

HİDROELEKTRİK SANTRALLERİN MODELLENMESİ

Ebru ÖZBAY

Muhsin Tunay GENÇOĞLU

Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elazığ

eozybay@firat.edu.tr, mtgencoglu@firat.edu.tr

ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi ve kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Elektrik enerjisi üretim oranları dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya hidroelektrik enerji sahiptir. Büyük güce ihtiyaç olan yerlerde, barajlı büyük hidroelektrik santraller (HES) yapılırken, küçük su kaynaklarını değerlendirmek amacıyla küçük veya mini HES'ler de yapılmaktadır. Suyun kinetik enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren HES'lerde, gerekli hesaplamaların doğru bir şekilde yapılması ve verimi arttıracak yeni kontrol ve kumanda teknolojilerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla HES'lerin tüm birimleri ayrı ayrı modellenerek, benzetim çalışmaları yapılmaktadır.

Bu çalışmada; HES'lerin yapısı ve HES'lerde kullanılan türbin çeşitleri kısaca anlatılmıştır. Bir HES 'i oluşturan ana elemanların modelleri ayrı ayrı incelenerek, HES'lerin modellenmesi ayrıntılı olarak araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidroelektrik Santral, Türbin, Doğrusal Model, Doğrusal Olmayan Model.

1. GİRİŞ

En eski enerji kaynaklarından biri olan hidrolik enerji, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en çok kullanılanıdır. Akan su içindeki enerji miktarını suyun akış veya düşüş hızı tayin eder. Kanal ya da borular içine alınan su, türbinlere doğru akarak, elektrik üretimi için türbinlerin dönmesini sağlar. Türbinlere bağlı olan generatörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürürler. Hidroelektrik enerji santralleri, içme, kullanma ya da sanayi suyu sağlamak amacıyla ırmakların önü kesilerek oluşturulan baraj göllerinde kurulmaktadır.

HES 'lerin yıllık üretimleri, kaynağa gelen su miktarıyla doğru orantılı olduğundan ve bir yıl boyunca gelen su, tam kapasite çalıştırmaya yetmeyebileceğinden, genel olarak puant santrali olarak çalıştırılırlar. Devreye alınış ve çıkarılışları çok kolay ve hızlı olduğundan, su rejimine bağlı olarak enerji gereksiniminin çok olduğu puant saatlerde çalıştırılarak, enerjiye az gereksinim olduğu zamanlarda devre dışı bırakılırlar. Tam kapasite çalışmada, türbin kanatlarının önündeki su giriş kapakçıkları tamamen açıktır ve geçen su miktarı en üst düzeydedir. Ancak, sistemden çekilen enerji, kullanıcıların devreye girme ve çıkmalarına göre değişir. Sisteme anlık olarak istenilen enerjinin verilmesini, üretim ünitesindeki regülasyon sistemi sağlar. Regülasyon sistemi, türbin kanatlarının önündeki su giriş kapakçıklarını otomatik olarak ayarlayarak, daha az su girişine paralel olarak daha az üretim yapar. Bu olaya sistemde frekans tutma denir. Tüm elektrikli alıcıların sağlıklı ve verimli

çalışabilmesi için frekansın, alıcılarda imalat sırasında belirlenen frekansa uygun olması gerekir.

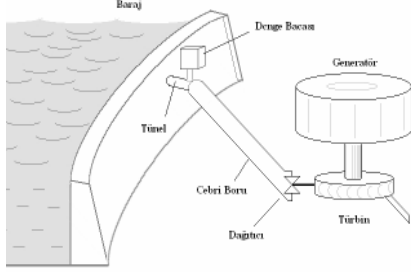
Hidrolik döngü; atmosfer, göl, deniz, okyanus, kara, yeraltı suları, nehir arasında suyun döngüsel taşınması işlemidir. Buharlaşma ve yoğunlaşmada, güneş enerjisi ve yer çekimi kuvveti en etkili rolleri oynamaktadır. Hidrolik döngü, zaman, mevsimsel hava ve toprak şartları, jeolojik konum, vb birçok bilinmeyen ve çok sayıda parametresi olan bir döngü olduğu için, matematiksel olarak modellenmesi çok zordur. Uzun süreli çalışma periyotlarında ve tahminlerde, simülasyon yaparken hidrolik döngünün önemi vardır. Ancak, anlık, dinamik simülasyonlarda hidrolik döngü dikkate alınmaz [1,2].

