

Francis Türbinlerinde Döner Girdap Halatının Titreşim Ölçümleriyle Belirlenmesi

Selim Saçma ¹

Talip Eskikale ²

B. Emre Orhon ^{*3}

ÖZ

Alçak ve orta düşümlü Francis türbinlerinin kısmi yüklerdeki dinamik davranışları önde gelen sorunlarından biridir. Optimal tasarım bölgesi dışındaki kısmi yüklerde çalışma sırasında emme borusundaki akış düzensizlikleri nedeniyle meydana gelen döner girdap halatı (vortex rope - draft tube swirl) olgusu, çark devir hızının 0.2 – 0.4 katı aralığında düşük frekanslı basınç dalgalanmalarına neden olur. Bu dalgalanmaların hidrolik, mekanik veya yapısal bir bileşenin doğal frekansı ile çakışması durumunda rezonans nedeniyle yüksek titreşimler oluşmaktadır. Bu çalışmada, Francis türbinlerinde kısmi yüklerde meydana gelen yüksek titreşimlerin, sürekli (online) titreşim izleme sisteminin analizi yoluyla döner girdap halatı olgusunun belirlenmesi incelenmektedir. Türbin kılavuz yatağına monteli eddy-current tip yer değişimi sensörlerinden elde edilen izafi shaft titreşimlerine ait trend, FFT ve orbit grafiklerinin analizi, belirli kısmi yüklerde devir hızının yaklaşık %27'si hızla dönen girdap halatını açıkça ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Döner girdap halatı, kavitasyon, titreşim izleme, hidroelektrik türbin

Determination of Draft Tube Swirl Type Cavitation due to Vibration Monitoring on Francis Turbines

ABSTRACT

The dynamic behavior at part load has been a major problem for low head and medium head Francis turbines. Vortex rope (draft tube swirl), caused due to the flow instabilities in the draft tube under off-design part load operating conditions, create low frequency pressure pulsations at a frequency of 0.2 to 0.4 times the rotational frequency of the runner. High amplitude vibrations due to resonance can occur in case these pulsations coincide with the natural frequency of a hydraulic, mechanical, or structural component. This study presents the results of the vibration analysis done using the online vibration monitoring & diagnosis system installed on Francis turbines in a hydroelectric power plant which involve high overall vibrations exceeding the alarm limits at partial loads. Orbit and FFT spectrum plots are obtained from relative shaft vibration measurements performed using eddy-current displacement sensors wired to a real-time multichannel vibration analyzer. Measurement results at the turbine guide bearing revealed the draft tube swirl that rotates at 27% of the rotational speed at certain partial loads.

Keywords: Draft tube swirl, cavitation, vibration monitoring, hydroelectric turbine

* İletişim Yazarı

Geliş/Received : 26.10.2017

Kabul/Accepted : 09.01.2018

¹ Makina Yüksek Mühendisi, Enerjisa Üretim Santralleri A.Ş. - selim.sacma@enerjisauretim.com

² Elektrik-Elektronik Yüksek Mühendisi, Enerjisa Üretim Santralleri A.Ş. - talip.eskikale@enerjisauretim.com

³ Makina Yüksek Mühendisi, Pro-Plan Ltd. Şti. - emre@proplan.com.tr



1. GİRİŞ

Tüm yenilenebilir enerjilerin ortak özellikleri çevreye dost, sürdürülebilir ve yerli kaynaklardan elde edilebilir olmasıdır. Hidroelektrik şu anda dünyadaki en büyük yenilenebilir enerji kaynağı ve dünya elektrik ihtiyacının neredeyse altıda birini karşılamaktadır. Günümüz dünyasında puant saatlerdeki yüksek enerji ihtiyacını karşılayabilmek ve iletim hatlarındaki frekans dengesizliklerinin giderilebilmesi için büyük düşü değişimleri ile çalışan hidroelektrik santrallere olan ihtiyaç daha da önem kazanmıştır. Bununla birlikte, türbin ağırlıklarının üretim gücüne oranının düşürülmesi, dökme çelik yapılardan, kaynakla birleştirilmiş yüksek gerilmelere maruz çelik plakalı yapılara geçiş sonucunda gerçekleştirilmiştir. Türbinlerdeki akış hızının da artmasıyla basınç dalgalanmalarında, titreşimlerde ve gürültüde artış olmuş, arıza riskleri eskiden olduğundan çok daha ciddi ölçüde ön plana çıkmıştır [1].

