

# Enerji Saklayabilen Moment Kontrol Jiroskopları

Kutlay AYDIN<sup>1</sup>

M. Timur AYDEMİR<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Ankara

<sup>1</sup>e-posta: kutlay.aydin@gmail.com

<sup>2</sup>e-posta: aydemirmt@gazi.edu.tr

## Özetçe

Bu çalışmada uydulara yüksek hareket kabiliyeti kazandıran moment kontrol jiroskobu (MKJ) ve tepki tekeri/moment tekerinin (TT/MT) çalışma ilkeleri üzerinde durulmuştur. Dönen bir kütle için aynı zamanda bir mekanik batarya olarak kullanılması fikrinden doğan volan sistemi kullanılarak doğru akım (DA) bara gerilim regülasyonunun yapılması kısaca anlatılmıştır. Daha sonra bara gerilim regülasyonu ile yönelim kontrolünün aynı anda yapılması, TT/MT ve ESMKJ yöntemleri kullanılarak anlatılmıştır. Son olarak fırçasız DA motoru kullanılarak bir volan sisteminin benzetimi yapılmıştır. Benzetim çalışmasında DA bara gerilim regülasyonu uygulaması yapılmıştır.

## 1. Giriş

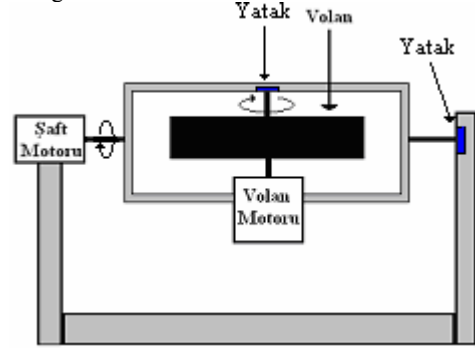
Uydulara etkili bir yönelim özelliği kazandırmak için uzun yıllardır Moment Kontrol Jiroskopları (MKJ) kullanılmaktadır. Son yıllarda bu amaçla Enerji Saklayan Moment Kontrol Jiroskobu (ESMKJ) kullanımına yönelik araştırma çalışmaları hız kazanmıştır. ESMKJ, MKJ sistemlerinin işlevini yerine getirmek yanında bir de enerji saklama görevini üstlenirler.

Uydularda enerji, güneş panelleri yardımıyla sağlanmaktadır. Fakat uyduların karanlıkta kaldığı sürede enerji sağlamaya bataryaların görevidir. Günümüzde bu amaçla kullanılan elektro-kimyasal bataryalar, güneşin görüldüğü süre boyunca yardımcıyla doldurulduktan sonra karanlıkta güç kaynağı olarak kullanılmaktadır. Özellikle alçak irtifa uydularında karanlıkta kalma süresi uzun olduğu için kullanılan bataryaların özellikleri çok önem kazanmaktadır. Bataryaların ağırlık ve sınırlı ömür sorunları, araştırmacıları mekanik batarya kullanımına yönlendirmiştir. ESMKJ sistemleri, yüksek hızlarda döndürülen rotorlarında depoladıkları kinetik enerjiyi, güneş enerjisinden yararlanılmayan sürelerde sisteme geri vererek mekanik batarya işlevi görürler.

Mekanik bataryaların (ESMKJ) elektro-kimyasal bataryalara karşı birçok üstünlüğü vardır; 1-Bir MKJ aynı zamanda batarya olarak kullanıldığından, elektro-kimyasal bataryanın ağırlık ve hacminden uydulara kurtulmuş olur, 2-elektro-kimyasal bataryalar kısa ömürlü sistemlerdir, buna karşın ESMKJ'ler çok daha uzun ömürlüdür, 3-MKJ'ler elektro-kimyasal bataryalar gibi kirlilik oluşturmaz, 4-MKJ'ler elektro-kimyasal bataryalara göre çok daha fazla boşalma (deşarj) derinliğine sahiptirler [1-8].

MKJ sistemleri, uydularda yönelim kontrolü için kullanılan iki temel yapıdan biri olup, yaygın olarak tercih edilenidir.

