

Nehir-Tipi Hidroelektrik Santrallerin Kararlı ve Güvenli Çalışma Sınırlarını Belirleyen Faktörler

Determining Factors for Stable and Safe Operation of Run-off River Type Hydraulic Power Plants

Mahmut Erkut Cebeci¹ Osman Bülent Tör¹ Oğuz Yılmaz¹ Abdullah Nadar¹ Erdoğan Güner¹
erkut.cebeci@* osman.tor@* oguz.yilmaz@* abdullah.nadar@*

¹ TÜBİTAK – UZAY ODTÜ Ankara (*@uzay.tubitak.gov.tr)

Anahtar sözcükler: Nehir-tipi hidrolik santral, kararlılık, seviye-kontrol, frekans-kontrol.

Özet:

Bu bildiride, nehir-tipi hidroelektrik santrallerin (HES) “şebekeye-bağlı” ve “izole” çalışma prensiplerine karşılık gelen “seviye-kontrol” ve “frekans-kontrol” döngülerinin matematiksel modelleri çıkarılmıştır. Bu modeller üzerinden tipik bir HES ünitesinin kararlılık sınırları ve temel değişkenlerin bu sınırlara etkisi incelenmiştir. Bir HES santralin güvenli çalışması için sınırlandırılması gereken cebri-boru aşırı basınç artışına ve türbin aşırı hızlanmasına etki eden faktörler ve önlemler belirlenmiştir. Tipik bir HES ünitesinin, her iki çalışma prensibinde de, bir PI-denetleyici üzerinden kararlı regülasyon yapabilmesi ve güvenli çalışmaları için optimum PI değerleri hesaplanmıştır.

Abstract:

In this paper, the mathematical models of the control loops of typical run-off river hydro electric power plants are determined for two main operational modes: “parallel to grid” (level-control) and “isolated” (frequency control). The stability margins and the variables that mainly affect those margins are investigated through these models. The effects of main plant components on the conditions of over-speed of the turbine and over-pressure of the penstock, which have to be limited for the safe operation of power plants, are investigated and corresponding measures are defined. Optimum PI settings of the controllers are determined for the stable and safe operation of a typical unit in both operational modes.

1. Giriş:

Türkiye’de hızla artan elektrik enerjisi talebi yeni enerji santrallerini zorunlu hale getirmiştir. Bu açığı kapatmak için yapımına başlanan büyük ölçekli santrallerin yanı sıra pek çok küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santral projesi de gündeme gelmiştir. Özellikle artan petrol ve doğalgaz fiyatları, ülkemizde bulunan kömürün kalitesinin düşüklüğü gibi etkenler göz önüne alındığında hidroelektrik santrallerin cazip bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır.

Hidroelektrik santrallerin son zamanda önem kazanan türlerinden biri ise *nehir-tipi* santrallerdir. Bu tip santraller yükleme havuzunun sınırlı kapasitesi sebebiyle çok küçük bir su depolama potansiyeline sahiptir ve sadece nehirde enerji üretimine yetecek *debi* olduğunda çalışabilirler [1]. Temel olarak bir nehir-tipi hidroelektrik santralin (HES) (yeterli su debisi olduğu varsayılırsa) iki farklı çalışma biçimi olabilir:

▪ İlk çalışma şekli “*Şebekeye-Bağlı*” çalışmadır. Bu durumda santral üretiminin tümü şebekeye iletilecektir. Dolayısıyla santralin işletme amacı mümkün olan en yüksek enerjiyi üretmektir. Doğal koşullar tarafından belirlenen nehir debisinin santral işletmesi ile değişmeyeceği açıktır. Fakat türbin verimlilik eğrileri ve o anki nehir debisi göz önüne alınarak yükleme havuzu seviyesi kontrol edilebilir ve nehir debisinin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilir. Yükleme havuzunun seviyesinin kontrol edildiği bu işletim şekline “*Seviye Kontrol*” denir.

