability of the energy networks, the operation of keeping the network frequency between certain values is called Load Frequency Control.

Load-frequency control is carried out in 3 stages;

- Primary Frequency Control,
- Secondary Frequency Control,
- Tertiary Control.

This thesis will provide information about primary frequency control performance in Pembelik Dam and Hydroelectric Power Plant.

Primary Frequency Control Tests have 3 stages as "Primary Frequency Control Reserve Test" and "Primary Frequency Control Sensitivity Test" and "Primary Frequency Control 24 Hours Verification Test" to determine compliance with ENTSO-E (UCTE) standards.

In this thesis, European Network of Transmission System Operators (ENTSO-E) criterias were taken into consideration. The compliance of Pembelik Dam and Hydro Power Plant to the criteria was examined.

KeyWords: Hydroelectric power plants, Load frequency control, Primary frequency control

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1 Hız eğim değerleri	17
Tablo 5.1 Pembelik Barajı ve HES için ünitelerin işletme ayar değerleri.....	24
Tablo 5.2 Ölçümü yapılan sinyallerin tipi ve bağlantı noktaları	25
Tablo 5.3 Ölçümü yapılan sinyallerin ölçekleme oranları	26
Tablo 5.4 Simule frekans değerleri.....	26
Tablo 5.5 Test sonuçlarına göre Ünite-1 ve Ünite-2	50
Tablo 5.6 Ünite-1 için PFK performans testleri sonuçları.....	50
Tablo 5.7 Ünite-2 için için PFK performans testleri sonuçları.....	51

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Hidroelektrik enerji üretim akım şeması	5
Şekil 3.1 Enterkonnekte güç sistemi	8
Şekil 3.2 Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işlem şeması.....	9
Şekil 3.3 Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işleminin aralıkları.....	10
Şekil 4.1 Ünite aktif çıkış gücünün frekans sapmasıyla hız eğimine göre değişmesi	12
Şekil 4.2 Sistem frekansının yükselmesi durumunda ünitenin primer frekans kontrol tepkisi	13
Şekil 4.3 Sistem frekansının düşmesi durumunda ünitenin primer frekans kontrol tepkisi	14
Şekil 4.4 Frekans simülasyonu uygulama yöntemi prensip şeması.....	16
Şekil 4.5 Maksimum çıkış gücü seviyesi için primer frekans kontrol rezerv testi simule frekans uygulaması.....	18
Şekil 4.6 Minimum çıkış gücü seviyesi için primer frekans kontrol rezerv testi simule frekans uygulaması.....	18
Şekil 4.7 $f=49,8$ Hz'lik simule frekans uygulamasında ünitelerden beklenen tepki	19
Şekil 4.8 $f=50,2$ Hz'lik simule frekans uygulamasında ünitelerden beklenen tepki	20
Şekil 4.9 Primer frekans kontrol rezerv testinin değerlendirilmesi	20
Şekil 4.10 Primer frekans kontrol hassasiyet testi uygulaması	22
Şekil 4.11 Primer frekans kontrol doğrulama testi değerlendirilmesi	23
Şekil 5.1 Ünite-1 maksimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi	28
Şekil 5.2 Ünite-1 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi	29
Şekil 5.3 Ünite-1 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi	30
Şekil 5.4 Ünite-2 maksimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi	31
Şekil 5.5 Ünite-2 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi	32
Şekil 5.6 Ünite-2 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi	33
Şekil 5.7 Ünite-1 minimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi	34

Şekil 5.8 Ünite-1 minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi	35
Şekil 5.9 Ünite-1 minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi	36
Şekil 5.10 Ünite-2 için minimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi	37
Şekil 5.11 Ünite-2 minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi	38
Şekil 5.12 Ünite-2 minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi	39
Şekil 5.13 Ünite-1 için maksimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi	40
Şekil 5.14 Ünite-2 için maksimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi	41
Şekil 5.15 Ünite-1 için minimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi	42
Şekil 5.16 Ünite-2 için minimum gücü seviyesinde hassasiyet testi	43
Şekil 5.17 Ünite-1 için 24 saatlik doğrulama testi.....	44
Şekil 5.18 Ünite-1 şebeke frekansı pozitif yöndeki maksimum sapması	45
Şekil 5.19 Ünite-1 şebeke frekansı negatif yöndeki maksimum sapması	45
Şekil 5.20 Ünite-1 24 saat doğrulama testi performansı	46
Şekil 5.21 Ünite-2 için 24 saatlik doğrulama testi.....	47
Şekil 5.22 Ünite- 2 şebeke frekansı pozitif yöndeki maksimum sapması	48
Şekil 5.23 Ünite- 2 şebeke frekansı negatif yöndeki maksimum sapması	48
Şekil 5.24 Ünite-2 24 saat doğrulama testi performansı	49

KISALTMALAR

ENTSO-E	: Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşleticileri Ağı
UCTE	: Elektrik İletim Koordinasyon Birliği
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
UYTM	: Ulusal Yük Tevzi Merkezi
CESA	: Kıta Avrupası Senkron Bölgesi
HES	: Hidroelektrik Santrali
MKÜD	: Minimum Kararlı Üretim Düzeyi
PFK	: Primer Frekans Kontrolü
SFK	: Sekonder Frekans Kontrolü
EPŞY	: Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği
PLC	: Programlanabilir Mantıksal Denetleyici
kWh	: Kilowatt-saat (Enerji)
MW	: Megawatt (Güç)
TWh	: Terawatt-saat (Enerji)
Hz	: Hertz (Frekans)
ms	: Milisaniye
dk	: Dakika

SEMBOLLER LİSTESİ

s_g	: Hız eğimi (Speed-Droop) (%)
f_n	: Nominal frekans (50 Hz)
Δf	: Sistem frekansındaki sapma miktarı
ΔP_G	: Ünite çıkış gücündeki değişim miktarı
P_{GN}	: Ünite nominal çıkış gücü
P_{Set}	: Ünite çıkış gücünün ayarlanmış değeri
f_0	: Ünite kontrol sisteminin frekans sapmalarına tepki vermediği frekans aralığı (Ölü bant - Hz)
Q	: Primer frekans kontrol rezerv kapasitesi
Δf_G	: Ünitenin ölü banttan sonra algıladığı frekans sapma miktarı
Δt_d	: Tepkideki gecikme süresi

1. GİRİŞ

Endüstri devrimi akabinde meydana gelen gelişmeler, artan nüfus, sanayi ve teknolojik yatırımlar sonucu elektrik enerjisine olan ihtiyaç da aynı ölçüde artmış ve zorunlu hale gelmiştir. Elektrik enerjisi ihtiyacı büyük ölçüde fosil kaynaklardan temin edilmektedir. Fakat bu kaynakların tükenmesi, çevreye olumsuz yönde etkileri neticesinde alternatif enerji kaynağı olan yenilenebilir enerji kaynakları tercih edilmeye başlamıştır. Verimlilik, sürdürülebilirlik, elektrik enerjisinin büyük ölçüde depolanamamasında dolayı kaynağı yenilenebilen enerji kaynaklarını tercih etmek büyük ölçüde önem arz etmektedir [1].

Yenilenebilir enerji kaynağı olarak hidroelektrik enerjisi, ekolojik dengeye olumsuz yönde etki eden kaynaklara göre daha temiz, verimli ve daha az işletme maliyetine sahip bir enerji kaynağıdır [2,3].

Bir elektrik enerjisi iletim sisteminde üretilen aktif ve reaktif güç birbirinden farklı denetim faaliyetleri ile kontrol edilir. Aktif güç kontrolü, frekans kontrolü ile ilişkilidir. Aynı şekilde reaktif güç kontrolü ise gerilim kontrolü ile ilişkilidir. Bundan dolayı aktif ve reaktif güç kontrolünde meydana gelen problemlerin çözülmesi için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır [4,6].

Elektrik enerjisi güç sistemlerinin kararlılığındaki en önemli faktör frekanstır. Güç sistemlerinde oluşabilecek kararsızlık durumu ciddi problemlere neden olmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek amacıyla üretilen enerji ile tüketilen enerji dengesinin sağlanarak frekans değerinin uluslararası standartlarda belirtilen değer aralıklarında tutulması gerekmektedir [7,8].

Sistem şebeke frekans değerinin belirli limit aralığında tutulması için yapılan kontrole yük ve frekans kontrolü denir. Yük ve frekans kontrolü, bir elektrik enerji sisteminde üretim/tüketim dengesinin kontrolüdür [4].

Üretilen enerji anlık olarak tüketilmektedir. Sistemdeki yükün durumuna göre arz talep dengesinin sağlanması zorunluluk gerektiren bir durumdur. Bu dengeyi sağlamak için yük frekans kontrol yöntemleri uygulanmaktadır [9].

Bir elektrik üretim tesisinde generatörlerin ürettiği güç, sistemdeki yük ve kayıplar kadardır. Bu eşitsizlik bozulduğu durumda bu denge sağlanana kadar türbin yük artışı veya yük azalmasına göre türbin hızının artması ve azalmasına neden olur [10].

Elektrik enerji şebekelerinin kapasitesi ve kalitesi dünyada hızla gelişip büyümektedir. Örneğin, bir ülke kendi içinde enterkonnekte şebeke oluşturmakla kalmayıp, komşu ülkeler ile enterkonnekte şebeke bağlantıları aracılığıyla belli bir standart içinde güç alışverişi yapmaktadır. Bu şekilde geniş ölçekte bir enterkonnekte şebeke sisteminin koordinasyonu ve işletilmesinde koordineli çalışan bir organizasyon vardır. Bu organizasyonun kriterleri arasında ilk sırada ele aldığı konu, yük frekans kontrolüdür. ENTSO-E (UCTE) organizasyonuna katılabilmek için bu kriterler sağlanmalı ve bu enterkonnekte sistemin içinde kararlı çalışması gereklidir. Yani, şebekenin frekans performansı ENTSO-E (UCTE) kriterlerine uygun olması gerekir. Sistem işletmecisi olan TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş) kurumu, bu kriterlere sahip olabilmesi için çeşitli projeler geliştirmekte, enerji üretim tesislerinde testler yapıp ve bu doğrultuda yönetmelikler hazırlamaktadır [4,5,6].

Yük frekans kontrolünün amacı genel olarak: elektrik enerji sistem frekansını, Ulusal Yük Tevzi Merkezi (UYTM) tarafından belirlenmiş bir aralıkta tutup; sistemdeki senkronizasyonun ve kararlılığın muhafaza edilmesiyle sabit bir şebeke frekansını yakalamak ve sabit genlikte sinüzoidal bir gerilim elde etmek, bölgeler arası güç değişimleri sonucu oluşan frekans değişimlerinin olumsuz etkilerini absorbe ederek kaliteli, kesintisiz, güvenilir, verimli enerji sağlamak ve yük tevzi sisteminde yer alan enerji üretim tesislerindeki ünitelerin, maksimum verimde çalışmalarını sağlamaktır.

2. ENERJİ VE YENİLENEBİLİR ENERJİ

Enerji iş yapabilme yeteneğidir. Tüm dünyada ve özellikle ülkemizin içinde bulunduğu coğrafyada tüm ilişkilerin temelini oluşturan en önemli konu enerjidir. Bu kadar ehemmiyet arz eden enerji meselesi, tüm sektörleri ilgilendiren ve etkileyen önemli bir faktördür.

Günümüz şartlarında enerji kaynaklarının tükenebilir olması, dışa bağımlılık ve çevreye verilen etkilerden dolayı, günümüzdeki toplumlar için güvenli, sürekli, az maliyet ile temiz enerji üretimi, ülkelerin ekonomik ve sosyal açıdan temel sorumlulukları ve problemleri arasında yer almaktadır. Sanayinin, ekonominin ve nüfusun hızla büyümekte ve gelişmekte olan ülkemizde, enerji ihtiyacı da sürekli artış göstermektedir. Bu nedenle üretilen enerjinin ve enerji kaynağının yüksek verimle kullanılması için mevcut olan enerji kaynaklarının yanı sıra alternatif ve yenilenebilir enerji kaynaklarına ait potansiyelin değerlendirilmesi büyük önem arz etmektedir.

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilebilen ve kendini sürekli yenileyebilen bir enerji kaynağı olarak tanımlamak mümkündür. Dışa bağımlılığın azaltılması, enerji kaynaklarının zenginleştirilerek sürdürülebilir duruma getirilmesi, enerji üretim ve tüketiminde çevreye verilen zararın azaltılması, enerji üretim/tüketim dengesi sağlanarak daha verimli bir sistemin ortaya koyulması büyük öneme sahiptir.

Yenilenebilir enerjiyi diğer enerji çeşitlerinden ayıran en büyük özellik doğal bir şekilde kendini yenileyebilmesidir. Bunun yanında çevreye zarar veren karbon salınımının azaltılması, yerli kaynaklar olduğu için dışa bağımlılığın azaltılması açısından oldukça büyük bir öneme sahiptir. Yenilenebilir enerjide, son yıllarda güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisi gibi alternatif enerji kaynakları yatırımlarının artmasına rağmen hidroelektrik enerjisi yenilenebilir enerji sektöründen büyük paya sahiptir.

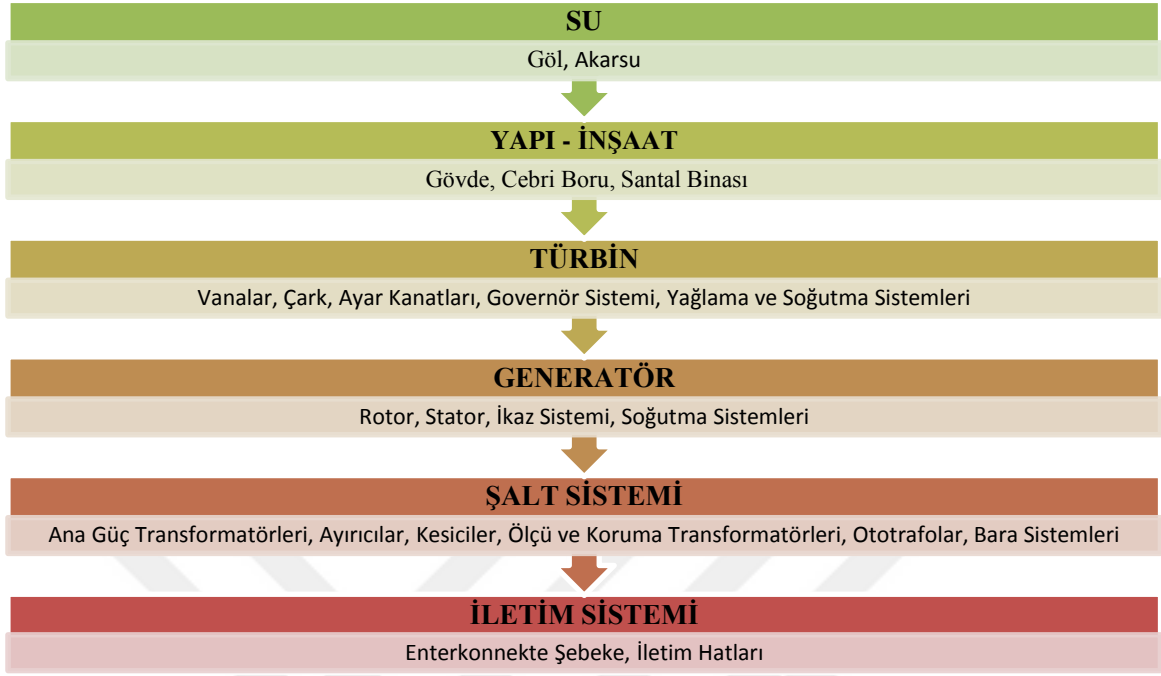
URL-1'e (2019) göre ülkemizde elektrik enerjisi tüketimi 2017 yılında bir önceki yıla göre %5, artarak 294,9 milyar kWh, enerji üretimi ise bir önceki yıla göre % 7,7 oranında artarak 295,5 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. 2017 yılında elektrik üretimimizin, %37'si doğalgazdan, %33'ü kömürden, %20'si hidrolik enerjiden, %6'sı rüzgârdan, %2'si jeotermal enerjiden ve %2'si diğer kaynaklardan elde edilmiştir. 2018 yılı ilk yarısından itibaren ülkemizin toplam kurulu gücü 87.139 MW' a değerine ulaşmıştır.

URL-1'e (2019) göre 2018 yılı ilk yarısı sonunda kurulu gücümüzün enerji kaynaklarına göre dağılımı; %32,0'ı hidroelektrik enerjisi, %26,4'ü doğalgaz, %21,4'ü kömür, %7,7'si rüzgâr, %5,4'ü güneş, %1,3'ü jeotermal ve %5,8'i ise diğer kaynaklar şeklindedir. Ayrıca Ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrallerinin sayısı, 2018 yılı ilk yarısı itibarıyla 6.886'ya (Lisanssız santraller dahil) yükselmiştir. Mevcut olan toplan enerji santrallerinde 636 adet hidroelektrik, 41 adet kömür, 232 adet rüzgâr, 40 adet jeotermal, 303 adet doğal gaz, 5.422 adet güneş, 212 adet ise diğer kaynaklı enerji santralleri mevcuttur.

URL-1'e (2019) göre elektrik tüketimimiz 2023 yılında baz senaryoya göre yıllık ortalama %4,8 artış ile 385 TWh'e ulaşması beklenmektedir.

Ülkemizde Yenilenebilir enerji kaynaklarında büyük bir yere sahip hidroelektrik santraller çevreye uyumlu, temiz, yüksek verimli, yakıt gideri olmayan, uzun ömürlü, işletme giderleri düşük ve dışa bağımlılığı olmaya yerli bir kaynaktır [2,3].

Hidroelektrik santrallerde belli bir akış veya düşüye sahip su, kanal veya borular ile taşınarak türbin çarkları döndürülür. Bu hareket neticesinde oluşan mekanik enerji generatör yardımı ile elektrik enerjisine dönüştürülür. Düşü üst su kotu ile çıkış su kotu arasındaki farktır. Düşüyle elde edilen debi, üretilen güce doğrudan etki eder [11,12]. Şekil 2.1'de hidroelektrik enerji üretiminin akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Hidroelektrik enerji üretim akım şeması

URL-2'ye (2019) göre Ülkemizin teorik hidroelektrik potansiyeli dünya teorik potansiyelinin %1'i, ekonomik potansiyeli de Avrupa ekonomik potansiyelinin %16'sıdır. Ülkemizin yenilenebilir enerji kaynakları potansiyeli içerisinde en önemli yere sahip olan hidrolik kaynaklarımızın teorik hidroelektrik potansiyeli 433 milyar kWh olup, teknik olarak değerlendirilebilir potansiyel 216 milyar kWh ve ekonomik hidroelektrik enerji potansiyel ise 140 milyar kWh/yıl'dır. 2017 yılında hidroelektrik kaynaklı 58,2 milyar kWh elektrik enerjisi üretimi olmuştur. 2018 Haziran ayı sonu itibarıyla, işletmede bulunan 27.912 MW'lık kurulu güce sahip 636 adet Hidroelektrik santrali Türkiye toplam kurulu gücünün %32'sine karşılık gelmektedir.

URL-3'e (2019) göre ENTSO-E, Avrupa Birliği ülkelerinin yüksek verimli bir uyum ile müşterek bir enerji piyasası sistemini oluşturmak ve bununla birlikte güvenli ve verimli bir enerji sunmak, enerjinin iletimini, tüketimini ve dağıtımını en ideal düzeye getirmek, enerji çeşitliliğini avantajlı bir hale getirmek ve bu süreci işletirken de çevreye olumsuz bir etki bırakmamak gayesiyle kurulmuş bir organizasyondur. 36 ülke ve bu ülkelerde bulunan 43 iletim sisteminin işleticileri ENTSO-E üyesidir.

Türkiye enterkonnekte şebeke sistemi ile ENTSO-E Kıta Avrupası Senkron Bölgesi (CESA) arasındaki senkron paralel denemeçalışmaları 18 Eylül 2010 tarihinde başlamıştır. Türkiye Elektrik Sistemi ENTSO-E Kıta Avrupası Senkron Bölgesi (CESA) ile 2014 sonu itibariyle kalıcı olarak işletmeye geçilmiştir. Ayrıca Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) 14 Ocak 2016 tarihinde imzalanan anlaşmayla birlikte ENTSO-E organizasyonunun ilk ve tek gözlemci üyesi olmuştur [13].

ENTSO-E organizasyonu, yukarıda bahsedildiği üzere uluslararası enterkonnekte sisteminde maksimum faydanın sağlanması için oluşturulan bir çalışmadır. Bölgemizde bulunan en büyük senkron blok aynı zamanda da dünyadaki en büyük senkron sistemlerden biri olan, Avrupa Elektrik İletim Koordinasyon Birliği (UCTE) Avrupa'nın büyük bölümünü oluşturan sistemdir [13].

1 Temmuz 2009 tarihinden itibaren Avrupa elektrik sisteminin teknik standartları belirleyen organizasyonlar (UCTE, NORDEL, BALTSO, ATSOI, UKTOA) ve piyasa kurallarını belirleyen ETSO organizasyonu, ENTSO-E (European Networks of Transmission System of Operators for Electricity - Avrupa Şebekeleri Elektrik İletim Sistem İşletmecileri) organizasyonu çatısı altında birleşmiştir. Önceden UCTE Bölgesi olarak adlandırılan organizasyon, ENTSO-E içerisinde "ENTSO-E Avrupa Kıtası Senkron Bölgesi" olarak adlandırılmaktadır [13].

UCTE organizasyonu yaklaşık 50 yıldan bu yana geliştirdiği teknik kural ve standartlarla, bu çalışma ve organizasyon içerisinde bulunan elektrik iletim sistemlerinin senkron paralel olarak işletilmesi konusunda gerekli koordinasyonu ve çalışmaları sağlamıştır. Şu anda da bu görev, ENTSO-E birliği tarafından yürütülmektedir [13].

