

UYDU YÖNELİM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ELEKTRİK MOTORLARININ DENETİMİ İÇİN YENİ BİR AKIM REFERANSLI SÜRME YÖNTEMİ

Kutlay AYDIN* ve **M. Timur AYDEMİR****

*TUSAŞ – Türk Havacılık ve Uzay Sanayii, Ankara

** Elektrik ve Elektronik Müh. Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06750, Ankara
kaydin@tai.com.tr, aydemirmt@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 07.04.2010; Kabul/Accepted: 28.06.2010)

ÖZET

Moment Kontrol Jiroskopları (MKJ) ve Tepki Tekerlekleri (TT) uydu yönelim eyleyicileri olarak kullanılan donanımlardır. Temelde elektrik motoru ve volandan oluşan bu sistemlerin denetimi, yönelim kontrolü ve uydu güç sisteminin sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır. Volan hızının doğruluğu ve kontrol kararlılığı, uydu yönelim kararlılığını doğrudan etkilemektedir. Bunun için hız denetimi yapılan bir motorun kullanılması uygundur. Ayrıca hız denetimi yapılan motor, harici bozuntulara karşı da gürbüz bir yapı oluşturmaktadır. Fakat hız denetimi yapılan motorda, harici bozuntu sonucunda büyük akım salınımları oluşabilmektedir. Bu da uydu güç sistemi açısından istenmeyen bir durumdur. Klasik akım denetimiyle sürülen motor, harici bozuntulara karşı dayanıksızdır. Bu çalışmada, söz konusu sistemlerde kullanılan motorlar için hız referansı ve klasik akım referansı yöntemleriyle sürme uygulamaları normal çalışma koşulları için ve bozuntulu durumlar için uygulanmıştır. Daha sonra, her iki yöntemin avantajlarını içeren yeni bir akım yöntemi tanımlanmış ve uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Uydu yönelim eyleyicisi; moment kontrol jiroskobu; tepki tekerleği; fırçasız doğru akım motoru; akım referanslı motor sürme.

A NOVEL CURRENT REFERENCE DRIVE METHOD FOR THE CONTROL OF ELECTRIC MOTORS USED IN SATELLITE ATTITUDE CONTROL SYSTEMS

ABSTRACT

Control Moment Gyroscopes (CMG) and Reaction Wheels (RW) are systems used for satellite attitude control. These systems basically consist of an electric motor and a flywheel. Their control is very critical for the attitude control and health of satellite power system. Accuracy and control stability of the flywheel speed directly affect the stability of satellite attitude control. Therefore a speed control is required for the motor. It is also required that speed controlled motor has robustness against external disturbances. However, if only speed control is utilized large current oscillations occur when there are disturbances. This causes undesired effects on the power system. On the other hand, motors driven by classical current control methods are also ineffective against disturbances. Classical current reference and speed reference based drive methods are applied to a motor in this paper for both normal operation conditions and disturbed operation conditions. Then a new current reference drive technique that incorporates the advantages of both methods is proposed and tested.

Keywords: Satellite attitude control actuator; control moment gyroscope; reaction wheel; brushless DC motor; motor driven by current reference.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tepki Tekerlekleri (TT) ve Moment Kontrol Jiroskopları (MKJ) en temel uydu yönelim

eyleyicileridir. TT'ler momentum takas prensibine göre çalışırlar. Bir volanı sabit hızda döndüren elektrik motoru, yönelim ihtiyacı doğduğunda değişken hızda hareket etmektedir. Volanın açıl

momentumunun değişmesi, (momentumun korunumu yasasına göre) uydunun hareket etmesine neden olmaktadır [1]. TT'lerde volan motoru, akım referansı veya hız referansı ile sürülmektedir. Volanı döndüren elektrik motoru akım (tork) referansı ile sürüldüğünde, öngörülen tork kayıpları ve bozuntular dikkate alınarak akım referansı oluşturulur. Öngörülmemiş bozuntuların oluşmadığı koşullarda, elektrik motorunun akım (tork) referansı ile sürülmesi yeterlidir. Fakat öngörülmemiş bozuntular her zaman mevcuttur ve sistem performansını olumsuz yönde etkilerler. Bu nedenle uygun bir yönelim sağlamak için volan hızı ölçülerek hız denetimi yapılması veya yönelim performansına göre akım referansının ayarlanması gerekmektedir [2].

