

FRANCİS TÜRBİNLERİNDE DÖNER GİRDAP HALATININ TİTREŞİM ÖLÇÜMLERİYLE BELİRLENMESİ

Selim SAÇMA¹, Talip ESKİKALE², B. Emre ORHON³

¹Makina Y. Mühendisi, Enerjisa Elektrik Üretim A.Ş., selim.sacma@enerjisa.com

²Elektrik-Elektronik Y. Mühendisi, Enerjisa Elektrik Üretim A.Ş., talip.eskikale@enerjisa.com

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

Özet

Kısmî yüklerdeki dinamik davranışları, alçak ve orta düşüklü Francis türbinlerinin önde gelen sorunlarından. Optimal tasarım bölgesi dışındaki kısmî 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 kısmî yüklerde meydana gelen yüksek titreşimlerin sürekli (online) titreşim izleme sistemi ile analizi yoluyla döner girdap halatı olgusunun tanılanması incelenmektedir. Türbin kılavuz yatağına monteli eddy-current tip yer değişimi sensörlerinden elde edilen izafi shaft titreşimlerine ait trend, FFT ve orbit grafiklerinin analizi, belirli kısmî yüklerde devir hızının yaklaşık %27'si hızla dönen girdap halatını açıkça ortaya koymaktadır.

1. Giriş

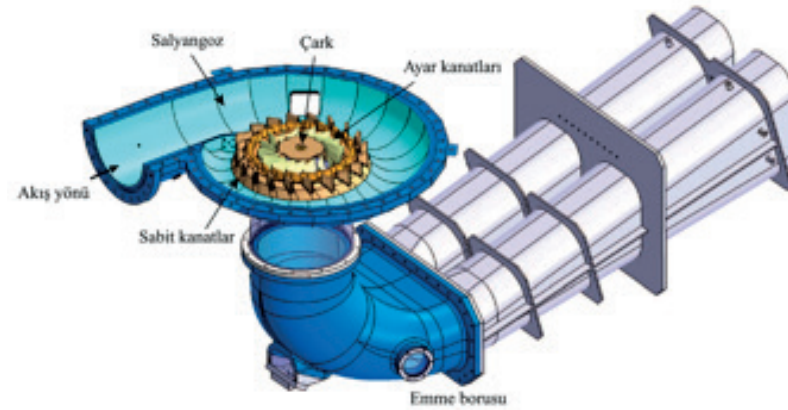
Tüm yenilenebilir enerjilerin ortak özellikleri çevreye dost, sürdürülebilir ve yerli kaynaklardan elde edilebilir olmasıdır. Hidroelektrik şu anda Dünya'daki en büyük yenilenebilir enerji kaynağıdır ve dünya elektrik ihtiyacının neredeyse altıda birini karşılamaktadır. Günümüz dünyasında puant saatlerindeki yüksek enerji ihtiyacını karşılayabilmek ve iletim hatlarındaki frekans dengesizliklerinin giderilebilmesi için büyük düşü değişimleri ile çalışan hidroelektrik santrallara 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” gibi belli bir çalışma süreci ile meydana gelebileceği gibi, makinaya özgü 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 incelenecektir.

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 kesit resmi Şekil 1’de görülmektedir. Salyangozda yönlendirilen su akışı açısıl momentumla çark girişindeki sabit kanatlara ve ayar kanatlarına ulaşır. Ayar kanatlarının açıklık miktarı çarka giren akışın debisini kontrol eder. Akışın açısıl momentumu çark kanatları tarafından shaftın mekanik momentumuna dönüştürülür. Çarkı terkeden akış emme borusundan geçer ve kinetik enerjisi statik geri basınca dönüştürülür [2].



Şekil 1. Francis türbini temsili kesit resmi [2].

Santral sahasının hidrolik özelliklerinin 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 açıya 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 açısı ayarlarına ilaveten çark kanat açıları da düzenlemeler yapılabildiğinden dolayı, akış düzensizlikleri Francis türbinlerine göre daha az olmaktadır [3].