2.HİDROELEKTRİK SANTRAL YAPISI

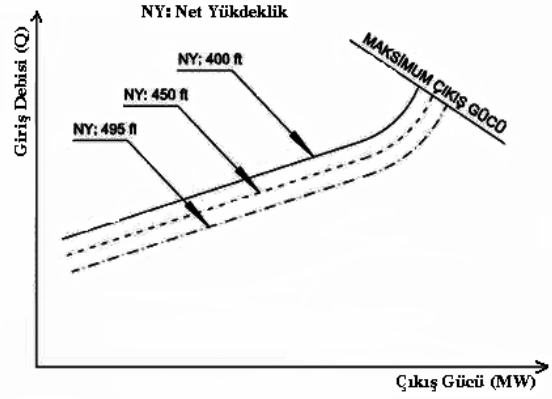
HES'lerin ana bölümleri; baraj seti arkasındaki rezervuar suyu, su giriş kapıları, tüneller, cebri borular, hidrolik türbinler, generatörler, türbinden geçtikten sonra suyun dışarı aktığı kısımlar, transformatörler ve su akışını ve elektrik enerjisi dağıtımını denetleyen yardımcı donanımlardır. HES'lerde giriş gücü, suyun potansiyel ve kinetik enerjisinden oluşmaktadır. Rezervuardan cebri boru içine akan su, sahip olduğu potansiyel enerji ve türbine kadar kazanmış olduğu kinetik enerji ile türbini çevirir ve çıkışta elektrik enerjisi elde edilmiş olur. Basit bir HES 'in yapısı Şekil 1 'de gösterilmiştir. Cebri borular, suyu türbinlere ileten büyük borular ya da tünellerdir. Türbinler, akan suyun hidrolik enerjisini mekanik enerjiye



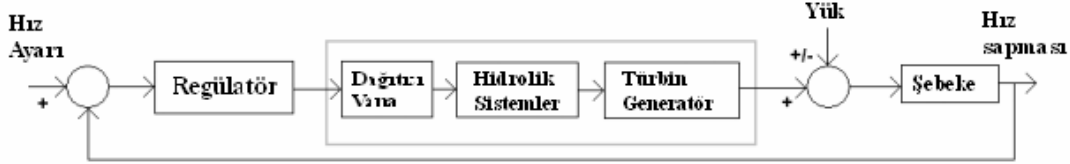
dönüştürürler. Transformatörler, generatörler ile üretilen alternatif gerilimi uzak mesafelere iletmek üzere, gerilimi yükseltmek için kullanılırlar. Yapı ve bileşenleri ile bir HES 'in blok diyagramı Şekil 2 'de gösterilmiştir [3].



Şekil 1. Basit bir HES 'in yapısı



Şekil 3. Hidrolik yüksekliğe bağlı olarak giriş ve çıkış gücü eğrileri [4]



Şekil 2. Yapı ve bileşenleri ile bir HES 'in blok diyagramı

HES 'lerde üretilen güç, kritik bir değere kadar suyun net akış yüksekliğine, yani net hidrolik yüksekliğe ve cebrî borudan akan suyun debisine bağlıdır. Rezervuar su seviyesi ile su çıkışı seviyesi arasındaki mesafe, brüt akış yüksekliği olarak tanımlanır. Net hidrolik yükseklik ise, kayıplardan dolayı brüt yükseklikten daha azdır. Farklı hidrolik yükseklikler için HES 'in giriş ve çıkış karakteristiği Şekil 3 'de gösterilmiştir [1].

2.1. Türbin Çeşitleri

Hidrolik türbinler, suyun hidrolik enerjisini döner çarklar (rotorlar) yardımı ile mekanik enerjiye çeviren hidrolik makinalardır. Hidrolik makinalar, su türbinleri ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Su türbinleri dinamik hidrolik makinalardır, su çarkları ise su ağırlığı kuvveti makinalarıdır. Hidrolik türbinlerde, türbin rotorunun kanat aralıklarından geçirilen suyun basıncı, dönen türbin rotorunun kanat aralıklarında mekanik enerjiye dönüştürülür. Buna karşın su çarklarında, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi, suyun çark kepeçlerine dolması ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmesi suretiyle mekanik enerjiye dönüşür. Su türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin, iletim hatları ile uzak mesafelere iletilmesi ile birlikte daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan HES 'ler kurulmaya başlanmıştır. Modern

anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarlaması yapılabilen, Francis, Kaplan ve Pelton tipi hidrolik türbinler, 1920 'lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır ve bu tip türbinler hala çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %95 'e kadar yükselmiştir. İşletme tarzlarına, yapılış şekillerine, hidrolik düşüye ve hidrolik akımın rotordaki yönüne göre, hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür. Ancak, genellikle hidrolik türbinler; aksiyon türbinleri ve reaksiyon türbinleri olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar.