Bu birliğin ortak amacı enterkonnekte elektrik sisteminin güvenli işletilmesi ve tüm katılımcıların piyasaya erişimini garanti altına alacak teknik koşulları sağlamaktır [13].

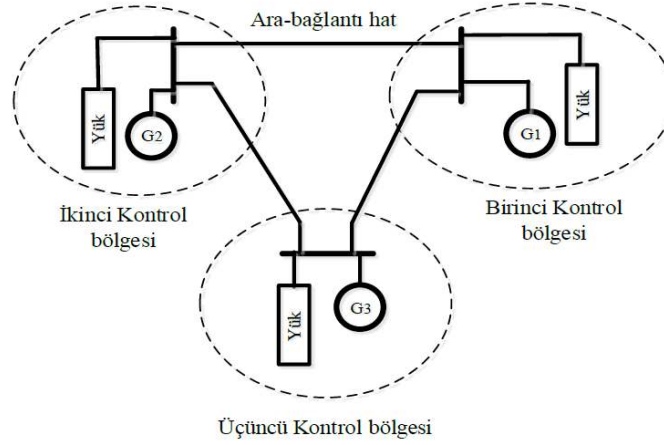
3. ENTERKONNEKTE GÜÇ SİSTEMİ VE YÜK FREKANS KONTROLÜ

3.1. EnterkonnekteGüç Sistemi

Gelişmekte olan ve tüketim alışkanlıklarının değiştiği dünyada enerji ihtiyacının artması, elektrik enerji talebinin de buna bağlı olarak artış göstermesine sebep olmaktadır. Buna bağlı olarak elektrik, dünyada en çok ihtiyaç duyulan enerji kaynağı haline gelmiştir. Bundan dolayı bu kaynağın ihtiyaç duyulan her noktaya kaliteli, kesintisiz ve düşük maliyetler ile temin edilmesi için, güvenilir ve büyük enterkonnekte güç sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [14].

Elektrik güç sisteminde ısı, ışık, mekanik vb. enerjileri elektrik enerjisine çevirip tüketiciye iletilmektedir. Elektrik güç sistemi tüketicinin anlık değişmekte olan aktif ve reaktif yük taleplerini karşılayabilmelidir. Bu talepleri karşılarken minimum maliyeti, ekolojik dengeyi, kaliteyi, sürekliliği, verimliliği, frekans ve gerilim sabitliğini dikkate alınacak şekilde dizayn edilmelidir.

Enterkonnekte elektrik güç sisteminin kararlı bir şekilde çalışması için sistem frekansının sabit kalması gerekmektedir. Bu sabit frekans için de güç dengesinin sağlanması gerekmektedir. Sisteme bağlı olan üretim merkezlerindeki generatörlerin çıkış güçlerinin sistemdeki yüke eşit olmasıyla sistemin kararlı olması ve istenen ideal durum elde edilmiş olur. Fakat talep edilen yükün sürekli artması/azalması durumu söz konusudur. Üretilen güç, talep edilen güçten yüksek olması durumunda, generatörlerin devir sayısının artmasına ve dolayısıyla sistem frekansının artmasına neden olur. Keza bunun tam tersi bir durumda da sistem frekansı azalma eğilimi gösterir. Bu gibi durumlarda sistemde değişen yükü karşılayabilmek için, komşu güç sistemleri birbirine bağlı bir şekilde çalışıp aktif gücü kendi kapasiteleri nispetinde paylaşarak frekansın yük değişiminden en az şekilde etkilenmesini sağlayabilirler. Bu komşu güç sistemleri yükü paylaşıp ortak bir frekans değeri oluşturarak daha kararlı bir sistem frekansı elde etmek için birlikte koordineli bir şekilde çalıştıkları sisteme enterkonnekte güç sistemi denir [14].



Şekil 3.1 Enterkonnekte güç sistemi

Enterkonnekte sistemin temel amacı, Şekil.3.1’de gösterilen enterkonnekte güç sisteminin dengesini sağlanması için kontrol alanları arasında koordinasyonun sağlanmasıdır. Böylelikle enterkonnekte güç sisteminde frekansın yük değişimleri sonucu en az şekilde etkilenmesini sağlanarak daha kararlı, kesintisiz ve kaliteli elektrik enerjisi temin edilebilir. Enterkonnekte güç sisteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kontrol bölgeleri arasında koordineli bir şekilde yük dağılımı yapılır. Her bir kontrol alanı sistem yükünü, yük-frekans kontrolü sistemi sayesinde kendi üretim kapasitesi oranında olarak paylaşır [14].
- Kontrol alanının kapasitesi üzerinde bir yük talebi olsa bile, koordineli ve müşterek çalışma sayesinde talep edilen yük, enterkonnekte sistem tarafından karşılanabilir [3].
- Üretim merkezlerindeki ünitelerin ekonomik kullanımı ve üretim maliyetlerini düşürebilir[14].
- Sistemdeki üretim üniteleri kapasiteleri ayırılmadan şebekeye bağlanıp "grid" yapılır. Böylelikle herhangi bir bölgenin enerji ihtiyacını sağlayan üretim merkezi devre dışı kalması durumunda, talep edilen enerji komşu üretim merkezlerinden karşılanmaya devam edebilir [14].
- Üretim merkezlerindeki ünitelerin kontrol rezerv güçleri düşük tutulabilir [14].

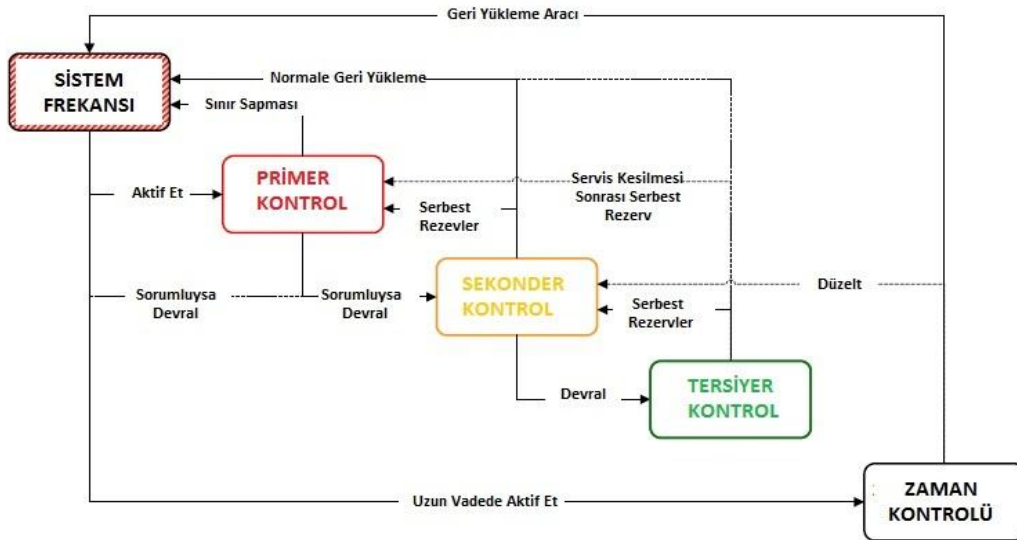
3.2. Enterkonnekte Sistemde Yük Frekans Kontrolü

Enerji şebekelerinin kararlı bir şekilde çalışmasını sağlamak için, enerji şebeke frekansının belirli değerler arasında dengede tutulmasına yük frekans kontrolü denir. Yük frekans kontrolüyle bir elektrik sisteminin üretim/tüketim dengesinin kontrolü, sabit şebeke frekansı, bölgeler arasında oluşacak güç değişimlerini ortadan kaldırma, yük tevzi sistemine bağlı ünitelerin maksimum verimlilikte çalışmasını sağlama, kesintisiz enerji ve enerji kaybının azaltılması amaçlanmaktadır.

Frekans ve gerilim sabitliği kaliteli güç üretimini belirleyen önemli faktörlerdir. Bundan dolayı yük frekans kontrolü elektrik enerji sisteminin yeterli ve istenen davranışı sergilemesinde önemli bir rol oynar [15].

Yük ve frekans kontrolü üç aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

- Primer (birincil) frekans kontrolü
- Sekonder (ikincil) frekans kontrolü
- Tersiyer kontrol



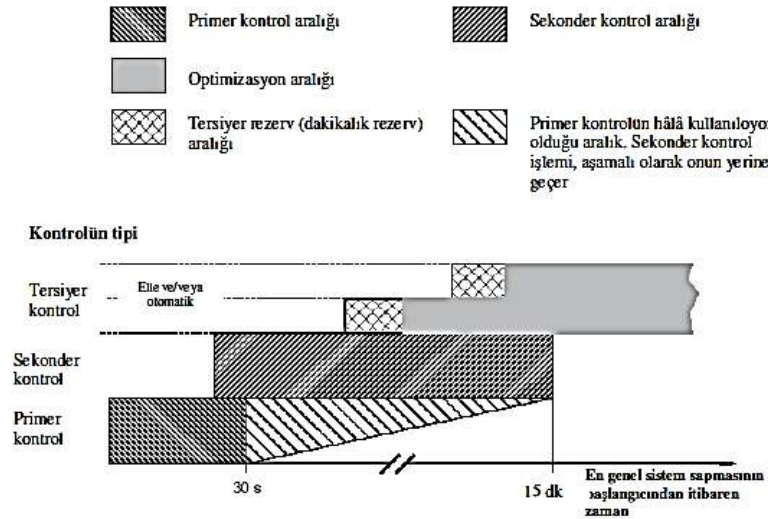
Şekil 3.2 Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işlem şeması[16]

Primer (Birincil) Frekans Kontrolü (PFK); Sistemdeki güç dengesinin bozulması durumunda frekans saptmaları makul sınırlarda tutulmasını sağlayarak sabit frekans sağlanır. Üretim merkezlerinde bu kontrolü sağlayan hız regülatör sistemleri mevcuttur. Bu kontrol ile sistemdeki üretim ve tüketim dengesi sağlanır. Ancak bu kontrolde, frekansta meydana gelen sürekli durum hatası yok edilemez [14].

Sekonder (İkincil) Frekans Kontrolü (SFK); Bölgeler arası güç akışını kontrol eder ve güç sistemindeki kalıcı frekans hatasını giderir. Bölgeler arasındaki hatlardaki aktif gücü yük tevzi merkezlerinde kurulu olan kontrol sistemleri tarafından denetlenir. Bu kontrol sistemlerinde bağlantı hattındaki alan kontrol hatasını (Area Control Error) denetler[14].

Tersiyer (Üçüncül) Frekans Kontrolü; Frekansın saptması durumunda yeterli SFK rezervine sahip olabilmek için gerek generatör güçlerini arttırıp/azaltıp gerekirse kontrollü bir şekilde yük alıp/atarak yapılan kontroldür [14].

Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işlem şeması Şekil.3.2’de işlem aralıkları Şekil.3.3’de gösterilmiştir. Bu tezde, "Primer (Birincil) Frekans Kontrolü" incelenmiştir.



Şekil 3.3 Primer, sekonder ve tersiyer kontrol işleminin aralıkları[16].

4. PRİMER (BİRİNCİL) FREKANS KONTROLÜ

Primer Frekans Kontrolünün (PFK) amacı, enterkonnekte sistemde üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlamaktır. Bu denge durumunda sabit bir sistem frekansı elde edilir. Güç sistemindeki üretim/tüketim dengenin bozulması durumunda sistem frekansında bozulmalar meydana gelir. Primer (Birincil) frekans kontrolünde çalışan generatörler bu duruma tepki vererek sistem frekansının dengeli ve sabit değerlerde kalmasını sağlar [14,22].

50 MW ve üzeri kurulu gücü olan enerji üretim santralleri, primer (birincil) frekans kontrolüne (PFK) katılması gerekmektedir. Kanal yada nehir tipi enerji santralleri, rüzgar enerji santralleri, güneş enerji santralleri, dalga ve gelgit enerjisiyle elektrik enerjisi üreten santraller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üreten santraller bu sorumluluktan muaftır [17].

Bu tezde ele alınan Pembelik Barajı ve Hidroelektrik Santralinin, toplam santral kurulu gücü **127,34 MW**, testi yapılan 2 ünitenin ayrı ayrı kurulu gücü **63,67 MW** 'dır.

Enerji üretim santrali, elektrik enerjisi üretim/tüketim dengesinin bozulması halinde sistem frekansında sapma meydana gelir. PFK yükümlülüğü olan üretim santrali, sistem frekansını sabit bir değerde dengeli hale getirmesi için rezerv kapasitesini, türbin hız regülatörlerinde ayarlanmış hız eğim (speed droop) değeri oranında, bu sapma süresince otomatik bir şekilde sisteme sunmalıdır [18].

Elektrik üretim santralinin PFK performansı, sistem frekansında ± 200 mHz'lik sapma meydana geldiğinde PFK rezerv kapasitesini (Q) hız eğim değeri (speed droop) oranında, maksimum 30 saniye içerisinde doğrusal olarak tamamen etkinleştirmeli ve ulaştığı bu çıkış gücünü minimum 15 dakika boyunca kararlı bir şekilde sürdürebilmelidir [18].

Enerji üreticileri, Ulusal Yük Dağıtım Merkezi (UYTM) tarafından belirlenen Türkiye toplam PFK rezervini karşılayabilmesi için, ünitelerinin çıkış güçlerini, frekans sapmalarına göre hız eğim değerine karşılık gelen miktar kadar arttırıp ya da azaltmalıdır.

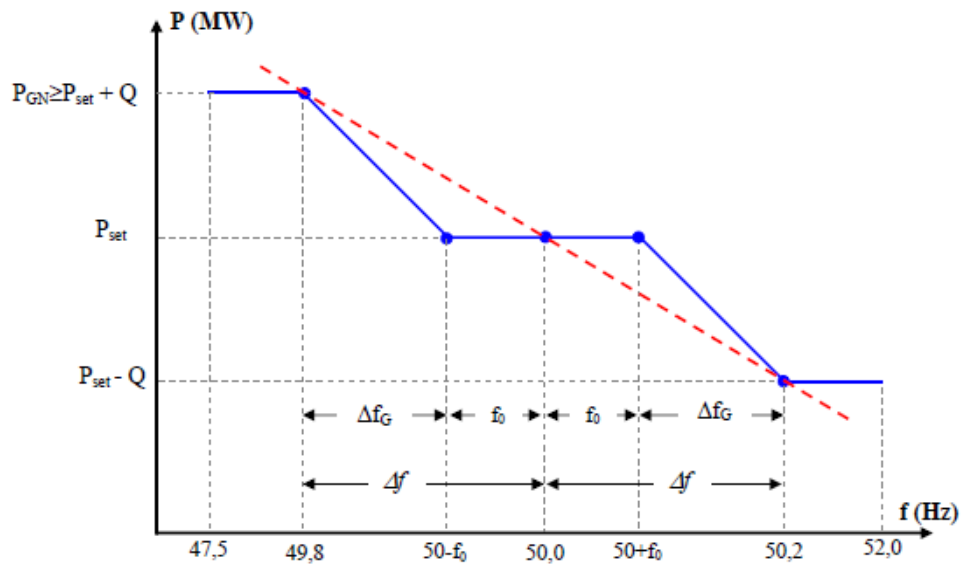
Enerji üretim santralindeki ünitenin hız eğimi, PFK rezerv kapasitesine göre 4.1’de gösterilen formülle hesaplanır [18];

$$s_g = \frac{\Delta f / f_n}{\Delta P_G / P_{GN}} \quad (4.1)$$

Burada, 4.1’de s_g (%) hız eğimi (speed - droop), f_n nominal frekans değeri (50 Hz), Δf sistem frekansındaki sapma miktarı, ΔP_G ünite çıkış gücünde meydana gelen değişim miktarı, P_{GN} ünitenin nominal çıkış gücünü ifade etmektedir.

Enerji üretim santralinde bulunan ünitelerinin PFK sistemindeki duyarsızlık aralıkları mümkün olduğu kadar az olmalıdır ve ± 10 mHz değerini geçmemelidir.

PFK yükümlülüğü olan tesislerin üniteleri, sistemde meydana gelen frekans sapması durumunda aktif çıkış güçleri Şekil 4.1’deki grafikte modellendiği gibi olmalıdır.



Şekil 4.1 Ünite aktif çıkış gücünün frekans sapmasıyla hız eğimine göre değişmesi [18]

P_{set} : Ünitenin ayarlanmış çıkış gücü değeri

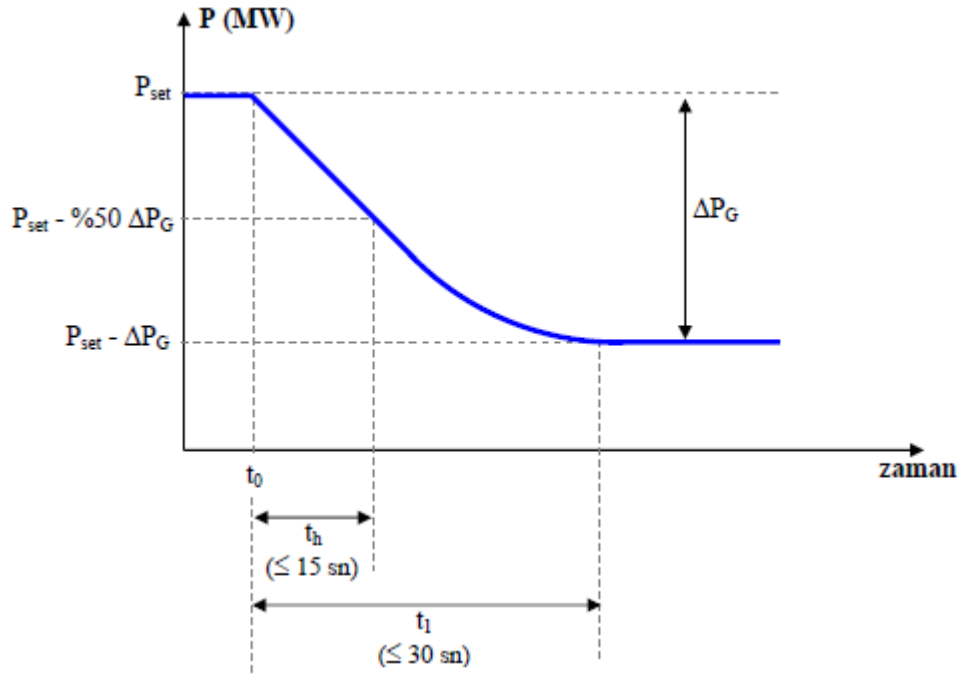
f_0 : Ünite kontrol sisteminin frekans sapmalarına tepki vermediği frekans aralığı (Ölü bant, Hz)

Q : PFK rezerv kapasitesi

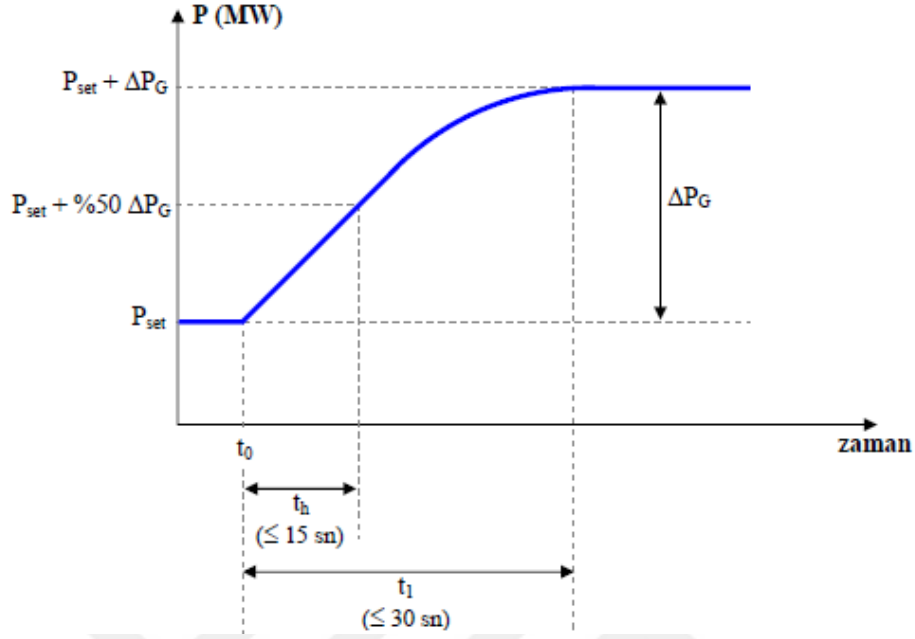
Δf_G : Ünitenin ölü banttan sonra algıladığı frekans sapmamiktarı

Δf : Sistem frekansında meydana gelen sapma miktarı

Sistem frekansında yükselme meydana gelmesiyle enerji üretim santralindeki ünitenin PFK tepkisi Şekil 4.2’de, sistem frekansında azalama durumunda enerji üretim santralindeki ünitenin PFK tepkisi Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil4.2 Sistem frekansının yükselmesi durumunda ünitenin primer frekans kontrol tepkisi [18]



Şekil 4.3 Sistem frekansının düşmesi durumunda ünitenin primer frekans kontrol tepkisi [18].

Enerji üretim tesisindeki ünitenin, sistem frekansında sapma meydana geldiği " t_0 " anından itibaren çıkış gücünü, frekans sapmasına göre, " t_h " süresi içinde, PFK rezerv miktarının (ΔP_G) %50'si kadar, " t_1 " süresi içinde ise tamamı kadar arttırıp/azaltarak sistem frekansında meydana gelen sapmayı sürekli takip etmeli ve beklenen tepkiyi otomatik olarak vermelidir.

Enerji üretim tesisindeki ünitenin, PFK rezerv miktarının yarısını maksimum 15 sn içinde, tamamını da en geç 30 sn süre içinde doğrusal olarak sağlamalıdır.