▪ İkinci çalışma şekli olan “*İzole-Ada*” modunda ise santral şebekeden bağımsız olan bir bölgede elektrik ihtiyacını karşılar. Bu çalışma prensibi nehir-tipi santraller için normalde tercih edilmeyip, ancak şebekede oluşacak bir arıza sonrasında ve santral tasarımı uygunsa kullanılabilir. Örneğin, santralin ve bölgesel yükün şebekeye tek bir iletim hattı ile bağlı olduğu durumlarda, santrali ve bölgesel yükü şebekeye bağlayan iletim hattında meydana gelecek bir arıza dolayısıyla iletim hattının kesici ile açılması sonrası, santral ve bölgesel yük bir izole-ada oluşturabilir. Bu çalışma prensibinde santralin amacı enerji üretimini maksimize etmek veya nehir debisini verimli kullanmak değil, izole sistemin gerilimini ve frekansını belirli sınırlar içinde tutmaktır (regüle etmektir). İzole sistemlerde gerilim kontrolü ayrıca irdelenmesi gereken bir konu olup, frekans kontrolüne odaklanan bu bildirinin kapsamı dışındadır.

Bu bildirinin amacı, tipik bir nehir-tipi hidrolik santralin kontrol sisteminin şebekeye-bağlı (seviye kontrolü) ve izole-ada (frekans kontrolü) çalışma koşullarının analiz edilmesi, santralin her iki prensipte de *kararlı* (stable) çalışmasına etki eden temel değişkenlerin belirlenmesi ve kararlı çalışma sınırlarına karşılık gelen *PI-denetleyici* (regülatör) ayar aralıklarını belirlemektir. Bunun yanında, oluşturulan sistem modeli üzerinde türbin/generatör *kaçma-hızı* (run-away speed) ve cebri-boru dayanma basıncı gibi temel güvenlik limitleri kararlılık analizi ile ilişkilendirilerek, *PI-denetleyicileri* en uygun ayar değerleri belirlenmiştir.

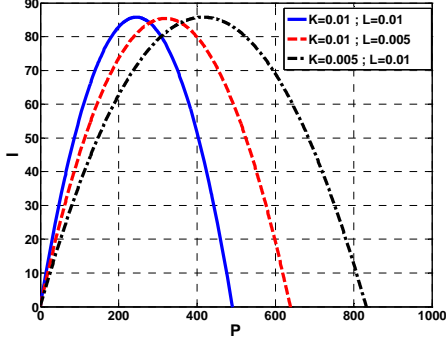
2. Modelleme

Tipik bir nehir-tipi HES’in yapısı Şekil 1’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi, şebekeye-bağlı çalışırken gerçekleştirilen seviye-kontrol için ve izole-ada çalışırken gerçekleşen frekans-kontrol için gerekli ölçüm ve set değerlerinin farkından oluşan hata sinyali, ilgili *PI-denetleyicilere* iletilir. Hata sinyali denetleyicide işlenerek komut sinyaline dönüştürüldükten sonra, bir *servo-motor* vasıtasıyla türbin *ayar-kanatlarını* kumanda eder.

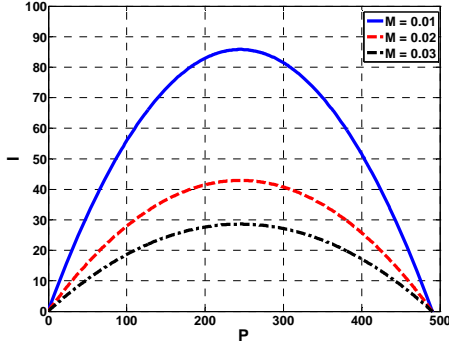
3.1.1. Seviye kontrol

Şebeke-bağlı çalışan ünitelerin seviye-kontrol döngüsünün kararlılığı temel olarak üç temel değişkene bağlıdır: 1) Su zaman sabiti, 2) Ayar kanadı gecikme zamanı, 3) Yükleme havuzu dolma zamanı. Bu değişkenlerin etkilerini daha iyi gözleyebilmek için aşağıda bazı oranlar tanımlanmıştır (13). Bu oranların kararlılık sınırlarına etkileri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.

$$K = T_w / T_s; \quad L = T_g / T_s; \quad M = T_w T_g / T_s \quad (13)$$



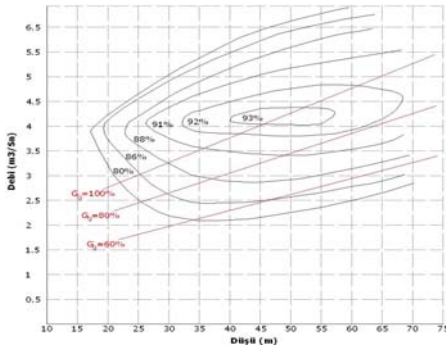
Şekil 4. Kararlılık limitleri - PI denetleyici ayar aralığı (M = 0.01).