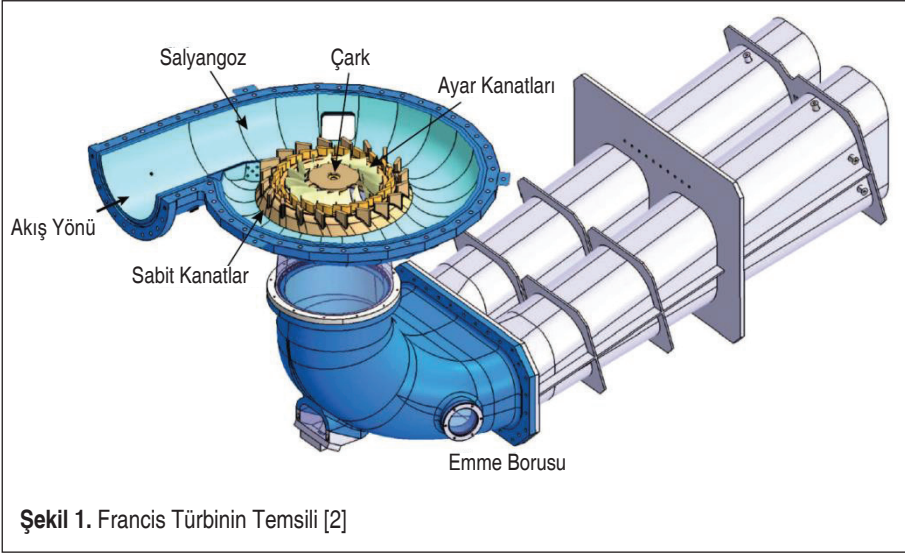
Makinanın verimini, sürekli çalışma süresini ve mekanik sağlığını olumsuz etkileyen olgular, “aşınmalar” vb. belli bir çalışma süreci ile meydana gelebileceği gibi, makina özü olarak en başta belirlenen tasarım parametrelerinin bir sonucu olarak da ortaya çıkabilir.

Bu çalışmada, kavitasyon çeşitlerinden bir tanesi olan ve ünitenin kısmî yüklerde işletilmesi durumunda ortaya çıkan “draft tube swirl” (döner girdap halatı) olgusu ve izafi shaft titreşimlerine etkisi incelenmiştir.

1.1 Francis Türbinleri Hakkında

Francis türbini, dünyadaki kurulu hidroelektrik güç kapasitesinin %60’ını oluşturması bakımından diğer hidrolik türbin tipleri arasında en yaygındır. Reaksiyon tipi olup, 50 metre ile 500 metre arası orta düşülerde kullanılan Francis türbininin temsili Şekil 1’de görülmektedir. Salyangozda yönlendirilen su akışı açısız momentumla çark girişindeki sabit kanatlara ve ayar kanatlarına ulaşır. Ayar kanatlarının açıklık miktarı çarka giren akışın debisini kontrol eder. Akışın açısız momentumu çark kanatları tarafından shaftın mekanik momentumuna dönüştürülür. Çarkı terkeden akış, emme borusundan geçer ve kinetik enerjisi statik basınca geri dönüştürülür [2].

Santral sahasının hidrolik özellikleri ve işletme stratejilerinin fonksiyonu olarak, her bir Francis türbini belirli nominal debi ve düşü değerleri için tasarlanır ve bununla birlikte en verimli çalışma bölgesi belirlenmiş olur. Farklı güç (yük) gereksinimlerine göre, ayar kanadı açıklıkları yoluyla çarka giren akışın debisi ayarlanarak makinanın çalışma aralığı değiştirilebilir. Kaynakla sabitlenmiş çark kanatları sabit açığa sahip olduğundan ötürü optimal tasarım bölgesi dışına çıkan bu çalışma koşulları verimde düşüşe ve emme borusunda çift fazlı akışlara sebebiyet verir. Kaplan tipi türbinlerde, ayar kanatları açay ayarlarına ilaveten çark kanat açılarında



da düzenlemeler yapılabildiğinden dolayı, akış düzensizlikleri Francis türbinlerine göre daha az olmaktadır [3].

1.2 Kaviteasyon ve Döner Girdap Halatı

Kaviteasyon olgusu, reaksiyon türbinlerinin son derece yatkın olduğu istenmeyen bir olay olup, hidroelektrik santrallerde vibrasyona, performans azalmasına ve türbin ekipmanlarında hasarlara neden olmaktadır [4].

Akışkan, hidrodinamik basıncını buhar basıncının altına düşmesi sonucunda buhar fazına geçer. Bu durumda oluşan küçük kabarcıkların yüksek basınç bölgesine geçtiğinde ani olarak ortadan kalkmasına kaviteasyon denir [5, 6]. Kabarcıkların sözkonusu şiddetli çöküşü nano-saniyeler gibi çok kısa bir süre içerisinde meydana geldiği için oluşan yüksek genlikli şok dalgaları metal yüzeylerde hasara neden olur [3].

Çark malzemesinde kaviteasyon kaynaklı bozulma ve deformasyonlar sonucunda yüzeyde oluşan hasarlar, türbin-jeneratör sisteminin verimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, kaviteasyon olgusu yüksek titreşimlere de yol açarak mekanik sistemlerde sorunlara yol açmaktadır [7].

Francis tipi türbinler için farklı farklı kaviteasyon tipleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir [3]:

- Ön kenar kaviteasyonu (Leading edge cavitation)
- Gezer kabarcık kaviteasyonu (Travelling bubble cavitation)



- Çark kanatları arası vorteks kavitasyonu (Inter-blade vortex cavitation)
- Von-Karman vorteks kavitasyonu (Von-Karman vortex cavitation)
- Kavitasyonlu döner girdap halatı (Cavitating draft tube swirl)