2.1.1. Reaksiyon Türbinleri

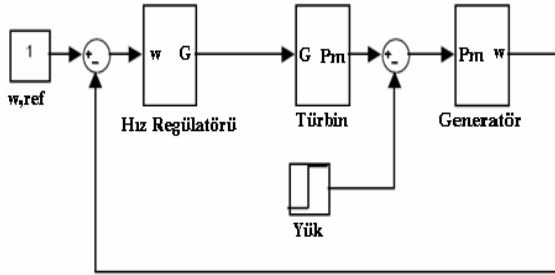
Reaksiyon türbinleri grubuna, Francis tipi hidrolik türbinler ile Kaplan tipi hidrolik türbinler girmektedir. Bu tip türbinlerde, türbin rotoru kanatçıkları arasındaki suyun giriş basıncında bir düşüş meydana gelir. Su basıncında meydana gelen bu düşüş, suyun ivmelenmesine, yani hızlanmasına neden olur. Hidrolik düşünün ve türbinden geçecek su debisinin değerlerine göre, hidrolik türbinlerin kullanım alanları değişmektedir. Kaplan tipi hidrolik türbinler büyük su debilerinde ve küçük düşülerde kullanılırlar. Francis tipi hidrolik türbinler ise, genel olarak orta yükseklikteki su düşülerinde ve orta değerlerdeki su debilerinde kullanılırlar.

2.1.2. Aksiyon Türbinleri

Bu tip türbinler 1880 yılında Pelton tarafından keşfedilmiş ve gelişmeleri günümüze kadar devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler, çok yüksek hidrolik düşümler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar. Michell-Banki tipi türbinler de bu türbin sınıfına dahil edilebilirler. Bu tip türbinler, 1903 yılında M.Michell tarafından keşfedilmiş ve 1917 yılında D.Banki tarafından geliştirilmiştir. Bu tip özel türbinlerin kullanılma sahası çok dar olup, genellikle küçük güçlü, nehir tipi santrallerde tercih edilmektedirler [5].

3. MODELLEME

Hidroelektrik santral modelleri genel olarak doğrusal modeller ve doğrusal olmayan modeller şeklinde sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma, modelin içerdiği denklemlerin karmaşıklığına bağlıdır. Modeller kendi içerisinde, cebri borudaki elastik su yükü ve elastik olmayan su yükü şeklinde sınıflandırılabilirler. Doğrusallaştırılmış modeller, kontrol sistem kararlılığı veya küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında kullanılırlar. Şekil 4 'de bir HES 'de hız kontrolünün genel modeli gösterilmiştir.



Şekil 4. Hız kontrolü genel modeli [1]

HES 'lerin modellenmesi ve kontrolör tasarımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Modelleme ile ilgili olarak Oldenburger, elastik su yükü etkilerini kapsayan çalışmada, doğrusal olmayan dinamikleri çalışma noktasında doğrusallaştırmıştır. Undrill [6], geçici gerilim düşümlerini hesaplamak için takip edilmesi gereken prosedürleri belirlemiştir. IEEE çalışma grubu [7,8], HES 'in farklı modellerini ve güç üretimi kontrolü için gerekli teknikleri rapor etmiştir. Bu çalışmada, doğrusal ve doğrusal olmayan modellerde, elastik olan ve olmayan su yükü etkilerini incelemiştirler. Ramey [9], Luqing [10], Wozniak [11], Malik [12] ve Vournas [13] çalışmalarında, ideal ve elastik olmayan su yükünü dikkate alarak, çalışma noktasında doğrusallaştırılmış klasik bir türbin modelinden bahsetmişlerdir. Benzer şekilde Sanathanan [14], uzun cebri borulu durumda, hidro türbinler için azalan düzenli türev modelini önermiş,

benzer bir sistem için doğrusal türbin karakteristiklerinin modellerinin yetersiz kaldığını kanıtlamıştır. Kundur [15], bir santralin modellenmesinde, doğrusal olmayan elastik su yükü etkisi dinamikleri üzerinde durmuştur. Fangtong [16], regülatör sistem tasarımı için, hidro türbin-generator ayarlamalarının modellenmesinde parametre tahmin teknikleri ve santral tanımlama üzerinde durmuştur. Qijuan [17], tekrarlanan en küçük kareler tahmin algoritmasını kullanan, lokal yük ile hidro türbin-generatorun dinamik modellenmesini tanıtmıştır. Vournas [18], ortak cebri boruyu paylaşan hidrolik türbinler için transfer fonksiyonunu geliştirmiştir. Bu çalışmada, cebri borunun hem elastik olan hem de olmayan modeli üzerinde çalışılmıştır. Benzer bir çalışmada, Hannet [19] ve Jaeger [20] aynı çalışmayı, alan test temelli modelde denemişlerdir.