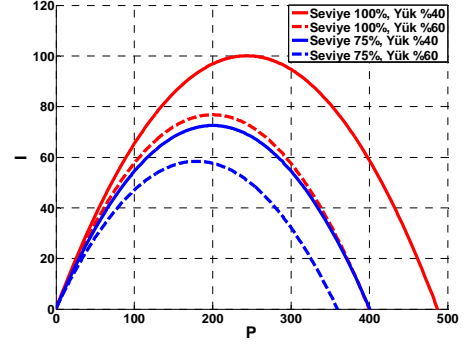
Şekil 5. Kararlılık limitleri - PI denetleyici ayar aralığı (K = 0.01 ve L = 0.01).

PI-denetleyicinin Şekil 4 ve 5'teki kararlı bir çalışma rejimi için gerekli olan ayar aralığındaki değişiminden görüldüğü gibi, T_w ve T_g büyüdükçe kararlılık sınırları daralmakta ve T_s büyüdükçe kararlılık sınırları genişlemektedir. Bu durum, küçük yüklemeli ve/veya uzun cebri borulu HES'lerde daha sık karşılaşılan kararlılık problemini açıklamaktadır.

Zaman sabitlerinin kararlılığa etkilerinin yanı sıra, farklı çalışma koşulları da kararlılık sınırlarının belirlenmesinde etkilidir. Örneğin prototip eş-verim-eğrileri (hill-chart) Şekil 6'da verilen bir santral için, farklı yüklenme ve seviye değerlerinde kararlılık sınırları Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Prototip eş verim eğrileri (hill chart).



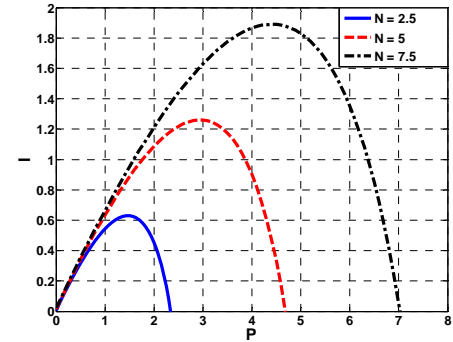
Şekil 7. Seviye ve yüklenme koşullarının kararlılık sınırlarına etkisi.

Şekil 7'de de görüldüğü gibi, santralin üretiminin artması kararlılık sınırlarını daraltmaktadır. Bu sonuç, PI-denetleyici ayarlarının santralin tam kapasite çalışma durumu göz önüne alınarak yapılması gerektiğini göstermektedir. Bunun yanında, seviyenin düşmesi kararlılık sınırlarını daraltmakla birlikte türbin verimini de düşürmektedir. Bu sebeple seviye kontrol referans değeri *anna* seviyesine yakın seçilmelidir.

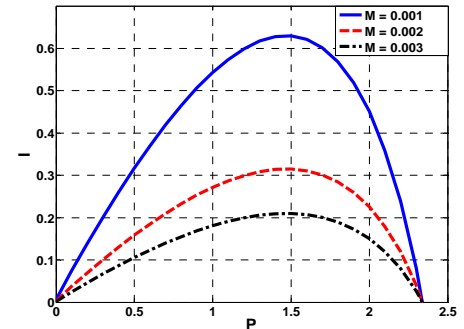
3.1.2. Frekans kontrol

Bu bölümde, şebekede meydana gelebilecek bir arıza sonucu santralin şebekeden izole bir biçimde bölgesel yükleri beslediği durum incelenmiştir. Temel olarak frekans-kontrol döngüsünün kararlılığı dört farklı temel değişkene bağlıdır: 1) Su hızlanma zaman sabiti, 2) Ayar kanadı gecikme zamanı, 3) Yükleme havuzu dolma zamanı, 4) Mekanik zaman sabiti. Bu değişkenlerin kontrol döngüsünün kararlılığına etkisini incelemek amacıyla, bir önceki bölümünde tanımlanan oranlara ilave olarak aşağıdaki oran tanımlanmıştır (14). Tüm bu parametrelerin kararlılık sınırlarına etkileri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.

$$N = T_m / T_w \quad (14)$$



Şekil 8. Kararlılık limitleri - PI denetleyici ayar aralığı (M=L=0.001, K=0.01).