1.2. Kavitasyon ve Döner Girdap Halatı

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

Akışkan, hidrodinamik basıncının buhar basıncının altına düşmesi sonucunda buhar fazına geçer. Bu durumda oluşan küçük kabarcıkların yüksek basınç bölgesine geçtiğinde ani olarak ortadan kalkmalarına kavitasyon 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].

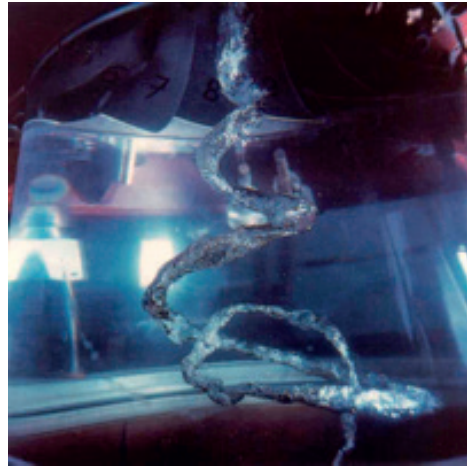
Çark malzemesinde kavitasyon kaynaklı bozulmalar ve deformasyonlar sonucunda yüzeyde oluşan hasarlar, türbin-generatör sisteminin verimini de olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra kavitasyon olgusu yüksek titreşimlere de yol açarak mekanik sistemlerde sorunlara yol açmaktadır [7].

Francis tipi türbinler için farklı farklı kavitasyon tipleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ön kenar kavitasyonu (Leading edge cavitation)
- Gezer kabarcık kavitasyonu (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) [3]

Bu çalışmada döner girdap halatı kavitasyon tipi ile türbin-generator sistemlerinde oluşan titreşim arasındaki ilişki incelenmektedir.

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 [3]. Bahsi geçen vorteks kısmi yükte işletme durumlarında çark ile aynı yönde ve aşırı yük durumlarında da çarkın zıttı yönde dönmektedir.



Şekil 2. Emme borusunda döner girdap halatı [8, [9].

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

Araştırmacılar döner girdap ve sebep olduğu titreşimlerin etkisini azaltmak için çeşitli yöntemler ileri sürmüşlerdir. Bunlardan en yaygın emme borusuna hava girişine izin verilmesidir (air admission) [10]. Son yıllarda önerilen bir diğer metod ise çark koniğinin uç kısmından aksel yönlü su jeti uygulamasıdır [11].

2. Döner Girdap Halatı Olgusuna Bağlı İzafi Şaft Titreşimlerinin İncelemesi

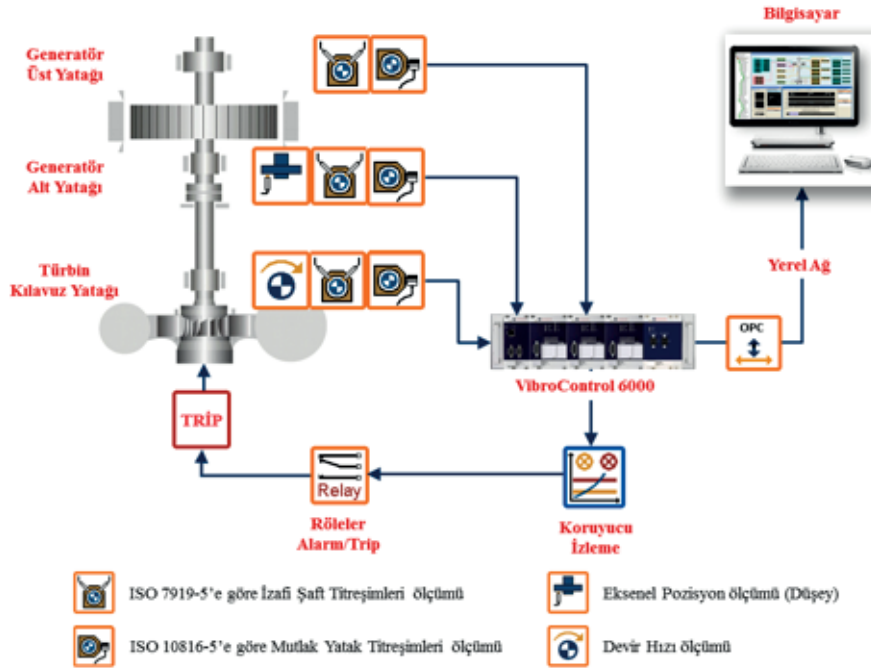
Gerekli incelemeler 100 MW gücünde, düşey Francis türbin ve 333,33 dev/dk'lık şaft devir hızına sahip bir ünite yapılmıştır. Üniteler zaman zaman ani ve dalgalı yük değişimleri sergilemektedir ve bu çalışma koşullarında yatak titreşimleri sürekli olarak değişim göstermektedir.