MKJ'nin moment sağlayan tekeri, yüksek hızda dönen ve büyük bir kütleyle sahip olan jiroskoptur. Moment tekerinin jiroskobik etkisinden faydalanmak için, dönme eksenine dik bir motor (şaft motoru, genellikle adım motoru) kullanılmaktadır. Şaft motoru, mili moment tekerinin gövdesine sabitlenmiş, moment tekerinin hareket etmesini sağlayan, normalde hareketsiz olan ve uydulara döndürülmek istendiğinde enerji uygulanan elektrik motorudur. MKJ yapısı Şekil-1'de görülmektedir.

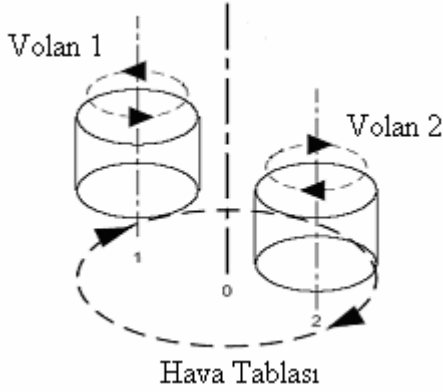


Şekil-1. MKJ Yapısı

İkinci yapı Tepki Tekeri/Moment Tekeri (TT/MT) adını alır. Tepki tekerlekleri nominal hızları üzerinde pozitif veya negatif yönde ivmelendirilerek dönme eksenleri yönünde tork üretirler ve uzay aracıyla momentum alışverişini yaparlar. Son yıllarda, tepki tekeri sistemlerine enerji depolama işlevi eklemek için de çalışmalar yapılmaktadır. Şekil 2'de bu tür bir sistem görülmektedir. Bu yapıda, yönelim kontrolünü sağlamak amacıyla aynı dönme ekseninde iki adet volan (flywheel) kullanılmaktadır. Genellikle özdeş olan moment tekerleri normal koşullarda eşit ve zıt yönlü tork oluşturmak için eşit hızlanma ile zıt yönlere dönerler. Yönelimi sağlamak gerektiğinde moment tekerlerinin hız değişimleri arasında birbirlerine göre fark oluşturulur. Böylece toplamda sıfır olan tork vektörü bir yönde sıfırdan farklı bir değer kazanır. Bu da moment tekerinin bağlı olduğu düzlemin hareket etmesini sağlar [6].

Dönen kütle için (jiroskop) eylemsizlik momentinin büyük olması istenir. Bunun için kütle ve hız parametreleri göz önünde bulundurulmalıdır. Öte yandan uzay uygulamalarında kütle için küçük olması istenir. Bu nedenle eylemsizlik momentini artırmak için hızın artırılması ihtiyacı doğar. Hızın istenen değerlere çıkarılması ve enerjinin geri alınması sırasında hız düşümünün az olması için ise sürtünmenin minimize edilmesi çok önemlidir. Sürtünmeyi minimize etmek için MKJ ve TT/MT sistemlerinde motorlar için manyetik rulmanlar kullanılır ve dönen sistemlerin bulunduğu kapalı hazne vakumlanır. Manyetik rulmanlar aktif veya pasif yapıda olabilir. Pasif manyetik rulmanlar sürekli miktatistler

kullanılarak oluşturulur. Aktif manyetik rulmanlar ise elektromıknatlardan oluşturulur ve çok karmaşık kontrol algoritmaları gerektirirler. Kontrollü, manyetik alanı ayarlanabilir ve uyarlanabilir yapıları nedeniyle aktif manyetik rulmanlar fonksiyon olarak daha fazla avantajlara sahiptirler. Karmaşık kontrol yapıları ise en büyük dezavantajlarıdır.

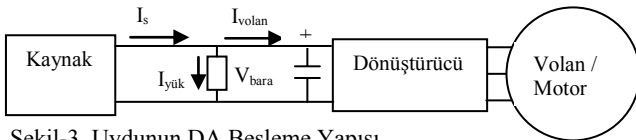


Şekil-2. Enerji Saklama Özellikli Tepki Tekerini [1]

Bu çalışmada önce tek bir moment tekerinin enerji saklama özelliği incelenecek, daha sonra iki moment tekeri ile enerji saklama ve tek eksenli yönelim özelliklerinin birleştirilmesi incelenecektir.