4.1. Primer Frekans Kontrol Performans Testleri

PFK testleri, "Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A. Primer Frekans Kontrol Performans Test Prosedürleri"ekine göre ünitelerin UCTE kriterlerine uygun olup olmadığını tespit etmek amacıyla aşağıda yer alan 3ayrı testten oluşmaktadır:

1. Primer (Birincil) Frekans Kontrol Rezerv Testi
2. Primer (Birincil) Frekans Kontrol Hassasiyet Testi
3. 24 Saatlik Doğrulama Testi

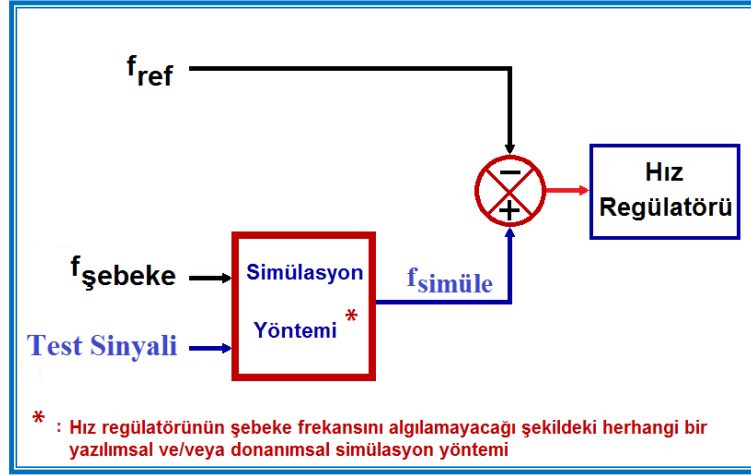
PFK performans testleri esnasında, enerji üretim santralının ünite tipine göre aşağıdaki değerler ölçülerek kayıt altına alınır;

- Ünitenin aktif güç referans değeri,
- Aktif güç çıkış değeri (akım ve gerilim trafosunda transdüser aracılığıyla)
- Şebeke frekansının değeri (Gerilim trafosundan transdüser aracılığıyla)
- Uygulanan simule frekans (Transdüser/PLC aracılığıyla)
- Vana pozisyonlarının veya yakıt akışının / miktarının değerleri (Transdüser / PLC aracılığıyla)
- Buhar türbinleri için türbinin by-pass vanası pozisyonunun açıklık miktarı (%) (Transdüser / PLC / DCS aracılığıyla)
- Buhar türbinlerinde buhar basıncının değeri (Transdüser / PLC / DCS aracılığıyla)
- Buhar türbinlerinde buhar sıcaklığı değeri (Transdüser / PLC / DCS aracılığıyla) [19].

PFK performans testleri esnasında ölçümü yapılan her bir değer için örnekleme oranı sn'de minimum 10 veri olması gerekmektedir. (100 ms'de ya da daha az sürede bir veri).

Testler için, harici olarak bağlanan her bir veri kayıt cihazının doğruluk sınıfı minimum % 0,2 olmalıdır. Ayrıca kayıt cihazıyla ölçülen değerler, zaman bilgisi ile birlikte kayıt yapabilme özelliğine sahip olmak zorundadır.

PFK performans testleri, herhangi bir yazılımsal ve / veya donanımsal simülasyon yöntemi kullanılarak, test edilen ünitenin türbin-hız regülatörünün şebeke frekansını algılamaması ve onun yerine performans testleri süresince uygulanan simule frekans değerini algılaması için, Şekil 4.4'de görülen prensibe göre bağlantılar yapılarak gerçekleştirilir.



Şekil 4.4 Frekans simülasyonu uygulama yöntemi prensip şeması [19]

Güç sisteminde yük değişimi meydana geldiğinde, hızda değişiklik olur ve generatör çıkış gücü sabit olduğundan frekans istenmeyen değerlere ulaşır. Bu durumu önlemek için yük değişimlerine göre ayar kanatlarını ayarlayıp, çıkış gücünü ve frekansı nominal değerine ulaşmasını sağlayan bir hız regülasyon sisteminin olması gerekir. Yük frekans kontrolünde en önemli görevi hız regülatörleri görmektedir [20].

Hız regülatör sisteminin genel olarak görevi, generatörün güç sistemine senkronizasyonu süresince nominal devir sayısı sinyaline ulaşmasını sağlamak ve güç sisteminde meydana gelen güç değişimlerinden dolayı meydana gelen frekans değişimlerine karşı generatörün devir sayısını nominal değerde tutmayı sağlamaktır [23].

4.1.1. Primer Frekans Kontrol Rezerv Testi

PFK rezerv testi gerçekleştirilen ünite, PFK işlevini sağlayacak konuma (Pembelik Barajı ve HES için PFC Mode ON) alınır. Ölü bant değeri 0 (sıfır) mHz olarak ayarlanır. Hız eğimi ve ilgili diğer değişkenler, "200 mHz'lik frekans sapması durumunda PKF rezervinin %50'si maksimum 15 sn içerisinde, tamamını ise en geç 30 sn içerisinde etkinleştirilmesi gerekmektedir" prensibine göre, aşağıdaki verilen Tablo 4.1'de yer alan hız eğimi değerleri ile tutarlı olacak şekilde ayarlanmalıdır. Primer rezerv kapasiteleri ve hız eğim değerleri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

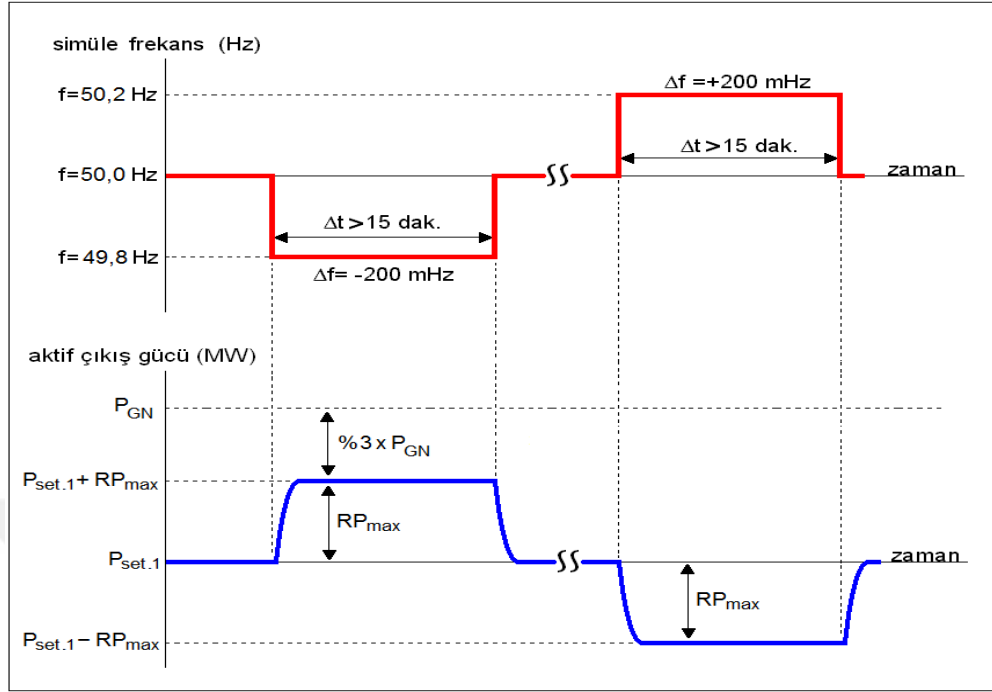
Tablo 4.1 Hız eğim değerleri

Primer Frekans Kontrol Rezerv Kapasitesi (Q), %	2,5	3	4	5	10
Türbin regülatörü hız eğimi (speed-droop, s_g), %	16	13,3	10	8	4

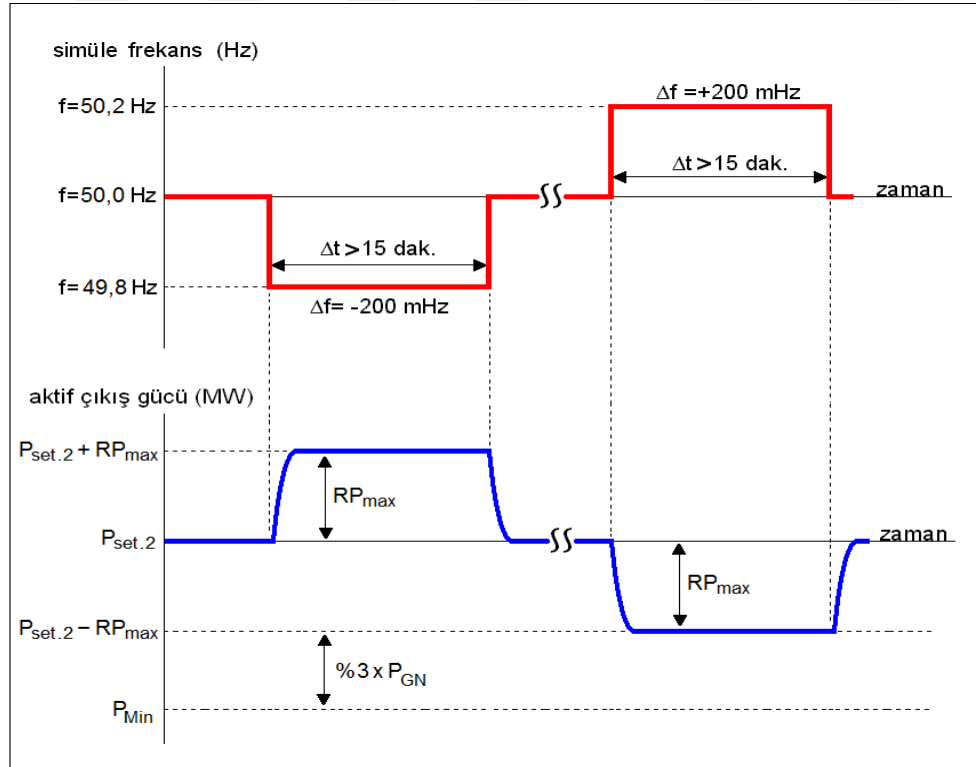
PFK rezerv testleri, minimum ve maksimum çıkış gücü seviyelerinde iki aşamada gerçekleştirilir. Maksimum çıkış gücü seviyesinde gerçekleştirilecek test için, ünitenin hız eğim değeri ve diğer ilgili değişkenler yukarıda ifade edildiği gibi ayarlandıktan sonra, ünite çıkış gücü ayar noktası değeri, ünitenin nominal aktif çıkış gücünün veya mevcut işletme şartlarında sağlayabileceği maksimum aktif çıkış gücünün " $RP_{max} + (\%3 \times PGN)$ " değeri kadar aşağısında bir Pset değerine ayarlanır.

Minimum çıkış gücü seviyesinde ise gerçekleştirilecek test için, ünitenin hız eğim değeri ve diğer ilgili değişkenler yukarıda ifade edildiği gibi ayarlandıktan sonra, ünite çıkış gücü ayar noktası değeri ünitenin kararlı ve güvenli çalışabileceği minimum aktif çıkış gücünün " $RP_{max} + (\%3 \times PGN)$ " değeri kadar yukarısında bir Pset değerine ayarlanır. Ünitenin testler için belirlenen maksimum ve minimum çıkış gücü seviyeleri arasındaki fark " RP_{max} " değerinin iki katından az ise minimum çıkış gücü seviyesindeki testlerin yapılması zorunlu değildir.

Yukarıdaki bahsedilen her iki çıkış gücü seviyesinde, türbin hız regülatörü girişine, şebekeden hız bilgisi almayacak şekilde Δf , -200 mHz'lik frekans sapması veya $f=49,8$ Hz'lik simule (test) sinyali (basamak değişiklik) halinde uygulanmalıdır. Bu değerde en az 15 dk'da beklenir. Bu süre sonunda nominal frekans değerinin 50 Hz'e dönmesi ve ünitenin de önceden ayarlanmış olan Pset değerine gelmesi gerekmektedir. Δf , +200 mHz'lik frekans sapması veya $f=50,2$ Hz'lik simule (test) frekans değeri için aynı işlem gerçekleştirilir. Bu iki ayrı frekans sapmalarına göre ünitenin, aşağıdaki Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi tepki vermesi gerekmektedir.



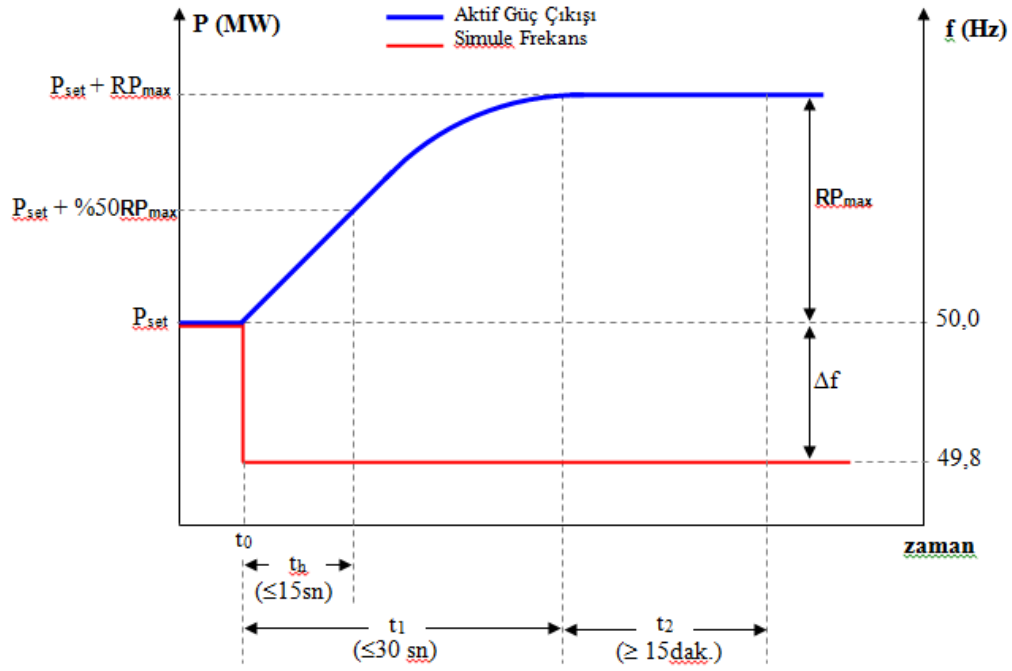
Şekil 4.5 Maksimum çıkış gücü seviyesi için primer frekans kontrol rezerv testi simüle frekans uygulaması [19]



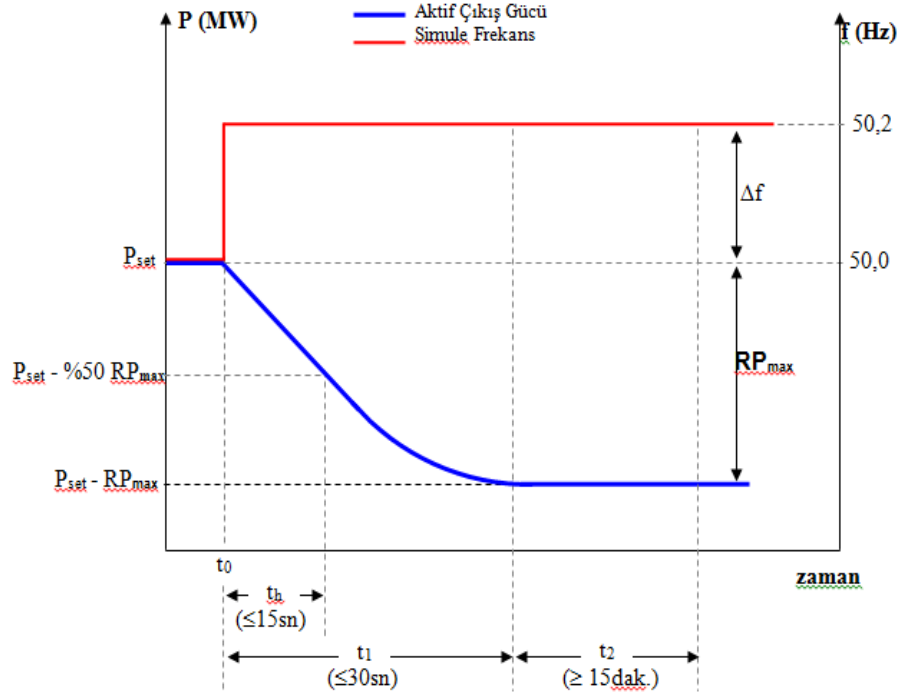
Şekil 4.6 Minimum çıkış gücü seviyesi için primer frekans kontrol rezerv testi simüle frekans uygulaması [19]

Δf değerinin -200 mHz'lik ve +200 mHz'lik iki ayrı simüle frekans seviyesi için ayrı ayrı oluşturulan, maksimum ve minimum çıkış gücü seviyelerinde gerçekleştirilen testler sonucunda, azami primer frekans kontrol rezerv kapasitesinin %50'si maksimum 15 sn içerisinde, tamamı ise en geç 30 sn'lik süre içerisinde Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilen şekilde etkinleştirmelidir.

Azami PFK rezerv kapasitesi maksimum 15 dk boyunca Şekil 4.9'da gösterilen sınırlar içinde belirlenen limitler arasında kararlı bir şekilde sürdürülebilmelidir. Bu kriter değerlendirilirken Şekil 4.9'da yer alan veri kayıt noktalarının en az %99'unun sınırları içerisinde yer alması yeterli kabul edilecektir.

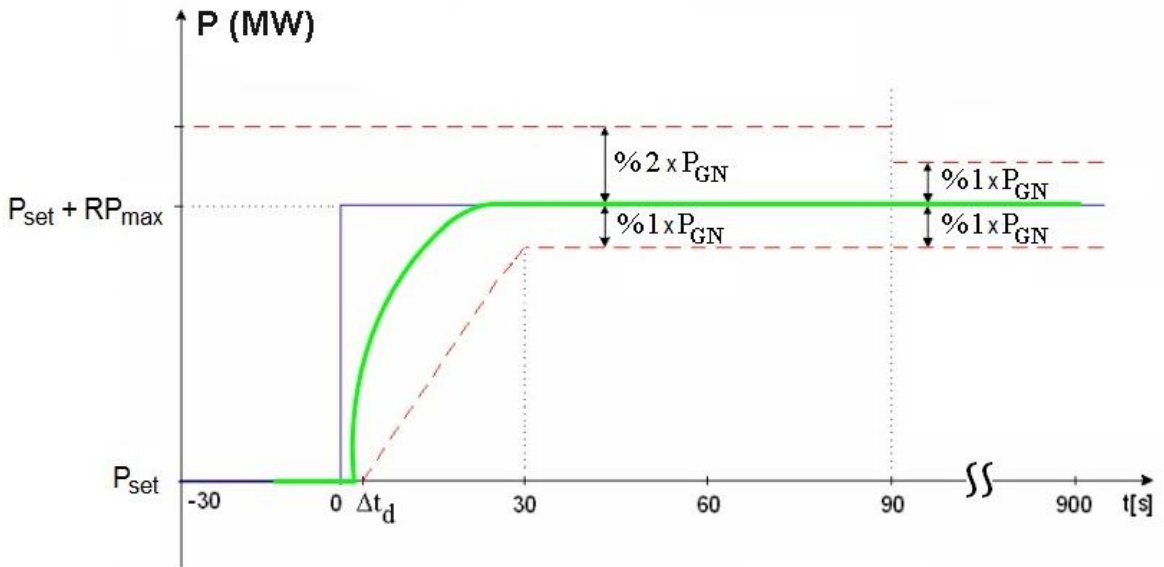


Şekil 4.7 $f=49,8$ Hz'lik simüle frekans uygulamasında üniteden beklenen tepki [19]



Şekil 4.8 $f=50,2$ Hz'lik simüle frekans uygulamasında üniteden beklenen tepki [19]

Enerji üretim santralindeki ünite, Şekil 4.9'da görüldüğü gibi en fazla " Δt_d " gösterilen "Gecikme Süresi" süresi içinde (hidroelektrik santralindeki üniteler için 4 sn, diğer üniteler için 2 sn) tepki vermeye başlaması gerekir.



Şekil 4.9 Primer frekans kontrol rezerv testinin değerlendirilmesi [19]

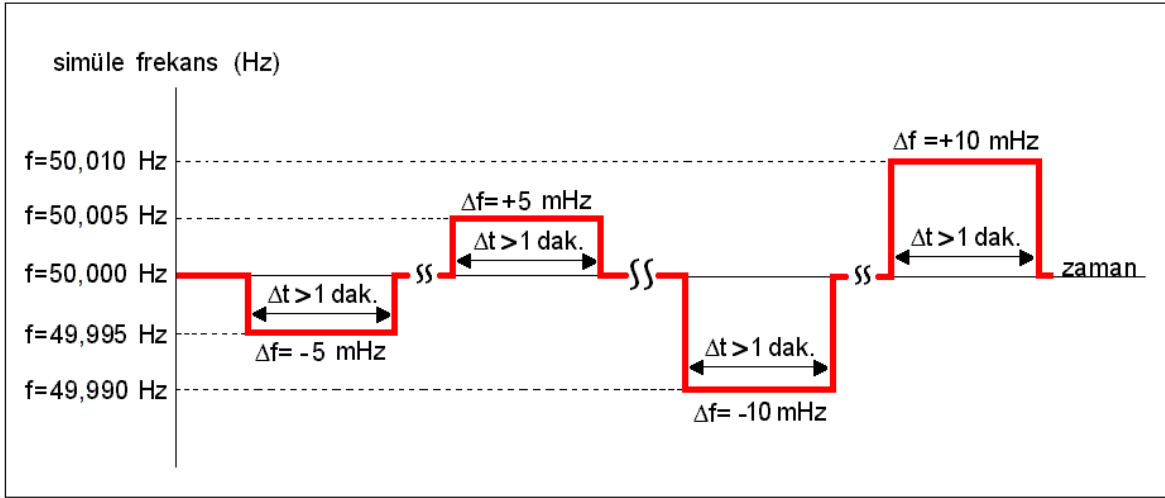
	Primer Rezerv Miktarı
	Tepki Sınırları / Toleranslar
	Beklenen Tepki
Δt_d	Tepkideki Gecikme Süresi $\Delta t_d = 4$ saniye, Hidroelektrik Üniteler için $\Delta t_d = 2$ saniye, Diğer Üniteler için
P_{GN}	Ünitenin Nominal Aktif Gücü

4.1.2. Primer Frekans Kontrol Hassasiyet Testi

PFK hassasiyet testinin amacı, test edilen ünitenin frekans sapmaları sonucu tepki vermesindeki duyarsızlığının istenilen limitler arasında olup olmadığını tespit etmektir.