Literatürde de belirtildiği üzere döner girdap halatı kavitasyon tipi ara yüklerde gerçekleşmekte olup, türbin generatör sistemlerinde ise özellikle şaft salınımı (dönel ekipman titreşimi) olarak kendisini göstermektedir.

2.1. Sürekli (Online) Titreşim İzleme Sistemi Hakkında

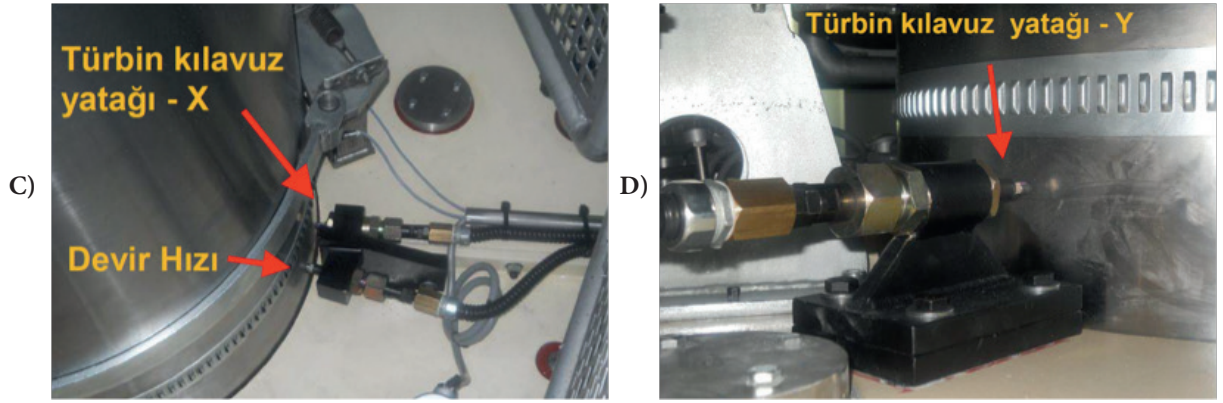
Titreşim ölçümleri ile balanssızlık, hizasızlık, mekanik gevşeklik, yağlama sorunları, ayar kanadı muylusu kırılması, kavitasyon gibi olası arızalar makinada hasara sebebiyet verebilecek titreşim düzeylerine ulaşılmadan önce erkenden teşhis edilebilir, bu sayede zamanında yapılan bakım planlaması sayesinde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

Yapılan çalışmalarda, hidroelektrik santralde kurulu bulunan Brüel & Kjær Vibro marka Vibrocontrol 6000 koruyucu titreşim izleme sistemi ve Compass diyagnostik titreşim analiz yazılımı kullanılmıştır. Üniteye ait generatör 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). 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) grafiklerini görüntülemekte ve veritabanında saklamaktadır.



Şekil 3. Ünitelerde kurulu bulunan titreşim izleme sisteminin şematik gösterimi.



