

Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskoplarında (ESMKJ) Kullanılan Aktif Manyetik Rulmanların Enerji Tüketimi

Energy Consumption of the Active Magnetic Bearings Used in Energy Storage Control Moment Gyroscopes (ESCMG)

Kutlay Aydın¹, M. Timur Aydemir²

¹TUSAŞ-Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş.
kaydin@tai.com.tr

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi
aydemirmt@gazi.edu.tr

Özet

Çalışmanın amacı, manyetik rulmanın Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskobu (ESMKJ) sisteminde kullanımının enerji tüketimi açısından uygunluğunun değerlendirilmesidir. Bu çalışmada ilk olarak kısaca ESMKJ çalışma ilkesi üzerinde durulmuştur. Daha sonra sisteme etki eden harici bozuntu kuvvetleri tespit edilmiş ve sürtünme kayıplarını azaltmak için önerilen manyetik rulman kısaca anlatılmıştır. Son olarak manyetik rulman için elektriksel model oluşturularak benzetim çalışması yapılmıştır.

Abstract

The purpose of this work is to evaluate the energy consumption of magnetic bearings when used in energy storage control moment gyroscope (ESCMG) systems. First, operation principles of ESCMG are explained in this paper. Then, external disturbance forces that act upon the system are discussed, and magnetic bearings that are suggested to reduce the friction losses are briefly explained. Finally, simulation results by using electrical equivalent circuits of the magnetic bearings are presented.

1. Giriş

Moment Kontrol Jiroskopları (MKJ) uzun yıllardır uydu yöneliminde kullanılan sistemlerdir. Momentum depolamak amacıyla kullanılan yüksek hızlı bir tekerlek dönme eksenine dik başka bir ekseninde döndürülerek jiroskobik kuvvet elde edilmektedir. Elde edilen jiroskobik kontrollü kuvvet de uydu yöneliminde kullanılmaktadır. Dönen tekerlekte aynı zamanda kinetik enerji depolanması (mekanik batarya) fikrinden doğan Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskobu (ESMKJ) uygulamasının en büyük problemi yüksek kayıplardır. Hızla birlikte artan kayıplar bataryanın deşarj süresini düşürmektedir. Bu da alçak irtifa uyduları için geçerli olan 35 dakikalık deşarj süresi gereksiniminin gerçekleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Özellikle motor/jeneratör biriminin

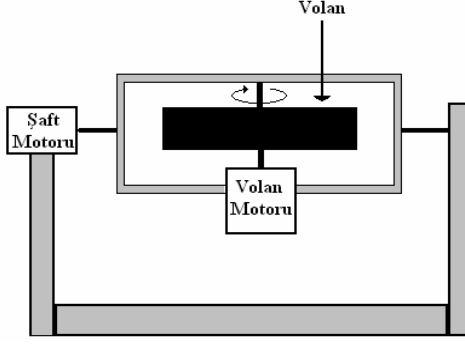
yataklarındaki sürtünme kayıpları deşarj süresini önemli ölçüde etkilemektedir (düşürmektedir).

Mekanik bataryalarda sürtünme kayıplarını düşürmek için manyetik rulman kullanımı önerilmektedir. Pasif manyetik rulmanlar, dinamik bir kontrol yapısına sahip olmadığı ve sönümleme özelliği olmadığı için tercih edilmemektedir. Aktif manyetik rulmanların dezavantajı ise enerji tüketen sistemler olmasıdır. Mekanik bataryada depolanan enerjinin bir kısmı aktif manyetik rulman için harcanacaktır. Mekanik bataryalarda sisteme etki eden harici kuvvet olmadığı için aktif manyetik rulmanların enerji tüketimleri oldukça düşük seviyededir ve bu nedenle tercih edilmektedir. ESMKJ sistemlerinde ise yapıya etki eden oldukça fazla dinamik kuvvet vardır ve bu kuvvetler aktif manyetik rulmanın enerji tüketimini artırmaktadır. Bu da aktif manyetik rulmanların ESMKJ sistemlerine uygunluğu konusunda bazı şüpheleri gündeme getirmektedir.