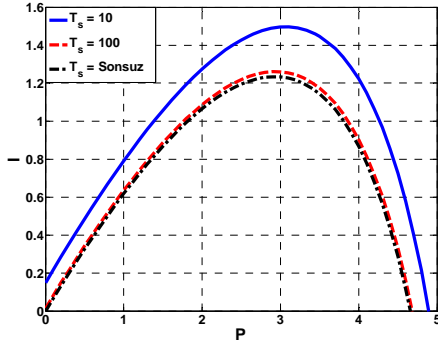


Şekil 9. Kararlılık limitleri - PI denetleyici ayar aralığı (N=2.5, K=0.01, L=0.001).

Seviye-kontrolde olduğu gibi yine T_w ve T_g büyüdükçe kararlılık sınırları daralmaktadır. Diğer yandan, T_m büyüdükçe kararlılık sınırları genişlemektedir. Yani izole-ada çalışma prensibinde *döner-kütle* büyüklüğünü ifade eden T_m 'in kararlılığa etkisi ön plana çıkmaktadır.

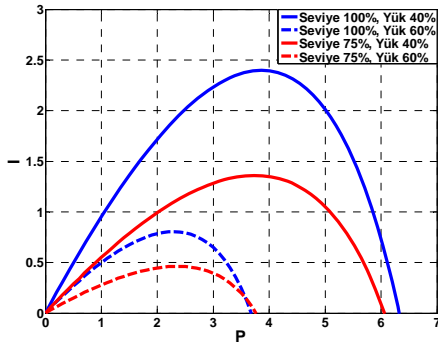
Her ne kadar Şekil 9'da T_s değerinin artması (M oranını düşürmekte) kararlılık sınırını genişletmekte gibi görünse de, N , K ve L oranlarının sabit olması T_s değerinin gerçek etkisini saklamaktadır. Diğer değişkenlerin sabit tutulup T_s değerinin artırıldığı bir durumda kararlılık sınırları daralmakta ve bir noktada doyuma ulaşmaktadır. Şekil 10'da daha iyi görülen bu etkiyi şu şekilde açıklayabiliriz:

▪ T_s 'in küçük olması ayar kanatlarındaki bir değişimin hızla seviyeye yansımaya anlamına gelmektedir. Yani, ayar kanat pozisyonunun artması hızla seviye düşüşüne, azalması ise hızla seviye artışına sebep olacaktır. Bu durum kontrol sisteminden kaynaklı aşırı hareketler sebebiyle çıkış gücündeki değişimleri azaltacak ve sistemin kararlı kalmasına yardımcı olacaktır. Bunun yanında, küçük yüklemeye havuzu olan bir santral izole-ada modunda, yükteki bir artışta hızla seviye kaybedeceğinden, yük regülasyon aralığı dardır.



Şekil 10. T_s değerleri PI denetleyici parametreleri kararlılık limitlerine etkisi.

Yüklenme ve seviye koşullarının kararlılık sınırlarına etkisi incelendiğinde, seviye düşüştükçe ve ünite yükü arttıkça kararlılık sınırının daraldığı görülmektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Seviye ve yüklenme durumunun kararlılık sınırlarına etkisi.

3.2. Güvenli çalışma limitleri

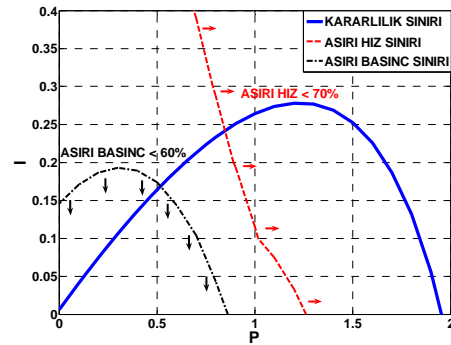
Bilindiği gibi bir ünite için en tehlikeli durumlardan biri tam yükte çalışma sırasında generatör kesicisinin açmasıdır. Bu durumda üniteyi hızlandırmaya çalışan mekanik güç karşısında onu yavaşlatmaya çalışan elektriksel güç sıfır olacak ve generatör büyük bir ivme ile hızlanmaya başlayacaktır [2]. Bu noktada iki seçenek vardır. Birincisi, kesici açması sonrası üniteyi doğrudan devre dışı bırakmaktır (trip ettirmek). Diğer seçenek ise frekans kontrol sisteminin çalışmaya devam etmesi ve üniteyi boşta anma frekansına geri

getirmesidir. Bu sayede geçici bir arıza sonrası hızlı bir biçimde yeniden senkronize olunabilir.