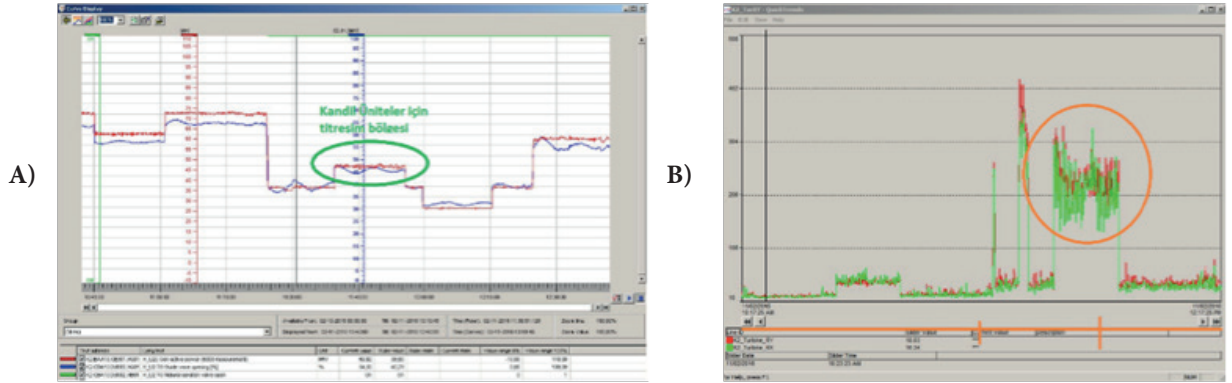


Şekil 4. Sürekli titreşim izleme sistemi bileşenleri. (a) Vibrocontrol 6000 koruyucu titreşim izleme cihazı, (b) Türbin kılavuz yatağı mutlak yatak titreşimi sensörü (elektromanyetik hız sensörü), (c, d) Türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimi ve devir hızı sensörleri (eddy-current yer değişimi sensörleri).

2.2. Türbindeki Döner Girdap Halatının Titreşim Ölçümleriyle Tanılanması

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.

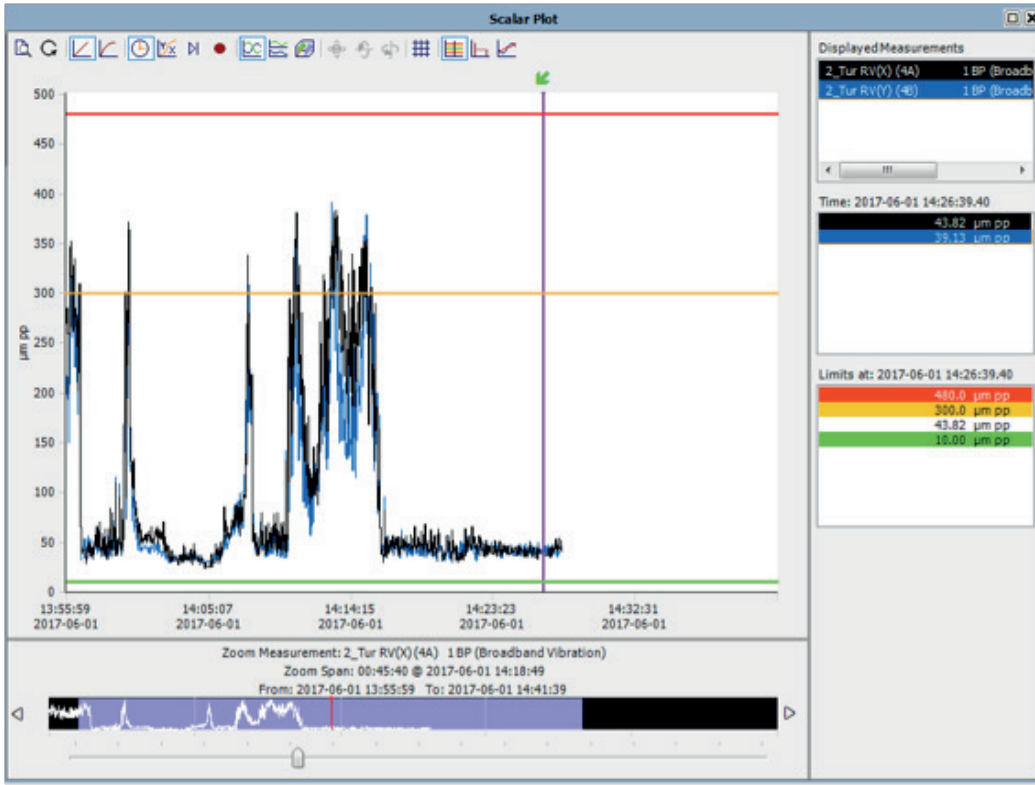
Bunların haricindeki herhangi bir yük değerinde titreşim seviyelerinin arttığı gözlenmemiştir.