Bu çalışmada ESMKJ sistemlerine etki eden kuvvetler tespit edilerek kullanılacak uygun bir aktif manyetik rulman için enerji tüketimi analizi yapılmaktadır. Tek bir radyal rulman için elektriksel modelleme ve benzetim çalışmasıyla söz konusu kuvvetler karşısında enerji tüketimi tespit edilerek toplam enerji tüketimi tahmin edilmektedir.

2. Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskobu (ESMKJ)

Moment kontrol jiroskopları, uydulara yüksek hareket kabiliyeti kazandırmak için kullanılan sistemlerdir. MKJ'nin moment sağlayan tekerleği, yüksek hızda dönen ve büyük bir kütleyle sahip jiroskoptur. Moment tekerleğinin jiroskobik etkisinden faydalanmak için, dönme eksenine dik bir eyleyici (şaft motoru) kullanılmaktadır. Şaft motoru, mili moment tekerleğinin gövdesine sabitlenmiş, moment tekerleğinin hareket etmesini sağlayan, normalde hareketsiz olan ve uydu döndürülmek istendiğinde enerji uygulanan elektrik motorudur. MKJ yapısı Şekil 1'de görülmektedir [1,2].



Şekil 1: MKJ Yapısı

Dönen volanda depolanan enerji, volanın atalet momentiyle ve volanın açısal hızının karesiyle orantılıdır. Volanda depolanan toplam enerji (E_{toplam}), (1) numaralı eşitlikle ifade edilmektedir [2]. Deşarj sırasında volandan alınabilecek olan net enerji (E_{net}) ise (2) numaralı eşitlikte görülmektedir. Deşarj sırasında depolanan enerjinin bir kısmı kayıplara harcanacaktır. Bu nedenle (2) numaralı eşitlikte verim parametresi (η) de kullanılmaktadır [2]. Ayrıca yönelim işlevinin kesintisiz sürdürülebilmesi için volan hızının belirlenen bir minimum değerine altına inmemesi gerekmektedir. Bunun için volanda depolanan enerjinin belirli bir kısmı geri alınabilmektedir. Minimum ve maksimum hızlar arasındaki bu enerji farkının depolanan toplam enerjiye oranı ise “Deşarj Derinliği” parametresi ile ifade edilmektedir [2].

$$E_{toplam} = \frac{1}{2} J_p * \omega_{max}^2 \quad (1)$$

$$E_{net} = \frac{1}{2} J_p * (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) * \eta \quad (2)$$

(1) ve (2) eşitliklerinde kullanılan değişkenlerin açıklamaları aşağıda verilmektedir:

E_{toplam} = Maksimum hızda depolanan toplam enerji (joule)
 E_{net} = Deşarj sırasında elektrik enerjisine dönüştürülen enerji miktarı (joule)
 J_p = Volanın toplam atalet momenti ($kg \cdot m^2$)
 ω_{max} = Volanın maksimum açısal hızı (rad/s)
 ω_{min} = Volanın minimum açısal hızı (rad/s)
 η = Tüm sistemin verimi

Eşitliklerden görüldüğü üzere elektrik enerjisine dönüştürülen mekanik enerji miktarı doğrudan sistem verimiyle ilişkili bir değerdir.

3. Volan Motoruna (Motor/Jeneratör) Etki Eden Kuvvetler

Motor/jeneratör sistemine ve dolayısıyla rulmanlara etki eden harici kuvvetler rulman kayıplarını artırmaktadır. Bu nedenle kayıp analizinde, harici kuvvetlerin ve etkilerinin bilinmesi büyük önem taşımaktadır.

Sistemin uzayda çalışacağı düşünüldüğünde yerçekimi kuvvetinin ve atmosferden kaynaklanan rüzgar kuvvetinin göz ardı edilebileceği görülmektedir. Sisteme etki eden 3 temel kuvvet mevcuttur; 1- balanssızlık kuvveti, 2- açısal ivmelenme kuvveti, 3- jiroskobik kuvvet [3,4].