MKJ'ler, jiroskobik tork etkisini kullanarak uydu yönelimini sağlayan sistemlerdir. Jiroskobik tork, dönen bir volanın, dönme eksenine dik olan başka bir ekseninde (şaft eksenine) döndürülmesi ile elde edilir. Sabit hızlı MKJ'lerde volan hızı sabittir ve yönelim kontrolü, şaft ekseninin hızının denetimi ile sağlanır. MKJ'ler, bazı momentum değerlerinde teklik problemi ile karşılaşır. Bu problemi aşmak için kullanılan yöntemlerden bir tanesi, değişken hızlı MKJ'dir. Değişken hızlı MKJ'lerde, önceden tanımlanmış teklik bölgelerinde volanın hızı ve dolayısıyla açısal momentumu değiştirilir [3]. MKJ volan motorları, akım referansı veya hız referansı ile sürülmektedir. TT'ler için anlatılan öngörülmemiş bozuntu, MKJ'ler için de geçerlidir. Sabit hızlı veya değişken hızlı MKJ'lerde, öngörülmemiş bozuntulara karşı gürbüz bir sistem oluşturabilmek için volan hızının kontrol sistemine geri beslenmesi, motor denetiminin doğrudan hız referansı ile yapılması veya yönelim performansına göre akım referansının ayarlanması gerekmektedir.

Son yıllarda Enerji Saklayabilen Eyleyici (ESE) çalışmaları hız kazanmıştır. Bu çalışmalarda amaç, yönelim amacıyla kullanılan eyleyicilerin volanlarında, enerjisinin kinetik olarak depolanmasıdır. Mekanik batarya olarak tasarlanan bu sistemlerden, uygun bir zamanda enerjinin (elektrik enerjisi olarak) alınması amaçlanmaktadır [2]. Bu tür eyleyiciler değişken hızlı olmak zorundadır. Güneş panellerinden enerji elde edilebildiği aydınlık bölgede, uydu güç sistemi aracılığıyla güneş panellerinden beslenen volan motorunun hızında artış, karanlık bölgede ise eyleyiciden güç çekildiği için volan hızında düşüş gerçekleşecektir [2]. Enerji Saklayabilen MKJ'lerde (ESMKJ) hıza bağlı bir motor denetimi gerekmez. Çünkü uydunun bulunduğu bölgeye (aydınlık veya karanlık bölge) bağlı olarak volan hızı belirli bir aralıkta sürekli değişecektir. Şaft denetimi ve dolayısıyla uydu yönelimi için volan hızının bilinmesi yeterlidir. Enerji Saklayabilen TT'lerde ise uydunun bulunduğu bölgeye bağlı olarak MKJ'lerde olduğu gibi volan hızının sürekli artması veya azalması durumu geçerli olmayabilir. Çünkü

TT'lerde yönelimin sağlanabilmesi için volan hızının değiştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Enerji Saklayabilen TT'lerde uygun bir yönelim sağlamak için volan hızı ölçülerek hız denetimi yapılması veya yönelim performansına göre akım referansının ayarlanması gerekmektedir.

Uydu yönelim sisteminin denetimi, uydu güç sisteminin performansı açısından da değerlendirilmelidir. Buraya kadar yapılan açıklamalarda, eyleyici motorları için en uygun sürme yönteminin hız denetimi olduğu görülmektedir. Hız denetimi yapılan bir elektrik motoru, harici bozuntulara karşı gürbüz bir davranış göstermesine karşın, güç sisteminde de (bozuntunun mertebesine bağlı olarak) oldukça yüksek geçici durumlar oluşturabilmektedir. Anlık olarak güç ihtiyacının değişmesi, güç sistemi açısından istenmeyen bir durumdur [1]. Bu açıdan bakıldığında, uydu eyleyici motorlarında hız denetimi cazibesini kaybetmektedir.