Şekil 5. Santralin SCADA sisteminden alınan trend grafikleri. (a) Ünite üretim gücü – Zaman, (b) Türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimleri – Zaman.

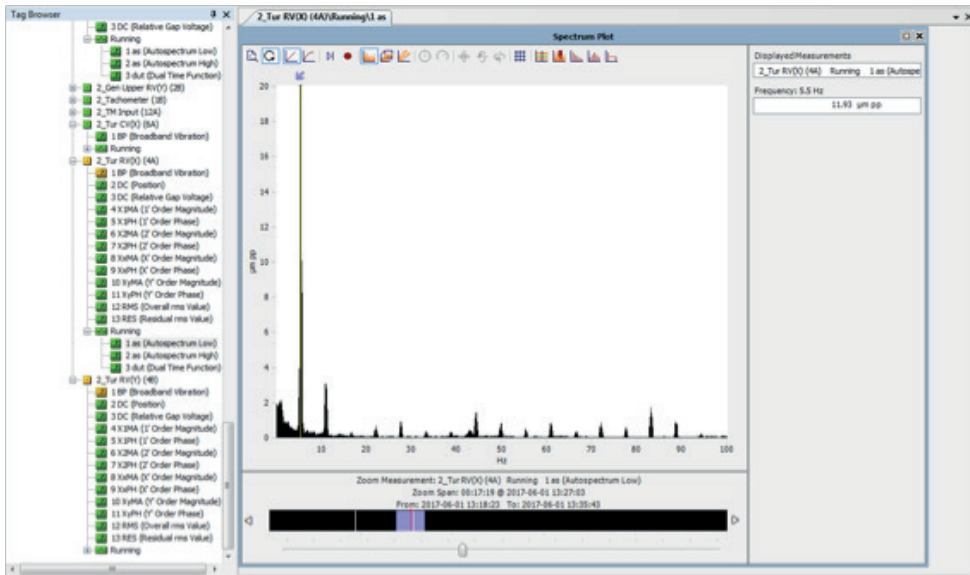
Ünitelerdeki titreşimler Compass yazılımı kullanılarak incelenmiş, ilgili trend, frekans spektrumu ve orbit grafikleri aşağıda sunulmuştur.

Şekil 6'da yer alan trend grafiğinde kısmi yüklerde türbin kılavuz yatağındaki izafi şaft titreşimlerinin zaman zaman 300 μ m peak-peak uyarı sınırını geçen dalgalı karaktere sahip seyri görülmektedir. Ünite tam yükte çalışırken ise titreşimler 50 μ m peak-peak seviyelerine inerek kararlı şekilde seyretmektedir. Kısmi yükte titreşim artışları özellikle türbin kılavuz yatağında görülmekte olup, generatör alt ve üst yataklarında kayda değer bir artış gözlenmemiştir.

