



Analog Jiroskop Sistemlerinde Kullanılan Elektromekanik Döner Milli Generatörün Frekans Analizi

Gökhan GÖKMEN*

Marmara Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

gokhang@marmara.edu.tr ORCID:0000-0001-6054-5844 , Tel: (216) 336 57 70 (1861)

Geliş: 09.10.2017 , Kabul Tarihi: 03.03.2018

Öz

Jiroskop, hava ve deniz taşıtlarında yön tespiti ve dengenin korunumu için kullanılan bir cihazdır. Sabit açısız dönme hareketi için, sabit frekanslı bir gerilim kaynağına ihtiyaç duyarlar. Günümüzde, endüstrinin birçok alanında, sabit ve yüksek hızlı dönme hareketi istenen uygulamalarda elektromekanik döner milli sistemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Analog jiroskoplarda giriş elemanı doğru akım motoru, çıkış elemanı üç fazlı senkron generatör olan elektromekanik döner milli dönüştürücüler kullanılmaktadır. Bu sistemin ürettiği üç fazlı gerilimde oluşan harmonik bozulmalar jiroskobun çalışma performansını olumsuz etkileyebilmektedir.

Bu çalışmada, denizcilik sektöründe analog jiroskop sistemlerinde kullanılan elektromekanik döner milli generatörün ürettiği gerilim, veri toplama sistemiyle kaydedilmiştir. Elde edilen veriler Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) metoduyla analiz edilmiştir. Analizlerde temel frekans ve harmonik bozulma frekansları elde edilmiştir. Veri edinim sistemi ile 1600, 4000 ve 6400 Hz örnekleme frekanslı veriler toplanmış, üç farklı veri kümesinin analizlerinde generatörün temel frekansının 200 Hz olduğu belirlenmiştir. Örnekleme frekansı değerinin artması ile yüksek frekanslı harmonik bozulmanın ortaya çıktığı tespit edilmiştir.

Analog jiroskop sisteminin dönüş hareketinin sabit ve titreşimsiz olması için Elektromekanik döner milli generatörün ürettiği gerilimlerin genlik ve frekansının sabit olması gerekmektedir. Bu çalışma ile frekans dengesizliğini neden olan harmonik bileşenler KZFD ile tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektromekanik Döner Milli Sistem; Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD); Harmonik Analiz; Üç fazlı Senkron Generatör; DC Motor.

* Yazışmaların yapılacağı yazar

Giriş

Ana fonksiyonu dönme hareketini oluşturmak olan, gerekli iş hareketini üreten döner şaftlı makine parçalarına genel olarak elektromekanik döner milli sistem adı verilir. Kullanım amaçlarına göre çok farklı türlerde ve devir sayılarında elektromekanik döner milli sistemler üretilmektedir (omlat.com, 2016; hiteco.net 2016). Elektromekanik döner milli sistemler; bilgisayarların sabit disk sürücülerinde, otomotiv ve denizcilik sektörlerinde ve yoğun olarak CNC tezgahlarında kullanılmaktadır (Sung vd 2013; Gairinei ve Marsili, 2013). Bu cihazlarda, döner hareket, bir doğru akım şönt motoru, fırçasız doğru akım motoru veya bir asenkron motor tarafından sağlanır. Kullanım amacına göre çok hassas uygulamalarda, titreşimsiz bir dönüş için manyetik yataklı modelleri de kullanılabilir (Tamisier vd. 2001; Ziran vd. 2010).

Elektromekanik döner milli sistemler, denizcilik sektöründe kullanılan jiroskopların ihtiyaç duyduğu üç fazlı gerilimin üretilmesini sağlarlar. Deniz taşıtlarında genellikle doğru akım kullanılmakta olup, generatörün tahrik elemanı olarak fırçasız doğru akım motoru veya doğru akım şönt motoru tercih edilir. Burada fırçasız doğru akım motoru kullanılması durumunda, yol verme akımının ve devir sayısının kontrolü, motor pozisyonunu sürekli olarak kontrol eden üç fazlı bir invertör devresi tarafından sağlanmaktadır (Aydogdu ve Bayer 2008).