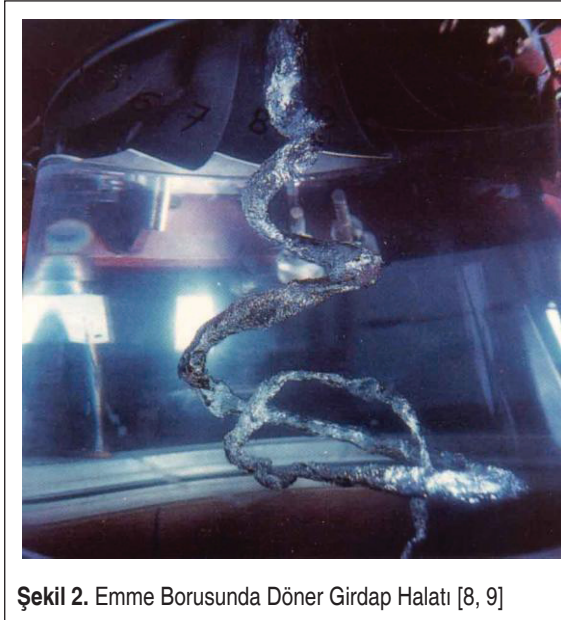
Pratik olarak incelendiğinde, ön kenar kavitasyonu ve gezer kabarcık kavitasyonu erozif etkilerinden, performans ve verim etkilerinden dolayı çok göze çarpmaktadır. Bunların yanında, kavitasyonlu döner girdap halatı ise stabilite – kararlılık bakımından operasyonel olarak türbin-jeneratör sistemlerini etkilemektedir [3].

Bu çalışmada, döner girdap halat kavitasyon tipi ile türbin-jeneratör sistemlerinde oluşan titreşim arasındaki ilişki incelenmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Döner girdap halatı, çark koniği altında, emme borusu (draft tube) merkezinde vorteks oluşumu şeklindedir. Bu kavitasyonun miktarı Tahoma sayısı veya santral kavitasyon sayısı olarak bilinen σ_p değerine bağlı olup, kısmi yük (partial load) ve debinin, artan dairesel hızından kaynaklı aşırı yükleme (over load) durumlarında oluşmaktadır. Bahsi geçen vorteks, kısmi yükte işletme durumlarında çark ile aynı yönde ve aşırı yük durumlarında da çarkın zıttı yönde dönmektedir [3].

Sistem veriminin maksimum olduğu debi değerinin %50 ila %80'i civarında girdap, helisel bir şekil alır (Şekil 2) ve çark hızının 0.25 - 0.35 katı olacak şekilde yalpalama-



Şekil 2. Emme Borusunda Döner Girdap Halatı [8, 9]



dönme şeklinde kendisini gösterir. Bu durumda düşük frekansta dalgalanmalı çevresel basınç oluşur. Bu yalpalama frekansı emme borusu ya da cebri borudan birinin doğal osilasyon frekansı ile eşleştiği anda çok sert dalgalanmalar olabilmektedir. Bu durum, emme borusu içerisinde basınç patlamalarını tetiklemekte ve türbinde ve hatta santral binasında yüksek titreşimlere neden olmaktadır. En verimli bölgenin (best efficient point) ötesinde iken ise vorteks, emme borusu koniğinin aksel olarak merkezinde olacaktır [3].

Araştırmacılar döner girdap ve sebep olduğu titreşimlerin etkisini azaltmak için çeşitli yöntemler ileri sürmüşlerdir. Bunlardan en yaygını, emme borusuna hava girişinin izin verilmesidir (air admission). Türkmenoglu [10] Ordu'da yer alan Darıca-1 HES Francis türbinleri hakkında yapmış olduğu çalışmada, kısmi yüklerde oluşan döner girdap halatının titreşimlere etkilerini incelemiş, generatör kapasitesine olan olumsuz etkilerini ortaya koymuş ve hava girişine izin verilmesi (air admission) ile sorunun çözülmesi sayesinde jeneratörde %11,11 oranında kapasite artışına gidilebildiğine değinmiştir. Son yıllarda önerilen bir diğer metod ise çark koniğinin uç kısmından aksel yönlü su jeti uygulamasıdır [11].

Dönmez [12], yayıcı girişinde – ya da başka bir deyişle türbin çıkışında- tanımlanan farklı dönme şiddetine (swirl intensity) sahip akışların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yardımı ile incelenmesini gerçekleştirmiş, Francis türbinlerinin tasarım yüklerinin uzağında çalıştırıldığında özellikle yayıcıda istenmeyen sonuçların ortaya çıktığını, bu istenmeyen sonuçların başında akış ayrılmaları ve döner girdap halatı oluşumunun geldiğini analiz sonuçları ile ortaya koymuştur.

Favrel [2], Francis türbinlerinde kısmi yükte oluşan kaviteyonsuz döner girdap halatının dinamiğini, küçük ölçekli bir model üzerinde PIV (Particle Image Velocimetry) ve LDV (Laser Doppler Velocimetry) yöntemleri ile deneysel olarak incelemiştir.

Escaler ve ark. [3] tarafından yapılan çalışmada, maksimum 112,75 MW yük kapasitesinde, 400 m düşü, 24 m³/s pompalama debisi, 31,5 m³/s türbin debisi değerine sahip 600 dev/dak devirli pompa-türbin tipi sistem incelenmiştir. Bu çalışmada, çıkış borusu (draft tube) bölgesinde dinamik basınçlar takip edilmiş, kısmi yük değerlerinde basınç değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Yine aynı çalışma sürecinde maksimum 65 MW güç kapasitesinde, 112,5 m düşü, 115 m³/s debi ve 250 dev/dak devre sahip Francis tipi türbin incelenmiştir. Sistemin gücünün 30 MW seviyelerinin altına indiği durumlarda döner girdap halatı kaynaklı, çıkış borusu bölgesinde ve duvarlarında çok yüksek titreşimler olduğu gözlemlenmiştir.