## 2. Volanlı Sistem ile DA Bara Regülasyonu

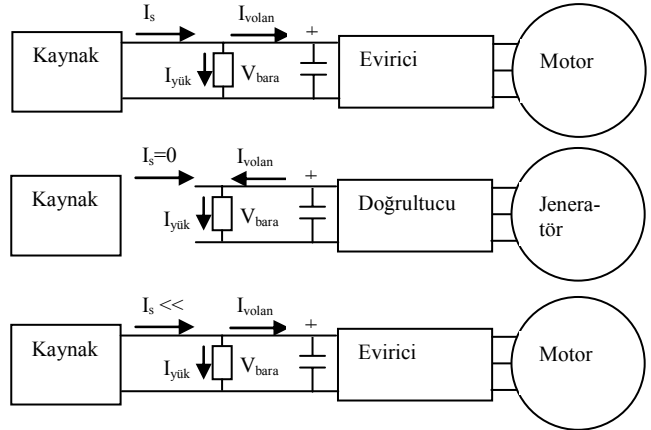
ESMKJ kullanarak uzay istasyonunun enerji sisteminde doğru gerilim barasının gerilim regülasyonunun nasıl gerçekleştirildiği [3,4,7] çalışmalarında anlatılmıştır. Sistemin en önemli elemanları motor/jeneratör, evirici/doğrultucu ve kontrol birimleridir. Motor/jeneratör elemanı olarak genellikle sürekli mıknatıslı senkron makine veya fırçasız DA makine kullanılmaktadır. Bu makineler, alan uyarımına ihtiyaç duymamaları ve fırçasız bir yapıya sahip olmaları nedeniyle tercih edilmektedirler. Eviricide genellikle darbe genişlik modülasyonu (DGM-PWM) kullanımı tercih edilmektedir. Bunun nedeni ise motorda harmoniklerden kaynaklanan gürültü ve kayıpların en aza indirilmesi gereksinimidir [1,2,9,10]. Enerji saklama amaçlı kullanılan sistemin blok diyagramı Şekil-3'de görülmektedir.



Şekil-3. Uydunun DA Besleme Yapısı

Şekil-3'de "kaynak" adı verilmiş olan birim, güneşten gelen enerjiyi göstermektedir. Uydun güneşi gördüğü süre boyunca enerji güneş panellerinden sağlanmaktadır. Güneş panelleri hem yükü hem de jiroskobu beslemektedir (baranın gerilim regülasyonu güneş panellerinin görevidir). Bu evre, jiroskop için "dolun" evresidir ve "dönüştürücü" elemanı evirici, "volan- motor" elemanı da motor olarak kullanılır. Bu süre boyunca jiroskop motorunun hızı düzenli olarak artar ve motor için akım regülasyonu yapılır. Uydun güneşi görmediği sürede

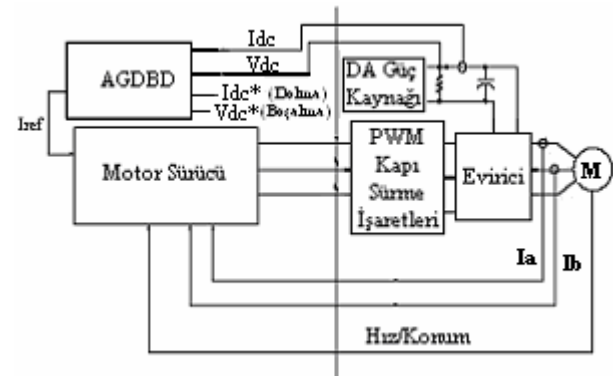
jiroskop motoru jeneratör olarak kullanılır ve volanda saklanan kinetik enerji elektrik enerjisine dönüştürülerek yükü beslemek için kullanılır. "Dönüştürücü" elemanının doğrultucu olarak kullanıldığı bu evre, jiroskop için "boşalma" evresidir ve baranın gerilim regülasyonu jiroskop tarafından sağlanır. Uydunun, güneş ışınlarından yeterince faydalanmadığı sürede hattın regülasyonu yine jiroskop tarafından sağlanır. Bu evre, jiroskop için "düşük dolun" evresidir ve bu süre boyunca güneş panelinden az bir miktar enerji elde edilmektedir. "Dolum", "Boşalım" ve "Düşük dolun" evrelerinde güç akış yönleri Şekil-4'te gösterilmektedir.