Her iki durumda da generatörü aşırı hızdan korumak amacıyla ayar kanatlarının hızlı hareketi gerekmektedir. Öte yandan, ayar kanatlarının hızlı hareketi cebri boru üzerinde ciddi bir basınç artışı yaratır. Bu basınç artışını sınırlamak için ise ayar kanatlarının hızını sınırlamak gerekir [7]. Dolayısıyla bir ikilem söz konusudur: ayar kanatlarının hızlı hareketi generatörü kaçma-hızından korurken cebri boruda basınç artışına sebep olmakta, tersi bir yaklaşım ise basınç artışını sınırlarsa da, generatörün aşırı hızdan hasar görmesine sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, T_m 'in seçiminde PI-denetleyici parametrelerinin yanı sıra, ayar kanadı maksimum açma ve kapama hızları ile de oldukça önemli rol oynamaktadır.

Aşağıda bilgileri verilen tipik bir santral için, ayar kanatlarının açma/kapama hızlarının ve T_m 'in güvenli ve kararlı çalışma sınırlarına etkileri incelenmiştir (Şekil 12-14).

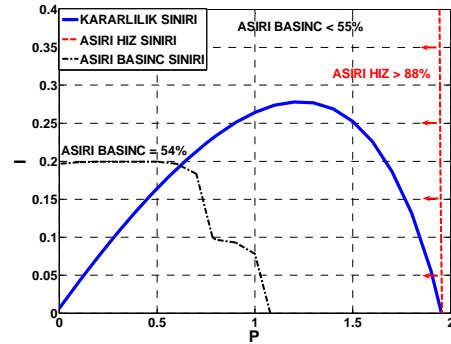
- $T_w = 2$ sn; $T_m = 4$ sn; $T_g = 0.1$ sn; $T_s = 100$ sn
- Kabul edilebilir basınç değişim sınırı = %60
- Kabul edilebilir hız değişimi sınırı = %70



Şekil 12. PI denetleyici kararlılık ve güvenli sınırları ($T_{up} = T_{dw} =$ sınırsız).

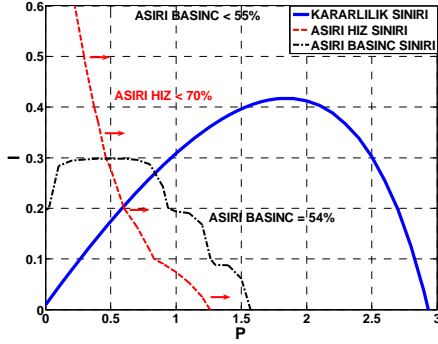
Şekil 12'de görüldüğü gibi, ayar kanat hızları limitlenmediği zaman, farklı PI değerleri için hız tepe değeri küçüldükçe basınç tepe değeri yükselmektedir. Bu durumda hem hızı hem de basıncı aynı anda güvenli sınırlarda tutmak mümkün olmayabilir. Şekil 14'de görüldüğü gibi, tipik bir santral için hız değişimi sınırı 70% ve basınç değişimi sınırı 60% kabul edilirse, santrali güvenli çalışma limitleri içerisinde tutan hiçbir PI değeri bulunmamaktadır. Başka bir deyişle, PI-denetleyici ile bu koşulları sağlamak mümkün değildir.

Ayar kanat hızlarına sınırlar getirilmesi kaydıyla basınç artışı limitlenebilir. (Şekil 13'te basınç artışı tepe değeri 55%'i geçmemektedir.) Fakat ayar kanatlarının yavaş hareketinden dolayı hız artışı tepe değeri artmakta ve belirli bir seviyenin altına düşürülemez. (Şekil 13'te hız artışı tepe değeri 88%'in altına inememektedir.)



Şekil 13. $T_{up} = 2.5$, $T_{dw} = 5$, PI kararlılık ve güvenli sınırları.

Bilindiği gibi generatör hızı ve frekansı birim-değer olarak birbirine eşittir. Eşitlik 8'den de görülebileceği gibi, frekanstaki/hızdaki artış T_m ile ters orantılıdır. Dolayısıyla, T_m 'in artırılmasıyla hız artışının tepe değeri limitlenebilir.



Şekil 14. PI denetleyici kararlılık ve güvenlik sınırları ($T_m=6$, $T_{wp}=2.5$, $T_{dv}=5$).