PFK hassasiyet testleri, primer tepkinin sürekli bir şekilde sağlanabilmesinde ve işletme şartlarına engel olmayacak maksimum çıkış gücü seviyesinde, ünite hassasiyetinin tespit edilmesi için test sinyali, Şekil 4.10’da gösterildiği gibi Δf , -5 mHz’den başlayarak ünite kontrol valfleri test sinyali ile bağlantılı bir tepki gözleninceye kadar frekans sapma miktarı artı ve eksi yönde 5 mHz’lik kademeler halinde artırılarak uygulanır.

Ünite tepkisi için vana hareketi ve/veya diğer ilgili sinyallerdeki değişimler ölçüt olarak kabul edilir. Δf , -5 mHz’lik frekans sapması veya 49,995 Hz’lik simule test frekans değeri aşağıda Şekil 4.10’da görüldüğü gibi uygulanır ve bu değerinde minimum bir dakika muhafaza beklenir. Bu süre sonunda nominal frekans değerinin 50 Hz’e dönmesi ve ünitenin ayarlanan çıkış gücü olan P_{set} değerinde kararlı hale gelmesi gerekir. Δf , +5 mHz’lik frekans sapması veya 50,005 Hz’lik simule frekans değeri aynı şekilde uygulanır. Eğer ünite ± 5 mHz’lik frekans sapmalarına tepki vermezse, aynı işlemler ± 10 mHz’lik frekans sapmaları için tekrar edilir.



Şekil 4.10 Primer frekans kontrol hassasiyet testi uygulaması[19]

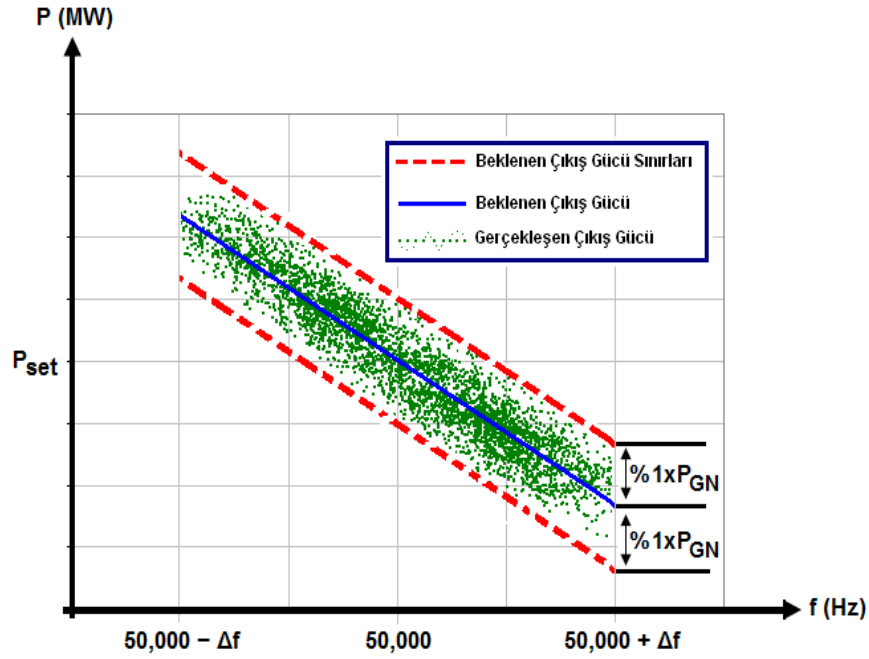
PFK hassasiyet testinde, frekans sapmasının uygulandığı anda vana pozisyonunda ve/veya diğer ilgili sinyallerde değişikliği gözlemlenmelidir. Ünite duyarsızlığı ± 10 mHz değerini geçmemelidir.

4.1.3. 24 Saat Doğrulama Testi

Doğrulama testi, test edilen ünitenin test koşulları dışında normal işletme şartları durumunda da sürekli ve kararlı bir şekilde PFK kriterlerine göre çalışabileceğinin doğrulanması için yapılır.

Doğrulama testi, PFK rezerv ve hassasiyet testleri neticesinde, ünitenin bu kriterleri sağladığının tespit edilmesi halinde gerçekleştirilir. Ünite üzerinde yapılan ayarlamalar değiştirilmeden, türbin hız regülatörünün hız bilgisini şebekeden alacağı şekilde bağlantıları yapılır ve 24 saat boyunca enterkonnekte sisteme bağlanarak, normal çalışmasının kaydı yapılır. Yük tevzi merkezinin vermiş olduğu talimatlardan kaynaklanan sebeplerden ötürü ünitelerin servis harici olması durumunda, çalışmanın yapılamadığı süre testin sonuna eklenir. Yük tevzi merkezi talimatı dışında yaşanabilecek devre dışı olma durumunda, 24 saatlik test tekrar başlatılır. Doğrulama testleri için ünite çıkış gücü ayar noktası değeri, azami PFK rezerv miktarının sağlanabileceği ve minimum çıkış gücü seviyesinin altında olmayan bir Pset değeri olarak ayarlanır. Doğrulama testinin yapılacağı süre içerisinde ünitenin çalışma programı, Pset değerini mümkün kılacak şekilde belirlenir.

Enerji üretim santralinde test edilen üniteler için doğrulama testinin değerlendirilmesi Şekil 4.11’de gösterilen sınırlara göre yapılır. Beklenen çıkış gücü “ $P_{set} + \Delta P_G \pm \%1 \times P_{GN}$ ” değer aralığında olması gerekmektedir. Buradaki ΔP_G , meydana gelen frekans sapmasına verilmesi beklenen primer tepkiyi ifade eder.



Şekil 4.11 Primer frekans kontrol doğrulama testi değerlendirilmesi [19]

5. PEMBELİK BARAJI VE HES PRİMER (BİRİNCİL) FREKANS KONTROLÜ PERFORMANS TESTLERİ

5.1. Pembelik Barajı ve HES için Teknik Veriler

Bu tezde ele alınan Pembelik Barajı ve HES'in PFK performans testleri, Elektrik Şebeke Yönetmeliği Ek-17'de yer alan "E.17.A Primer Frekans Kontrolü Performans Test Prosedürleri" kriterlerine göre gerçekleştirilmiştir. Pembelik Barajı ve HES için;

- Santralin Kurulu Gücü: **127,34 MW** (2 x 63,67 MW)
- Azami PFK Rezerv Kapasitesi: **12,74 MW**
- Asgari PFK Rezerv Kapasitesi: **6,37 MW**

Azami PFK (Primer Frekans Kontrolü) rezerv kapasitesi, PFK performans testinde başarılı olan ünitelerin azami rezerv kapasiteleri toplamıdır. Asgari PFK rezerv kapasitesi ise, PFK performans testinde başarılı olan en küçük güçteki ünitenin kurulu gücünün PFK yükümlülük oranı ile çarpılması sonucunda elde edilir. Pembelik Barajı ve HES Üniteleri İşletme Modları;

- i. Kondenser Mod (Condenser Mode)
- ii. Türbin Modu (Turbine Mode)
- iii. Ada Modu (Island Mode)
- iv. Generetör Modu (Generator Mode)

Primer frekans kontrolü için, **PFC Mode ON** (Ünite Primer Frekans Kontrol İşletme Modu) işletme moduna geçilir.

Tablo 5.1 Pembelik Barajı ve HES için ünitelerin işletme ayar değerleri

	Ayarlanabilirlik	Ayar Değeri	Ayar Aralığı	Ayar Çözünürlüğü
Hız Eğimi	Var	%4	%1 - %10	0,01
Ölü Bant	Var	0 mHz	0 - 1000 mHz	1 mHz

Primer frekans performans testleri için kullanılan test ekipmanları;

- Veri Toplama Cihazı: NI (National Instruments) Compact RIO-9073
- Veri Kayıt Yazılımı: LabVIEW (32 bit) DataLogger
- SinyalJeneratörü : TM 1703ACP
- Diz üstüBilgisayar

Testler sebebiyle ünite değişkenlerinin (basınç, ısı, gerilim, vb...), teçhizatın güvenli çalışması için normal işletme şartlarındaki sınırları aşmaması ve kısıtlayıcı bir etkiye sahip olmaması gerekmektedir. Yapılmakta olan testin veya çalışmakta olan ünitenin durmasına sebep olacak herhangi birkoruma sistemi kullanılmamıştır.

Primer frekans kontrol performans testleri "Andritz" marka 2 adet (Ünite-1, Ünite-2) dikey francis hidrolik türbinleri için "TM 1703 ACP" adlı kontrol sistemi yazılımı aracılığıyla, ünite kontrol sisteminin şebeke frekansını algılamayacağı şekilde ölçülen hız bilgisi yerine doğrudan simüle edilen hız bilgisinin (basamak değişiklik halinde) uygulanması yoluyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümü yapılan sinyaller National Instruments cRIO 9073 ve NI 9203 AI veri kayıt cihazıyla"100 ms" örnekleme oranıyla kaydedilmiştir.

Tablo 5.2 Ölçümü yapılan sinyallerin tipi ve bağlantı noktaları

SİNYAL ADI	BAĞLANTI NOKTASI	ÖLÇME ARALIĞI	SİNYAL TİPİ
Şebeke Frekansı	Transducer	49,5 – 50,5 Hz	4-20 mA
Simule Frekans (Ölçme)	PLC	49,7 – 50,3 Hz	4-20 mA
Aktif Güç	Transducer	-10 – 80 MW	4-20 mA
Ayar Kanat Açıklığı	PLC	0 – 100 %	4-20 mA
Aktif Güç Referans Değeri	PLC	-10 – 80 MW	4-20 mA

Tablo 5.3 Ölçümü yapılan sinyallerin ölçekleme oranları

$y = mx + b$	m	b
Şebeke Frekansı	0.0625	49,25
Simüle Frekans (Ölçme)	0.0375	49.55
Aktif Güç	5.625	-32.5
Ayar Kanat Açıklığı	6.25	-25
Aktif Güç Referans Değeri	5.625	-32.5

Yapılan PFK performans testinde;

- Örnekleme süresi: **100 ms** (Saniyede 10 veri) (≤ 100 ms)'dir.
- Frekans sapmasının uygulanma biçimi: Basamak Değişiklik
- Ünite nominal hızı: **166,7**

Pembelik Barajı ve HES'in primer frekans kontrolü performans testlerinin yapılacağı ünitelerin işletme ayar değerleri Tablo 5.1'de, ölçümü yapılan sinyallerin tipi ve bağlantı noktaları Tablo 5.2'de, ölçümü yapılan sinyallerin ölçekleme oranları Tablo 5.3'de, simüle frekans değerleri Tablo 5.4'de gösterildiği gibidir.

Tablo 5.4 Simüle frekans değerleri

Frekans	Simüle Hız/Frekans (Δf)
50 Hz	0 mHz
50,2 Hz	200 mHz
49,8 Hz	-200 mHz
50,005 Hz	5 mHz
49,995 Hz	-5 mHz
50,010 Hz	10 mHz
49,990 Hz	-10 mHz

Pembelik Barajı ve HES'in 1026,40 metre göl kotunda nominal gücü 63,67 MW'tır. Fakat mevcut işletme göl kotu 1016,40 metre olduğundan "Andritz" marka 2 adet (Ünite-1, Ünite-2) dikey francis hidrolik türbin ünitelerinin ve sağlayabileceği maksimum çıkış gücünün 55 MW olabileceği belirlenmiştir. Mevcut %4'lük hız eğim değerine göre sağlanması gereken PFK rezerv miktarının 6,37 MW (ünite nominal gücünün $\pm$ % 10'u olduğu) ve " $RP_{max} + (\%3 \times PGN)$ " kriterine göre, maksimum çıkış gücü seviyesinde yapılan testler, "Andritz" marka 2 adet (Ünite-1, Ünite-2) dikey francis hidrolik türbin üniteleri için, 47 MW Pset değerinde gerçekleştirilmiştir. Minimum çıkış gücü seviyesindeki yapılan testlerde ise belirtilen MKÜD değeri 25MW ve " $RP_{max} + (\%3 \times PGN)$ " kriteri dikkate alınarak 33 MW Pset değerinde gerçekleştirilmiştir.

5.1.1. Ölü Bant

Ölü bant, üretim sistemindeki primer frekans kontrol sisteminin çıkış belirli bir frekans değişimine kadar cevap vermemesidir. Ölü bant aralığı uygulaması şebeke frekansının kararlılığı için tercih edilmeyen bir durum olmasına rağmen enerji üretim santrallerindeki ünitelerin ömrü açısından faydalıdır. ENTSO-E standartları gereğince ünitelerin ölü bantları 0 (sıfır) olarak ayarlanmıştır.

5.1.2. Hız Eğimi (Speed–Droop)

Elektrik güç sisteminde yük değişimi ile generatörün senkron hızı değişir. Türbin hız regülatör sisteminin hızı tekrar senkron hıza getirmek için sistemi harekete geçirme özelliğidir [21].

5.2. Pembelik Barajı ve HES PFK Rezerv Testleri

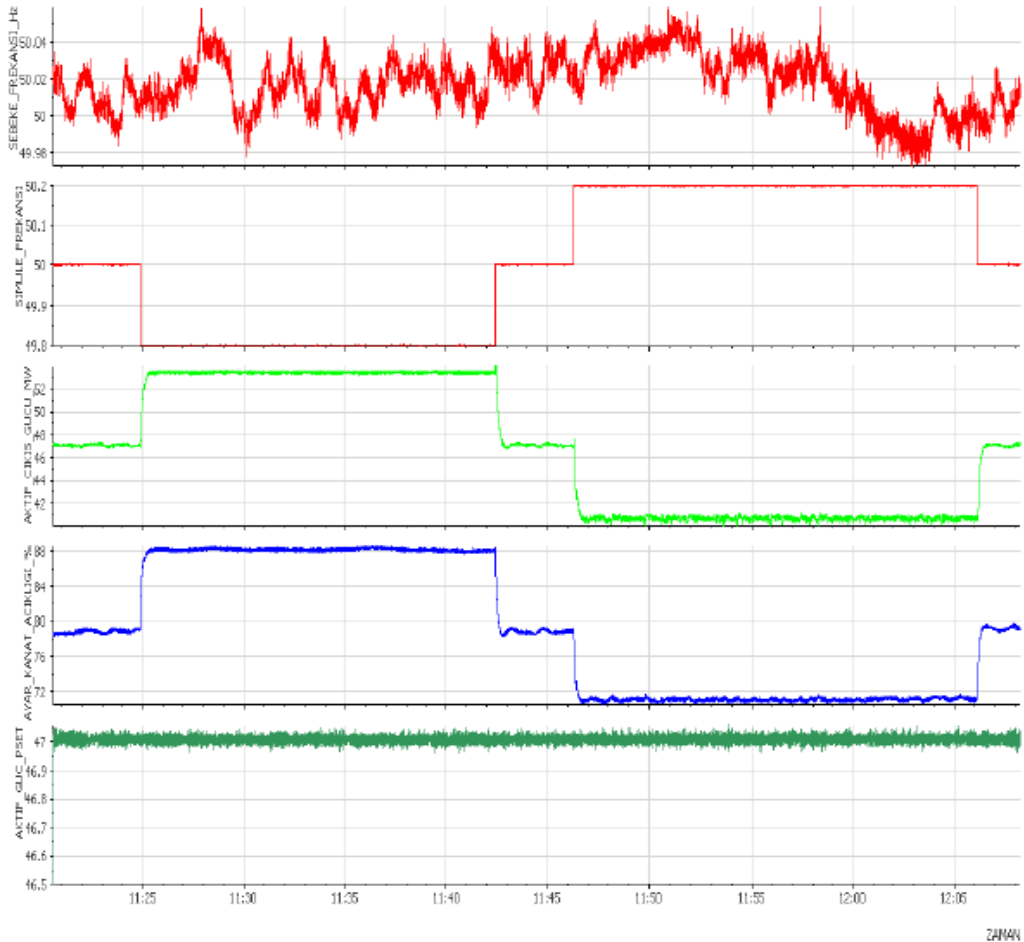
Pembelik Barajı ve HES'de rezerv testleri maksimum ve minimum güç değerlerine göre 2 aşamada gerçekleştirilmiştir.

5.2.1. Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de mevcut olan Ünite-1 ve Ünite-2’nin maksimum çıkış gücü rezerv testleri mevcut işletme şartlarına uygun olarak yapılmıştır.

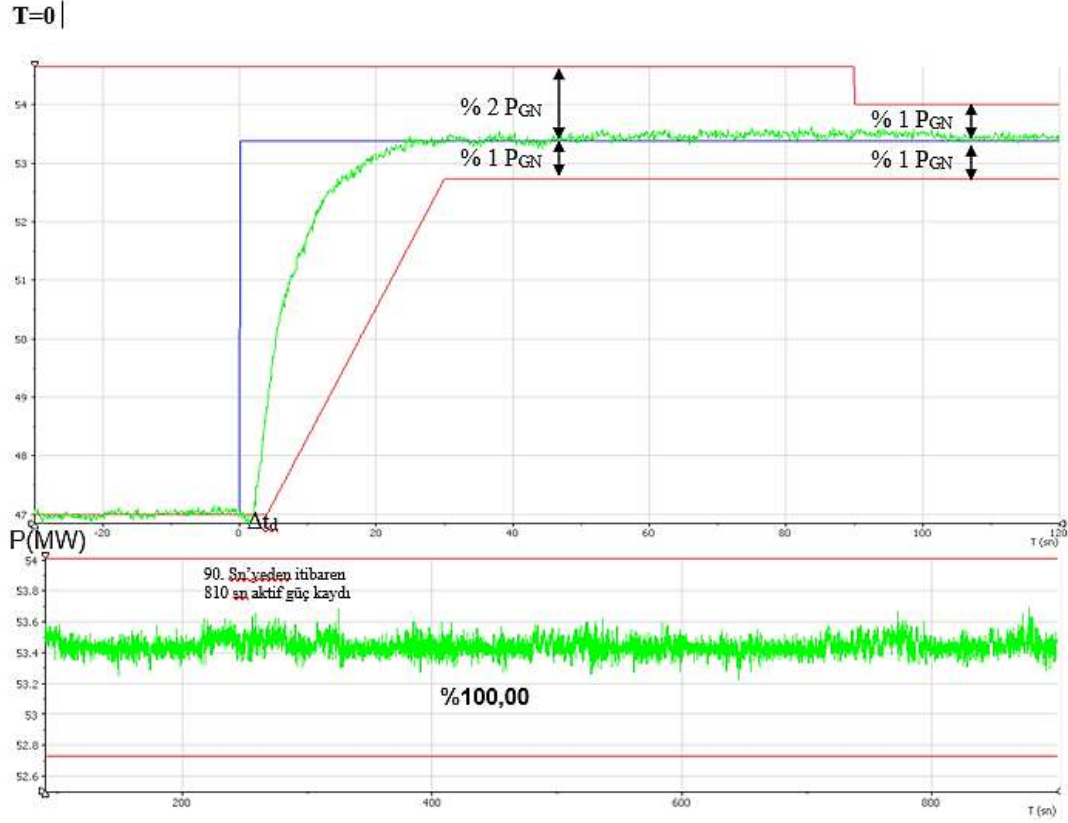
5.2.1.1. Ünite-1 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **P_{nom}**: 63,67 MW, **P_{set}**: 47 MW, **ΔP**: 6,37 MW, **%2xP_{nom}**:1,274MW, **%1xP_{nom}**: 0,637, **Δtd**: 4 sn, **Hız Eğimi**: %4, **Ölü Bant**: 0 mHz şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.1’de Ünite-1’in maksimum çıkış gücü seviyesinde rezerv test sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.1 Ünite-1 maksimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi

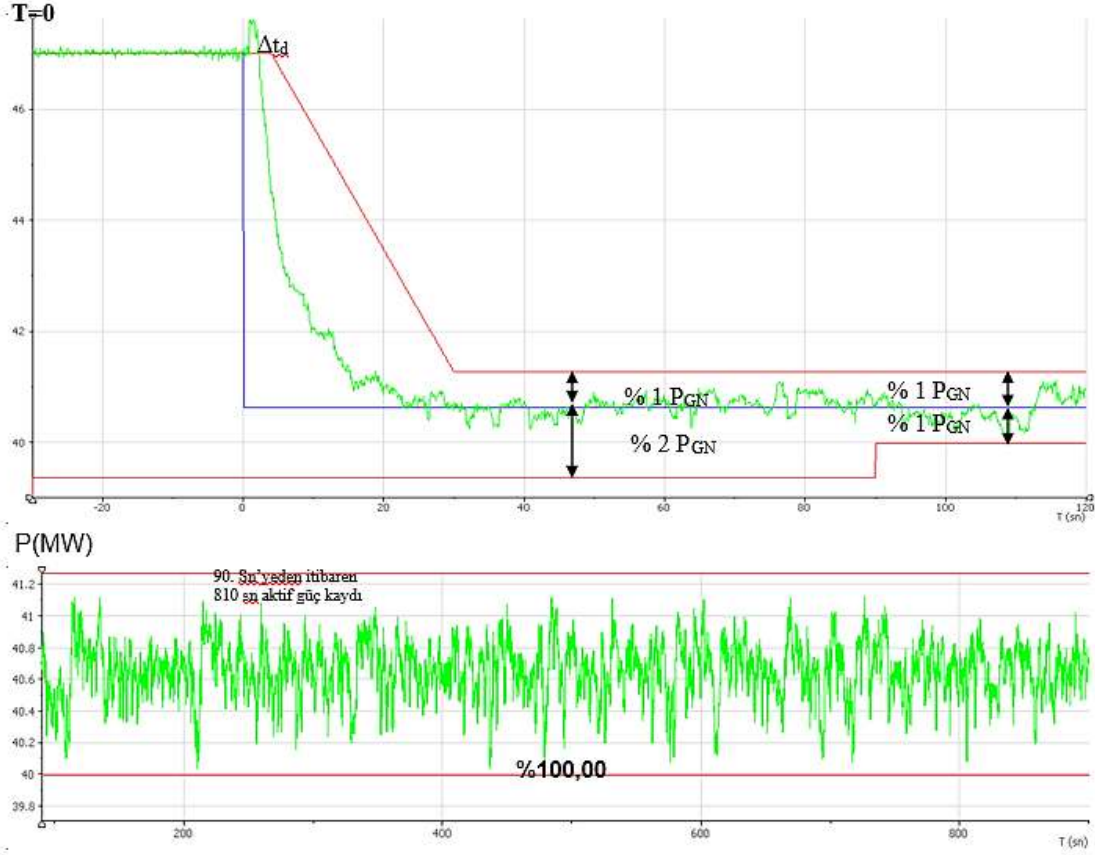
Ünite-1'in maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi;