Daha eski sistemlerde tahrik makinası olarak, bir doğru akım şönt motoru kullanılarak gerekli devir sayısı elde edilmektedir. Uyarım akımıyla devir sayısı ayarlanabilmektedir. Tahrik elemanının ürettiği sabit devirli hareket, akupile bağlı üç fazlı bir senkron generatöre aktararak üç fazlı, sinüzoidal gerilimin üretilmesi sağlanır. İyi bir çalışma performansı için generatörün ürettiği gerilimin genliğinin ve frekansının kararlı olması gerekmektedir (Zile 2016; Omaç ve Tufan 2012).

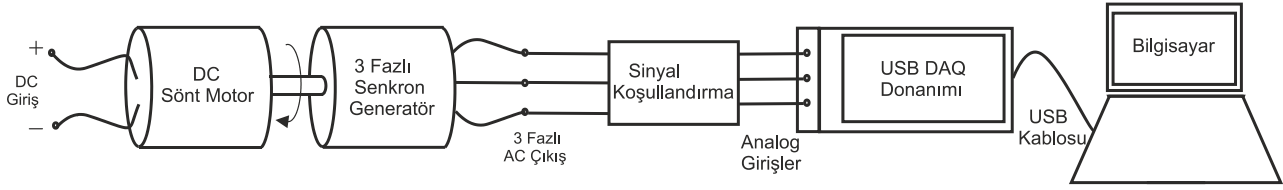
Literatürde, elektromekanik döner milli sistemlerde yüksek devirde oluşan titreşimlerin, ölçülen kesme kuvvetlerinin, generatör ve elektronik sürücü sistemlerinin harmonik analizleri üzerine farklı çalışmalar mevcuttur (Liu vd. 2010; Ren vd.2013; Brunet 1989; Dondi 2006; Song vd. 2007; Kalinski ve Galewski 2015; Totis vd. 2017; Zhang ve Zhu 2015). Bu çalışmada ise, jiroskopların üç fazlı besleme gerilimini sağlayan özel bir elektromekanik döner milli generatörün harmonik analizi KZFD metoduyla gerçekleştirilmiştir. Bu harmoniklerin tespit edilmesi, harmonikleri yok etmek için kullanılacak pasif veya aktif filtre devrelerinin seçimi ve tasarımı için önemlidir.

Materyal ve Yöntem

Veri edinimi için birbirlerine akupile edilmiş doğru akım şönt motor ile üç fazlı senkron generatör düzeneğine, bir sinyal koşullandırma devresi, USB veri edinim kartı ve bir bilgisayar bağlıdır. USB veri toplama kartının analog girişi, 14 bit, 48 ks/s, analog sayısal dönüştürme özelliğine sahiptir. Dizüstü bilgisayar, 2 GHz hızında işlemciye ve 2 GB belleğe sahiptir. Doğru akım şönt motorun besleme gerilimi: DC 18 V, devir sayısı 6000 d/dk, çıkış gücü 11 W,'dır. Senkron generatörün kutup sayısı 4, frekansı 200 Hz, çıkış gerilimi tepeden tepeye değeri 3 V'dur. Veri toplama sisteminin şematik diyagramı ve laboratuvar deney düzeneği Şekil 1-2'de verilmiştir.