3.1. Balanssızlık Kuvveti

Volanın üretiminden kaynaklanan, dönme eksenine ile kütle merkezi arasındaki kaçıklık (e) balanssızlık kuvvetini oluşturmaktadır. Balanssızlık kuvveti, volanın dönme hızına eşit hızda dönen ve hızın karesiyle orantılı olarak büyüklüğü değişen bir kuvvettir. Uzay uygulamalarında volanın en az “Grade1” (1 mm/s) balans seviyesinde olması önerilmektedir. Volan balans seviyesi (3) numaralı formülle ifade edilmektedir.

$$grade = e * \omega \quad (3)$$

$$grade1 = e * \omega = 1 \text{ mm} / s = 10^{-3} \text{ m} / s$$

Balanssızlıktan kaynaklanan harici bozuntu kuvveti ise (4) numaralı formülle ifade edilmektedir.

$$F_b = m * e * \omega^2 = m * (grade) * \omega \quad (4)$$

(3) ve (4) eşitliklerinde kullanılan değişkenlerin açıklamaları aşağıda verilmektedir:

e = Volanın dönme eksenine ile kütle merkezi arasındaki kaçıklık (mm)
 ω = Volanın açısal hızı (rad/s)
 F_b = Balanssızlıktan kaynaklanan harici bozuntu kuvveti (N)
 m = Volanın kütlesi (kg)

3.2. Açısal İvmelenme Kuvveti

Şaftın ivmelenmesi için bir tork oluşturmak gerekmektedir. Bu tork, büyüklüğüne, rulmanla volan arasındaki mesafeye ve volanın şaft eksenindeki ataletine (J_s) bağlı olarak motor/jeneratör rulmanları üzerinde bir bozuntu kuvveti oluşturur. Oluşan bozuntu kuvvet vektörü, volanın dönüşünden bağımsız olarak rulmana daima aynı doğrultuda etki eder. Şaft sabit hızla ulaştığında kuvvetin değeri sıfırdır. Açısal ivmelenme torku (5), açısal ivmelenme kuvveti de (6) numaralı eşitliklerle ifade edilmektedir [3,4].

$$\tau_a = J_s * \ddot{\delta} \quad (5)$$

$$F_a = \tau_a / d = (J_s * \ddot{\delta}) / d \quad (6)$$

(5) ve (6) eşitliklerinde kullanılan değişkenlerin açıklamaları aşağıda verilmektedir:

τ_a = Açısal ivmelenme torku (Nm)
 J_s = Volanın şaft eksenindeki atalet momenti ($kg \cdot m^2$)
 δ = Şaft açısal konumu (rad)
 d = Volanla rulman arasındaki mesafe (m)
 F_a = Açısal ivmelenme kuvveti (N)

3.3. Jiroskobik Kuvvet

Şaft, sıfırdan farklı bir açısal hızla sahip olduğu süre boyunca açısal ivmelenme tork vektörüne dik bir tork vektörü oluşur. Bu tork vektörü jiroskobik torktur ve şaft hızıyla orantılı bir değerdir. Jiroskobik tork sonucu rulmanlar üzerinde oluşan bozuntu kuvveti, jiroskobik tork değerinin rulmanlarla volan arasındaki mesafeye bölümüyle elde edilmektedir. Açısal ivmelenme sonucu oluşan bozuntu kuvveti rulmanlara x-yönünde etki ederken jiroskobik kuvvet rulmanlara y-yönünde

etki eder. Jirokobik tork ve jirokobik bozuntu kuvveti sırayla (7) ve (8) numaralı eşitliklerle ifade edilmektedir [3,4].

$$\tau_j = (J_p * \omega) * \dot{\delta} \quad (7)$$

$$F_j = (J_p * \omega) * \dot{\delta} / d \quad (8)$$

(7) ve (8) eşitliklerinde kullanılan değişkenlerin açıklamaları aşağıda verilmektedir:

τ_j = Jirokobik tork (Nm)

F_j = Jirokobik kuvvet (N)

ω = Volanın açısal hızı (rad/s)

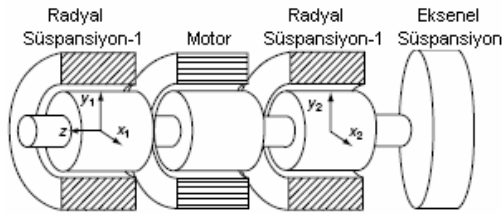
J_p = Volanın dönme eksenindeki atalet momenti (kg.m²)

δ = Şaft açısal konumu (rad)

d = Volanla rulman arasındaki mesafe (m)

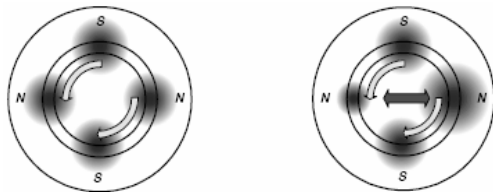
4. Aktif Manyetik Rulmanlar

Manyetik rulmanlarda radyal süspansiyon ve eksenel süspansiyon işlevleri söz konusudur (Şekil 2). Radyal süspansiyon için dört eksen (x₁-y₁ ve x₂-y₂), eksenel süspansiyon için de tek eksen (z) kararlı bir yapının oluşturulması gerekmektedir [3,4].