Şekil-4. Uydun güç sisteminin evreleri: Dolun (en üst), Boşalım (orta), Düşük dolun (en alt)

"Dolum" evresinde motor için akım regülasyonu söz konusudur. "Boşalım" evresinde güneş panelleri sisteme hiç enerji sağlamaz ve volan akımı ters yönde akarak yükü besler. Bu evrede jeneratör yükü beslediği için akımın değişkenliği söz konusudur, çünkü uydunun akım ihtiyacı her an değişebilmektedir. Bu evrede baranın gerilim regülasyonunu sağlamak için kontrol algoritmaları oluşturulmalıdır.

ESMKJ veya TT/MT ile bara regülasyonu uygulamasında yukarıda sözü edilen evrelere uygun olarak akım ve gerilim regülasyonu yapmak amacıyla, sürücü sisteme ek olarak Akım-Gerilim Dolum-Boşalım Düzenleyici (AGDBD) kullanılmaktadır (Şekil-5).



Şekil-5. Bara Düzenleyici Volan Kontrol Algoritması

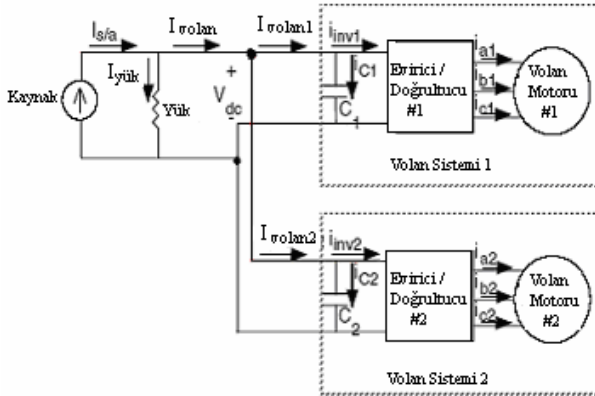
"DA Güç Kaynağı" bloğu uydularda güneş panellerini ifade etmektedir. Sisteme dışarıdan hız referansı yerine "Dolum"

modundaki motor akımının referansı ( $I_{DC}^*$ ) ve “Boşalım” modundaki hat geriliminin referansı ( $V_{DC}$ ) girilmektedir. Girilen referans akım/gerilim değerleri ve ölçülen gerçek akım/gerilim değerleri kullanılarak kontrol için gerekli hata işaretlerini üretilmektedir.

### 3. DA Bara Düzenleme ve Yönelim Kontrolü

Yönelim kontrolü ve DA bara düzenlemesi için TT/MT veya ESMKJ kullanılabilir. Tek eksende yönelim sağlamak için TT/MT ilkesi kullanıldığında iki adet volan gerekirken ESMKJ ilkesi kullanıldığında bir adet volan yeterli olmaktadır. Ayrıca ESMKJ'nin kontrol kolaylığı da önemli bir avantajdır.

Yönelim kontrolü (tek dönme ekseninde) ve gerilim regülasyonu sağlamak için tümlşik yapıda iki volan kullanılmaktadır (TT/MT yöntemi). Kullanılan iki motor/jeneratör ünitesinin parametreleri eşit kabul edilmektedir. Aynı düzlemde ters yönlere dönen motorların oluşturdukları zıt torklar hareket kontrolü için kullanılmıştır. Her iki motorun da hız değişimi eşitse oluşan zıt torklar eşit olacağı için monte tablası (uydu) hareketsiz kalacaktır. Tablanın, motorların dönme ekseninde hareket etmesi için bu eşitlik istenen yönde bozulur. Sistem modeli Şekil 6'da görülmektedir. Sistemin dezavantajı, “Boşalım” evresinde hareket kontrolü sağlamak için tork referansı değiştirildiğinde gerilim regülasyonunun bozulmasıdır [5,6,8].