Bilinen tüm gözlem uydularının yönelim sistemlerinde tepki tekerlekleri kullanılmaktadır. Bu nedenle literatürde, tepki tekerlekleri için motor denetim yöntemlerine dair çalışmalar görülmektedir. [4] numaralı makalede hız denetiminin akım denetimine kıyasla daha kararlı olduğu belirtilmiş ve ortak mod ve diferansiyel mod gürültülerini minimuma indirmek için yeni bir evirici yapısı önerilmiştir. [5] numaralı makalede ise klasik 2 serbestlik dereceli (DOF) denetleyici ile geri beslemeli rezonanslı denetleyici birleştirilerek yeni bir denetleyici oluşturulmuştur. Önerilen bu yeni denetleyici sayesinde faz akımlarının referansı daha kararlı ve düşük hatayla takip etmesi sağlanmıştır. Ayrıca önerilen yapının daha gürbüz bir akım/tork denetimi sağladığı gösterilmiştir.

Uydular, bozuntulara karşı oldukça duyarlı sistemlerdir. Uydu içindeki tüm bozuntu kuvvetleri, uydu konumu için olumsuz girdiler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle uydu alt birimlerinin minimum bozuntu üretmesi büyük önem taşımaktadır. Uydularda, bozuntu kuvveti oluşturan bileşenlerden birisi de yönelim eyleyicileridir (teпки tekerlekleri ve moment kontrol jiroskopları). Bu eyleyicilerin en önemli elemanları, elektrik makinası ve sürücüsüdür. Elektrik makinasından kaynaklanan bozuntu kuvvetlerinin minimuma indirilmesi önem taşımaktadır. Motora bağlı volanın hızındaki düzgün olmayan değişimler, sistem momentumunda da düzgün olmayan değişimlere neden olmaktadır. Bu da yönelim kararlılığı üzerinde önemli sorunlar oluşturmaktadır. Ayrıca motor akımında meydana gelecek harmonikler ve değişimler, diğer elektronik sistem ve bileşenlerin performansını olumsuz yönde etkilemektedir [4,5,6].

Moment kontrol jiroskoplarında yönelim için oluşturulan tork, volan hızıyla doğru orantılıdır ($T_y \sim$

ω_m). Volan hızındaki salınım, doğrudan yönelim torkunda salınım oluşturmaktadır [7].

Hız denetimi yapılan sabit miktatsız motorlarda, hız ve buna bağlı olarak akım salınımlarını minimize etmek için farklı çalışmalar yapılmıştır. Yapay sinir ağları, bulanık mantık ve optimal kontrol yöntemleri ile bu sorununun iyileştirildiği rapor edilmektedir [8-10]. Özellikle sabit çalışma koşullarında hız salınımlarına bağlı akım/tork salınımlarından kurtulmak için mekanik yük tabanlı bir referans akım tahmin algoritması önerilmiştir [8]. Değişken hız koşullarında referans akım tahmini oldukça zordur. Motor, sabit hız değerine ulaşıncaya kadar klasik hız ve akım denetim yöntemleri ile sürülürken, sabit hız ulaşıldıktan sonra (sabit hızı korumak için) akım referans tahmini yapılmaktadır. Bunun yanında hız da ölçülerek doğruluğu kontrol edilmektedir. Sabit çalışma koşullarında referans akım tahmini için yapay sinir ağları kullanılmıştır [8].

Bulanık mantık ve optimal hız denetleyici kullanılması durumunda PI hız regülatörüne kıyasla avantajlar sağlandığı rapor edilmektedir [9, 10]. Bulanık mantık hız denetleyicisinin ayrıca yük bozuntuları ve parametre değişimlerine karşı da gürbüz bir yapı oluşturduğu görülmüştür [9]. Özellikle yük değişimlerine karşı gürbüzlük oldukça büyük önem taşımaktadır. Çünkü uydu yönelim eyleyicilerinde volana etki eden çeşitli bozuntular mevcuttur. Önerilen optimal kontrol yönteminde de sabit çalışma koşulları dikkate alınmıştır. Hız denetleyicisi için klasik PI denetleyici kullanılmıştır. Akım denetimi ise, hız ve gerçek akım değerleri kullanılarak optimum akım referansı üretilmesi temeline dayanmaktadır [10].