Şekil 5.2 Ünite-1 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi Ünite-1'in " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar minimum " $P_{set} + \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} + \Delta P - \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} + \Delta P + \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} + \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

Ünite-1'in maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi;

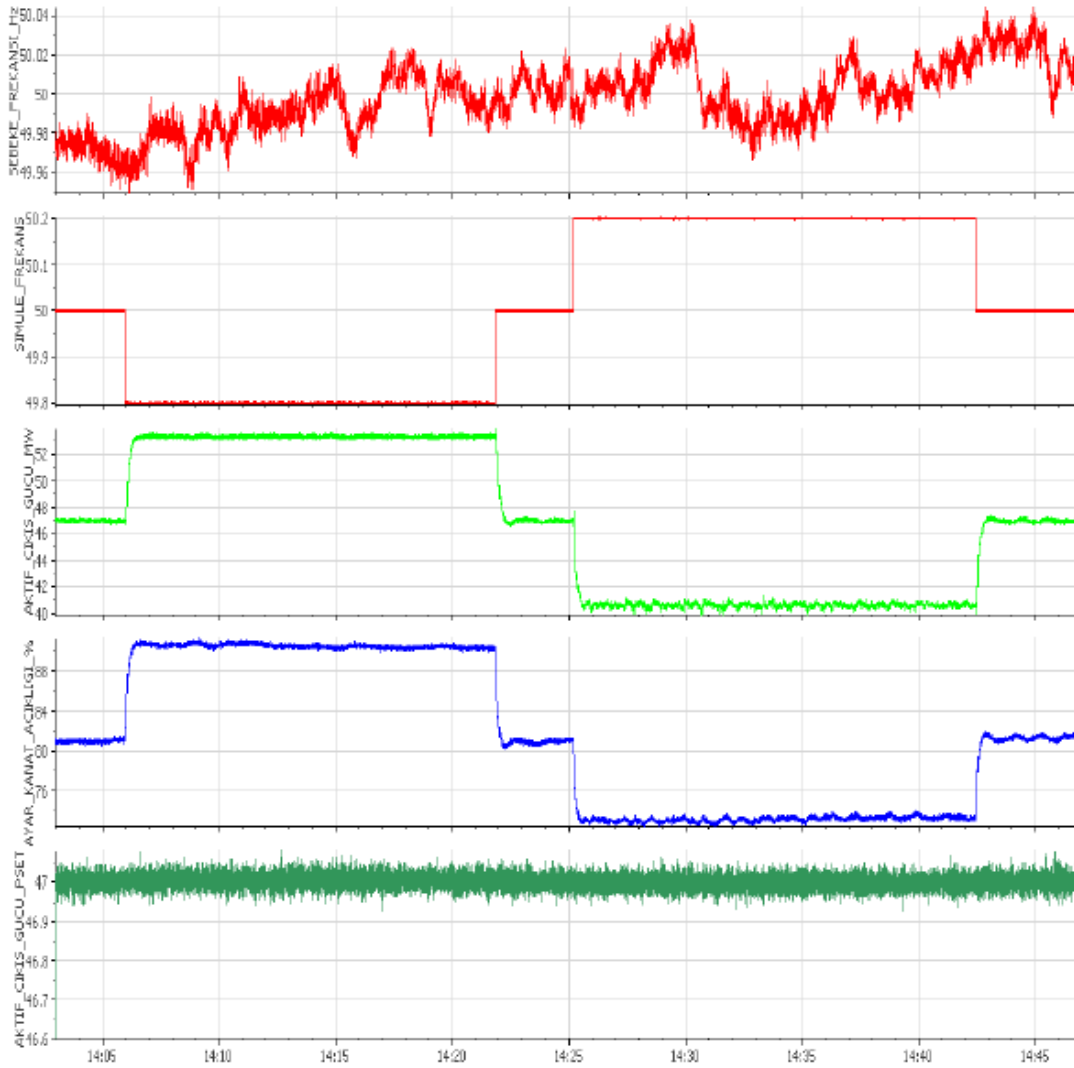


Şekil 5.3 Ünite-1 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi Ünite-1'in " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} - \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} - \Delta P + \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} - \Delta P - \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} - \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

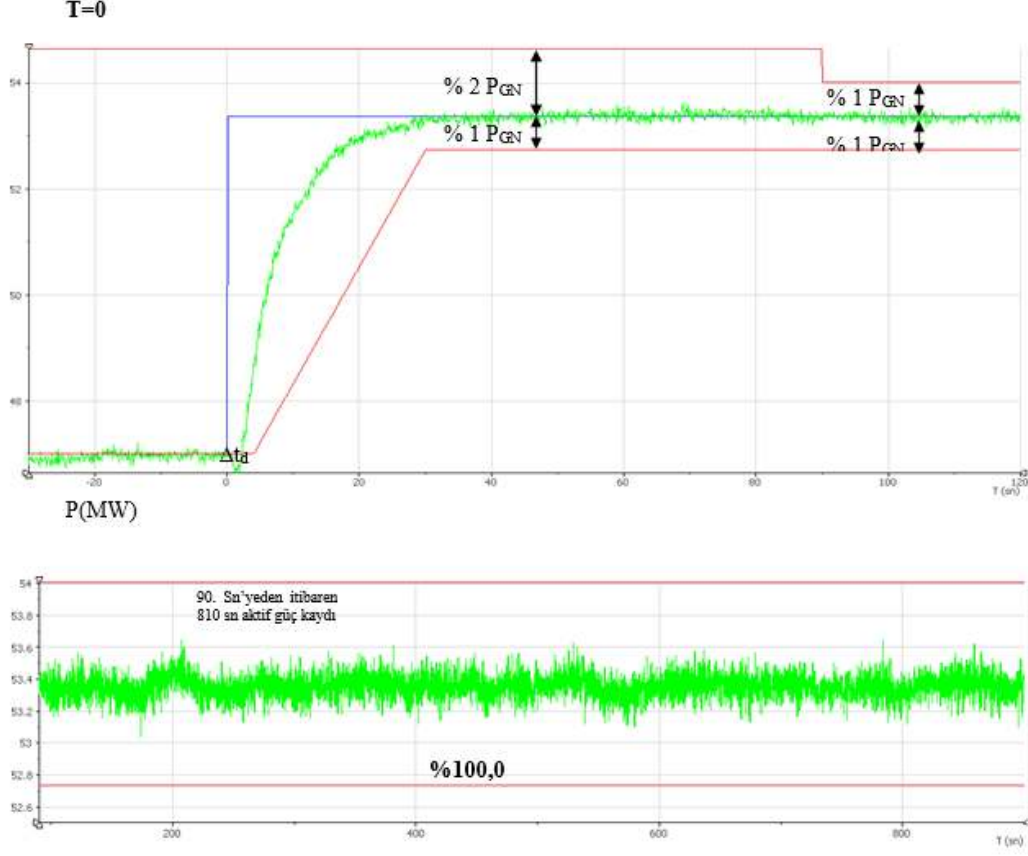
5.2.1.2. Ünite-2 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 47 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:**1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHz şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.4’de Ünite-2 maksimum çıkış gücü seviyesi rezerv test sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.4 Ünite-2 maksimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi

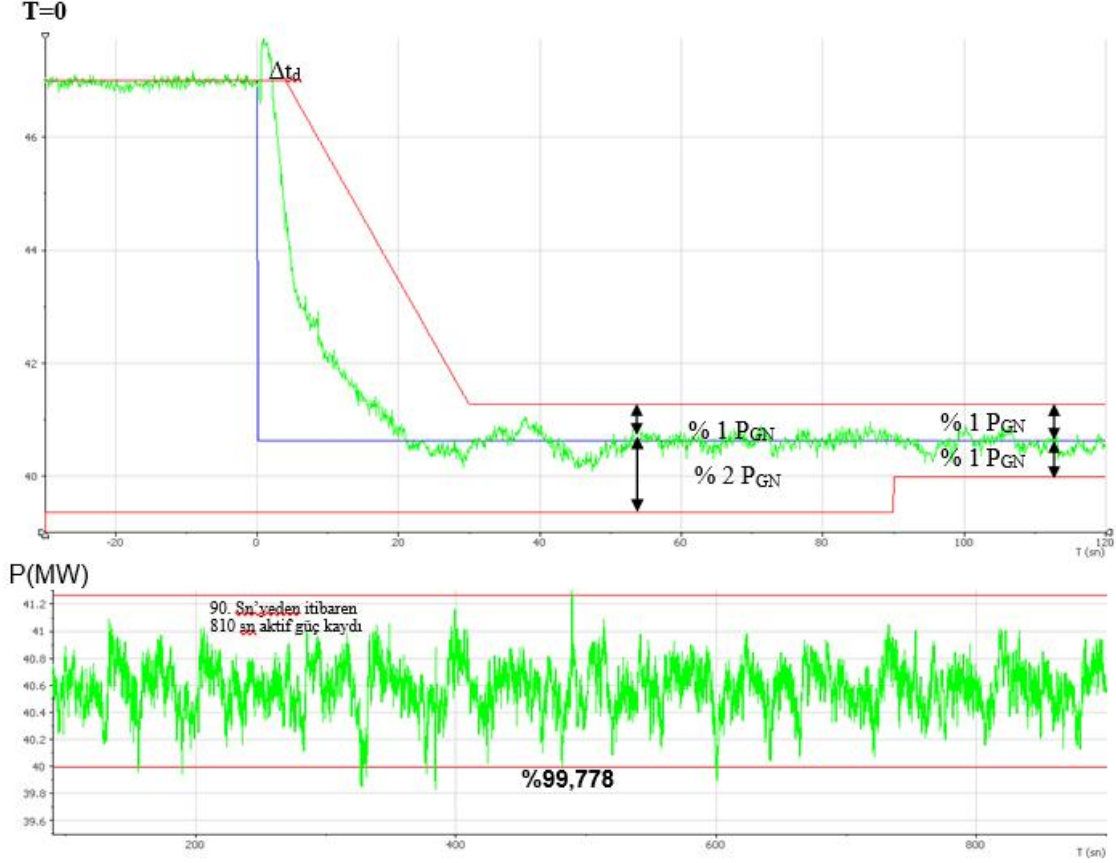
Ünite-2'nin maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi



Şekil 5.5 Ünite-2 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi Ünite-2'nin " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} + \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} + \Delta P - \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} + \Delta P + \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} + \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

Ünite-2'nin maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi;



Şekil 5.6 Ünite-2 maksimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi

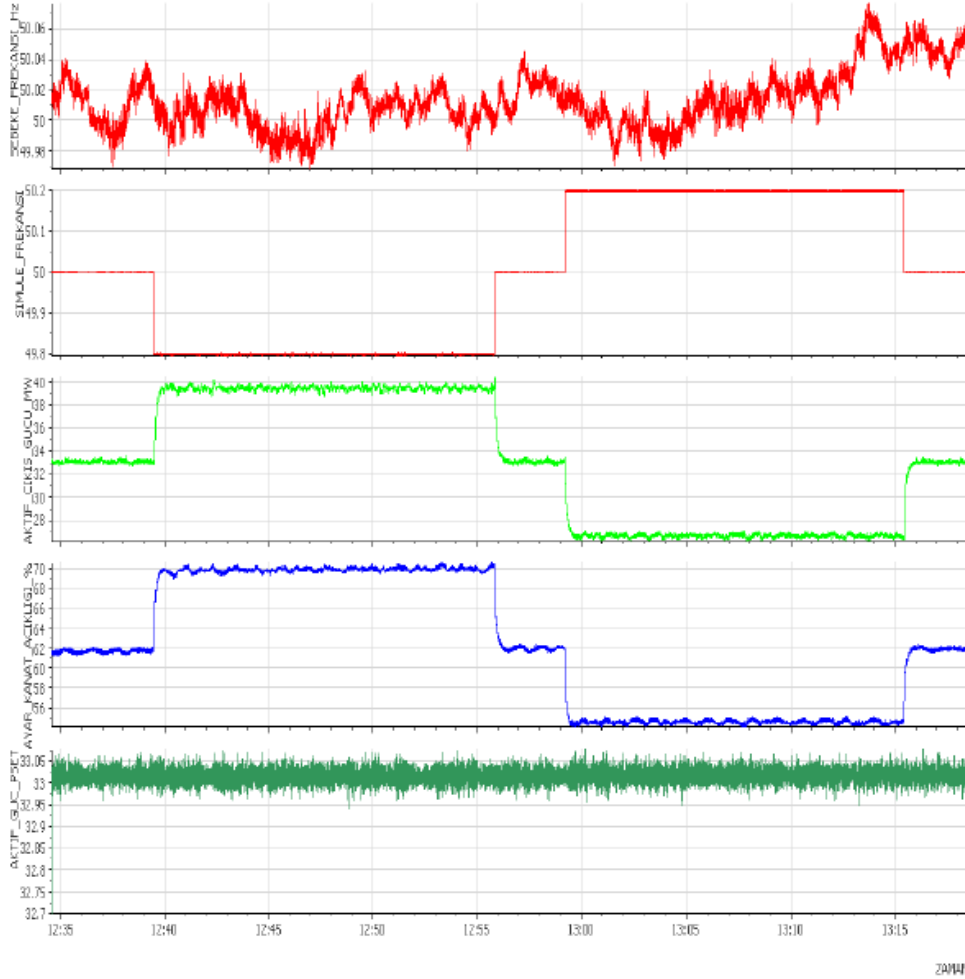
Şekil 5.6'da görüldüğü gibi Ünite-2'nin " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} - \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} - \Delta P + \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} - \Delta P - \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} - \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

5.2.2. Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de mevcut olan Ünite-1 ve Ünite-2’nin minimum çıkış gücü rezerv testleri mevcut işletme şartlarına uygun olarak yapılmıştır.

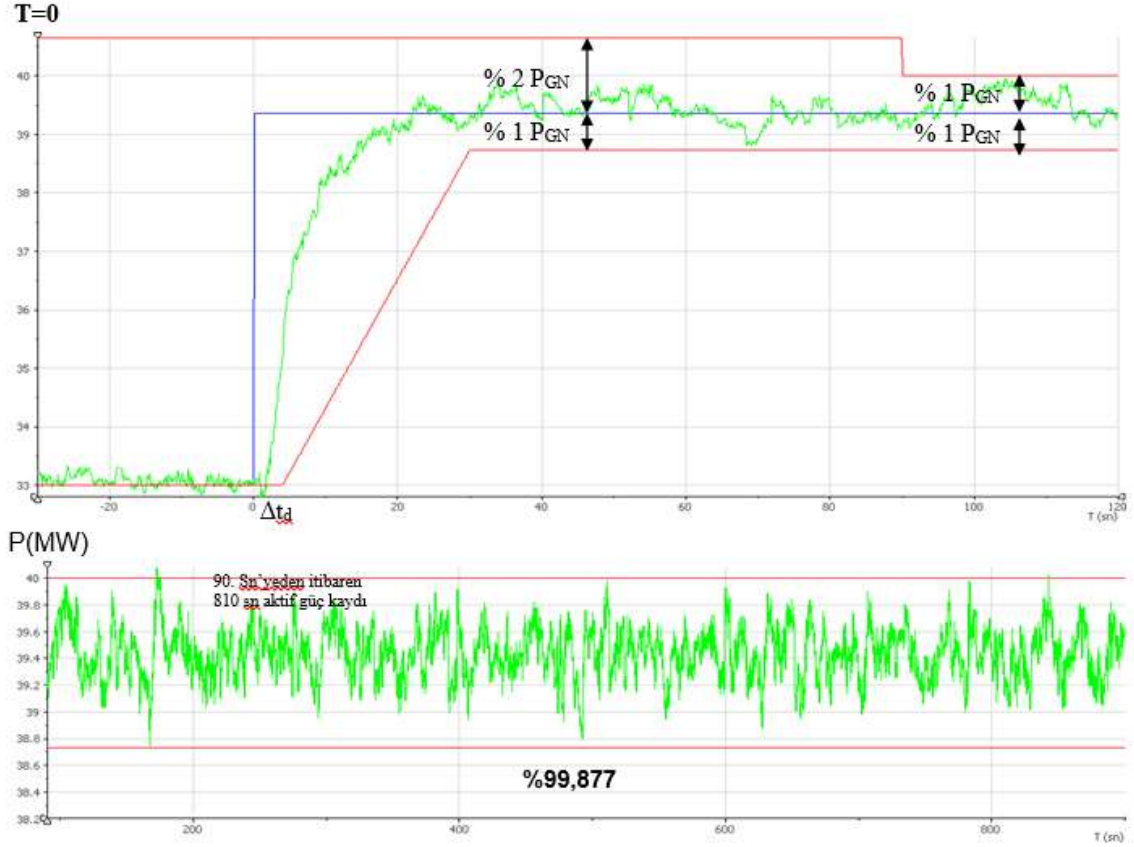
5.2.2.1. Ünite-1 Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **P_{nom}**: 63,67 MW, **P_{set}**: 33 MW, **ΔP**: 6,37 MW, **%2xP_{nom}**:1,274MW, **%1xP_{nom}**: 0,637, **Δtd**: 4 sn, **Hız Eğimi**: %4, **Ölü Bant**: 0 mHz şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.7’de Ünite-1 minimum çıkış gücü seviyesi rezerv test sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.7 Ünite-1 minimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi

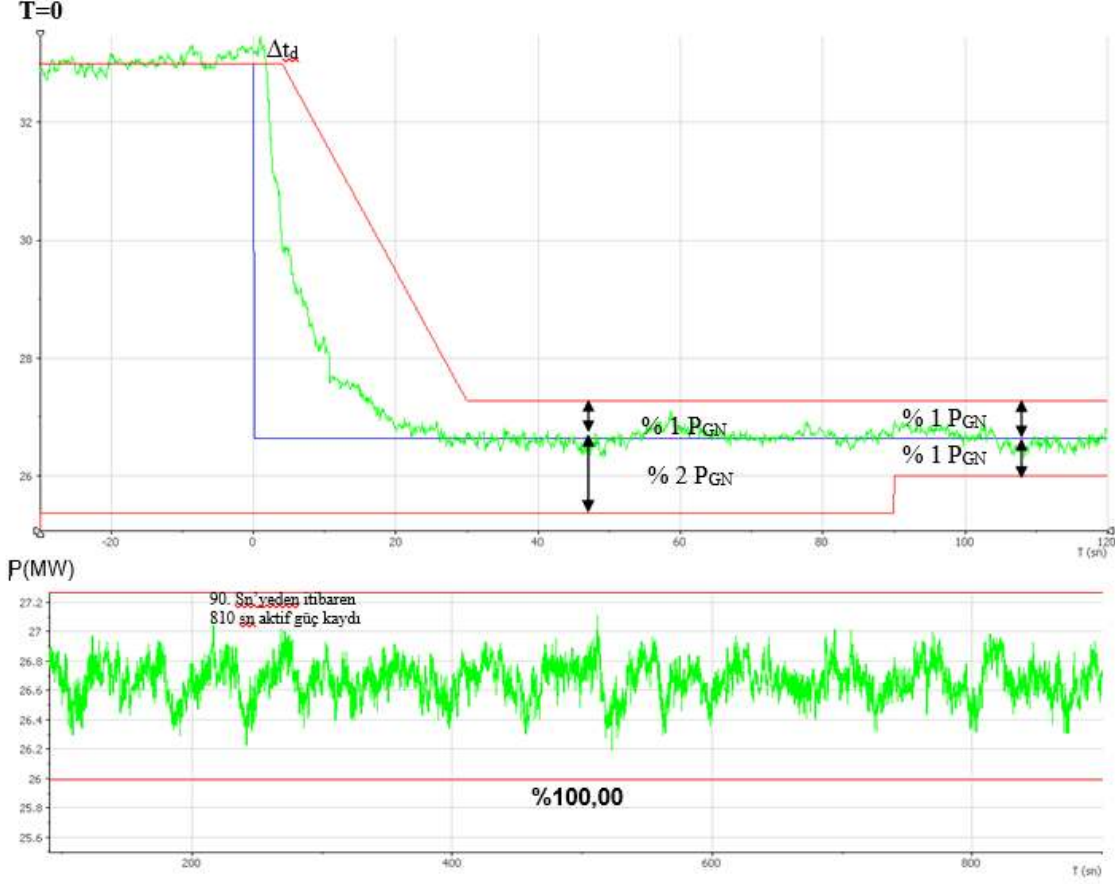
Ünite-1'in minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi;