Şekil 2: Manyetik Süspansiyon Sistemi

Aktif manyetik rulmanlar elektromıknatıslanma prensibine göre çalışan sistemlerdir ve manyetik çekme kuvvetlerini kullanılmaktadır. Yapı olarak manyetik malzemeden üretilen rotor ve sarımlar içeren statordan oluşmaktadır. Çekme kuvvetleri kullanıldığı için yapı olarak kararsız sistemlerdir. Dört kutuplu bir rulman yapısı Şekil 3'te görülmektedir. Rotor için harici bir bozuntu kuvveti olmadığı ve her kutupta sabit büyüklükte manyetik kuvvetler oluşturulduğu düşünüldüğünde bileşke kuvvet sıfırdır ve bu durumda rotor merkezde dengededir (Şekil 3.a) [3]. Uygulanan manyetik kuvvetler eşitken rotora harici bir bozuntu kuvveti uygulandığında rotor kuvvet yönünde hareket edecektir. Bu durumda (hava aralığı uzunluğu azaldığı için) rotorun yaklaştığı kutuptaki çekme kuvveti artarken (hava aralığı uzunluğu arttığı için) uzaklaştığı kutuptaki çekme kuvveti azalacaktır. Böylece bileşke kuvvet sıfırdan farklı olacak ve rotor, dengedeki konumundan uzaklaşacaktır (Şekil 3.b) [3].



(a) Bileşke Kuvvet Sıfır (b) Bileşke Kuvvet Sıfırdan Farklı

Şekil 3: Manyetik Kuvvetin Rotor Üzerine Etkisi

Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için dinamik bir kontrol uygulanmaktadır. Her kutup için oluşturulan çekme kuvvetleri, bozucu kuvvetler ve rotor deplasmanına bağlı olarak kontrol edilmektedir.

5. Modelleme ve Benzetim Çalışması

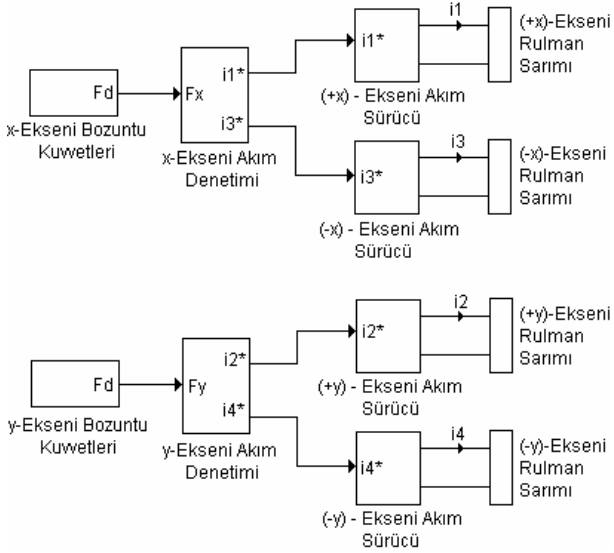
Benzetimde, volanın iki radyal rulman arasında olduğu yapı dikkate alınmıştır. Bu durumda radyal rulmanların volana olan mesafeleri ($d = 0.1m$) eşit alınmış ve radyal rulmanların özdeş oldukları kabul edilmiştir. Benzetim çalışması, tek bir radyal manyetik rulmanın elektriksel modeli oluşturularak yapılmıştır. Benzetimde kullanılan rulman parametreleri Ek A'da verilmektedir.