Ayrıca hız/tork regülasyonu için önerilen bir sayısal kontrol yönteminde, hız referansına bağlı olarak mekanik yük tabanlı referans akım hesabı yapılmakta ve akım regülasyonu gerçekleştirilmektedir [11]. Doğrudan hız denetimi yapmak yerine farklı çalışma durumlarında akım denetimi yapılmaktadır. Çalışma bölgesinde iki farklı durum tanımlanmıştır (yüksek hız ve düşük hız durumları). Gerçek hız referans hızın altındaysa “yüksek hız” durumu, üstündeyse “düşük hız” durumu seçilmektedir. Motor tork denklemi kullanılarak elde edilen referans akım üzerinden sisteme iki farklı şekilde denetim uygulanmaktadır. Birinci yöntemde, akım genliği sabit olup iletim süresi kontrol edilmektedir. Böylece ortalama akım değeri ayarlanmaktadır. İkinci yöntemde ise doğrudan akım genlik regülasyon yöntemi kullanılmıştır. Önerilen yöntemle hız salınımlarının minimize edildiği gösterilmektedir [11].

Bir başka çalışmada, basit kontrol algoritması ve dengeli faz akımları oluşturma avantajları nedeniyle ortak DA işaret tabanlı akım denetim algoritması kullanılmıştır [12]. Faz akımları direnç algılayıcılar

tarafından algılanmaktadır. Her faz akımı için referans üretmek ve bunları gerçek akımlarla karşılaştırmak yerine akımın tepe değeri elde edilmektedir. Üretilen referans akım da faz akımlarının tepe değerini ifade etmektedir. Akımların faz dağılımlarını yapmak için ise motor Hall algılayıcıları kullanılmaktadır. Bu yöntemin en büyük avantajı, akım kontrol sistemini basitleştirmesidir.

Bu makalede, uydu yönelim eyleyicisi sisteminin tanımı yapılmış, alt bileşenler ve sistem mimarisi açıklanmıştır. Daha sonra motor birimine akım denetiminin uygulanması açıklanmış, akım denetleyici tasarımı ve referans akımın tahmin yöntemi aktarılmıştır. Bu bilgiler ışığında sisteme hız denetim döngüsünün eklenmesi durumu incelenmiştir. Hız denetimi için kullanılan PI denetleyici parametrelerinin optimizasyon çalışması sunulmuştur. Son olarak elde edilen sistemin Bode çizimleri yapılarak, kararlılığı ve sistem tepkisi incelenmiştir. Ayrıca, geçici bozuntulara karşı klasik akım denetimi yönteminden daha gürbüz olan ve hız denetimi gibi güç sisteminde anlık değişimlere neden olmayan bir akım denetim yöntemi önerilmiştir.

Tasarımı yapılan sistem mimarileri kullanılarak deneysel çalışma yapılmıştır. Önce, belirgin bir harici bozuntu olmadan, hız denetimi yapılan sistemin hız ve akım grafikleri incelenmiştir. Arkasından, çalışmanın herhangi bir anında volana harici bir bozuntu torku uygulanmıştır. Bu durumda motorun hız ve akım grafikleri incelenmiştir. Daha sonra, aynı koşullarda (bozuntu torkunun olmaması ve olması durumları için) klasik akım denetimi yapılan sistemin hız ve akım grafikleri incelenmiştir. Son olarak önerilen akım denetim yöntemi için aynı koşullarda deneysel çalışma yapılmış ve sonuçları aktarılmıştır. Sonuç olarak, uygulanan sürüş yöntemlerinin gürbüzlüğü irdelenmiştir ve eyleyici sistemlerine uygunluğu tartışılmıştır. Tepki tekerleklerinde volan motoruna tanımlı bir hız profili uygulanmadığı için söz konusu yöntemin TT’lerde kullanımı önemli bir avantaj getirmemektedir. Fakat bu yöntemin MKJ’ler için önemli bir avantaj sağladığı görülmüştür. Uydularda MKJ kullanımı yaygın olmadığı için literatürde, bu detayda bir çalışmaya rastlanmamıştır. Önerilen yöntem, özellikle tanımlı bir hız profilinin kullanıldığı eyleyiciler olan MKJ’lerde avantaj sağlamaktadır. MKJ’lerde hız profili önceden tanımlanır ve hız çevrimi eyleyici bünyesinde otonom olarak sağlanır. Tepki tekerleklerinde tanımlı bir hız profili söz konusu değildir. Uydu yönelim ihtiyacına göre volan hızı, üst sistem tarafından değiştirilir. Yönelim ve hız anlık olarak ölçülerek ihtiyaca göre referans büyüklük (hız veya akım) değiştirilebilir.