Nicolet ve ark. [13], üst kısmi yüklerde (upper part load) çalışan Francis türbini modelinde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada eliptik kesitle oluşan döner girdap halatını hızlı kamera ile görüntülemiş ve titreşim frekanslarını belirlemişlerdir.



Wack ve Riedelbauch [14], emme borusundaki kısmi yüklerdeki akışın farklı Tahoma sayısı değerlerine göre ne şekilde değiştiğini nümerik olarak modellemiş, basınç dalgalanmalarını deneysel ölçümlerle belirlemiş ve kavitasyon hacminin σ sayısının azalması ile arttığını ortaya koymuşlardır.

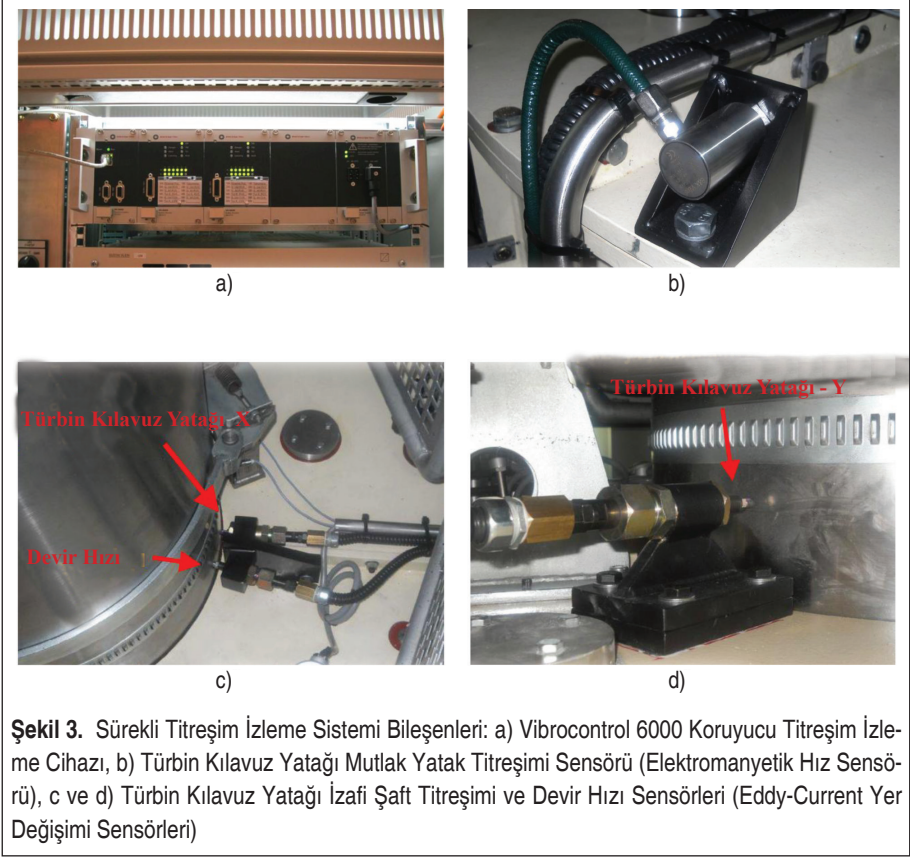
3. DÖNER GİRDAP HALATI OLGUSUNA BAĞLI İZAFİ ŞAFT TİTREŞİMLERİNİN İNCELEMESİ

Literatürde de belirtildiği üzere, döner girdap halatı kavitasyon tipi, kısmi yüklerde gerçekleşmekte olup, türbin jeneratör sistemlerinde özellikle şaft salınımı (izafi şaft titreşimi) olarak kendisini göstermektedir. Bu çalışma kapsamındaki incelemeler, 100 MW gücünde ve 333,33 dev/dk'lık şaft devir hızına sahip bir düşey Francis türbin-jeneratör ünitesinde yapılmıştır. Ünite zaman zaman ani ve dalgalı yük değişimleri sergilemekte ve bu işletme koşullarında yatak titreşimleri sürekli olarak değişim göstermektedir.

3.1 Sürekli (Online) Titreşim İzleme Sistemi Hakkında

Titreşim ölçümleri ile balanssızlık, hizasızlık, mekanik gevşeklik, yağlama sorunları, ayar kanadı muylusu kırılması, kavitasyon gibi olası arızalar makinada hasara sebebiyet verebilecek titreşim düzeylerine ulaşılmadan önce erkenden teşhis edilebilir. Bu sayede zamanında yapılan bakım planlaması ile beklenmeyen duruşların önüne geçilerek devamlı üretim süresi (uptime) arttırılır.