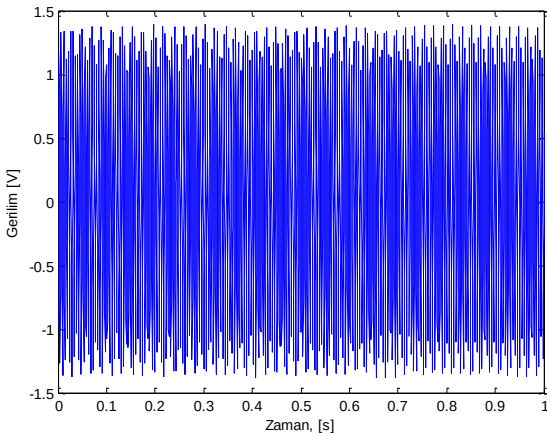


Şekil 1. Veri edinim sistemi

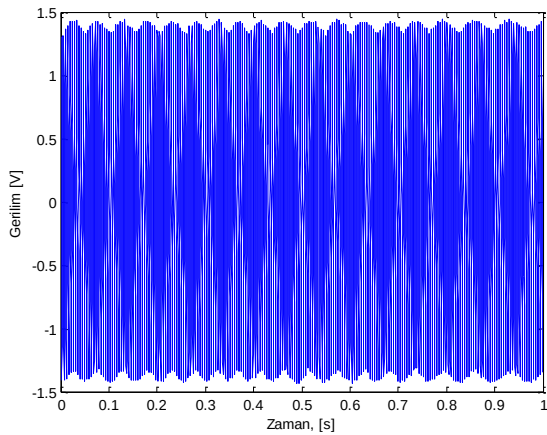


Şekil 2. Veri edinim sistemi şematik diyagramı

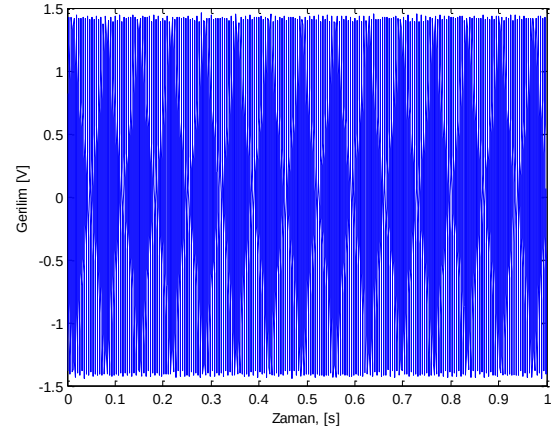
Generatörün ürettiği gerilimler veri toplama kartı vasıtasıyla, 1600, 4000, 6400 Hz'lik örnekleme frekanslarıyla kaydedilmiştir. Bu örnekleme frekanslarında, generatörün bir fazına ait kaydedilen gerilim değerleri Şekil 3-5'de verilmiştir. KZFD ile tespit edilen harmoniklerin üç farklı örnekleme frekansında tespit edilmeleri ve karşılaştırılmasının sağlanması amacıyla, üç farklı veri kümesine ayrılmıştır.



Şekil 3. Elektromekanik döner milli generatörün 1600 Hz örnekleme bir faz gerilimi



Şekil 4. Elektromekanik döner milli generatörün 4000 Hz örnekleme bir faz gerilimi



Şekil 5. Elektromekanik döner milli generatörün 6400 Hz örnekleme bir faz gerilimi

Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü

Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (KZFD) 1946 yılında Gabor tarafından işaretlerin frekans bileşenlerinin elde edilmesi amacıyla ileri sürülmüş bir tekniktir. KZFD sabit boyuttaki bir pencerenin sinyal (işaret) boyunca pencerelenmesi ile elde edilir. İşaret bu pencere boyunca sabit kabul edilir. Burada pencere boyutu hem frekans hem de zaman için sabit olarak seçilir. KZFD'de sabit boyutlu $g(t)$ penceresi $x(t)$ işareti ile pencerelendiğinde, $x(t)$ sinyalinin değişken olmadığı kabul edilir. Burada τ bölgesinin merkezi olarak kabul edilir. KZFD ile $x(t)$ sinyali pencerelendiğinde aşağıdaki eşitlikler elde edilir (Denklem 1-3).

$$\begin{aligned} STFT \{x(t)\} &\equiv X(\tau, f) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)g(t-\tau)\exp[-j2\pi ft]dt \end{aligned} \quad (1)$$