Kütlesi 2 kg olan bir volanın 35 dakikada 40000 RPM hızından 10000 RPM hızına düşmesi sırasında üreteceği balanssızlık kuvveti (4) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır. Volanın balans seviyesinin maksimum hızda Grade1 olduğu durum dikkate alınmıştır. Balans seviyesi açısal hızla doğru orantılı olduğu için minimum hızda balans seviyesinin Grade0.25 olduğu görülmektedir. Bu koşullar altında deşarj evresinin başında balanssızlık kuvvetinin tepe değerinin (maksimum) 8.4 N ve deşarj evresinin sonunda balanssızlık kuvvetinin tepe değerinin (minimum) 0.52 N olduğu hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Balanssızlık kuvvetinin etkisi, bir radyal manyetik rulmanda x ve y-eksenlerinde eşit olarak görülmektedir.

Motor/jeneratör birimini döndüren şaftın 1 saniyede 7 °/s hızı ulaşması istenmektedir. Bu durumda maksimum şaft ivmesi için 7 °/s² değeri alınmaktadır. Şaft eksenindeki atalet moment değeri 75.10⁻³ kg.m² olan volan için (6) numaralı eşitlik kullanılarak açısal ivmelenmeden kaynaklanan bozuntu kuvveti hesaplanmış ve bu değer yaklaşık 91.6 mN olarak elde edilmiştir. Şaft y-ekseni yönünde döndürüldüğü süre boyunca açısal ivmelenme kuvveti sadece y-ekseni rulmanlarına etki eder.

Şaft hızı 7°/s alınarak (8) numaralı eşitlik yardımıyla jirokobik kuvvet hesaplanmıştır. Volanın dönme eksenindeki atalet momenti değeri 15.10⁻³ kg.m²'dir. Modelde, 35 dakikalık deşarj evresi süresince 3 kez, her biri 50 saniye süreli şaft hareketi (manevra) uygulanmıştır. İlk manevra 100 ile 150nci saniyeler arasında, ikinci manevra 1000 ile 1050nci saniyeler arasında ve üçüncü manevra 1800 ile 1850nci saniyeler arasında uygulanmıştır. Volan hızının deşarj evresinde doğrusal değiştiği kabul edilerek ilk manevrada ortalama açısal hızın yaklaşık 38215 RPM, ikinci manevrada yaklaşık 25360 RPM ve üçüncü manevrada yaklaşık 13930 RPM olduğu tespit edilmiştir. Buna göre ilk manevrada oluşan jirokobik kuvvetin büyüklüğü yaklaşık 73.3 N, ikinci manevrada yaklaşık 48.6 N ve üçüncü manevrada da yaklaşık 26.7 N olduğu hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Şaft y-ekseni yönünde döndürüldüğü süre boyunca jirokobik kuvvet sadece x-ekseni rulmanlarına etki eder

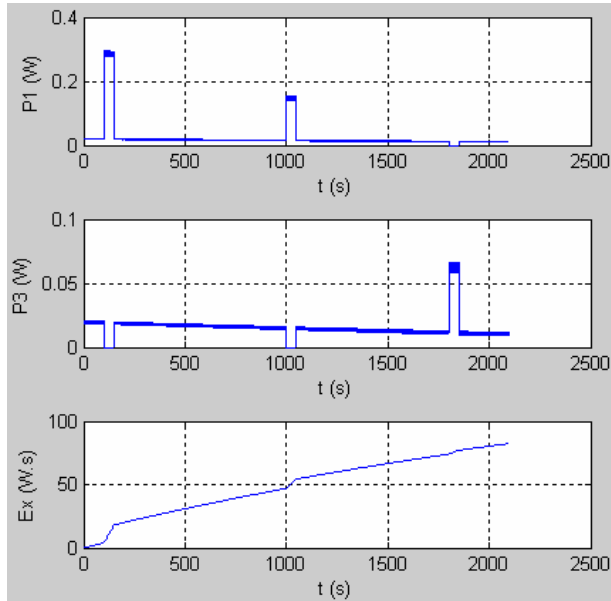
Manyetik rulmanın akım denetim modelinde ağırlıktan doğan kuvvet ve öngörülemeyen bozuntu kuvvetlerine karşı sabit besleme akımı (bias current) kullanılır. Sabit besleme akımının değeri düşüktür ve sisteme sürekli uygulanır. Oluşturulan benzetim modelinde besleme akımının değeri 100 mA olarak alınmıştır. Benzetim için Şekil 4'teki model oluşturulmuştur [3,4].