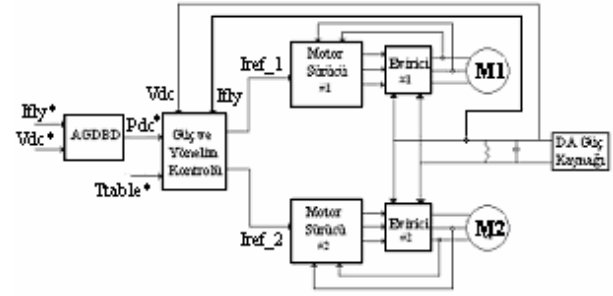


Şekil-6. İki Volan Elektriksel Bağlantı Şeması

Önceki modelde olduğu gibi motor/jeneratör olarak sabit mıknatıslı fırçasız makina kullanılmaktadır. Bu modelde kullanılan DC bara regülasyonu yöntemi farklı değildir. Yine gerçek motor akımı ve hat gerilim değerleri ile referans akım ve gerilim değerlerinin kullanıldığı AGDBD bloğu mevcuttur. AGDBD'nin çıkışı güç referansını vermektedir. Dışarıdan girilen tablanın tork referansı ( $T_{masa}^*$ ) ve tahmin edilen motor hız değerleri “Güç ve Yönelim Kontrol” bloğunun girişlerini oluşturmaktadır. Bloğun çıkışları ise motorların akım referans değerleridir. Kontrol sisteminin blok şeması Şekil-7'de görülmektedir. AGDBD bloğu en basit haliyle PI denetleyicilerden oluşturulabilmektedir.

Sistem enerjisinin güneş panellerinden sağlandığı süre boyunca uydunun yönelim kontrolü gerektiğinde, yapılması gereken tek şey motorlara hız kontrolü uygulamaktır. Girilmiş

olan referans tork değerine göre motor hız değişimleri arasında fark oluşturularak sıfırdan farklı bir zıt tork elde edilir. Bu süre boyunca hattın gerilim regülasyonu görevi güneş panellerine aittir. Boşalma evresi süresince motorlar jeneratör olarak kullanılırlar ve hattın gerilim regülasyonu görevini üstlenirler. Bu süre içinde uydu yönelimine ihtiyaç duyulduğunda jeneratör hız değişimleri arasında fark oluşturmak için bir jeneratörden daha az diğerinden daha fazla akım çekilir. Fazla akım çeken jeneratörün hızı düşer. Bu geçici durum anlık olarak bara gerilim regülasyonunun bozulmasına neden olur. Bu geçici etki kaçınılmazdır fakat bazı önlemlerle şiddeti azaltılabilir.



Şekil-7. İki Volan ile Yönelim Kontrolü ve Bara Düzenlemesi

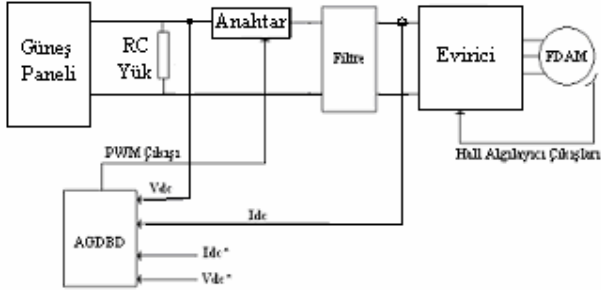
Yönelim kontrolü ve DA bara regülasyonu için ESMKJ kullanıldığında bir eksende yönelim için tek volan kullanılmaktadır. ESMKJ'nin en büyük avantajlarından birisi küçük bir güç ile (şaft motoru) büyük bir gücün (volan) kontrol edilebilmesi olanağıdır. Ayrıca yönelim kontrolü ayrı bir şaft motoru ile yapıldığından DA bara regülasyonu kontrol algoritması ile yönelim kontrolü algoritmaları birbirinden tamamen bağımsızdır. Bu da, TT/MT kullanılarak yönelim yapıldığında DA bara regülasyonunda meydana gelen istenmeyen geçici durum etkilerini ortadan kaldırmaktadır.