Araştırmacıların çoğu, uzun cebri boruda sıkıştırma ve elastik etkilerin dinamiklerini kapsayan çok yönlü araştırmalar üzerinde durmamışlardır. Bu etkiler hidrolik yapıdaki irrasyonel terim olan e^{-2sT_e} 'nin ertelemesini gösterir. İrrasyonel terimli transfer fonksiyonunun çözümü zordur ve bazen kararlılık çalışmalarında doğrudan kullanılamayabilir. Elastik olmayan su yükü etkisi temelli, uzun cebri boru için yapılan çalışmalarda, belirli hatalar olacaktır [21].

3.1. Doğrusal Model

Doğrusal modellemede, hidrolik direnç (hidrolik kayıplar) ihmal edilebilir, cebri boru elastik yapıda değildir ve su sıkıştırılmaz. Suyun hızı, türbin dağıtıcı açıklığı ve net hidrolik yüksekliğin karekökü ile, türbin mekanik gücü ise, hidrolik yükseklik ve su hızının çarpımı ile doğru orantılıdır. Türbin ve cebri boru karakteristikleri cebri boru su hızı, türbin mekanik gücü ve su yükü ivmesi olmak üzere üç temel eşitlik ile belirlenir.

Cebri boru su hızı, türbin dağıtıcı açıklığı ve net hidrolik yüksekliğin karekökü ile doğru orantılı olduğu için

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (1)$$

(1)

yazılabilir. Burada K_u hız sabitidir.

Çalışma noktasından küçük bir sapma olduğu durumda, hız değişimi, hidrolik yüksekliğe ve dağıtıcı pozisyonuna bağlı olarak oluşan hız değişimlerinin toplamıdır.

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (2)$$

(2)

Kısmi türevlere sürekli çalışma rejimindeki anma değerleri yerleştirilirse,

$$U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0} \quad (3)$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \quad (4)$$

elde edilir. Baz değer olarak, anma değerleri seçilirse, eşitlik (4) pu sistemde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (5)$$

Türbin çıkış gücü, hidrolik yükseklik ve su hızının çarpımı ile doğru orantılı olduğu için,

$$P_m = K_p H U \quad (6)$$

yazılabilir. Burada K_p mekanik güç sabitidir.

Çalışma noktasından küçük bir sapma olduğu durumda, mekanik güç değişimi, hidrolik yüksekliğe ve suyun hızına bağlı olarak oluşan mekanik güç değişimlerinin toplamıdır.

$$\Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial P_m}{\partial U} \Delta U \quad (7)$$

Kısmi türevlere sürekli çalışma rejimindeki anma değerleri yerleştirilirse,

$$\frac{\Delta P_m}{P_{m,0}} = \frac{\Delta H}{H_0} + \frac{\Delta U}{U_0} \quad (8)$$

elde edilir.

Baz değer olarak, anma değerleri seçilirse, eşitlik (8) pu sistemde aşağıdaki gibi olur.

$$\Delta \bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (9)$$

(9) eşitliği kullanılarak, (10) ve (11) elde edilir.

$$\Delta \bar{P}_m = 1.5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (10)$$

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (11)$$

Newton'un ikinci hareket yasasına göre, hareketli bir sistemde kinetik enerji ile potansiyel enerji toplamı daima sabittir. Bu nedenle, rezervuardaki suyun cebri borunun giriş noktasındaki hızının sıfır olduğu kabul edilirse, türbin girişinde suyun kazandığı kinetik enerji, potansiyel enerji değişimine eşittir.

Su kütlesi ρLA , türbin giriş basınç değişimi $\rho a_g \Delta H$ olmak üzere;

$$\rho LA \frac{d}{dt} \Delta U = -\rho a_g \Delta H \quad (12)$$

$$\frac{1}{a_g} \frac{d}{dt} \Delta \bar{U} = -\Delta \bar{H} \quad (13)$$

yazılabilir. Eşitlik (13) 'deki türevsel terimin sol tarafı suyun hareket süresi (T_w) olarak adlandırılır. Suyun hareket süresi, hidrolik yükseklik H_0 iken, cebri borudaki suyun U_0 hızına ulaşmasına kadar geçen süredir. Bu süre, yüke bağlı olarak değişmektedir. Suyun hareket süresi, uygulamada, tam yükteki anma değerlerine göre belirlenir.

$$T_w \frac{d}{dt} \Delta \bar{U} = -\Delta \bar{H} \quad (14)$$

$$T_w = \frac{1}{a_g} \frac{L}{U_0} = \frac{L Q_0}{a_g A H_0} \quad (15)$$

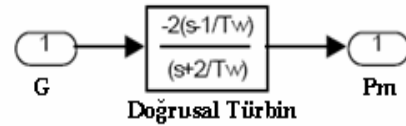
Su hızının dağıtıcı pozisyonuna göre değişimi incelenirse;

$$T_w \frac{d}{dt} \Delta \bar{U} = 2(\Delta \bar{G} - \Delta \bar{U}) - \Delta \bar{U} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} T_w} \Delta \bar{G} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta \bar{G}} = \frac{1 - T_w}{1 - \frac{1}{2} T_w} \quad (17)$$

elde edilir. Bu eşitlik hidrolik türbinin klasik transfer fonksiyonudur.