Bu eşitlikle sinyal Zaman-Frekans (t,f) düzleminde iki boyutlu bir sinyal olarak tanımlanır. Yapılan analiz seçilen pencerenin genişliği $g(t)$ ile doğrudan ilişkilidir. KZFD

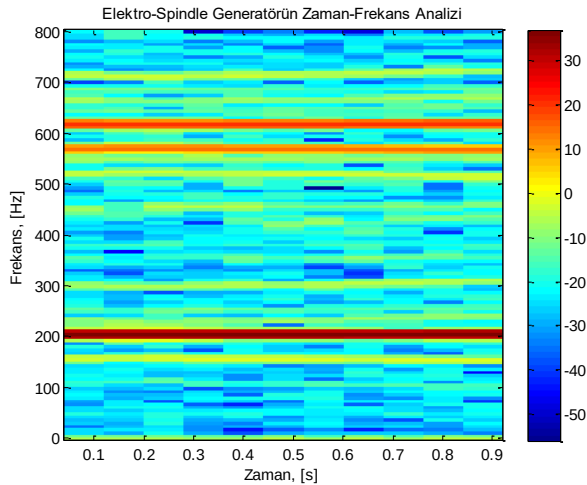
çözünürlüğü bütün zaman-frekans düzlemi boyunca sabittir. Ayrık zamanda bu eşitlik denklem 2'deki gibi yazılabilir. Fonksiyonun Spektrogramı ise Denklem 3 ile tanımlanır (Seker 2000; Akinci 2010; Akinci 2011).

$$STFT \{x(n)\} \equiv X(m, f) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) g(n-m) e^{-j\omega n} \quad (2)$$

$$Spectrogram \{x(t)\} \equiv |X(\tau, f)|^2 \quad (3)$$

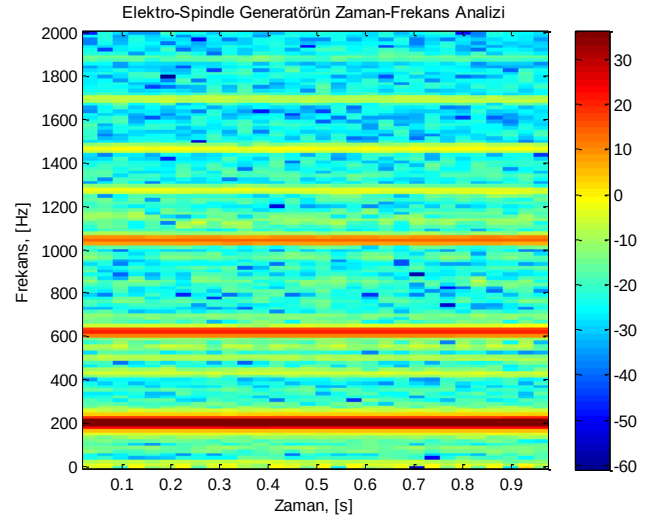
Uygulama

Elektromekanik döner milli generatörün gerilim harmoniklerine ilişkin KZFD analizleri Şekil 6-8 de sırası ile verilmiştir.