Yapılan çalışmalarda, hidroelektrik santralde kurulu bulunan Brüel & Kjør Vibro marka Vibrocontrol 6000 koruyucu titreşim izleme sistemi ve Compass diyagnostik titreşim analiz yazılımı kullanılmıştır. Üniteye ait jeneratör üst ve alt yatakları ile türbin kılavuz yatağında ISO 10816-5 standardına göre mutlak yatak titreşimleri, ISO 7919-5 standardına göre de izafi şaft titreşimleri ölçülmektedir (Şekil 3 ve 4). Mutlak yatak titreşimi ölçümleri her yatakta su geliş yönünde radyal olarak yerleştirilmiş elektromanyetik hız sensörleri vasıtasıyla, izafi şaft titreşimi ölçümleri ise yatay düzlemde birbirleriyle 90 derece açı yapacak şekilde radyal olarak yerleştirilmiş (X-Y) eddy-current yer değişimi sensörleri ile alınmaktadır. Titreşim izleme sisteminin koruyucu donanımı sürekli olarak ölçülen verileri alarm ve trip seviyeleri ile karşılaştırmakta, tehlike (trip) seviyesini geçen titreşimler olması durumunda makineyi otomatik olarak durdurmaktadır. Diyagnostik titreşim izleme yazılımı ise geçmişe yönelik titreşim düzeylerini (trend), frekans spektrumlarını ve kinetik şaft yörüngesi (orbit) grafikleri görüntülemekte ve veritabanında saklamaktadır.



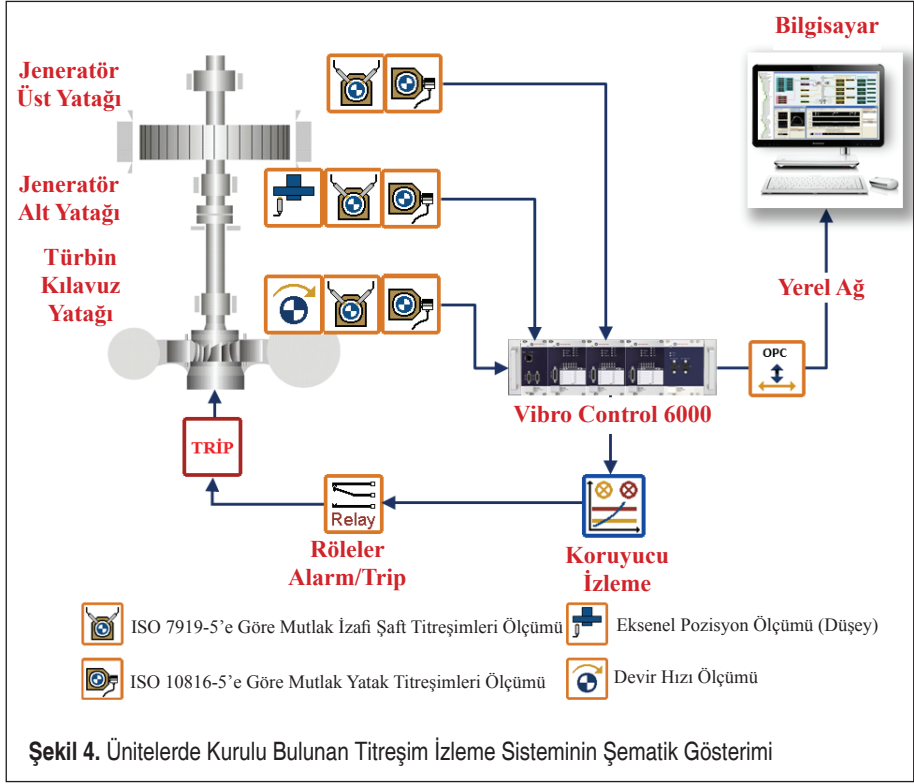
Şekil 3. Sürekli Titreşim İzleme Sistemi Bileşenleri: a) Vibrocontrol 6000 Koruyucu Titreşim İzleme Cihazı, b) Türbin Kılavuz Yatağı Mutlak Yatak Titreşimi Sensörü (Elektromanyetik Hız Sensörü), c ve d) Türbin Kılavuz Yatağı İzafi Şaft Titreşimi ve Devir Hızı Sensörleri (Eddy-Current Yer Değişimi Sensörleri)

3.2 Türbindeki Döner Girdap Halatının Titreşim Ölçümleriyle Belirlenmesi

Ünitelerdeki koruyucu titreşim izleme sistemi santralin ilk kurulumunda monte edilip devreye alınmıştır. Şekil 5'teki ekran çıktılarında ünitenin çeşitli çalışma yüklerindeki izafi şaft salınımları zamana bağlı grafik olarak görülmektedir. Özellikle 42-47 MW seviyelerinde izafi şaft titreşimleri yüksek derecede artmaktadır. Bunların haricindeki herhangi bir yük değerinde titreşim seviyelerinin arttığı gözlenmemiştir.

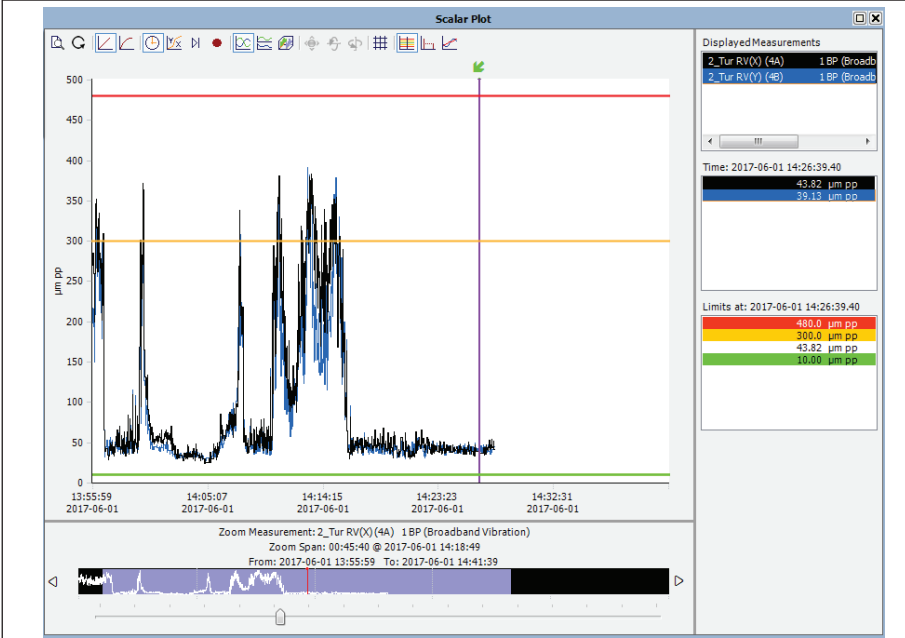
Ünitelerdeki titreşimler Compass yazılımı kullanılarak incelenmiş, ilgili trend, frekans spektrumu ve orbit grafikleri aşağıda sunulmuştur.