Yukarıdaki eşitlikler dikkate alınarak oluşturulmuş doğrusal türbin modeli Şekil 5 'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Doğrusal türbin modeli [1]

3.2. Doğrusal Olmayan Model

3.2.1. Elastik Olmayan Su Yüğü Modeli

Bu modelde, cebri boru modellenirken, elastik yapıda olmadığı ve suyun sıkıştırılmaz bir akışkan gibi davrandığı düşünülmüştür. A kesit alanlı ve L uzunluğundaki rijit boru göz önüne alınırsa, cebri boru yükseklik kaybı, cebri boru duvarındaki su sürtünmesi ile debinin karesinin çarpımıdır.

$$H_f = f_s Q^2 \quad (18)$$

Newton 'un ikinci hareket yasasını kullanarak cebri borudaki debi değişim oranı şöyle tarif edilir;

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{(1-H-H_f)}{T_w} \quad (19)$$

Net debi ile yüksüz durumdaki debinin farkı efektif debiyi verir. Efektif debinin yükseklikle çarpımı mekanik gücü verir. Mekanik güç doğal olarak % 100 değildir. Dağıtıcı açıklığının bir fonksiyonu olan türbin sönmüleme etkisi de ilave edilirse, birim değer türbin gücü;

$$\bar{P}_T = A_T \bar{H} (\bar{Q} - \bar{Q}_{Tn}) - D_n \bar{C} \Delta \bar{h} \quad (20)$$

olarak bulunur. Türbin gücü (MW) baz güç olarak alınır. Dağıtıcılar tam açık (dağıtıcı pozisyonu = 1) kabul edilerek Q_{baz} türbin debisi seçilmiştir. H_{baz} su yüzeyinin statik yüksekliğini (H_0) gösterir. D_n türbin verimindeki hız değişiminin (Δn) etkisini gösteren bir katsayıdır ve değeri 0.5 ile 2.0 arasında değişir.

Türbindeki birim değer debi miktarı;

$$\bar{Q} = \bar{C} \sqrt{\bar{H}} \quad (21)$$

ile bulunur.

Türbin kazancı, türbin kapağı açıklık oranının kazanca yaptığı etki olarak;

$$A_T = \frac{1}{C_{T1} - C_{Tn}} \times \frac{Türbin MW_{maksimal}}{Generator MW_{nominal}} \quad (22)$$

şeklinde gösterilir.

Bu denklemler doğrusallaştırılarak;

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta C} = \frac{1 - C_{T1} T_{11} F}{1 + C_{T1} T_{11} F} \times A_T \quad (23)$$

elde edilir.

3.2.2. Elastik Su Yükü Modeli

Cebri borunun hassas dinamiği için hidrolik hat karakteristiğinin meydana getirdiği su koçunu da hesaba katmak gerekir. Su koçu, cebri borudaki basınç değişimlerinin sonucudur. Dağıtıcının aniden açılması veya kapanması, akan suyun hızının azalmasına veya artmasına neden olur. Herhangi bir nedenle su hızının hızlı değişimi, su koçuna sebep olur. Bu olay, pozitif ve negatif basınç dalga serileri ile karakterize edilebilir. Basınç dalgası, sürtünmeyle sönmülene kadar cebri boru içinde ileri geri hareket devam eder. Dağıtıcının ani kapanmasıyla bütün su aniden durur, bu durum hızda çok büyük değişimlere neden olur. Newton 'un ikinci hareket yasasına göre, bu durumda kuvvetin sonsuza ulaşması beklenir. Ancak pratikte

bu durumun gerçekleşmesi imkansızdır. Aslında, su bir derece sıkıştırılabilirse, tanecikler de aynı şekilde hızlanmaz ve dağıtıcıdaki hızlı kapanma su yükünün ani duruşuna neden olmaz. İlk önce, sadece dağıtıcı ile temas eden su tanecikleri durur, daha sonra diğerleri durur.