### 4. Benzetim Çalışması

SIMULINK programıyla yapılan benzetim çalışmasında DA bara gerilim regülasyonu için fırçasız DA motor (FDAM) kullanılmıştır. Fırçasız DA motoru sürmek için değişken DA bara ile 3-fazlı evirici kullanılmıştır. “Dolum” evresinde motor için sabit akım referansı (50 A) kullanılmıştır. Benzetimde “Düşük dolum” evresinde güneş panellerinden akım elde edilmemiş, doğrudan güneş panelleri devre dışı bırakılarak “Boşalım” evresine geçilmiştir. “Boşalım” evresinde hat gerilimi 250 V'a sabitlenmiş ve bir RC (R=1000 ohm, C=200 uF) yükü beslenmiştir. Benzetimde kullanılan modelin blok şeması Şekil-8'de görülmektedir [3,7,10]. Anahtar ve filtre bloklarıyla bir düşüren dönüştürücü (buck converter) modeli oluşturulmuştur. “Dolum” evresinde akım regülasyonu, “Boşalım” evresinde gerilim regülasyonu bu dönüştürücü ile sağlanmaktadır.

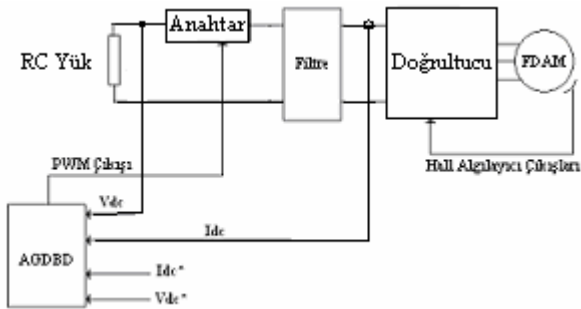
Benzetimde kısa zamanda yüksek hızlara çıkılması amaçlanmıştır. Bu nedenle dolum evresinde 50 amper referans akım değeri seçilmiştir. Normal çalışma koşullarında motorun anma hızına, uydunun güneşi gördüğü sürenin sonunda (yaklaşık 60 dakika) ulaşması istenir. Bunun için de seçilen referans akım değeri çok daha küçüktür. Seçilen referans akım

değeri ( $I_{dc}^*$ ) AGDBD bloğuna dışarıdan girilmektedir. Anahtarla Güneş Paneli arasındaki akımın dalga şekli kesikli olduğu için kontrol bloğunda (AGDBD) kullanılması uygun değildir. Bu nedenle kontrol bloğunda kullanılmak üzere Filtre ile Evirici/Doğrultucu arasındaki akımın ortalama değeri 250 mA olmasına karşın Filtre akımından dolayı  $I_{dc}$ 'nin değeri daha yüksektir.