2. UYDU YÖNELİM EYLEYİCİSİ (SATELLITE ATTITUDE CONTROL ACTUATOR)

Bir uydu yönelim eyleyicisi temelde bir elektrik makinası (volan motoru), bu makinaya entegre bir

volan ve elektrik makinasının sürücüsünden oluşmaktadır. Elektrik makinasının sürüş yöntemi, yönelim başarısını ve diğer alt sistemlerle olan elektromanyetik etkileşimi doğrudan etkilemektedir.

Fırçasız yapıları, değişken hız denetim kolaylığı ve birim hacimden maksimum verim alınabilmesi gibi avantajlarından dolayı yönelim eyleyicilerinde fırçasız doğru akım motorları (FDAM) veya sabit mıknatıslı senkron motorlar (SMSM) kullanılmaktadır [13, 14]. FDA motorlar, oldukça basit olan 6 basamaklı anahtarlama yöntemi ile sabit tork üretebilme avantajına sahiptirler. Sabit mıknatıslı senkron motorların da vektör kontrol yöntemi ile performansı artırılabilir. Fakat güvenilirlik ve gürbüzlük açılarından uzay uygulamalarında basit sistemler ve algoritmalar tercih edilmektedir. Bu çalışmada da FDAM ve 6 basamaklı anahtarlama algoritması kullanılmıştır.

Çalışmada, 2 kutuplu, 50 W (Maxon EC22) bir FDAM ve DSP tabanlı MCK2812 sürücü kullanılmıştır. Kullanılan motorun anma çalışma gerilimindeki (32 V) hızı 38.000 rpm'dir. Yönelim amacıyla momentum depolamak için motora, $4,8 \times 10^{-4}$ kg.m² atalet momentine sahip bir volan entegre edilmiştir. Kullanılan sürücü donanımı için amaca uygun denetim algoritması tasarlanmıştır. Motor sürücü ve kontrol mimarisi Şekil 1'de görülmektedir.

Önerilen akım denetimi algoritmasında, normal çalışmada "SW" anahtarı "Im_ref" bloğunu seçiyorken, hız döngüsü sadece aşırı hız koruması amacıyla kullanılmıştır. Hız denetimi algoritmasında ise "SW" anahtarı "PI Denetleyici (Hız Denetleyicisi)" bloğunun çıkışı seçmektedir.

3. VOLAN MOTORUNUN AKIM REFERANSIYLA SÜRÜLMESİ (CURRENT REFERENCE BASED DRIVE OF THE FLYWHEEL MOTOR)

3.1. Akım Denetleyicisinin Tasarımı (Current Controller Design)

Bu yöntemde volan motoru, doğrudan algoritmaya girilen akım referansı ile sürülmektedir. Referans akımla gerçek akım değerleri karşılaştırıldıktan sonra, akım denetleyicisi tarafından gerilim referansı oluşturulmaktadır. Denetleyici katsayılarının uygun olarak ayarlanabilmesi için sistem transfer fonksiyonu kullanılmıştır. Bunun için FDA motorun, elektriksel ve mekanik denklemleri kullanılmıştır.