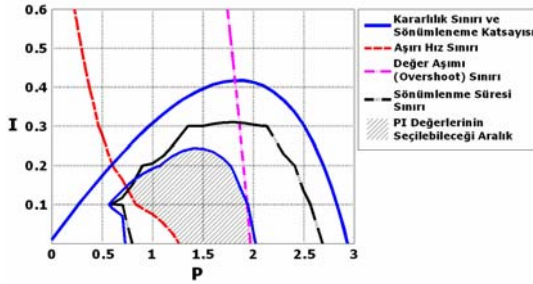
Görüldüğü gibi T_m 'in artışı hız aşımı tepe değerini düşürmekte ve kararlı PI ayar aralığını güvenlik sınırları açısından uygulanabilir hale getirmektedir.

3.3. Optimum PI değerleri

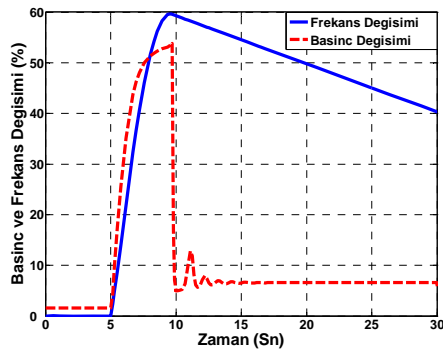
Bir PI-denetleyici set değerleri, kararlılık ve güvenlik yanında, yüksek *sönümlenme-katsayısı* (damping ratio), düşük *geçici-değer-aşımı* (overshoot) ve düşük *sönümlenme-zamanı* (settling-time) da göz önüne alınarak seçilmelidir [8]. Bir önceki bölümde incelenen tipik bir santral ünitesinin aşağıda belirtilen koşulları sağlaması istenirse, P ve I değerlerinin sırasıyla 1.3 ve 0.1 olarak seçilmesi gerekmektedir (Şekil 15).

- Hız değişimi ~60% (koşul < 70%)
- Basınç değişimi ~54% (koşul < 60%)
- Sönümlenme katsayısı ~0.7 (koşul > 0.25)
- Geçici-değer-aşımı (overshoot) ~30% (koşul < 40%)
- Sönümlenme süresi ~50sn (koşul < 100sn)

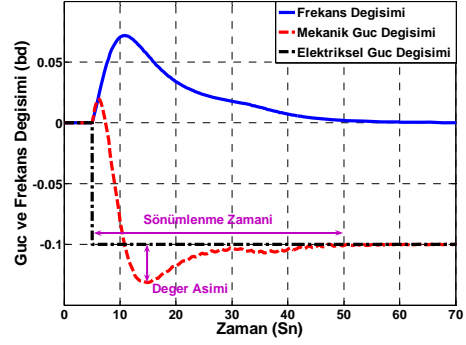
Santral yük altına iken generatör kesicisi açması sonrası basınç ve hız artışının tepe değerleri belirlenen sınırlar içinde kaldığı Şekil 16'da görülmektedir.



Şekil 15. PI denetleyici kararlılık, güvenlik ve adım-tpperformans sınırları.



Şekil 16. Tam yükte kesici açması sonrası frekans ve basınç değişimi



Şekil 17. İzole-ada talebinde %10 değişim

PI-denetleyicinin set edilen bu değerleri ($P=1.3$ ve $I=0.1$) altında, ani bir yük değişimi sonrası ünitenin frekans-kontrol performansı Şekil 17'de verilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada nehir-tipi hidroelektrik santrallerin şebekeye-bağlı ve izole-ada çalışma prensiplerine karşılık gelen kontrol döngülerinin matematiksel modelleri oluşturulmuş ve bu modeller üzerinden santralin kararlı ve güvenli çalışmasına etki eden faktörler incelenmiştir. Sonuçları özetleyen tablolar aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. Değişikendeki artışın kararlılık sınırlarına etkileri

Değişken (Artış)	Seviye Kontrol	Frekans Kontrol
T_m	*	+
T_w	-	-
T_s	+	**
T_g	-	-

Tablo 2. Değişikendeki artışın aşırı basınç ve aşırı hız etkileri

Değişken (Artış)	Aşırı Basınç	Aşırı Hız
T_{down}	+	-
T_m	*	+
T_w	-	-
T_s	*	*
T_g	+	-