Rijit cebri boru göz önüne alınarak dağıtıcının aniden kapanması ve dağıtıcıdan yukarı doğru basıncın aniden artmasıyla, baraj üstünde (veya denge bacasında) aşırı basınç dalgası oluşur. Dağıtıcı yanındaki su tanecikleri üzerlerindeki suyla sıkıştırılır. Su normal hızıyla hareket eder ve suyun birbirini izleyen tanecikleri sıkıştırılır. Bu sıkıştırma hareketi dalga hareketine benzer ve yukarı doğru hareket eder. Serbest su yüzeyine ulaşana kadar basınç dalgası hızla hareket eder. Basınç dalgasının serbest su yüzeyinden cebri boru uzunluğu içindeki hareketine kadar geçen süreye, dalga hareket zamanı (T_e) denir.

$$T_e = \frac{L}{A} \quad (24)$$

Hareketli suyun kinetik enerjisi, suyun sıkıştırılmasıyla ve cebri borunun gerilmesiyle elastik enerjiye çevrilir. Diğer elemanların orijinal halini takip etmesiyle, son su taneciğinin serbest su yüzeyine yayılması, negatif basınç dalgasına sebep olur. Dalganın aşağı doğru hareketiyle, dalganın $t=2 \cdot T_e$ zamanında dağıtıcıya erişmesiyle, artan su basıncı normal basıncına döner. Dağıtıcıdan uzaklaşarak hareket eden su, basınç azalmasına neden olur. Negatif basınç dalgası yukarı doğru serbest su yüzeyine hareket eder.

Cebri boru büyük barajdan beslenen bir kanal olarak kabul edilirse, türbin girişindeki yükseklik ve debi bağıntısı transfer fonksiyonunu verir. Burada F, cebri borudaki sürtünme kayıpları ve s Laplace kompleks değişkenini ifade eder.

$$\frac{H(s)}{Q(s)} = -\frac{T_w}{T_e} \tanh(T_e s + F) \quad (25)$$

İdeal türbin parametreleri kullanılarak ve sürtünme katsayısı (F) sıfır kabul edilerek, sürtünme kayıpları ihmal edilirse;

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta C(s)} = \frac{1 - Z_0 \tanh(T_e s)}{1 + 0.5 Z_0 \tanh(T_e s)} \quad (26)$$

elde edilir. Burada, $Z_0 = \frac{T_w}{T_e}$, cebri boru normalize empedansdır [1, 2, 8, 15, 19, 20].

3.3. Denge Bacası Modeli

Daralan ağız tipli denge bacası göz önüne alındığında, sistemde alçak basınç tüneli, yüksek basınç tüneli ve denge bacası bulunur.

Denge bacasındaki debi, denge bacası alanı (A_s) ve denge bacası seviyesinin (H_s) değişimine bağlıdır. Bu ifade;

$$Q_s = A_s \frac{dH_s}{dt} \quad (27)$$

olarak ifade edilir. Birim değer denge bacası su seviyesi;

$$H_s = \frac{Q_s}{C_s} \quad (28)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada C_s denge bacası depolama sabitidir.

$$C_s = \frac{A_s H_{bas}}{Q_{bas}} \quad (29)$$

Denge bacası ağızdaki yükseklik kaybı, debi ve nominal frekans (f_0) ile orantılıdır. Alçak cebri borudaki yükseklik, denge bacası seviyesi ile ağızdaki yükseklik kaybı arasındaki farktır. Denge bacası seviyesi alçak cebri boru üzerindeki yükseklikle tanımlanır. Denge bacasının eklenmesi, su haznesi ile tank arasındaki zayıf sönümlü salınımların artmasına neden olur. Her dönem için birkaç dakika olan bu salınım genelde çok yavaştır. Yük frekans kontrolü ve denetleyici kullanılarak bu salınım ihmal edilebilir.

Lump sistem teorisine göre; eğer her iki tünel ve ağızdaki yükseklik kaybı ihmal edilirse, denge bacasındaki denge osilasyonlarının T_{st} gibi bir periyodu olur. Bu süre, türbin yük değişimi ve maksimum dalganın meydana gelmesi arasındaki zaman süresidir.

Bu periyot;

$$T_{st} = 2\pi \sqrt{\frac{L_s A_s}{gA}} \quad (30)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada, L_s su haznesinden denge bacasına olan tünel uzunluğunu, A_s denge bacası kesit alanını ve A tünel kesit alanını ifade eder [2].