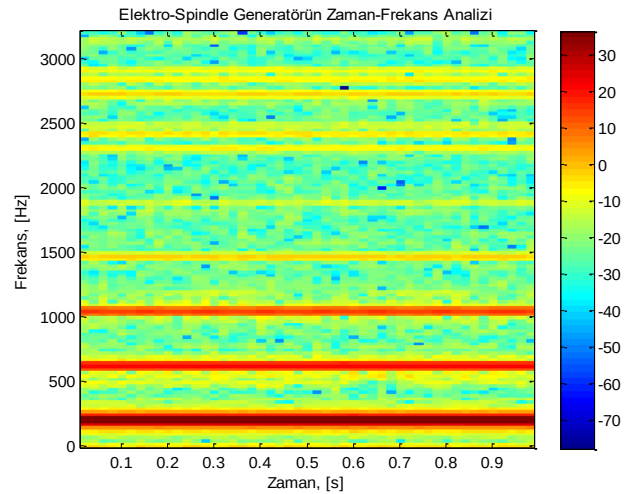
Şekil 6. 1600 Hz için KZFD

Şekil 6'da örnekleme frekansı 1600 Hz olan veri için yapılan analizde yaklaşık olarak 200 Hz civarında temel harmonik frekansı ortaya çıkmaktadır. Bu frekans, bu spektrumda en düşük frekans değerini aldığı için temel frekans olarak belirlenmiştir. Örnekleme frekansı 1600 Hz olduğundan 800 Hz'e kadar frekans incelemesi yapılabilir. Temel frekans bileşenlerinin yanında ayrıca 570 Hz ve 620 Hz de harmonik bileşenlerin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7. 4000 Hz için KZFD

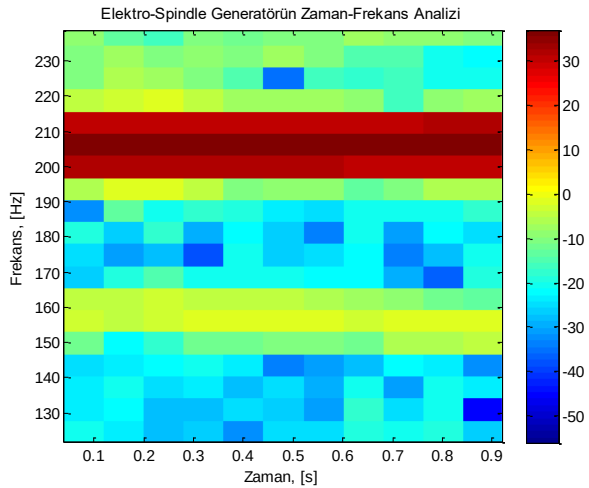
Şekil 7 ve Şekil 8'de sırasıyla 4000 Hz ve 6400 Hz örnekleme frekanslı sinyallerin analiz sonuçları verilmiştir. Burada, her iki analiz için de temel frekans 210 Hz civarındadır. Ayrıca 4000 Hz örnekleme frekansı için temel frekansın yanında, 635 Hz ve 1050 Hz'lik iki harmonik bileşen ortaya çıkmaktadır. 6400 Hz örnekleme frekansına sahip işaret için, 630 Hz, 1050 Hz baskın harmonik frekanslara ek olarak 1475 Hz, 2425 Hz ve 2725 Hz frekans değerlerine sahip olan ancak daha düşük genlikli harmonik bileşenler ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 8. 6400 Hz için KZFD

Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, elektromekanik döner milli generatörün çıkış geriliminin harmonikleri incelenmiştir. Değişik örnekleme frekansında kaydedilen çıkış gerilimleri KZFD ile analiz edilerek, temel frekans ve harmonik bozulmalara neden olan frekans bileşenleri ortaya çıkarılmıştır. Farklı örnekleme frekanslarıyla yapılan analizlerde, temel harmonik ve bozucu harmonik frekansları gözlemlenmiş bu değerlerin birbirine yakın değerlerde seyir ettiği görülmüştür. Örnekleme frekansının daha büyük değerde seçilmesi daha büyük bozucu harmoniklerin tespit edilmesinde kolaylık sağlamıştır.



Şekil 9. 1600 Hz örnekleme frekansı için Temel Harmonik Frekansı

Yapılan analizlerde temel frekansın yaklaşık 200 Hz civarında (205 Hz) olduğu tespit edilmiştir (Şekil 9). Bu değer elektromekanik döner milli generatörün etiket değerleri ile uyum göstermektedir. Şekil 8’de, 1600 Hz örnekleme frekansındaki generatörün temel harmonik frekansını gösteren detaylı şekil verilmiş olup, 4000 Hz ve 6400 Hz örnekleme frekansları için temel frekans değeri 210 Hz civarındadır. 1600 Hz örnekleme frekansına ait spektrumda 570 Hz ve 620Hz frekanslarında bozucu harmonikler ortaya çıkmaktadır. Benzer şekilde, 4000 Hz örnekleme frekansına ait spektrumda 635 Hz ve 1050Hz frekanslarında bozucu harmonikler rastlanmıştır. 6400 Hz örnekleme frekansına ait spektrumda 500 Hz ve

600Hz frekanslarında bozucu harmonikler görülmektedir. 6400 örnekleme frekanslı yapılan analizde 630 Hz, 1050 Hz baskın harmonik frekanslar tespit edilmiştir ayrıca 1475 Hz, 2425 Hz ve 2725 Hz gibi düşük genlikli harmonik bileşenler görülmektedir.