* Çok az ya da sıfır etki + Olumlu etki
- Olumsuz etki ** Etki için Şekil 10'a bakınız

Sonuç olarak, nehir-tipi bir HES'in her iki çalışma koşulunda da kararlı ve güvenli - yani sürdürülebilir - çalışması, tasarım aşamasında T_s , T_w ve T_m değerlerinin uygun seçilmesine bağlıdır. Santralin fiziksel yapısına karşılık gelen T_s ve T_w değerleri santralin proje ve inşa safhasında kesinleşmekte olup, bu aşamalardan sonra değiştirilmeleri çok maliyetli ya da tamamen imkansızdır. Diğer yandan generatör ve türbin kütlelerine bağlı olan T_m 'in artırılması ancak ilave teçhizatla (volan) ile mümkündür.

Kararlılık üzerinde bir başka önemli etken ise T_g , yani ayar kanatlarının kontrol sisteminden aldıkları bir komutu yerine getirmeleri için geçen süredir. Bu değişken ayarlanabilir bir değer değil, kontrol sistemi içindeki bir gecikmedir ve mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır.

Bu çalışmada, Routh-Hurwitz yöntemi kullanılarak, nehir-tipi KHS'lerin çalışma prensibine karşılık gelen doğrusal kontrol modelleri üzerinden kararlılık analizi yapılabileceği gösterilmiş ve bu analizler için gerekli olan santral bilgileri belirtilmiştir. Kararlılık, güvenlik ve performans analizlerinin, santral henüz proje aşamasında iken santralin tasarım bilgilerini içeren bu veriler ile gerçekleştirilmesi, ileride santral devreye alındıktan sonra

yaşanabilecek kararlılık/ stabilite problemlerin minimize edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması açısından önemlidir.

Ülkemizde kararlılık ve güvenlik sorunları yaşayan HES'ler olduğu bilinmektedir. Yeni projelerde bu tür problemlerin önüne geçmek için santral tasarım aşamasında fiziksel şartların beklenen performans etkileri mutlaka göz önüne alınmalıdır.

5. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. KAMAG (1007 programı) Proje No: 105G124.

6. Referanslar

- [1]. Güner E., Tor O. B., Altın M., "Küçük Hidrolik Santrallerin Projelendirilmesinde Dikkat Edilmesi Gereken Bazı Teknik Hususlar," *ELECO 2008, Bursa, Türkiye*.
- [2]. Kundur P., *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3]. Sarasua J.I., Ardanuy J.F., Perez J.I., Wilhelmi J.R., Sanchez J.A., "Control of a Run-Off River Small Hydro Power Plant", *Powereng 2007*, 672-677.
- [4]. IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies", *Trans. On Power Systems*, Vol. 7 No 1, 167-179, Şubat 1992.
- [5]. Cebeci M.E., Karaağaç U., Tör O. B., Ertaş A., "The Effects of Hydro Power Plants' Governor Settings on the Stability of Turkish Power System Frequency", *Eleco 2007*, 178-183.
- [6]. Ogata K., *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, ABD, 2002.
- [7]. Duncan W., Cline R., *Mechanical Governors for Hydroelectric Units*, United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2002
- [8]. IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, *IEEE Standard 1207-2004*, Nov. 2004.
- [9]. W.D.Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1982.

Ekler 1. Semboller

A_{ceb}	Cebri boru alanı (m ²)
\bar{A}_f	Ayar kanatları akış alanı (birim değer(bd) (per unit))
A_s, A_{turb}	Yükleme havuzu alanı (m ²), Türbin kazancı
b_0, b_1, b_2	Ayar kanatları akış alanı ile ayar kanat pozisyonu arasında ilişkiyi belirten eşitliğin katsayıları
C	Cebri boru sürtünme katsayısı
f_r, \bar{f}_r	Frekans (Hz) ve frekans değişimi (bd)
f_{ref}	Frekans (hız) kontrol referansı (Hz)
f_{ref}	Anma frekansı (50 Hz)
g	Yer çekimi ivmesi (m/Sn ²)
GD^2	Dönen kütle ataleti (Flywheel effect) (kg.m ²)
G_g, G_I	Gerçek, istenen ayar kanadı pozisyonu (%)
\bar{G}_g, \bar{g}_g	Gerçek ayar kanadı poz. (bd), ve değişimi (bd)