Şekil 5.8 Ünite-1 minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.8'de görüldüğü gibi Ünite-1'in " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} + \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} + \Delta P - \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} + \Delta P + \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} + \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

Ünite-1'in minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi

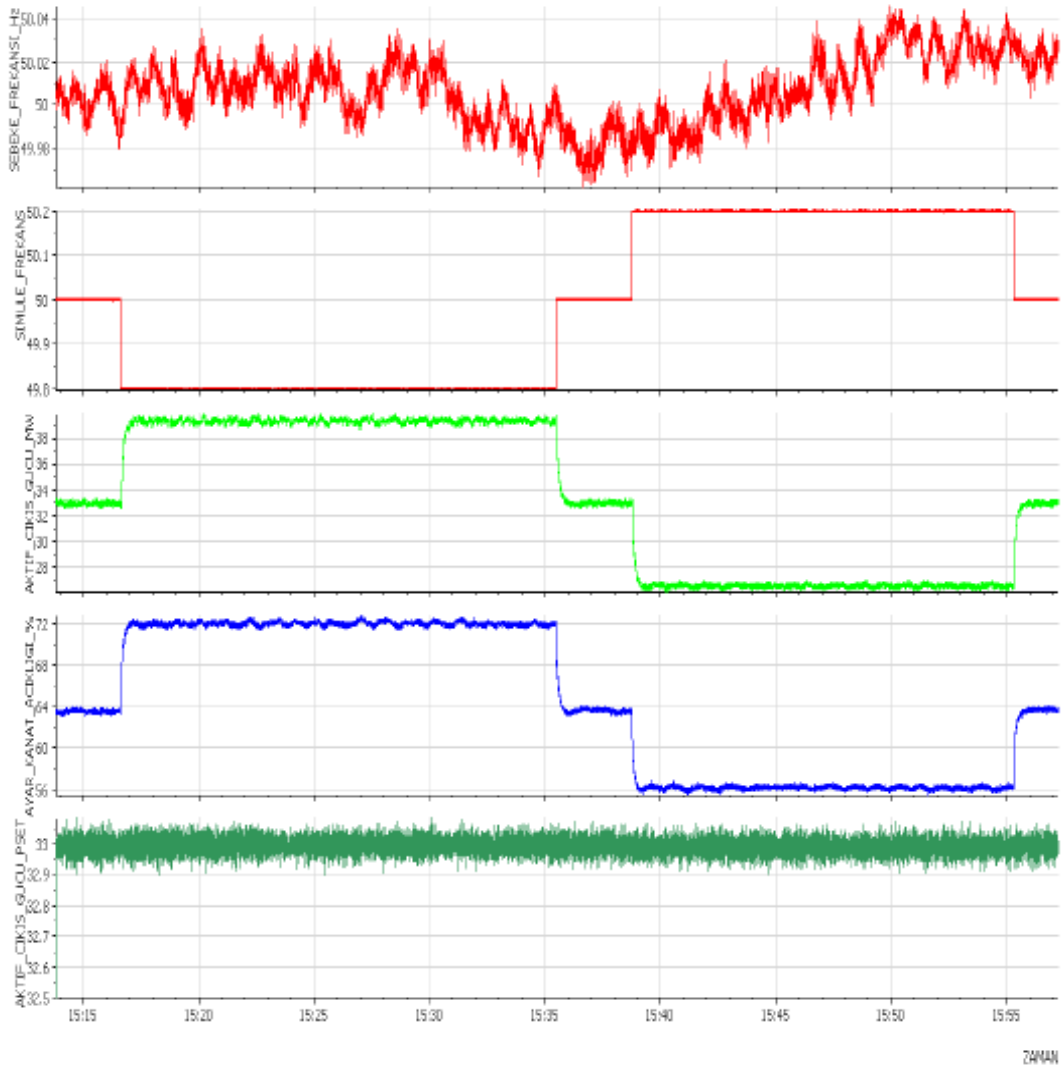


Şekil 5.9 Ünite-1 minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.9'da görüldüğü gibi Ünite-1'in " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} - \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} - \Delta P + \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} - \Delta P - \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} - \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

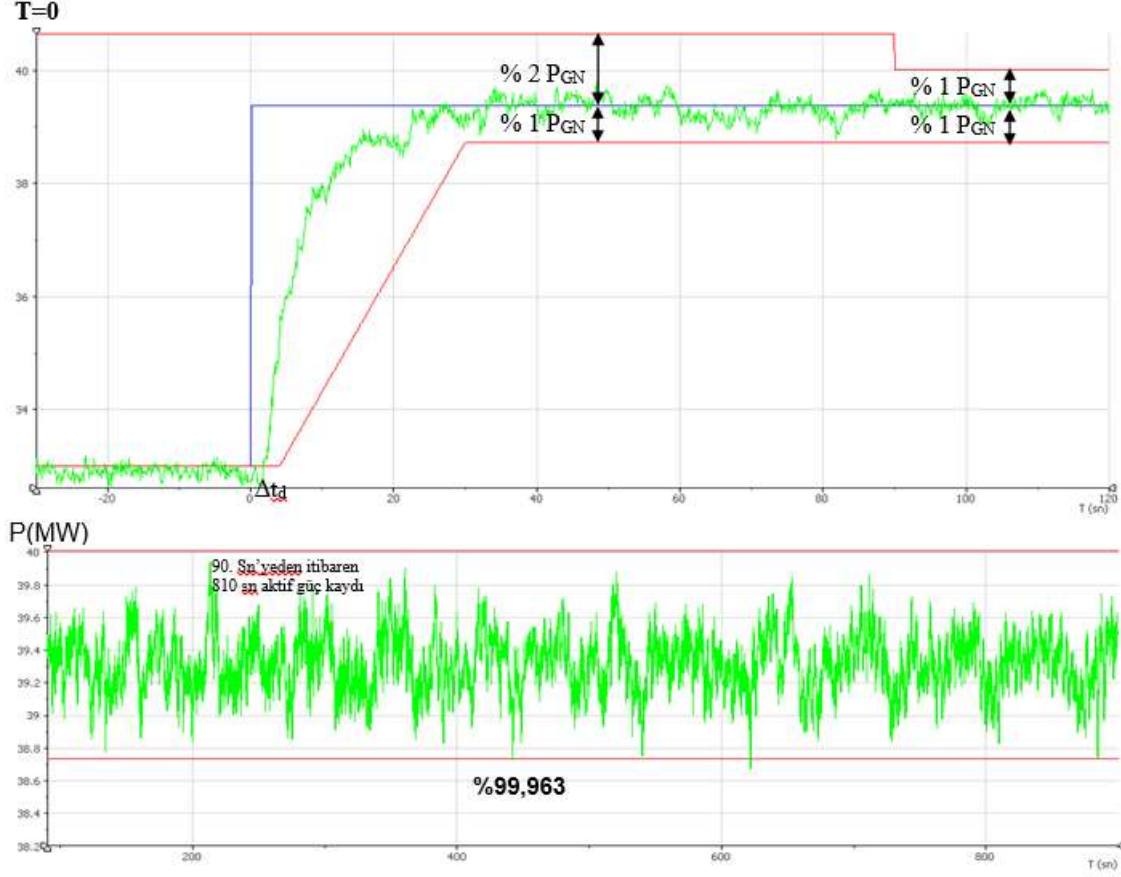
5.2.2.2. Ünite-2 Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Rezerv Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 33 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:**1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHzşeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.10’de Ünite-2minimum çıkış gücü seviyesi rezerv test sonuçları görülmektedir.



Şekil 5.10 Ünite-2 için minimum çıkış gücü seviyesi rezerv testi

Ünite-2'nin minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi;

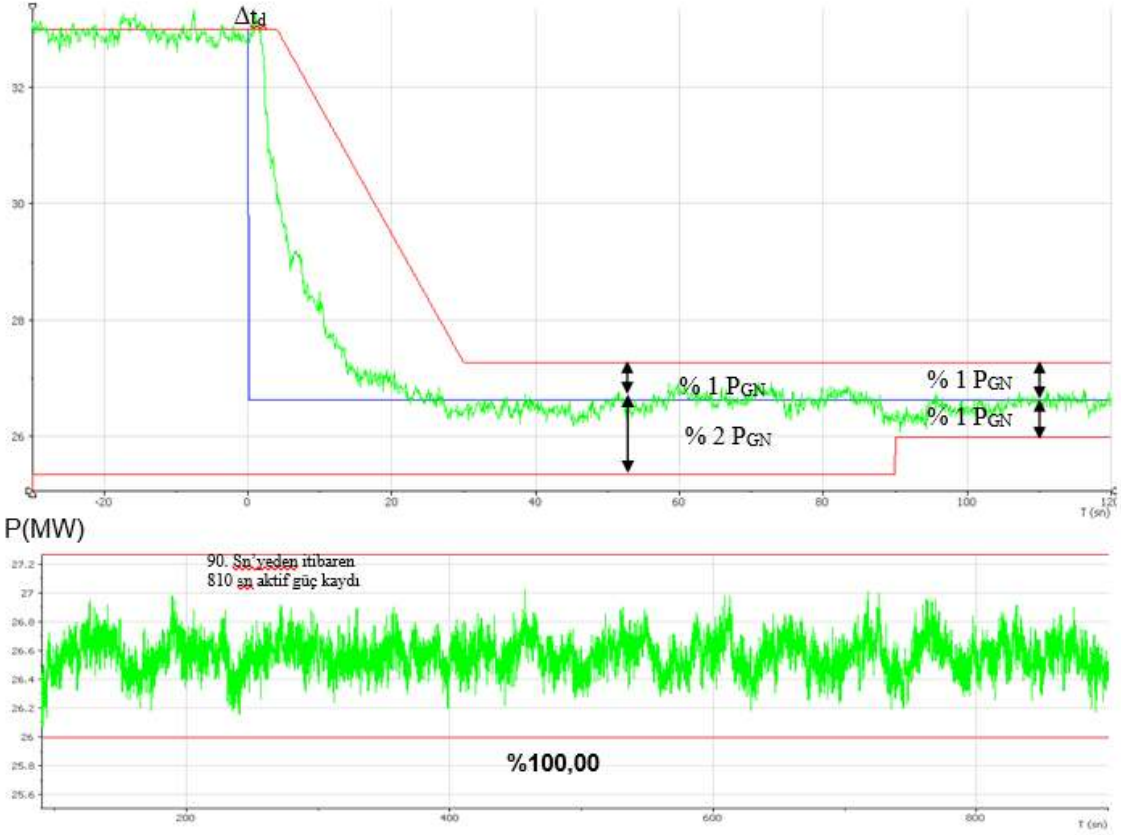


Şekil 5.11 Ünite-2 minimum çıkış gücünde $\Delta f = -200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.11'de görüldüğü gibi Ünite-2'nin " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} + \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} + \Delta P - \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} + \Delta P + \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı, ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} + \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

Ünite-2'nin minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi;

T=0



Şekil 5.12 Ünite-2 minimum çıkış gücünde $\Delta f = +200$ mHz için rezerv testi

Şekil 5.12'de görüldüğü gibi Ünite-2'nin " Δt_d " süresi içinde tepki vermeye başladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'ye kadar en az " $P_{set} - \Delta P$ " değerini sağladığı, ünite çıkış gücünün 30. sn'den sonra " $P_{set} - \Delta P + \%1 \times P_{nom}$ " değerinin altına düşmediği, ünite çıkış gücünün 90'ıncı saniyeye kadar " $P_{set} - \Delta P - \%2 \times P_{nom}$ " değerini aşmadığı ünite çıkış gücü değerlerinin Δt_d 'den 30'uncu saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 30'uncu saniyeden 90'ıncı saniyeye kadar en az %90'ının tolerans bandı içinde kaldığı, ünite çıkış gücü değerlerinin 90'ıncı saniyeden 900'uncu saniyeye kadar en az %90'ının " $P_{set} - \Delta P \pm \%1 \times P_{nom}$ " değer aralığında olduğu, ünite çıkış gücünün Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK 17.A'da yer alan "Beklenen Tepki" grafiğine uygunluğu gözlemlenmiştir.

5.3. Pembelik Barajı ve HES PFK Hassasiyet Testleri

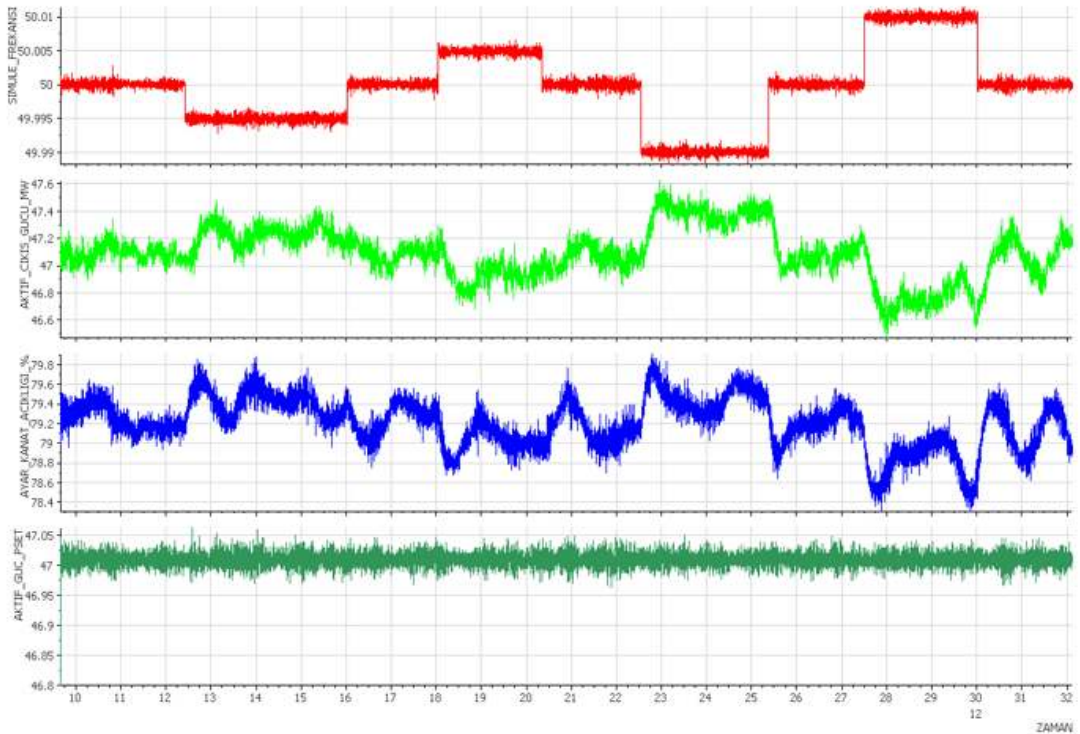
Pembelik Barajı ve HES’de hassasiyet testleri maksimum ve minimum güç değerlerine göre 2 aşamada gerçekleştirilmiştir.

5.3.1. Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de mevcut olan Ünite-1 ve Ünite-2’nin maksimum çıkış gücü hassasiyet testleri mevcut işletme şartlarına uygun olarak yapılmıştır.

6.3.1.1. Ünite-1 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **P_{nom}**: 63,67 MW, **P_{set}**: 47 MW, **ΔP**: 6,37 MW, **%2xP_{nom}**:1,274MW, **%1xP_{nom}**: 0,637, **Δtd**: 4 sn, **Hız Eğimi**: %4, **Ölü Bant**: 0 mHz şeklinde belirlenmiştir.

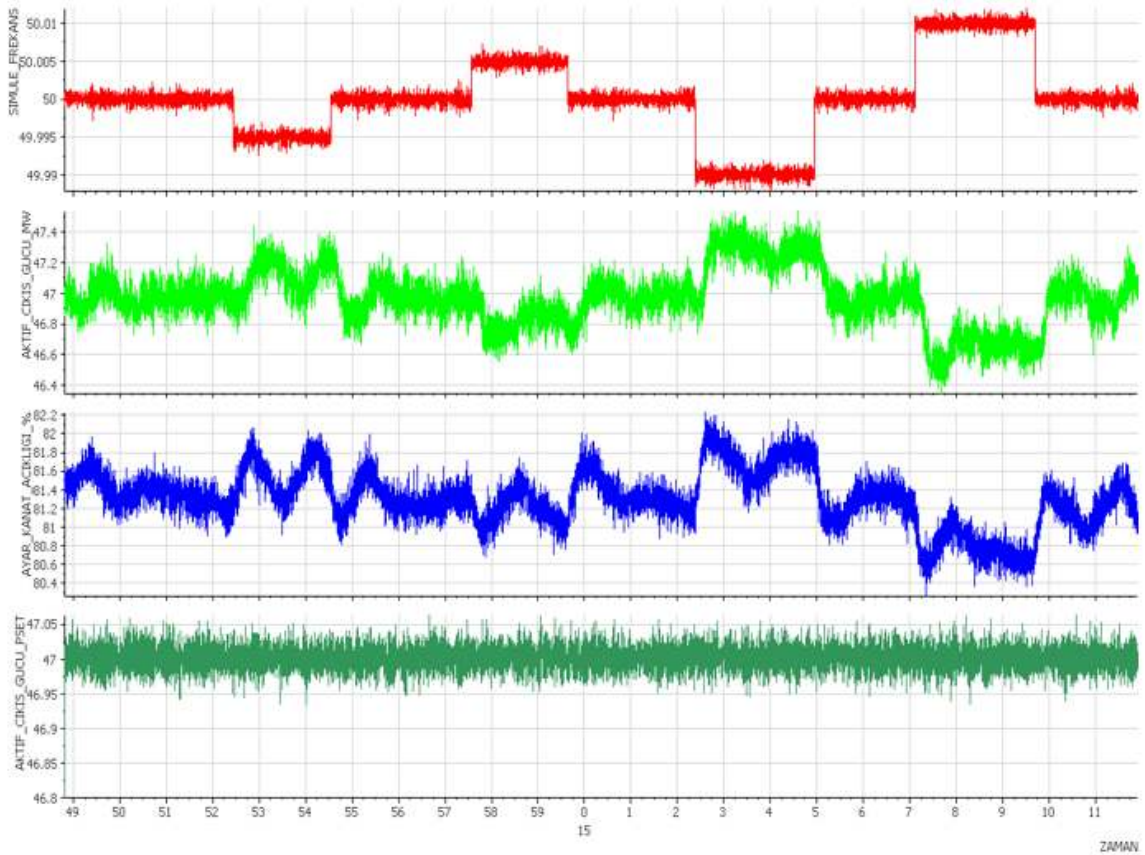


Şekil 5.13 Ünite-1 için maksimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi

Şekil 5.13’de Ünite-1 maksimum çıkış gücü seviyesi hassasiyet testi sonuçları görülmektedir. Şekil 5.13’de görüldüğü gibi Ünite-1 Ayar kanatları açıklığı ve diğer ilgili parametrelerdeki değişikliğe göre duyarsızlığın ± 10 mHz’i aşmadığı gözlemlenmiştir.

5.3.1.2. Ünite-2 Maksimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **P_{nom}**: 63,67 MW, **P_{set}**: 47 MW, **ΔP** : 6,37 MW, **%2xP_{nom}**:1,274MW, **%1xP_{nom}**: 0,637, **Δt_d** : 4 sn, **Hız Eğimi**: %4, **Ölü Bant**: 0 mHzşeklinde belirlenmiştir.



Şekil 5.14 Ünite-2 için maksimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi

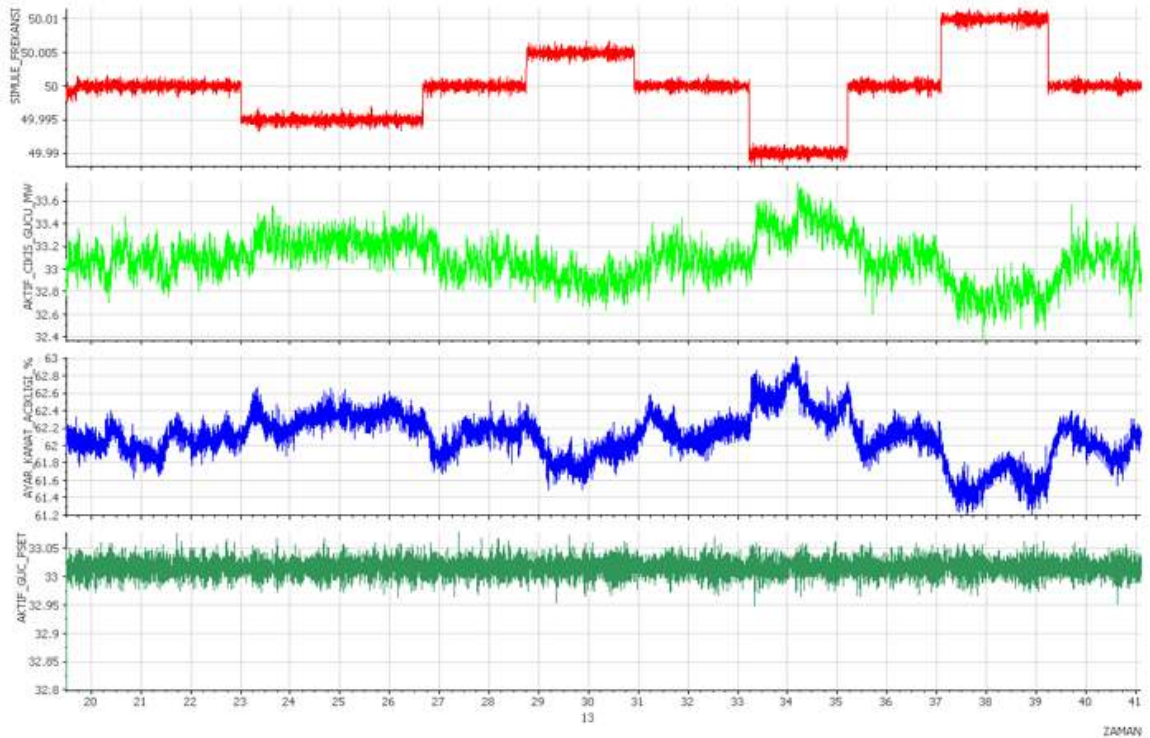
Şekil 5.14’de Ünite-2 maksimum çıkış gücü seviyesi hassasiyet testi sonuçları görülmektedir. Şekil 5.14’de görüldüğü gibi Ünite-2 ayar kanatları açıklığı ve diğer ilgili parametrelerdeki değişikliğe göre duyarsızlığın ± 10 mHz’i aşmadığı gözlemlenmiştir.