Bütün farklı örnekleme frekanslı veriler göz önüne alındığında, analiz sonucunda elde edilen temel frekans değerlerinin generatörün etiket değeriyle uyumlu olduğu söylenebilir. Cihazların tolerans ve veri toplama sisteminden kaynaklanan hatalar nedeniyle, temel frekans 200-210 Hz aralığında olduğu tespit edilmiştir. 570, 620, 630 ve 635 Hz değerleri 3. harmonik olarak, 1050 Hz değeri 5. harmonik olarak, 1475 Hz değeri 7. harmonik olarak, 2425 Hz değeri ise 11. harmonik olarak değerlendirilmiştir. 2725 Hz harmonik bileşen ölçme sisteminden kaynaklanan ara harmonik olarak tespit edilmiştir.

Elektromekanik döner milli generatörden beklenen sabit frekanslı bir gerilim sağlamasıdır, temel frekans harmoniği dışındaki bütün harmonik bileşenlerin ilave pasif veya aktif harmonik filtreler ile yok edilmesi gereklidir. Bu çalışma ile kompanze edilmesi gereken harmonik bileşenler tespit edilmiş ve çıkış gerilimine ait KZFD analizleri detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- <http://www.omlat.com/en/prodotti/>.(2016).
<http://www.hiteco.net/en/products>.(2016).
- Sung, S. J., Jang G. H., Jang J.W., Song J. Y., Lee, H. J.,(2013). Vibration and Noise in a HDD Spindle Motor Arising from the Axial UMF Ripple, *IEEE Transaction on Magnetics*,49(6), 2489-2494.
- Gairinei, A., Marsili, R.,(2013). Design of an optical measurement system for dynamic testing of electrospindles, *Measurement*, 46(5),1715-1721.
- Tamisier V.,Font S., Lacour M., Carrere F., Dumur D., (2001). Attenuation of Vibrations due to Unbalance of an Active Magnetic Bearings Milling Electro-Spindle, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 50(1), 255-258.
- Ziran, L., Wen J., Tao, He., (2010). Application of Adaptive Filtering Based on Harmonic Wavelet in the Dynamic Unbalance of Electro-Spindle, *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, 2010 International Conference on, DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.348.
- Aydogdu Ö., Bayer M., (2008), PIC Tabanlı Fırçasız DC Motor Sürücüsü Tasarımı, *Elektrik-Elektronik- Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2008)*, 26-30 Kasım 2008, Bursa.
- Zile, M., DC Şönt Motorun Bulanık Mantık ile Hız Kontrolü. (2016).
http://www.emo.org.tr/ekler/9133ecd58d46a5f_ek.pdf.
- Omaç Z., Tufan F.,(2012). Bir Senkron Generatörün İkaz Sistemi ve Gerilim Regülasyonu, *ELECO 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa.
- Liu, Z., Wen, J., & He, T. (2010). Application of adaptive filtering based on harmonic wavelet in the dynamic unbalance of electro-spindle. In *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*, 2010 International Conference on,
- Ren, Q., Balazinski, M., Jemielniak, K., Baron, L., & Achiche, S. (2013). Experimental and fuzzy modelling analysis on dynamic cutting force in micro milling. *Soft Computing*, 17(9),1687-1697.
- Brunet, M. (1989). Practical applications of the active magnetic bearings to the industrial world. In *Magnetic Bearings, Springer Berlin Heidelberg*, 225-244.
- Dondi, V. (2006). U.S. Patent No. 7,066,028. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Song, C. M., Zhao, N., & Zhang, S. Y. (2007). Research on Dynamics Characteristics of High-speed Electric Spindle. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 1, 088
- Kalinski, K. J., & Galewski, M. A. (2015). Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 92,19-30.
- Totis, G., Albertelli, P., Torta, M., Sortino, M., & Monno, M. (2017). Upgraded stability analysis of milling operations by means of advanced modeling of tooling system bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 113, 19-34.
- Zhang, W., & Zhu, H. (2015). Control system design for a five-degree-of-freedom electrospindle supported with AC hybrid magnetic bearings. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(5), 2525-2537.
- Seker, S.(2000). Determination of air-gap eccentricity in electric motors using coherence analysis, *IEEE Power Engineering Review*, 20(7), 48-50.
- Akinci, T.C. (2010). Time- Frequency Analysis of the Current Measurement by Hall Effect Sensors for Electric Arc Welding Machine, *Mechanika*, 5(85), 66-71.
- Akinci, T.C. (2011). The Defect Detection in Ceramic Materials Based on Time-Frequency Analysis by Using the Method of Impulse Noise, *Archives of Acoustics*, 36(1),1-9.