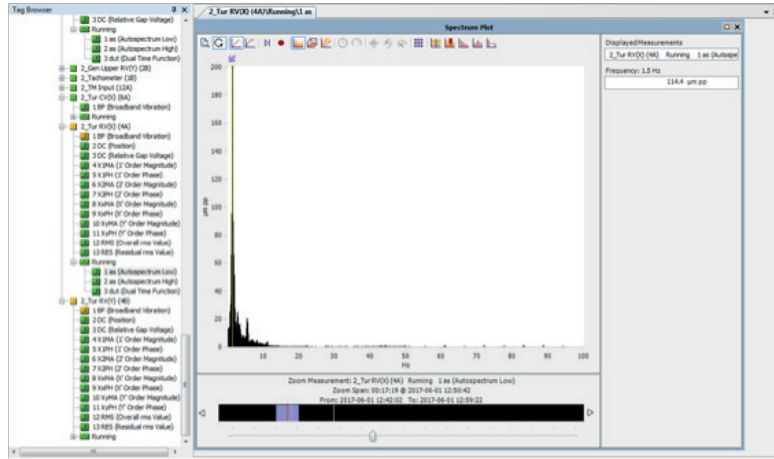


Şekil 6. Titreşim izleme yazılımından alınan türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimleri trend grafiği kısmî yüklerde uyarı sınırını geçen titreşim düzeylerini ortaya koymaktadır. (Sarı renkli yatay çizgi uyarı (alarm), kırmızı renkli yatay çizgi ise tehlike (trip) sınır değerlerini göstermektedir.)

Yük değişimleri döneminde alınan FFT spektrumları incelendiğinde, ünite tam yükte çalışırken titreşimlerin en yüksek bileşeninin makinanın devir hızı olan 5,5 Hz frekansında 12 µm peak-peak civarında düşük seviyeli genliğe sahip olduğu (Şekil 7), 42-47 MW kısmî yüklerde çalışırken ise titreşim genliklerinin 1,5 Hz frekansında 114 µm peak-peak değerine ulaştığı görülmektedir.



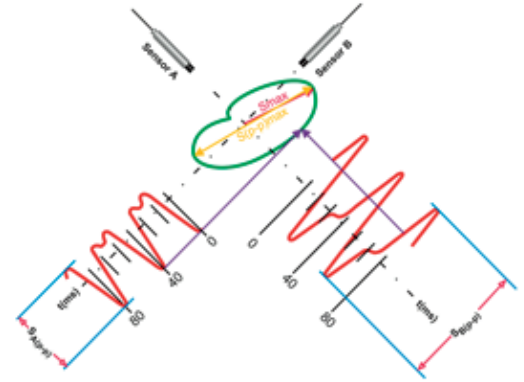
Şekil 7. Ünite tam yükte çalışırken türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimi (X yönlü) frekans spektrumu.



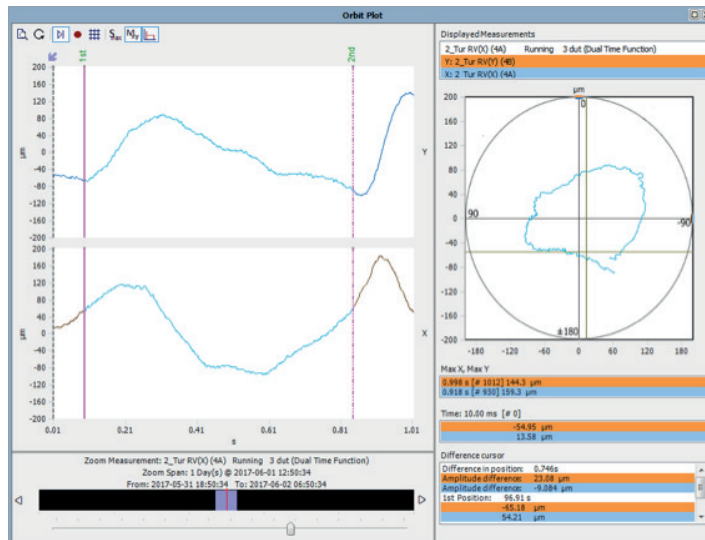
Şekil 8. Ünite 42-47 MW kısmi yükte çalışan türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimi (X yönlü) frekans spektrumu.