5.3.2. Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testleri

Pembelik Barajı ve HES’de mevcut olan Ünite-1 ve Ünite-2’nin maksimum çıkış gücü hassasiyet testleri mevcut işletme şartlarına uygun olarak yapılmıştır.

5.3.2.1 Ünite-1 Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 33 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:** 1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHz şeklinde belirlenmiştir.

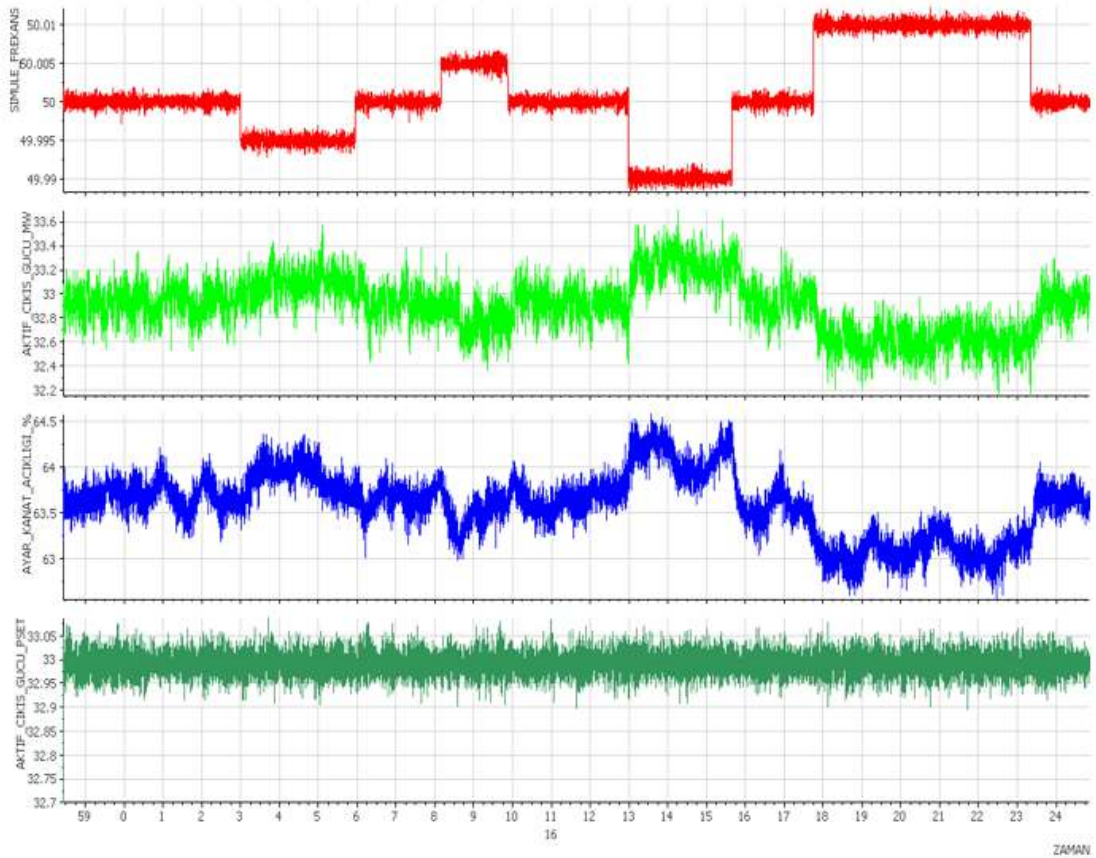


Şekil 5.15 Ünite-1 için minimum çıkış gücü seviyesinde hassasiyet testi

Şekil 5.15’de Ünite-1 minimum çıkış gücü seviyesi hassasiyet testi sonuçları görülmektedir. Şekil 5.15’de görüldüğü gibi Ünite-1 ayar kanatları açıklığı ve diğer ilgili parametrelerdeki değişikliğe göre duyarsızlığın ± 10 mHz’i aşmadığı gözlemlenmiştir.

5.3.2.2. Ünite-2 Minimum Çıkış Gücü Seviyesinde Hassasiyet Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 33 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:**1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHz şeklinde belirlenmiştir.



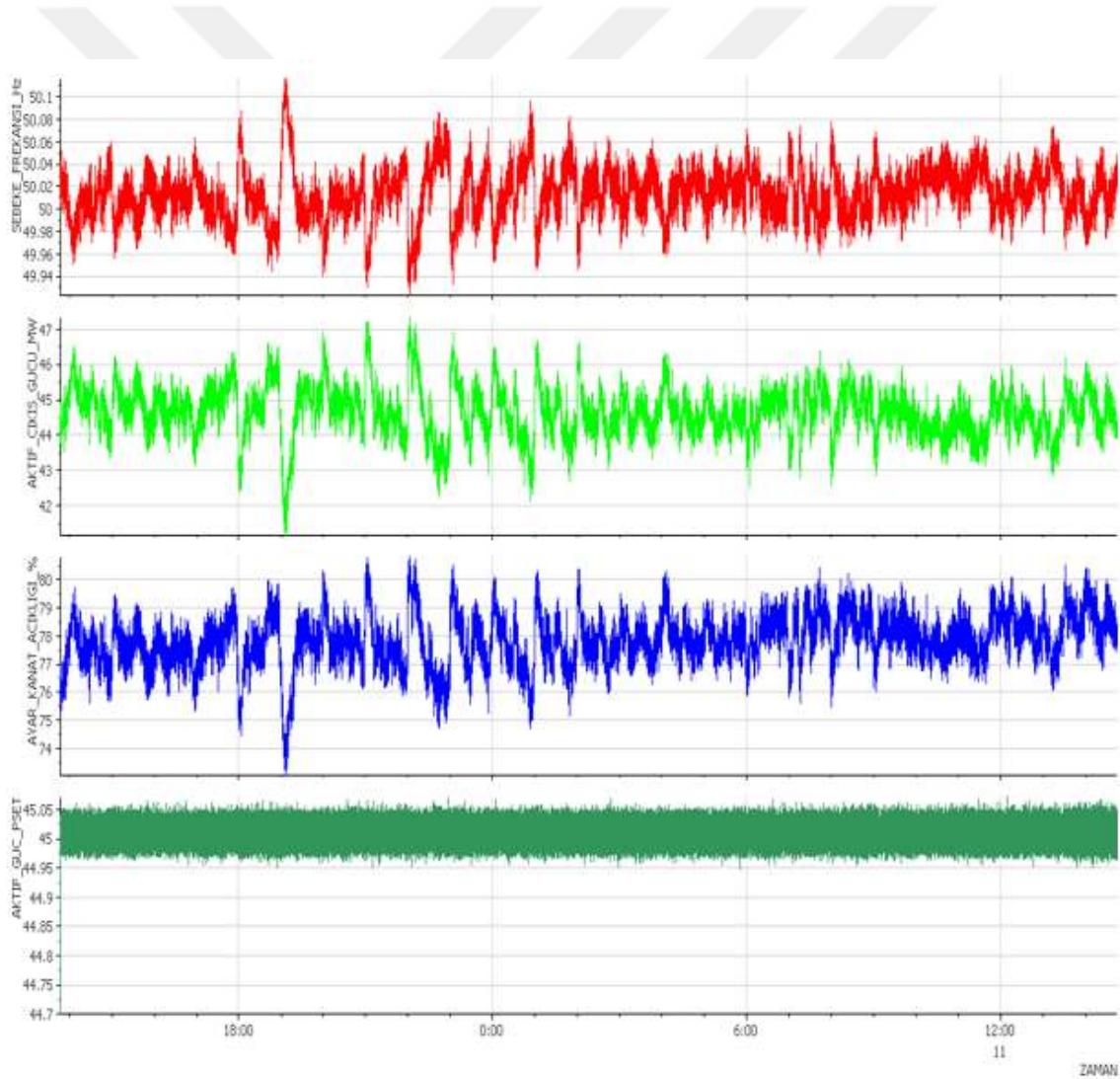
Şekil 5.16 Ünite-2 için minimum gücü seviyesinde hassasiyet testi

Şekil 5.16’da Ünite-2 minimum çıkış gücü seviyesi hassasiyet testi sonuçları görülmektedir. Şekil 5.16’da görüldüğü gibi Ünite-2 ayar kanatları açıklığı ve diğer ilgili parametrelerdeki değişikliğe göre duyarsızlığın ± 10 mHz’i aşmadığı gözlemlenmiştir.

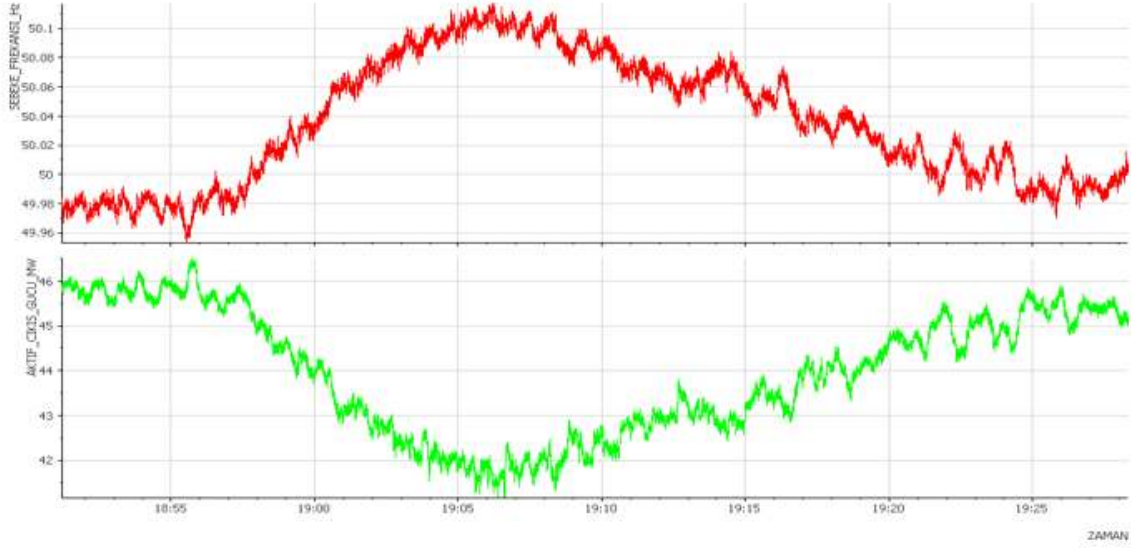
5.4. Pembelik Barajı ve HES PFK 24 Saatlik Doğrulama Testi

5.4.1. Ünite-1 İçin 24 Saatlik Doğrulama Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 45 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:** 1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHz şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.17’de Ünite-1’in 24 saat doğrulama testi sonuçları görülmektedir.

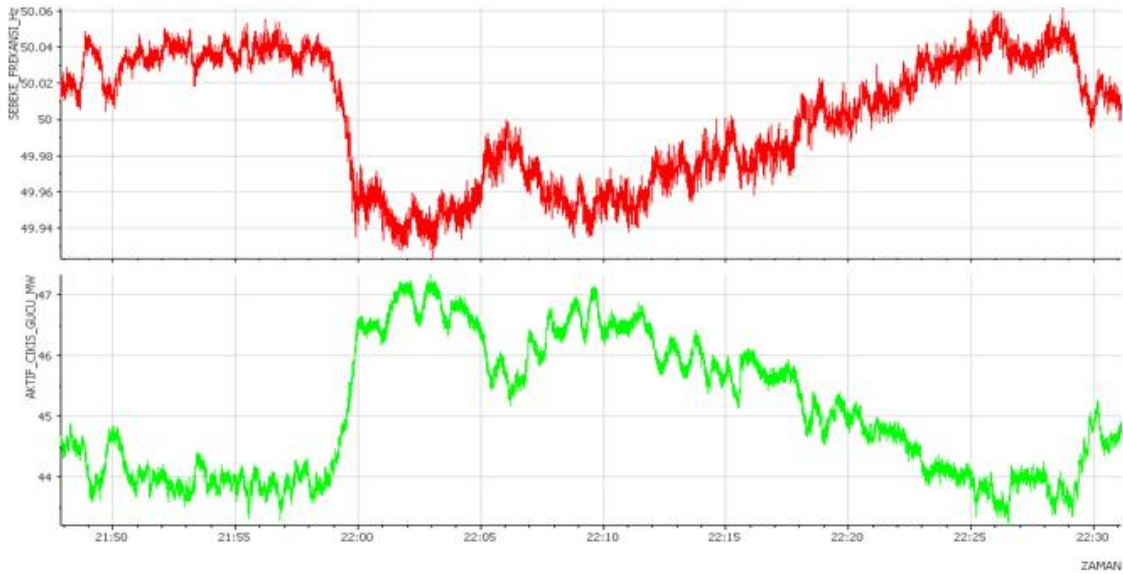


Şekil 5.17 Ünite-1 için 24 saatlik doğrulama testi



Şekil 5.18 Ünite-1 şebeke frekansı pozitif yöndeki maksimum sapması ($f = 50,117025$ Hz)

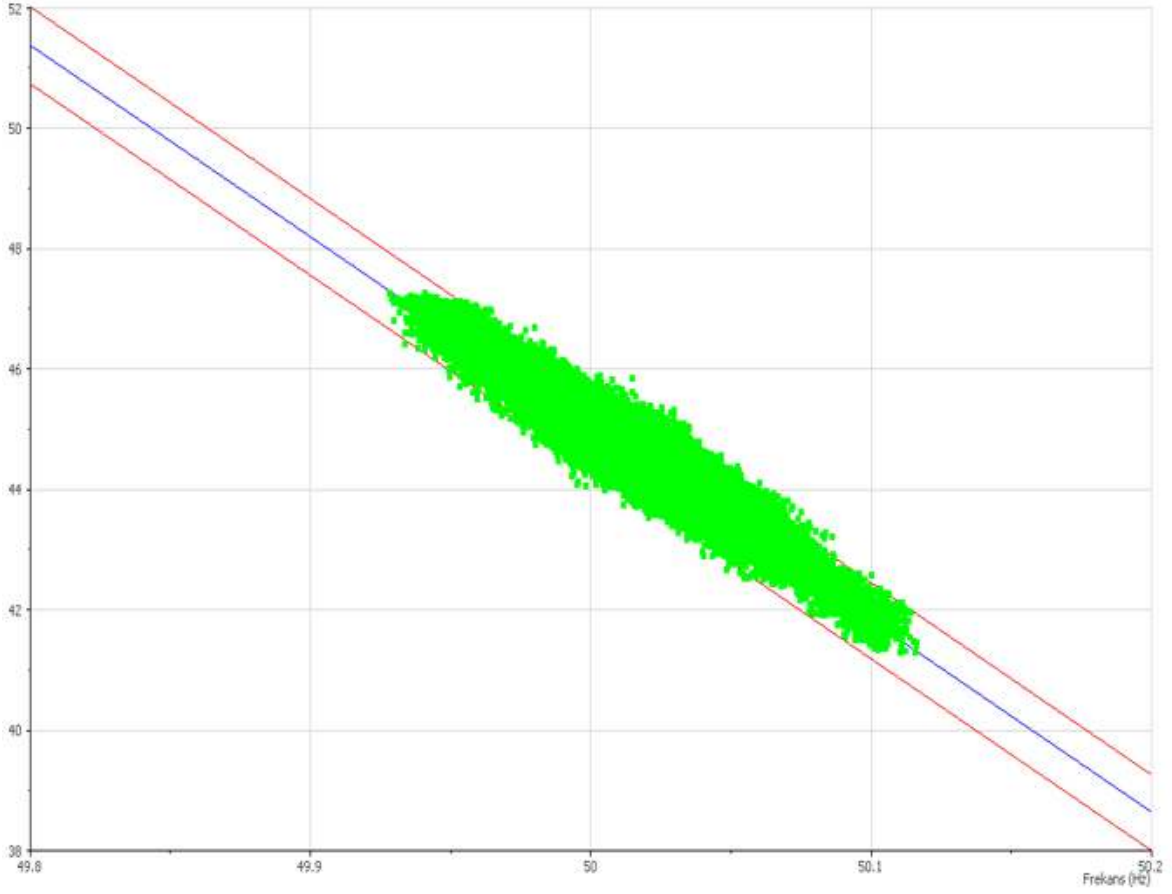
Şekil 5.18’de 24 saatlik doğrulama testi esnasında, şebeke frekansının pozitif yöndeki maksimum sapması 50,117 Hz olduğu zamandaki Ünite-1’in tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.19 Ünite-1 şebeke frekansı negatif yöndeki maksimum sapması ($f = 49,922946$ Hz)

Şekil 5.19’da 24 saatlik doğrulama testi esnasında, şebeke frekansının pozitif yöndeki minimum sapması 49,922 Hz olduğu zamandaki Ünite-1’in tepkisi görülmektedir.

P(MW)

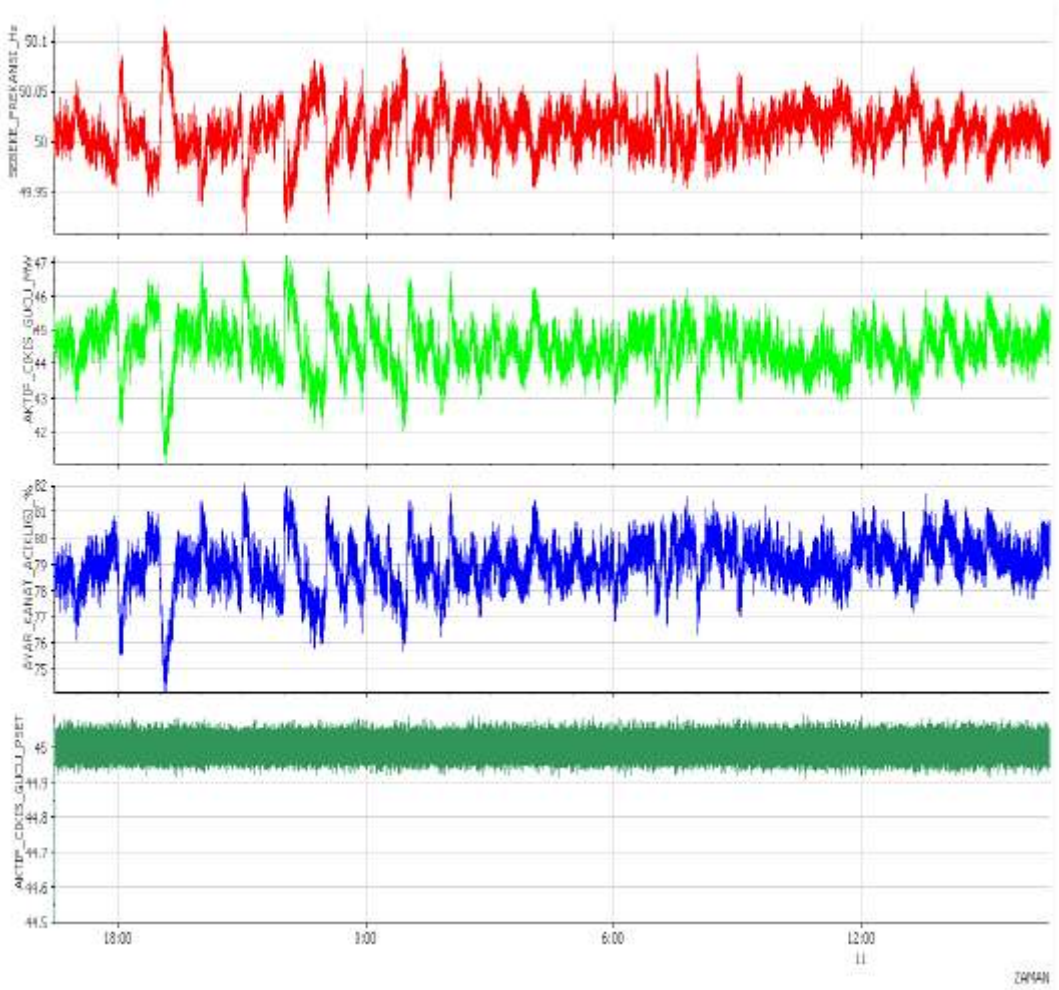


Şekil 5.20 Ünite-1 24 saat doğrulama testi performansı

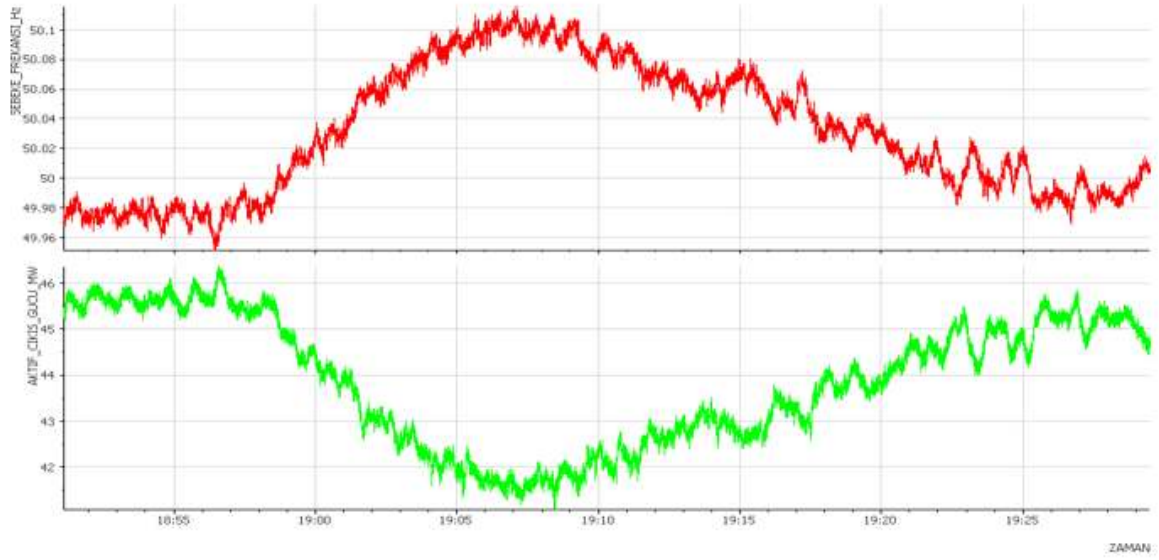
Ünite-1 'in 24 saatlik doğrulama testi süresince , Kaydedilen toplam veri adedi: **899.100**, "Pset + $\Delta P \pm \%1 \times \text{PGN}$ " kriterine uyan veri adedi: **884.736** 'dır. Bu veriler ışığında başarı yüzdesi **%98,402** olarak saptanmıştır. Ünite-1'in 24 saatlik doğrulama testi performans eğrisi Şekil 5.20'de görülmektedir.