3.4. Regülatör Modeli

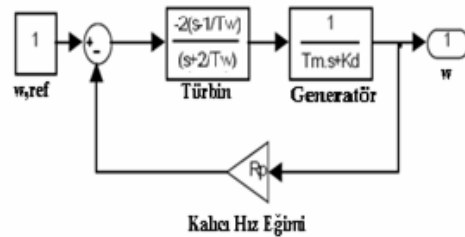
Bir generatörün ürettiği elektriksel güç, elektriksel yük ile iletim kayıplarının toplamına eşit olmalıdır. Aksi takdirde, türbin şaftına etki eden toplam tork, yani mekanik ve elektriksel tork farkı, üretilen gücün hat kayıpları ile tüketilen gücün toplamına eşit olana kadar türbinin hızlanmasına veya yavaşlamasına neden olur.

$$P_{üretilem} = P_g = P_{yük} + P_k \quad (31)$$

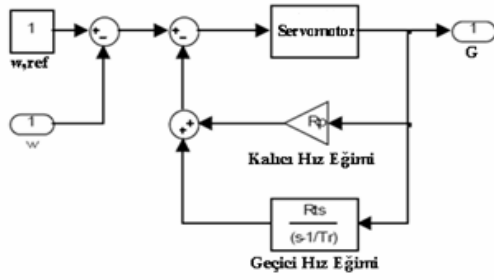
$$T_m - T_g = -J \frac{d\omega}{dt} \quad (32)$$

Elektriksel hız, mekanik hız ile doğru orantılı olduğu için, güç sistemindeki elektriksel hız ve frekans değişecektir. Kaliteli bir güç sisteminde, frekansın kabul edilebilir bir aralıkta sabit olması istendiği için, hız kontrolü yapılır. Hız regülatörü, hem hızı hem de üretilen elektrik gücünü ayarlar. Hız, referans hıza göre geri besleme yaptırılarak, hız regülatörünün dağıtıcı pozisyonunu değiştirmesine ve sırasıyla, mekanik ve elektriksel gücün değişmesine neden olacaktır. Geri besleme için kabul edilen maksimum hız değişimine göre, kalıcı hız eğimi kullanılır. Kalıcı hız eğimi, bağlı olunan şebeke yönetmeliklerine göre, genellikle % 4-5 arasında seçilir. %5 hız eğiminin kullanılması, hızın %5 değişmesi durumunda, dağıtıcı pozisyonunda veya çıkış gücünde %100 değişimin elde edileceği anlamına gelir. Şekil 6 'da kalıcı hız eğimi kullanılarak elde edilen HES modeli gösterilmiştir.

Hidrolik türbinlerde suyun ataletinden dolayı, dağıtıcı pozisyonundaki bir değişiklik, ters yönde ilk türbin gücü değişimini oluşturur. Ani değişiklik, sistemin dengesiz çalışmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, kalıcı hız eğimi etkisini kompanse etmek için, büyük geçici hız eğimi ve uzun sıfırlama süresi gerekir. Geçici hız eğimi, dağıtıcı pozisyonundaki değişimi kontrol altında tutarak, suyun akışındaki değişimin güç değişimini yakalamasını ve eş zamanlı hareket etmesini sağlar. Şekil 7 'de geçici hız eğimli bir HES modeli gösterilmiştir. Sonuç olarak, hız regülatörü, yüksek hız dalgalanmasında yüksek hız eğimi (düşük kazanç) ve normal çalışma rejimindeki küçük hız dalgalanmalarında ise düşük hız eğimi (yüksek kazanç) sağlar [1].



Şekil 6. Kalıcı hız eğimi ile HES modeli [1]



Şekil 7. Geçici hız eğimi ile hız regülatörü modeli [1]

4. SONUÇ

Bu çalışmada, HES 'lere ait çeşitli araştırmacılar tarafından elde edilen matematiksel modeller incelenmiştir. Matematiksel bir model kullanılarak, bir hidroelektrik sistemin simülasyonu gerçekleştirilebilir. Bu çalışma özel bir HES 'i kapsamamakla birlikte, küçük değişiklikler ile özel bir hidroelektrik santrale uyarlanabilir. Bu değişiklikler, santralin hidrolik kısımlarına göre farklılık gösterirler. Türbin-cebri boru modeline, denge bacası ile türbin dağıtıcı modeli ilavesiyle gerçek bir santral için çalışma yapılabilir.

Hız regülatörü parametrelerinin etkilerini gözlemlemek amacıyla, hidrolik türbinler için doğrusal model kullanılabilir. Geçici hız eğiminin kullanımı, sistemin kararlılığını arttırmak için gereklidir. Geçici hız eğimi sabiti için çok yüksek ve çok düşük değerler kullanıldığı durumlarda hız regülatörünün tepkime süresi uzamaktadır. Sistem frekansının kabul edilebilir aralıklarda tutulması için, hız regülatörü tepkime süresinin kısa olması gerekir.