Şekil-8. Volan Benzetim Modeli

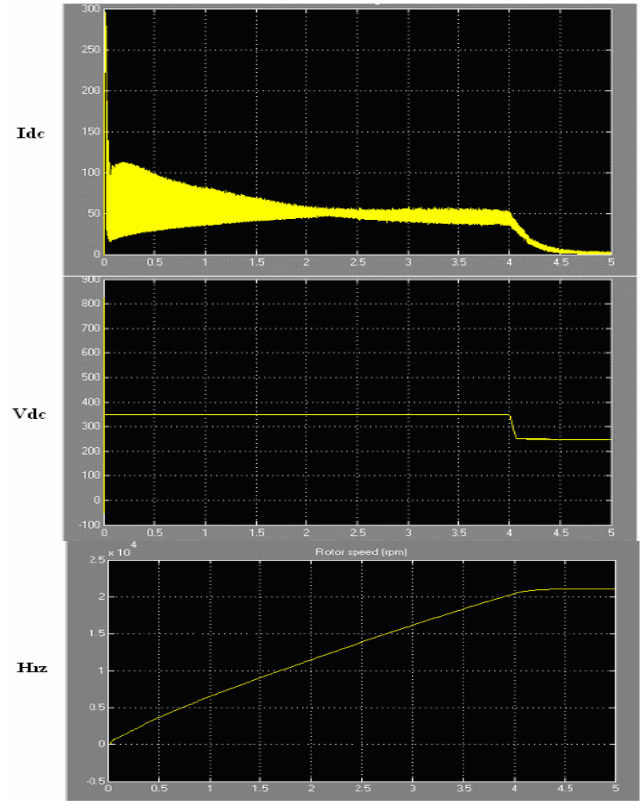
Simülasyonda 4 saniye süreyle volan motor fazında çalıştırılarak hızı yaklaşık 21.000 rpm değerine yükseltilmiştir. Bu çalışma süresince motor akımının ortalama 50 A olduğu gözlenmiştir. Dördüncü saniye sonunda "boşalım" evresi başlamış ve FDAM sabit elektrik yükünü beslemeye başlamıştır. Bu evrede 1 saniye boyunca DA hat geriliminin referans değer olan 250 V'da tutulduğu gözlenmiştir. "Boşalım" evresindeki eşdeğer devre Şekil-9'da görülmektedir.



Şekil-9. "Boşalma" Evresi Eşdeğer Devresi

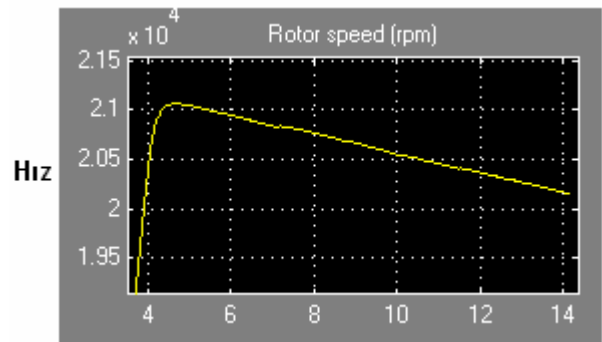
Benzetim çalışmalarında kullanılan motor parametreleri aşağıda verilmiştir:

- $R_s$  (stator direnci) = 0.06 ohm
- $L_s$  (stator endüktansı) = 139e-6 H
- Mıknatıs akısı = 0.0141 Wb
- J (eylemsizlik momenti) = 0.0153 kg.m<sup>2</sup>
- B (sürtünme katsayısı) = 1e-4 N.m.s
- P (kutup çifti) = 4

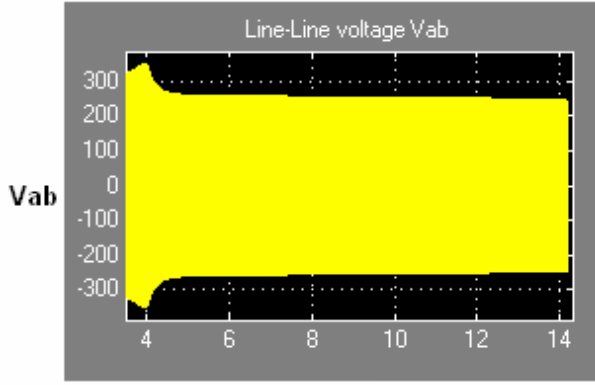


Şekil-10. FDAM'ye Ait Akım, Gerilim ve Hız Grafikleri

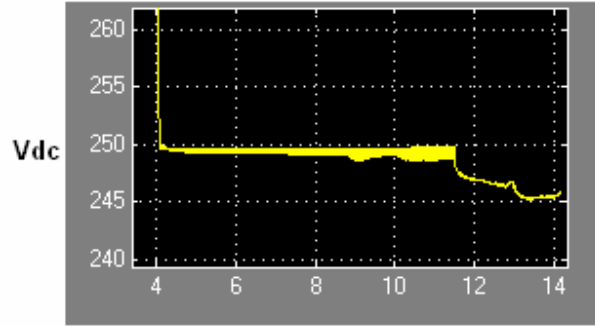
Dördüncü saniyede motorun giriş enerjisi bir miktar düştükten sonra tamamen kesilmekte ve FDAM bir jeneratör olarak kullanılmaktadır. Yaklaşık 21.000 rpm değerine ulaşan motor hızı, giriş enerjisi tamamen kesildiği andan itibaren sürtünme ve elektrik yükünden dolayı düşmeye başlayacaktır (Şekil-11.a). Jeneratör çıkışı faz-faz arası gerilimi ( $V_{ab}$ ) boşalım evresinde zıt EMK değerine düşmektedir. Zıt EMK değeri de zamanla azalmaktadır (Şekil-11.b). Zıt EMK'nın tepe değeri yaklaşık 11.5nci saniyede 250 V'un altına düşmekte ve bu andan itibaren DA hat regülasyonu yapılamamaktadır (Şekil-11.c).