5.4.2. Ünite-2 İçin 24 Saatlik Doğrulama Testi

Pembelik Barajı ve HES’de nominal işletme şartları ve mevcut işletme şartlarına göre ayarlanmış değerler sırasıyla, **Pnom:** 63,67 MW, **Pset:** 45 MW, **ΔP :** 6,37 MW, **%2xPnom:**1,274MW, **%1xPnom:** 0,637, **Δt_d :** 4 sn, **Hız Eğimi:** %4, **Ölü Bant:** 0 mHz şeklinde belirlenmiştir. Şekil 5.21’de Ünite-2’nin 24 saat doğrulama testi sonuçları görülmektedir.

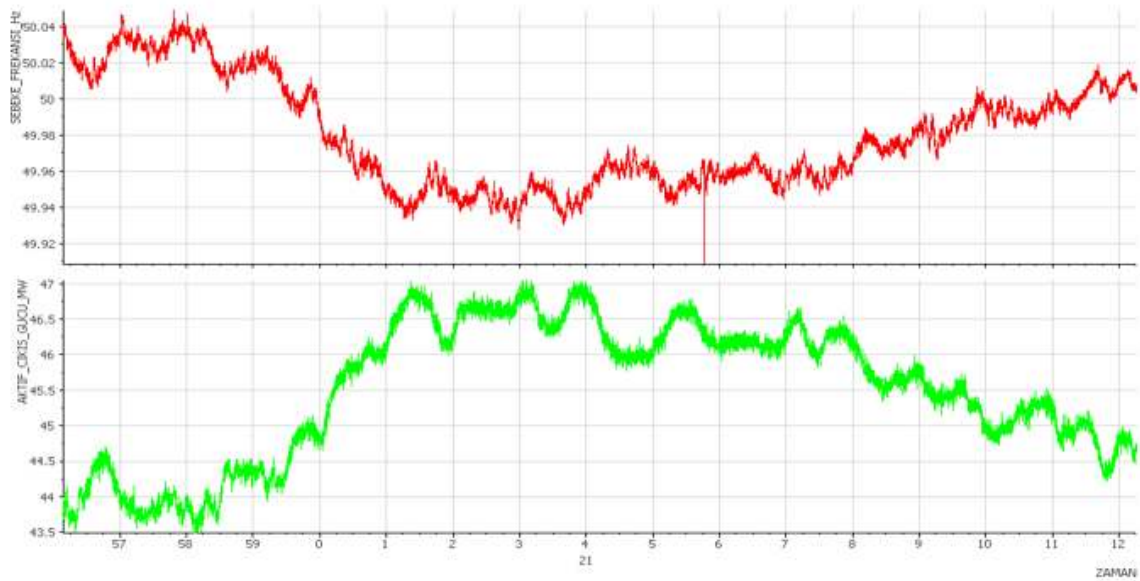


Şekil 5.21 Ünite-2 için 24 saatlik doğrulama testi



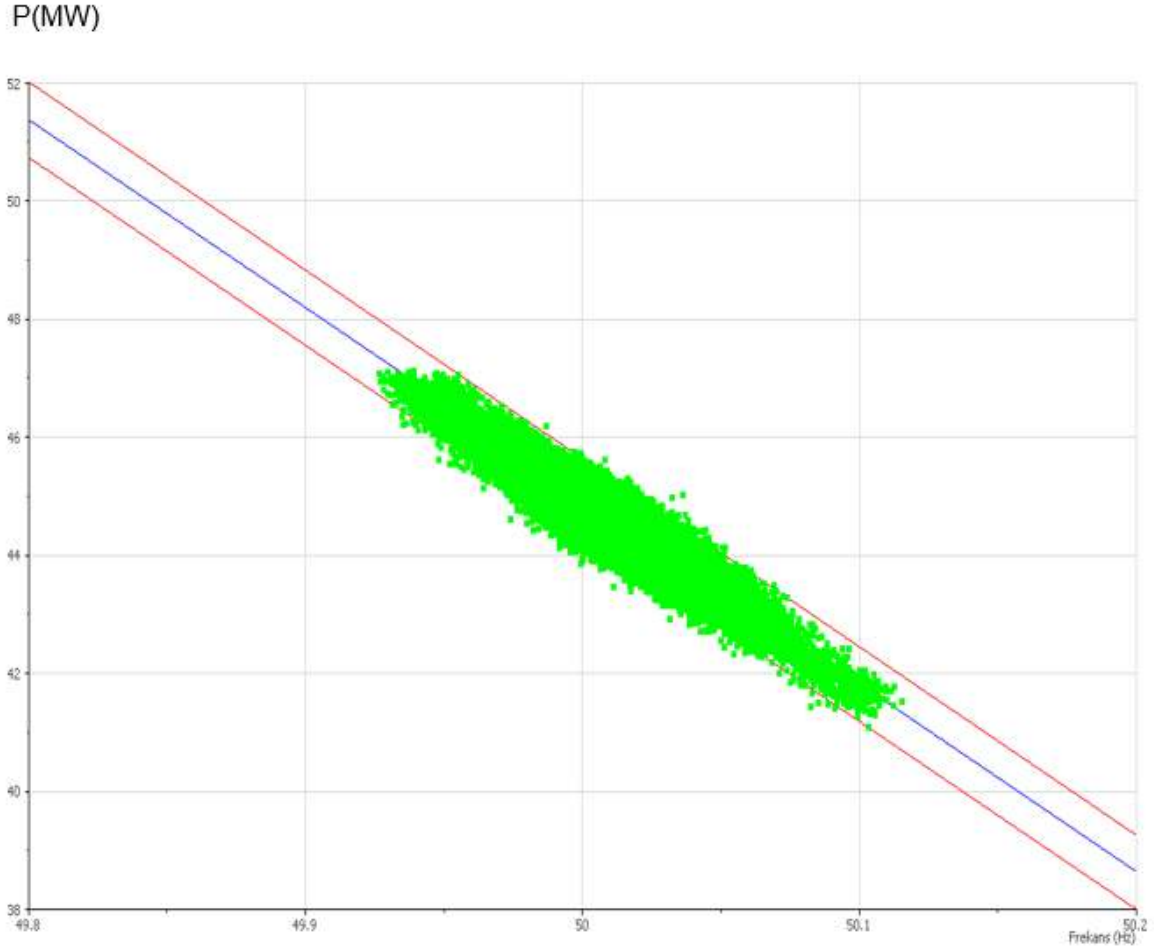
Şekil 5.22 Ünite- 2 şebeke frekansı pozitif yöndeki maksimum sapması ($f = 50,115566$ Hz)

Şekil 5.22’de 24 saatlik doğrulama testi esnasında, şebeke frekansının pozitif yöndeki maksimum sapması 50,115 Hz olduğu zamandaki Ünite-2’in tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.23 Ünite- 2 şebeke frekansı negatif yöndeki maksimum sapması ($f = 49,908626$ Hz)

Şekil 5.23’de 24 saatlik doğrulama testi esnasında, şebeke frekansının negatif yöndeki maksimum sapması 49,908 Hz olduğu zamandaki Ünite-2’in tepkisi görülmektedir.



Şekil 5.24 Ünite-2 24 saat doğrulama testi performansı

Ünite-2 'in 24 saatlik doğrulama testi süresince, kaydedilen toplam veri adedi: **867.200**, "Pset + $\Delta P \pm \%1 \times \text{PGN}$ " kriterine uyan veri adedi: **849.126**'dır. Bu veriler ışığında başarı yüzdesi **%97,915** olarak saptanmıştır. Ünite-2'in 24 saatlik doğrulama testi performans eğrisi Şekil 5.24'de görülmektedir.

Pembelik Barajı ve HES'de gerçekleştirilmiş olan "Primer Frekans Kontrol Performans Testi" sonuçları özet olarak Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'de sunulmuştur. Özet tablolarında, ünitelerin nominal güçleri (P_{nom}) mevcut işletme şartlarına göre test için ayarlanan güç değerleri (P_{set}), primer frekans rezerv değerleri (ΔP), frekans değişikliklerine ($\Delta f = \pm 200$ mHz) karşı rezerv miktarlarını etkinleştirme süreleri (sn), sürdürme süreleri (dk), istenilen zamanlarda tolerans bandı içinde kalma oranları (%), hassasiyetleri (mHz), hız eğim (%) değerleri yer almaktadır.

Tablo 5.5 Test sonuçlarına göre Ünite-1 ve Ünite-2

Pembelik	Rezerv	Etkinleştirme	Doğrusallık	Sürdürme	TRP_A	TRP_B	TRP_C	Hassasiyet	24-Saatlik
Hidroelektirik Santrali	Miktarı	Süresi		Süresi	Süresince	Süresince	Süresince	(± 10 mHz)	Doğrulama
		(≤ 30 saniye)		(≥ 15 dakika)	Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı ($\geq \%90$)	Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı ($\geq \%90$)	Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı ($\geq \%90$)		
ÜNİTE – 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ÜNİTE – 2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tablo 5.6 Ünite-1 için PFK performans testleri sonuçları

Pembelik Hidroelektirik Santrali	P _{nom} (MW)	P _{set} (MW)	ΔP (MW)	Etkinleştirme Süresi (saniye)	Sürdürme Süresi (dakika)	TRP_A	TRP_B	TRP_C	Hassas iyet (mHz)	Ölü Bant (mHz)	Hız Eğimi (%)		
						Süresince	Süresince	Süresince					
						Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı (%)	Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı (%)	Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı (%)					
Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Testleri (P _{set} = 47 MW)													
U-01	- 200 mHz	63,7	47	6,44 5	24	≥15	%100	%100	%100	≤10	0	4	3,951
	+ 200 mHz	63,7	47	6,34 3	22	≥15	%100	%100	%100	≤10	0	4	4,015
Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Testleri (P _{set} = 33 MW)													

U-01	- 200 mHz	63,7	33	6,443	22	≥ 15	%100	%100	%99,877	≤ 10	0	4	3,952
	+ 200 mHz	63,7	33	6,328	23	≥ 15	%100	%100	%100	≤ 10	0	4	4,024

Tablo 5.7 Ünite-2 için için PFK performans testleri sonuçları

Pembelik Hidroelektirk Santrali	P _{nom}	P _{set}	ΔP	Etkinle ştirme Süresi	Sürdür me Süresi	TRP_A Süresince Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı	TRP_B Süresince Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı	TRP_C Süresince Tolerans Bandı İçinde Kalma Oranı	Hassasi yet	Ölü Bant	Hız Eğimi (%)		
	(MW)	(MW)	(MW)	(saniye)	(dakika)	(%)	(%)	(%)	(mHz)	(mHz)	Ayarla	Gerçekle	
											nan	şen	
Maksimum Çıkış Gücü Seviyesi Testleri (P _{set} = 47 MW)													
U-02	- 200 mHz	63,7	47	6,360	28	≥15	%100	%100	%100	≤10	0	4	4,004
	+ 200 mHz	63,7	47	6,413	21	≥15	%100	%100	%99,778	≤10	0	4	3,971
Minimum Çıkış Gücü Seviyesi Testleri (P _{set} = 33 MW)													
U-02	- 200 mHz	63,7	33	6,321	27	≥15	%100	%100	%99,963	≤10	0	4	4,029
	+ 200 mHz	63,7	33	6,429	23	≥15	%100	%100	%100	≤10	0	4	3,961

6. SONUÇ

Bir hidroelektrik santralde senkron generatörün gücü ne olursa olsun devir sayısı sabit olmalıdır. Generatörlerin devir sayısı, yük arttığında azalır. Yük azaldığı zaman ise devir sayısı artar. Bu değişimler elektrik güç sisteminin frekansını etkiler. Elektrik güç sistemine bağlı olan üretim tesislerindeki generatörlerin sistem frekansını sabit tutmak amacıyla, governör sistemleri ile generatörü tahrik eden türbinlerin ayar kanat açıklıkları ayarlanmak suretiyle devir sayısı sabit tutulur.

Bu tezde ele incelenen Pembelik Barajı ve HES'in elektrik güç sistemine bağlı olan tüketici birimlere sürekli, kararlı ve kaliteli bir elektrik enerjisi sunabilmesi için frekans kontrolü önem arz etmektedir. Frekans kontrolünü sağlayacak bu tesisin, performansını test etmek, eğer varsa eksikliklerinin tespit edilip iyileştirilerek istenilen standartlara sahip olması amaçlanır. Bu doğrultuda, santraldaki "Andritz" marka 2 adet (Ünite-1, Ünite-2) dikey francis hidrolik türbinlerinin PFK (Primer Frekans Kontrolü) performans testleri gerçekleştirilmiştir.

PFK performans testleri şebeke frekansı, simüle (test) frekans, aktif güç, ünite aktif güç referansı ve ayar kanat açıklığı pozisyon sinyalleri kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen testler esnasında, ölçümü yapılan sinyaller 100 milisaniyelik örnekleme oranıyla (saniyede 10 veri) ölçümleri yapılarak kayıt edilmiştir.

PFK performans testlerinde verilen frekans simülasyonu, santraldaki "Andritz" marka 2 adet (Ünite-1, Ünite-2) Dikey Francis Hidrolik Türbinleri için "TM 1703 ACP" adlı kontrol sistemi yazılımı aracılığıyla, ünite kontrol sisteminin şebeke frekansını algılamayacağı biçimde ölçülen hız bilgisinin yerine doğrudan simüle edilen hız bilgisi (basamak değişiklik halinde) uygulanarak gerçekleştirilmiştir.

Pembelik Barajı ve HES türbinleri, primer frekans kontrol performans test kriterlerine uygun tepkiler verdiği gözlemlenmiştir.

Pembelik Barajı ve HES ünitelerinin; maksimum çıkış gücü seviyesinde ve minimum çıkış gücü seviyesinde gerçekleştirilen Rezerv testlerinde ünitenin $\Delta f = \pm 200$ mHz basamak değişiklik halinde uygulanan simule frekansa karşılık gelen rezerv miktarını sağladığı ve rezerv miktarını 15 dakika boyunca sürdürebildiği; ünite çıkış gücü değerlerinin en az %90 tolerans değerleri aralığında olup ve beklenen tepki grafiğine toleranslar dahilinde sağladığı gözlenmiştir.

Pembelik Barajı ve HES ünitelerinin; maksimum çıkış gücü seviyesinde ve minimum çıkış gücü seviyesinde gerçekleştirildikten sonra Hassasiyet testlerine geçilmiş; hassasiyet testlerinde ünitenin $\pm 5/\pm 10$ mHz (Δf) basamak değişiklik halinde uygulanan simule frekansta; detaylı olarak incelendiği ünitenin Hassasiyet testlerine belirlenen kriterlere uygun tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Pembelik Barajı ve HES'nin ünitelerinde; rezerv ve hassasiyet testlerinin başarıyla gerçekleştirilmesinden sonra her iki ünite için, 24 saatlik doğrulama testi gerçekleştirilmiştir. 24 saatlik doğrulama test verilerinin incelemesi sonucunda; Ünite -1 için 899.100 veriden 884.736 adet veri toleranslar dahilinde kalmış ve %98,402 oranında, Ünite-2 için 867.200 veriden 849.127 adet veri toleranslar dahilinde kalmış ve %97,915 oranında belirlenen kriterlere uygun tepki verdiği gözlemlenmiştir.

Bu tezde faaliyette olan Pembelik Barajı ve Hidroelektrik Santralinde Primer (Birincil) Frekans Kontrolü uygulamasının hangi standartlara ve yönetmeliklere göre yapıldığı, santralin bu standartlara uygunluğunu tespit amaçlı yapılan performans testleri ve bu testlerde hangi şartların yerine getirilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] OĞUZ, Y. ve KAYSAL, A. Ve KAYSAL, K., Adıgüzel Hydroelectric Pwer Plant Modelling and Load Frequency Control, Akademik Platform Journal of Engineering and Science, 2015.
- [2] GENÇOĞLU, M.T., ve CEBECİ, M., Büyük Hidroelektrik Santraller ile Küçük Hidroelektrik Santrallerin Karşılaştırılması, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 2001.
- [3] GÖKDEMİR, M., ve KÖMÜRCÜ M.İ, ve EVCİMEN, T.U., Türkiye’de Hidroelektrik Enerji ve HES Uygulamalarına Genel Bakış, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2012.
- [4] SEZER, O.K.,Kocaeli Fen Bilimleri Enstitüsü, Primer-Sekonder Frekans Kontrolü ve Afşin Elbistan B-Termik Santrali Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [5] KÜÇÜKERDEM, H., Hidroelektrik Santralleri İçin Yeni Bir Model Türbin Hız Regülatörü Tasarımı, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [6] AKÇAY, S., Hidroelektrik Santrallerde Güç Frekans Denetimi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [7] YALÇIN, E., ve ÇAM, E., ve VARDAR, T., ve LÜY, M., PID Kontrolör ile İki Bölge Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolünün İncelenmesi, International Journal of Engineering Research and Development, 2013.
- [8] UZUNOĞLU, C.P., Enerji Sistemlerinde Frekans Ölçümü ve Kontrolü, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2011.
- [9] GEZER, D., Su Türbini Hız Regülatörleri için Model Referanslı Uyarımlı Denetim Eklentilerinin Geliştirilmesi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 2018.
- [10] ÖZBAY, E., ve GENÇOĞLU, M.T., Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi, 5. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 2009.

- [11] ÖZDEMİR, M.T., ve ORHAN, A., ve CEBECİ, M., Çok Küçük Potansiyellerin Enerji Üretim Amacı ile Yerel İmkanlarla Değerlendirilmesi, Elektrik Elektronik Sempozyumu, 2011.
- [12] BAŞEŞME, H., Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri, Hidroelektrik Santraller Daire Başkanlığı Yayınları 2. Baskı, 2003.
- [13] DURUKAN, Y. ve ÖZKÖK D. ve ÖZKAYA, A. ve KARA, M.H, TEİAŞ, Türkiye Elektrik Sisteminin Avrupa Elektrik Sistemine Bağlantısı, 2011.
- [14] SAFI, S.J., Güç Sistemin Frekans Kontrolü ve Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [15] DEMİRÖREN, A. ve ZEYNEGİL. L., Birsen Yayınevi, Elektrik Enerji Sistemlerinin Kararlılığı Kontrolü ve Çalışması, 2004.
- [16] Policy-1:Load Frequency Control and Performance, UCTE Operation Handbook, 2009.
- [17] TEİAŞ, Primer Frekans Kontrol Hizmetinin Uygulanmasına İlişkin El Kitabı, 2009.
- [18] EK.4 Primer Frekans Kontrolü, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, Elektrik Piyasası Denetleme Kurumu
- [19] EK17.A. Primer Frekans Kontrol Performans Test Prosedürleri, EK 17 Yan Hizmetler Performans Test Prosedürleri, Elektrik Şebeke Yönetmeliği,6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu, 2013.
- [20] ÇELİK, H., Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Güç Sistemlerinde Frekans Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [21] WOODWARD, Application Note 01302, Revision NEW, 1991
- [22] BAYDEMİR, S., Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Küçük Güçlü Hidroelektrik Santrallerinin Güç ve Frekans Kontrolü, 2013.
- [23] YOLCUBAL, E., Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hidroelektrik Santrallerinde Governor Kontrolü, 2011.
- URL-1, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Elektrik> 2019.
- URL-2, <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Hidrolik> 2019.
- URL-3,<https://www.teias.gov.tr/tr/kurumsal/uyelikler/uluslararası-kuruluslar/entso-e> 2019.

ÖZGEÇMİŞ

21 Ekim 1989 tarihinde Elazığ Palu'da doğdu. İlköğretimini 2003 yılında Elazığ Koç İlk Öğretim Okulunda tamamladı. 2006 yılında Elazığ Fatih Lisesinden mezun oldu. 2007 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünü kazandı ve yine aynı bölümden 2012 yılında mezun oldu. 23 Eylül 2011 ile 30 Kasım 2012 tarihleri arasında Bilgin Rüzgar Santrali Enerji Üretim A.Ş. Soma Rüzgar Santrali İşletme Müdürlüğünde bakım departmanında çalıştı. 12 Aralık 2012 ile 18 Mayıs 2013 tarihleri arasında vatani görevini Samsun'da yerine getirdi. 4 Temmuz 2013 tarihinden itibaren Darenhes Elektrik Üretim A.Ş. Pembelik Barajı ve HES İşletme Müdürlüğünde İşletme Müdür Yardımcısı ve Enerji Yöneticisi olarak çalışmaya devam etmektedir. 2014-2015 bahar yarıyılından itibaren Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünde Yenilenebilir Enerji Sistemleri anabilim dalında tezli yüksek lisans programında öğrenimi devam etmektedir. 2017 yılında Hilal GÖLEN SOMUNKIRAN ile evlendi.