Radyal yönde birbirine dik olarak yerleştirilmiş iki izafi titreşim yer değişimi sensörü sayesinde şaftın yatağa göre izafi salınımının maksimum değerini gösteren Smax değeri ölçülebilmekte ve “kinetik şaft yörüngesi” (orbit) grafiği çizdirilebilmektedir (Şekil 9) [12], [13].

Şekil 9. Çift izafi titreşim yer değişimi sensörü ile Sp-p ve Smax ölçümleri ve kinetik şaft yörüngesi (orbit) grafiğinin elde edilmesi.



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 bu frekans devir hızının yaklaşık %27’sine denk gelmektedir. Söz konusu dönel şaft salınımı, emme borusundaki döner girdap halatına sahip su kütesinin çarka dönel kuvvet uygulaması sonucunda meydana gelmekte olup şaft dönüş yönü ile eş yönlüdür.



Şekil 10. Ünite kısmi yükte çalışan türbin kılavuz yatağı izafi şaft titreşimleri (X-Y) zaman dalga formları (solda) ve kinetik şaft yörüngesi (orbit) grafiği (sağda).

2.3. Döner Girdap Halatının Emme Borusu ve Çark Üzerindeki Kavitasyon Hasarı Etkilerinin İncelenmesi

Ünite emme borusu (draft tüp) bölgesine (Şekil 11) bakıldığında, döner girdap halatının meydana getirdiği kavitasyon hasarları görülebilmektedir. Söz konusu hasarlara çark dönüş yönü (ve su akış yönü) ile eş yönlü meydana gelen kavitasyonlu döner girdap halatının neden olduğu bu fotoğrafla görsel olarak ortaya konmaktadır.



Şekil 11. Ünite emme borusu bölgesindeki kavitasyon hasarı izleri.

Çark kanatlarında ise (Şekil 12), döner girdap halatının meydana getirdiği belirgin bir kavitasyon hasarı tespit edilmemiştir. Döner girdap halatının çarkın alt kısmında oluşması ve çark kanatlarına doğrudan hasar verecek bir darbesel etkisinin olmaması nedeniyle bu beklenen bir durumdur.



Şekil 12. Ünite çark kanatlarının emme borusundan çekilmiş fotoğrafı.

3. 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 şaftın yatağa sürtmesi halinde yatakta kalıcı hasarlar meydana gelebilmektedir. Döner girdap halatının neden olduğu radyal kuvvetin yağ filmi bozacak mertebeyle ulaşmaması önem arz etmektedir. Bu sebeple titreşim izleme sisteminde ölçülen izafi şaft titreşimlerinin sürekli olarak takip edilerek analiz edilmesi makinaryı ko-

rumak için elzemdir. Doğru analiz gereçleri kullanılarak mekanik ve akış kaynaklı sorunların erkenden tanınması sayesinde hasarlara ve beklenmeyen duruşlara sebebiyet verilmeden önce çözüm üretilerek sağlıklı şekilde bakım planlaması gerçekleştirilebilir ve üretim sürekliliği arttırılabilir.

4. Referanslar

- [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, Volume 20, Issue 4, pp. 983-1007, ISSN 0888-3270.
- [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, 9 (1), pp. 357-365.
- [5] Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, 2004, ESHA.
- [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] Fotoğraf: Henry, P. Institut de Machines Hydrauliques et de Mecanique de Fluides, Ecole Polytechnique Federal de Lausanne, İsviçre.
- [10] Türkmenoğlu, V. 2013. "The vortex effect of Francis turbine in electric power generation", Turkish J. Elect. Eng. Comput. Sci., no. 21, pp. 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, paper F192.
- [12] Orhon, B.E. 2011. "Bir Hidroelektrik Santralda Sürekli Titreşim İzleme Sistemi Uygulaması", V. Bakım Teknolojileri Kongresi, Kocaeli.
- [13] Brüel & Kjær Vibro kurs notları, Basic Vibration – Measurement & Assessment, p.66.