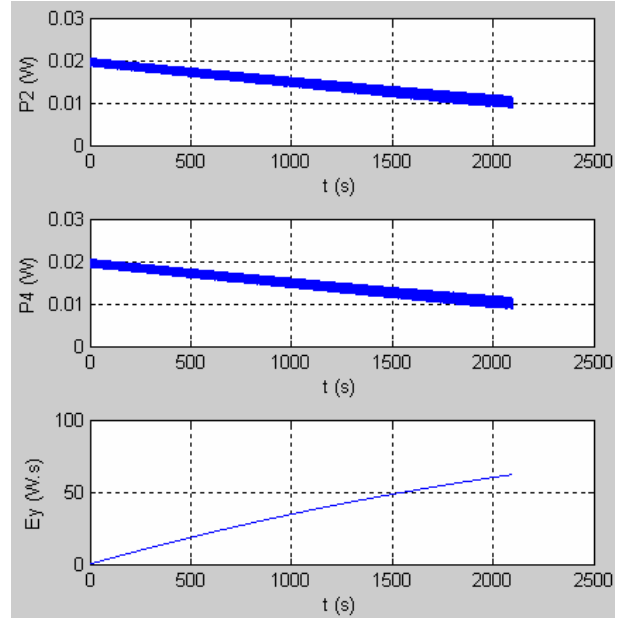
Şekil 4: Manyetik Rulman Akım Denetim Modeli

Aktif manyetik rulmanın enerji tüketimi ESMKJ'nin deşarj evresi için önem taşımaktadır. Çünkü bu evrede tüm enerji ihtiyacı ESMKJ tarafından sağlanmaktadır. Bu nedenle benzetim çalışması 35 dakikalık bir çalışma süresi için yapılmış ve sonuçlar alınmıştır.

Tek radyal manyetik rulmanın x-ekseni yönündeki sarımlarının güç ve enerji tüketim grafikleri Şekil 5'te, y-ekseni yönündeki sarımlarının güç ve enerji tüketim grafikleri ise Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 5: x-Eksenli Yönündeki Sarımların Güç ve Enerji Grafikleri

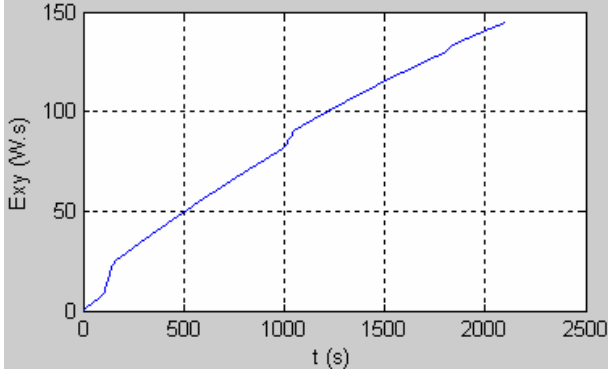


Şekil 6: y-Eksenli Yönündeki Sarımların Güç ve Enerji Grafikleri

Şekil 5'te, x-ekseni yönündeki sarımlarda sabit besleme akımı ve balanssızlıktan kaynaklanan bozuntu kuvvetine karşılık gelen güç tüketiminin yanında jiroskobik kuvvetlere karşılık gelen güç tüketimleri de yönelim süresi boyunca darbeler şeklinde görülmektedir (P1 ve P3). Grafiklerden 100ncü ve 1000nci saniyelerdeki yönelimlerin (+) yönde ve 1800nci saniyedeki yönelimin ise (-) yönde olduğu görülmektedir. Jiroskobik kuvvete karşılık gelen güç tüketimi hızla orantılı olarak azalmaktadır (eşitlik-8). Balanssızlıktan kaynaklanan güç tüketiminin de hıza bağlı olarak azaldığı görülmektedir (eşitlik-4). x-Eksenli yönündeki sarımların 35 dakikada toplam enerji tüketimlerinin (E_x) yaklaşık 82.4 W.s olduğu grafikten görülmektedir.