\bar{G}_I, \bar{g}_I	İstenen ayar kanadı pozisyonu (bd), İstenen ayar kanadı pozisyonu değişimi (bd)
H, \bar{H}, \bar{h}	Yükleme havuzu seviyesi (m, bd), yükleme havuzu seviyesi değişimi (bd)
n	Generatör anma hızı (dev/dak)
H_{base}	Seviye baz değeri (m)
$H_{inertia}$	Dönen kütle (generatör + türbin) atalet sabiti
H_{ref}, \bar{h}_{ref}	Seviye kontrol referansı (m) ve değişimi (bd)
H_t	Türbin girişinde görülen seviye (m)
\bar{H}_t, \bar{h}_t	Türbin girişinde seviye (bd) ve seviye değişimi (bd)
P, I	PI kontrol P ve I değeri (bd için)
K	PI kontrol oransal kazanç değeri (Gerçek değer için)
L	Cebri boru uzunluğu (m)
\bar{P}_e, \bar{P}_m	Elektriksel güç (bd), Mekanik güç (bd)
S_{anma}	Generatör anma gücü (MVA)
Q_{base}	Debisi baz değeri (m ³ /Sn)
Q_{ζ}, \bar{Q}_g	Çıkış debisi (m ³ /Sn), giriş debisi (m ³ /Sn)
$Q_{\zeta}, \bar{q}_{\zeta}$	Çıkış debisi (bd), çıkış debisi değişimi (bd)
\bar{Q}_g, \bar{q}_g	Giriş debisi (bd), giriş debisi değişimi (bd)
ρ	CQ_{base}^2 / H_{base}
T_{down}	Ayar kanadı 100%'den 0%'a kapanma zamanı (Sn)
T_g	Ayar kanadı komut gecikmesi (Sn)
T_i	PI kontrol integral zaman sabiti (Gerçek değer için)
T_m	Mekanik zaman sabiti
	$T_m = GD^2 (2\pi n / 60)^2 / (1000 * S_{anma} * 2)$ [9]
T_s	Yükleme havuzu Q_{base} debisi ile dolum süresi (Sn)
T_{up}	Ayar kanadı 0%'dan 100%'e açılma zamanı (Sn)
T_w	Su zaman sabiti (Sn) $T_w = LQ_{base} / gA_{ceb}H_{base}$

Ekler 2. Doğrusal Denklemler

$$\frac{d\bar{h}_t}{dt} = \frac{(\bar{q}_g - \bar{q}_{\zeta})}{T_s} \quad (1')$$

$$\frac{d\bar{q}_{\zeta}}{dt} = \frac{\bar{h}}{T_w} + \left[\frac{2\bar{H}_t (b_1 + 2b_2 \bar{G}_g)}{T_w \bar{A}_f} \right] \bar{g}_g - \left[\frac{2\sqrt{\bar{H}_t}}{T_w \bar{A}_f} + \frac{2\rho \bar{Q}_{\zeta}}{T_w} \right] \bar{q}_{\zeta} \quad (2')$$

$$\frac{d\bar{g}_I}{dt} = I\bar{h} - I\bar{h}_{ref} + P \frac{\bar{q}_g}{T_s} - P \frac{\bar{q}_{\zeta}}{T_s} \quad (3')$$

$$\frac{d\bar{g}_g}{dt} = \frac{(\bar{g}_I - \bar{g}_g)}{T_g} \quad (4')$$

$$\frac{d\bar{g}_I}{dt} = -I\bar{w} - P \left[\frac{A_{turb} \bar{H}_t \bar{q}_{\zeta}}{T_m} + \frac{A_{turb} (\bar{Q}_{\zeta} - \bar{q}_{nl})}{T_m} \right] \left(\frac{2\sqrt{\bar{H}_t} \bar{q}_{\zeta}}{A_f} - \frac{2\bar{H}_t (b_1 + 2b_2 \bar{G}_g) \bar{g}_g}{A_f} \right) - \frac{\bar{P}_e}{T_m} \quad (7)$$

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = \frac{A_{turb} \bar{H}_t \bar{q}_{\zeta}}{T_m} + \frac{A_{turb} (\bar{Q}_{\zeta} - \bar{q}_{nl})}{T_m} \left(\frac{2\sqrt{\bar{H}_t} \bar{q}_{\zeta}}{A_f} - \frac{2\bar{H}_t (b_1 + 2b_2 \bar{G}_g) \bar{g}_g}{A_f} \right) - \frac{\bar{P}_e}{T_m} \quad (8')$$