Şekil 6'da yer alan trend grafiğinde kısmî yüklerde türbin kılavuz yatağındaki izafi şaft titreşimlerinin zaman zaman 300 μm tepeden tepeye (peak peak) uyarı sınırını geçen dalgalı karaktere sahip seyri görülmektedir. Ünite tam yükte çalışırken ise titreşimler 50 μm tepeden tepeye seviyelerine inerek kararlı şekilde seyretmektedir.

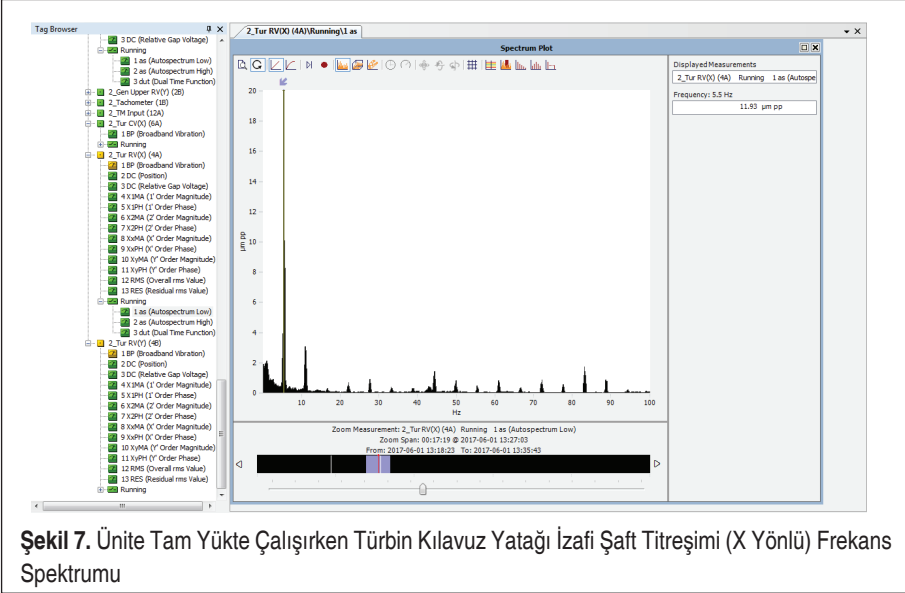


Kısmi yükte titreşim artışları özellikle türbin kılavuz yatağında görülmekte olup, jeneratör alt ve üst yataklarında kayda değer bir artış gözlenmemiştir.

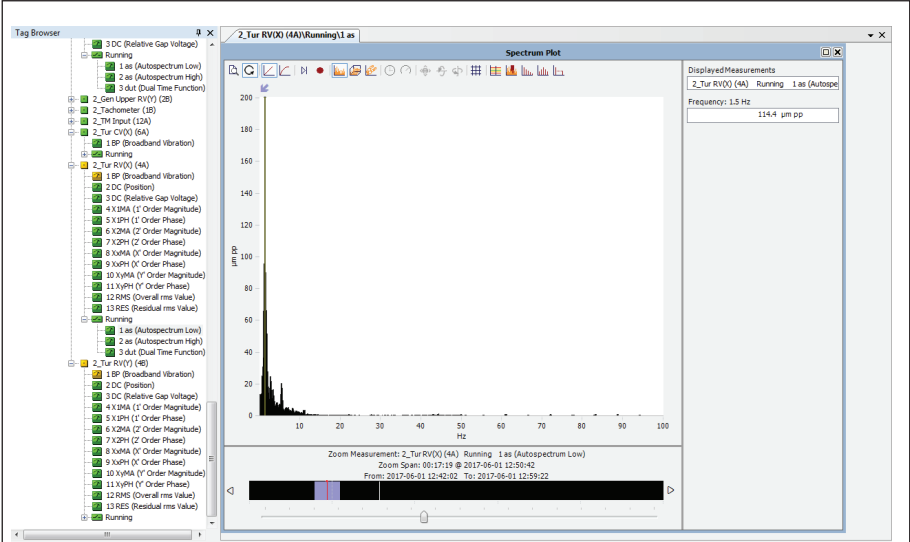
Yük değişimleri döneminde alınan FFT spektrumları incelendiğinde, ünite tam yükte çalışırken titreşimlerin en yüksek bileşeninin makinanın devir hızı olan 5,5 Hz frekan-