Şekil 6'da y-ekseni yönündeki sarımların sabit besleme akımı, balanssızlıktan kaynaklanan bozuntu kuvveti ve açılal ivmelenmeden kaynaklanan bozuntu kuvvetine karşılık gelen güç tüketimleri görülmektedir (P2 ve P4). Açılal ivmelenmeden kaynaklanan bozuntu kuvvetinin değeri çok küçük olduğu için (91.6 mN) grafikte etkisi görülmemektedir. Balanssızlıktan kaynaklanan güç tüketiminin de hıza bağlı olarak azaldığı görülmektedir (eşitlik-4). y-Eksenli yönündeki sarımların 35 dakikada toplam enerji tüketimlerinin (E_y) yaklaşık 62.2 W.s olduğu grafikten görülmektedir.

Tek radyal manyetik rulmanın 35 dakikada toplam enerji tüketimi x ve y- eksenlerindeki enerji tüketiminin toplamına eşittir (Şekil 7). Toplam enerji tüketiminin (E_{xy}) yaklaşık 144.5 W.s (~0.04 W.h) olduğu görülmektedir.



Şekil 7: Tek Radyal Rulmanın Toplam Enerji Tüketim Grafiği

Çalışmada iki radyal rulman özdeş kabul edildiği için radyal rulmanların toplam enerji tüketimleri $2 \times 0.04 = 0.08$ W.h olarak elde edilir. Uzay uygulamalarında yerçekim kuvveti sıfır olduğu için aksel rulmanların enerji tüketimleri radyal rulmanlara kıyasla düşüktür. En kötü koşulda aksel rulmanın enerji tüketimi radyal rulmanın tüketimine eşit kabul edilirse sistemin toplam enerji tüketimi (E_t) $0.08 + 0.04 = 0.12$ W.h olur.

Deşarj evresinde kayıplar dahil ($\eta=1$ alınarak) sistemden geri alınabilecek net enerji miktarı (1) numaralı eşitlik kullanılarak hesaplandığında yaklaşık 34 W.h değeri elde edilmektedir. Bu değerle E_t değeri karşılaştırıldığında manyetik rulman sisteminin ESMKJ sistemi için yaklaşık % 0.35'lik bir kayıp anlamına geldiği görülmektedir. İyi tasarlanmış bir elektrik makinasının %1-2 civarında bir çekirdek kaybına sahip olduğu düşünüldüğünde manyetik rulman sisteminin sebep olduğu eşdeğer kayıp miktarının oldukça düşük olduğu görülmektedir.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, manyetik rulmanların enerji tüketimleri bakımından ESMKJ sistemlerinde kullanılmasının uygunluğu değerlendirilmiştir. Çeşitli dinamik kuvvetlere maruz kalan ESMKJ sistemlerinde rulman kayıplarının artması kaçınılmazdır. Dinamik kuvvetlerdeki bu çeşitlilik, manyetik rulmanlara enerji ihtiyacı olarak yansımaktadır. Yapılan modelleme ve benzetim çalışması sonucunda mevcut dinamik kuvvetlere rağmen manyetik rulmanların enerji ihtiyacının oldukça düşük olduğu ve bu konuda mekanik rulmanlara büyük üstünlük sağladığı görülmüştür.

7. Kaynaklar

- [1] Aydın, K., Aydemir, M.T., "Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskopları", *12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuar*, 2007, 1-2.
- [2] Aydın, K., Aydemir, M.T., "Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskobu Motor/Jeneratör Ünitesindeki Kayıplar ve Kayıp Azaltma Yöntemleri", *SAVTEK2008 4. Savunma Teknolojileri Kongresi*, 2008, 1-5.
- [3] Chiba, A., Fukao, T., Ichikawa, O., Oshima, M., Takemoto, M., Dorrel, D.G. (2005), "Magnetic Bearings and Bearingless Drives", ELSEVIER Newnes, Oxford, 2005.

- [4] Larssonneur, R., "Design and Control of Active Magnetic Bearing Systems for High Speed Rotation", Swiss Federal Institute of Technology (Doctor of Technical Sciences), Zurich, 1990

Ek A

Çalışmada kullanılan radyal manyetik rulman sistemine ait parametreler aşağıda verilmektedir.

Maksimum sarım akımı	: 6 A
Maksimum gerilim	: 150 V
Sarım endüktansı	: 24 mH
Sarım direnci	: 1 ohm
Kuvvet-akım faktörü	: 181 N/A