Kısaltmalar

U: Cebri boru su hızı (m/s)
G: Dağıtıcı açıklığı (%)
H: Net hidrolik yükseklik (m)
H₀: İlk su yüksekliği (m)
U₀: Suyun ilk hızı (m/s)
G₀: İlk dağıtıcı açıklığı (%)
P_m: Türbin çıkış gücü (joule)
ρ : Su yoğunluğu (kg/m³)
L: Cebri boru uzunluğu (m)
A: Cebri boru kesiti (m²)
T_w: Suyun hareket süresi (s)
H_f: Cebri boru yükseklik kaybı (m)
f_p: Cebri boru duvarındaki su sürtünmesi
Q: Debi (m³/s)
A_t: Türbin kazancı
D_n: Türbin sönmleme etkisi
Δn: Hız değişimi
G_n: Tam yükte ideal dağıtıcı açıklığı (%)
G_n: Yüksüz durumda ideal dağıtıcı açıklığı (%)
T_e: Dalga hareket zamanı (s)

F: Sürtünme katsayı
Z₀: Cebri boru normalize empedansı
Q_s: Denge bacasındaki debi (m³/s)
H_s: Denge bacası seviyesi (m)
A_s: Denge bacası kesit alanı (m²)
c_s: Denge bacası depolama sabiti
T_{st}: Türbin yük değişim ve maksimum dalganın meydana gelmesi arasındaki zaman süresi (s)
L_s: Su haznesinden denge bacasına olan tünel uzunluğu (m)
P_e: Generatörün ürettiği elektriksel güç (joule)
P_{yük}: Tüketilen güç (joule)
P_k: Hat kayıpları (joule)
T_m: Mekanik tork (tork)
T_e: Elektriksel tork (tork)
w: Türbin açısal hızı (rad/s)
J: Eylemsizlik momenti
R_p: Kalıcı hız eğimi
K_d: PID kontrol türevsel katsayısı
R_t: Geçici hız eğimi
T_r: Sıfırlama süresi (s)

KAYNAKLAR

1. Kılıçkap, E., Hidrolik Santralin Dinamik Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
2. Eke, İ., Hidroelektrik Santrallerin Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
3. Yumurtacı Z., Öztürk R., Hidroelektrik Enerji, Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
4. Wollenberg, B.F., Wood, A.J., Power System Generation Operation and Control, 2nd Ed., J. Wiley&Sons, New York, 20-23, 131-138, 1996.
5. Demirhan, A. Y., Küçük Hidroelektrik Santrallerde Türbin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
6. Undrill, J., Woodward, J., Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop, IEEE Trans on Power Appar Syst, 86:228-33, 1967.
7. IEEE Committee, Dynamic Models for Steam And Hydro Turbines in Power System Studies, IEEE Trans on Power Appar Syst, 92:1904-15, 1973.
8. IEEE Working Group, Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamic Studies, IEEE Trans on Power Syst, 7:167-79, 1992.
9. Ramey, DG., Skooglund, JW., Detailed Hydro Governor Representation for System Stability Studies, IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 89:106-12, 1970.
10. Luqing, YE., Shouping, WEI., Malik, OP., Hope, GS., Variable And Time Varying Parameter Control for Hydroelectric Generating Unit, IEEE Trans Energy Conv, 4:293-9, 1989.

11. Wozniak, LA., Graphical Approach to Hydrogenerator Tuning. IEEE Trans Energy Conv, 5:417–21, 1990.
12. Malik, OP., Hope, GS., Hancock, G., Zhaohui, L., Luqing, YE., Shouping, WEI., Frequency Measurement for Use with A Microprocessor-Based Water Turbine Governor, IEEE Trans Energy Conv, 6:361–6, 1991.
13. Vournas, CD., Second Order Hydraulic Turbine Models for Multimachine Stability Studies, IEEE Trans Energy Conv, 5:239–44, 1990.
14. Sanathanan, CK., A Frequency Domain Method for Tuning Hydro Governors, IEEE Trans on Energy Conv, 3:14–7, 1988.
15. Kundur P. Power System Stability and Control, New York: Mc Graw-Hill; 1994.
16. Fangtong, Xu., Yonghua, Li., Qijuan, C., Study of The Modeling of Hydroturbine Generating Set. In: International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, p. 644-647, 22-27 May, 1995.
17. Qijuan, C., Zhihuai, Xiao., Dynamic Modeling of Hydroturbine Generating Set. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 3427–3430, 8–11 Oct. 2000.
18. Vournas, CD., Zaharakis, A., Hydro Turbine Transfer Functions with Hydraulic Coupling. IEEE Trans Energy Conv, 8:527–32, 1993.
19. Hannet, L., Fardanesh, B., Feltes, J., Field Tests to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters. IEEE Trans Power Syst, 9:1744–51, 1994
20. De Jaeger, E., Janssens, N., Malfliet, B., De Meulebroeke, FV., Hydro Turbine Model for System Dynamic Studies. IEEE Trans on Power Systems, 9:1709–15, 1994.
21. Kishora, N., Sainia, R.P., Singhb, S.P., A Review on Hydropower Plant Models and Control, Science Direct, Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 776-796, 2007.