Frequency Analysis of Electrospindle Generator used in Analogue Gyroscope Systems

Extended abstract

Nowadays, Electrospindle systems are used in many area of industry in application required fixed and high speed. One of the less known application areas of Electrospindle systems is a gyroscope application in maritime industry. As known, the gyroscope is a device is used for finding direction and keeping balance. It requires a fixed frequency voltage source for fixed angular rotation. As a voltage source, Electrospindle converters which have DC motor for input device and three phase synchronous generator for output device is used in analog gyroscope application. Harmonic distortions of three phase voltages in these system can cause negative effects to operating performance of the gyroscope.

In this study, the output voltages of the electrospindle generator in used analog gyroscope in maritime industry, were acquired with data acquisition system and then all data were analyzed with Short Time Fourier Transformation (STFT). In analysis results, fundamental frequency and harmonic distortion frequencies were obtained. 1600, 4000 and 6400 Hz sampling frequency data were acquired by data acquisition system.

With different sampling frequency analysis fundamental harmonic and disruptive harmonic frequency were observed. Generally, very close results were observed. Choosing bigger sampling frequency, it makes easier to find bigger harmonic distortions.

When the analysis results are examined, fundamental frequency are determined around 205 Hz. This value is compatible with Electrospindle label value. The fundamental frequency is 210 Hz for 4000 Hz and 6400 Hz sampling frequency. 570 Hz and 620 Hz disruptive harmonics emerge in spectrum of 1600 Hz sampling frequency. Similarly,

it is find 635 Hz and 1050 Hz disruptive harmonics are determined in spectrum of 4000 Hz sampling frequency.

630 Hz and 1050 Hz disruptive dominant harmonics can be seen. 1475 Hz, 2425 Hz and 2725 Hz lower harmonics also determined in spectrum of 6400 Hz sampling frequency.

When all different sampling frequency values are considered, harmonic order can be determined exactly. Because of tolerance of instruments and Data Acquisition System errors, fundamental frequency is bandwidth of 200 Hz and 210 Hz. The third order harmonics are 570 Hz, 620 Hz, 630 Hz and 635 Hz. The fifth order harmonic is 1050 Hz. The seventh order harmonic is 1475 Hz and the eleventh order harmonic is 2425 Hz. 2725 Hz which originated from measurement system is an inter harmonic.

It is expected that Electrospindle generator generates fixed frequency voltage. It is required that all harmonic components must be compensated by active or passive filters except fundamental frequency harmonic. All harmonic components which must be compensated were determined by this study and detailed STFT analysis of output voltages were carried out.

Keywords: Electrospindle; Short Time Fourier Transformation (STFT); Harmonic Analysis; Three Synchronous Generator; DC Motor.