a) Boşalım Evresi Motor Hızı



b) Boşalım Evresi Faz-Faz Gerilimi



c) Boşalım Evresi DA Hat Gerilimi

Şekil-11. Boşalım Evresi

#### 4. Sonuçlar

Belirtildiği gibi enerji saklayabilen jiroskopların kimyasal bataryalara bir çok üstünlüğü mevcuttur. Şu an deneme aşamasında olan ESMKJ uygulamalarının gerçek hedefi uzay araçlarını tamamen kimyasal bataryalardan kurtarmaktır. Kimyasal bataryalardan ESMKJ sistemlerine geçiş sürecinde ESMKJ'lerin kimyasal bataryalara yardımcı güç kaynakları olarak kullanılması düşünülmektedir. Böylece geçiş sürecinde kimyasal bataryaların boyutları ve ağırlıkları azaltılacaktır.

Manyetik rulmanların ve rulmansız sürücü sistemlerinin gelişimi ile sürtünmeden doğan kayıplar en aza indirilmekte ve elektrik motorları çok daha düşük enerji kullanılarak daha yüksek hızlara çıkarılabilmektedir. Böylece "boşalım" evresinde enerji saklayabilen jiroskoptan daha yüksek verimle enerji elde etmek mümkün olmaktadır. Bu da uzay araçlarındaki boyut ve ağırlık sınırlaması bakımından önemli bir gelişme sağlamaktadır.

#### 5. Kaynakça

- [1] Kenny, B., Kascak, P.E., Hofmann, H., Mackin, M., Santiago, W., Jansen, R., "Advanced Motor Control Test Facility for NASA GRC Flywheel Energy Storage System Technology Development Unit", IECEC2001-AT-11, 2001
- [2] Kenny, B., Kascak, P.E., "Sensorless Control of Permanent Magnet Machine for NASA Flywheel Technology Development", IECEC 2002 20072, 2002

- [3] Kascak, P.E., Kenny, B., Dever, T.P., Santiago, W., Jansen, R.H., "International Space Station Bus Regulation with NASA GRC Flywheel Energy Storage System Development Unit", NASA/TM-2001-211138, 2001
- [4] Kenny, B., Kascak, P.E., Jansen, R.H., Dever, T.P., Santiago, W., "Control of a High-Speed Flywheel System for Energy Storage in Space Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No.4, 2005
- [5] Kascak, P.E., Jansen, R.H., Kenny, B., Dever, T.P., "Single Axis Attitude Control and DC Bus Regulation with Two Flywheels", NASA/TM-2002-211812, 2002
- [6] Kenny, B., Jansen, R.H., Kascak, P.E., Dever, T.P., Santiago, W., "Integrated Power and Attitude Control with Two Flywheels", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol.41, No.4, 2005
- [7] Kenny, B., Kascak, P.E., "DC Bus Regulation With a Flywheel Energy Storage System", 2003 IEEE
- [8] R., Fasoulas, S., "Methology for the Development of Combined Energy and Attitude Control Systems for Satellites", ELSEVIER, Aerospace Science and Technology, 2002
- [9] Kenny, B., Santiago, W., "Filtering and Control of High Speed Motor Current in a Flywheel Energy Storage System", NASA/TM-2004-213343, 2004 Varatharajoo,
- [10] Krishnan, R., "Electric Motor Drives", 2001 Prentice Hall, pp.513-614