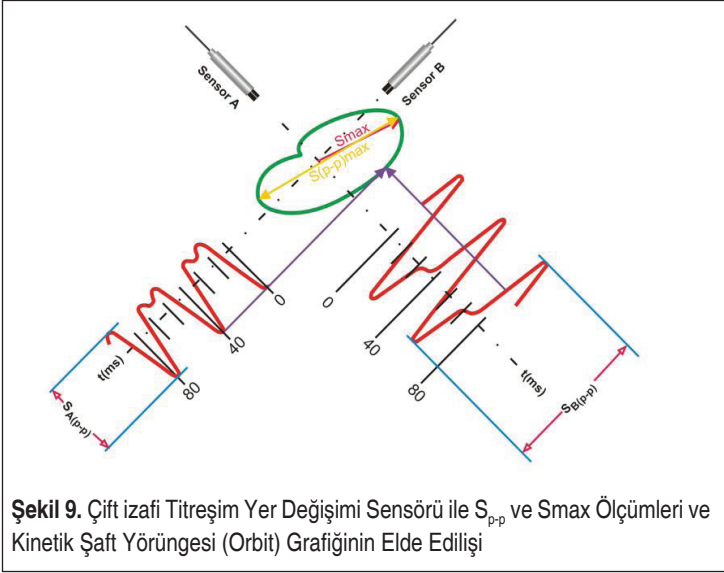
Şekil 6. Titreşim izleme yazılımından alınan türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimleri trend grafiği kısmi yüklerde uyarı sınırını geçen titreşim düzeylerini ortaya koymaktadır. (Sarı renkli yatay çizgi uyarı (alarm), kırmızı renkli yatay çizgi ise tehlike (trip) sınır değerlerini göstermektedir.)



Şekil 7. Ünite Tam Yükte Çalışırken Türbin Kılavuz Yatağı İzafi Şaft Titreşimi (X Yönlü) Frekans Spektrumu



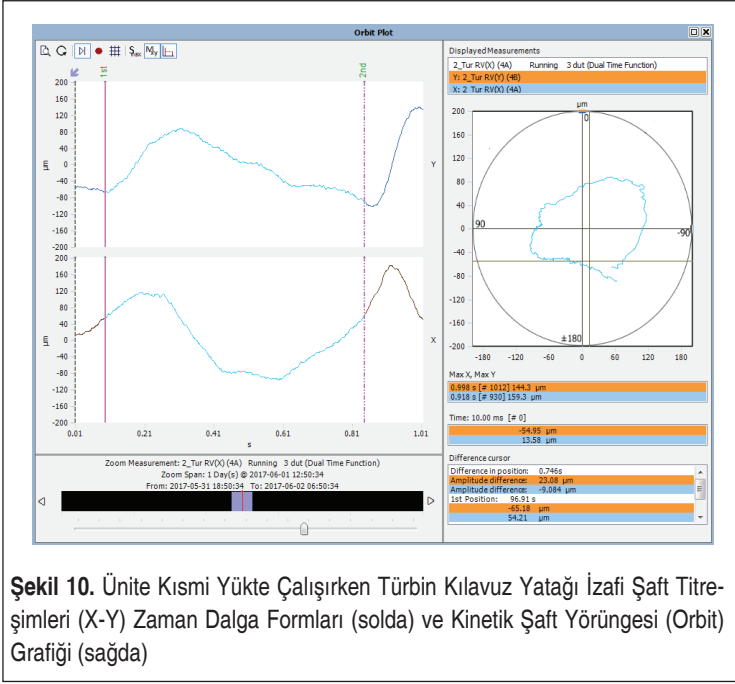
Şekil 8. Ünite 42-47 MW Kısmi Yükte Çalışırken Türbin Kılavuz Yatağı İzafi Şaft Titreşimi (X Yönlü) Frekans Spektrumu



Şekil 9. Çift izafi Titreşim Yer Değişimi Sensörü ile S_{p-p} ve S_{max} Ölçümleri ve Kinetik Şaft Yörüngesi (Orbit) Grafiğinin Elde Edilişi

sında 12 µm tepeden tepeye civarında düşük seviyeli genliğe sahip olduğu (Şekil 7), 42-47 MW kısmi yüklerde çalışırken ise titreşim genliklerinin 1,5 Hz frekansında 114 µm tepeden tepeye değerine ulaştığı görülmektedir (Şekil 8).

Radyal yönde birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki izafi titreşim yer değışimi sensö-



rü sayesinde şaftın yatağa göre izafi salınımının maksimum değerini gösteren Smax değeri ölçülebilmekte ve “kinetik şaft yörüngesi” (orbit) grafiği çizdirilebilmektedir (Şekil 9) [15, 16].

Türbin kılavuz yatağı kinetik şaft yörüngesi (orbit) grafiğine bakıldığında (Şekil 10), şaftın yatak içerisinde geniş bir yuvarlak oluşturacak şekilde dairesel halde salındığı görülmektedir. Salınım 1,5 Hz’te olup şaft dönüş yönü ile eş yönlüdür ve frekansı devir hızının yaklaşık %27’sine denk gelmektedir. Bu frekans değeri, literatürde döner girdap halatı için belirtilen frekans aralığında yer almaktadır. Dolayısıyla, söz konusu dönel şaft salınımının, emme borusundaki döner girdap halatına sahip su kütesinin çarka dönel kuvvet uygulaması sonucunda meydana geldiği anlaşılmaktadır.

3.3 Döner Girdap Halatının Emme Borusu ve Çark Üzerindeki Kaviteyon Hasarı Etkilerinin İncelenmesi

Ünite emme borusu (draft tüp) bölgesine (Fotoğraf 1) bakıldığında, döner girdap halatının meydana getirdiği kaviteyon hasarları görülebilmektedir. Söz konusu hasarlara çark dönüş yönü (ve su akış yönü) ile eş yönlü meydana gelen kaviteyonlu döner girdap halatının neden olduğu bu fotoğrafla görsel olarak ortaya konmaktadır.

Çark kanatlarında ise (Fotoğraf 2), döner girdap halatının meydana getirdiği belirgin



Fotoğraf 1. Ünite Emme Borusu Bölgesindeki Kaviteasyon Hasarı İzleri



Fotoğraf 2. Ünite Çark Kanatlarının Emme Borusu

bir kaviteasyon hasarı tespit edilmemiştir. Döner girdap halatının çarkın alt kısmında oluşması ve çark kanatlarına doğrudan hasar verecek darbesel bir etkisinin olmaması nedeniyle bu beklenen bir durumdur.

4. SONUÇ

Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü üzere, döner girdap halatı şaftın düşük frekanslı dairesel salınımına neden olmakta ve şaft bu salınımın sonucu olarak yataklara radyal



yönlü dönel bir kuvvet uygulamaktadır. Radyal yatakların yağ filmi bozulmaksızın taşıyabilecekleri kuvvetler belirlenmekte ve yatak tasarımı buna göre yapılmaktadır. Bunun yanı sıra, izin verilebilecek maksimum izafi titreşim yer değişimi düzeyi yatak boşluğu (clearance) değerine bağlıdır. Yağ filmi bozularak shaftın yatağa sürtmesi halinde yatakta kalıcı hasarlar meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla, döner girdap halatının neden olduğu radyal kuvvetin yağ filmi bozacak mertebeğe ulaşmaması önem arz etmektedir. Bu sebeple titreşim izleme sisteminde ölçülen izafi shaft titreşimlerinin sürekli takip edilerek analiz edilmesi makineyi korumak için elzemdir. Doğru analiz gereçleri kullanılarak mekanik ve akış kaynaklı sorunların erkenden belirlenmesi sayesinde hasarlara ve beklenmeyen duruşlara sebebiyet verilmeden önce çözüm üretilerek sağlıklı şekilde bakım planlaması gerçekleştirilebilir ve üretim sürekliliği artırılabilir.

KAYNAKÇA

1. **Brekke, H.** 2010. A Review on Work on Oscillatory Problems in Francis Turbines, *New Trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, Meng Joo Er (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/10434.
2. **Favrel, A.** 2016. "Dynamics of the Cavitation Precessing Vortex Rope for Francis Turbines at Part Load Operating Conditions," Ph.D., EPFL, Lausanne.
3. **Escaler, X., Egusquiza, E., Farhat, M., Avellan, F., Coussirat, M.** 2006. "Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20 (4), ISSN: 0888-3270, p. 983-1007.
4. **Gohil, P. P., Saini, R. P.** 2016. "Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant," *International Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 9 (1), p. 357-365.
5. ESHA. 2004. Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant.
6. **Knapp, R. T., Daily, J. W., Hammit, F. G.** 1970. *Cavitation*, McGraw-Hill, New York.
7. **Raja, A. K., Srivastava, A. P., Dwivedi, M.** 2006. *Power Plant Engineering*, New Age International Publishers, New Delhi.
8. **Brennen, C. E.** 1995. *Cavitation and Bubble Dynamics*, Oxford University Press.
9. **Brennen, C. E.**, 1995. *Cavitation and Bubble Dynamics*. Oxford University Press, New York. ISBN 0195094093, p. 218.
10. **Türkmenoğlu, V.** 2013. "The Vortex Effect of Francis Turbine in Electric Power Generation," *Turkish J. Elect. Eng. Comput. Sci.*, vol. 21, p. 26-37.
11. **Susan-Resiga, R., Vu, T. C., Muntean, S., Ciocan, G. D., Nennemann, B.** 2006. "Jet Control of the Draft Tube Vortex Rope in Francis Turbines at Partial Discharge," *Proceedings of the 23rd IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Yokohama, Japan, 17 - 21 October 2006.



12. **Dönmez, A. H.** 2012. “Francis Türbini Yayıcısındaki Akışın Modellenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
13. **Nicolet, C., Zobeiri, A., Maruzewski, P., Avellan, F.** 2010. “On the Upper Part Load Vortex Rope in Francis Turbine: Experimental Investigation,” IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 12 012053, 20-24 September 2010, Timişoara, Romania.
14. **Wack, J., Riedelbauch, S.** 2017. “Numerical Simulation of a Cavitating Draft Tube Vortex Rope in a Francis Turbine at Part Load Conditions for Different σ -Levels,” J. Phys.: Conf. Ser. 813 012019, 2–3 February 2017, Porto, Portugal.
15. **Orhon, B. E.** 2011. “Bir Hidroelektrik Santralda Sürekli Titreşim İzleme Sistemi Uygulaması,” V. Bakım Teknolojileri Kongresi, 14-16 Ekim 2011, Kocaeli.
16. Brüel & Kjær. Basic Vibration – Measurement & Assessment, p. 66.