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L = K_m I_m \quad (1)$$

$$V = iR + L \frac{di}{dt} + e = iR + L \frac{di}{dt} + K_e \omega_m \quad (2)$$

T_{em} : Motorun ürettiği elektromekanik tork (Nm)

J : Rotor ve volanın toplam atalet momenti (kg.m²)

ω_m : Motor açısal hızı (rad/s)

B : Viskoz sürtünme (Nms)

T_L : Mekanik yük torku(Nm)

K_m : Motorun tork katsayısı (Nm/A)

I_m : Motor fazının tepe akımı (A)

i : Motor faz akımı (A)

V : Motor giriş gerilimi (V)

R : Motor faz direnci (ohm)

L : Motor faz endüktansı (H)

e : Zıt-EMK (V)

K_e : Motorun zıt-EMK katsayısı (V/(rad/s))

Elektriksel ve mekanik denklemlerin Laplace dönüşümü alınır, frekans tanım alanında aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V(s) = (R + sL)I(s) + K_e \omega_m(s) \quad (3)$$

$$(sJ + B)\omega_m(s) + T_L = K_m I(s) \quad (4)$$

Eşitlikler kullanılarak girişi gerilim (V), çıkışı ise açısal hız (ω_m) olan FDA motor modeli elde edilir. Bu model Şekil 2'de gösterilmektedir. Model, sabit alan uyarımlı DA motorun modeli ile aynıdır.

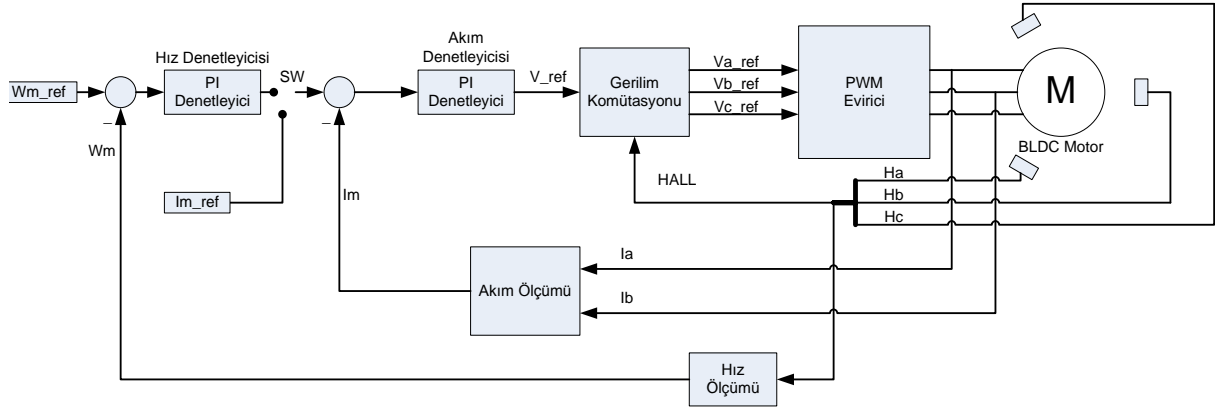
Sisteme akım denetim döngüsü eklendiğinde Şekil 3'teki model elde edilir. Modelde görülen $G_{ci}(s)$ bloğu akım denetleyicisini, K_{pi} parametresi oransal katsayıyı ve K_{ii} parametresi de integral katsayısını ifade etmektedir.

Modelde sadece motorun elektriksel transfer fonksiyonu ($G_{me}(s)$) kullanılmaktadır. Çünkü akım referansıyla denetimde amaç, motor akımını regüle etmektir. Motor akımının (torkunun) uygun bir şekilde regüle edilmesi durumunda, motor hızının da minimum salınımla değişeceği bilinmektedir. Motor hızının sistem denetimine etkisi ise akım referansının elde edilmesinde görülmektedir. Akım referansının elde edilmesi, Bölüm 3.2'de kısaca anlatılmaktadır. Ayrıca modelde görülen zıt-EMK (e), motor hızına bağlı bir büyüklüktür ve akım döngüsüne kıyasla oldukça yavaş dinamiklere sahiptir. Bu nedenle transfer fonksiyonu oluşturulurken zıt-EMK harici bir bozuntu olarak kabul edilmiş ve akım döngüsü dinamiklerine katkısı ihmal edilebilir olduğu için ihmal edilmiştir [15].

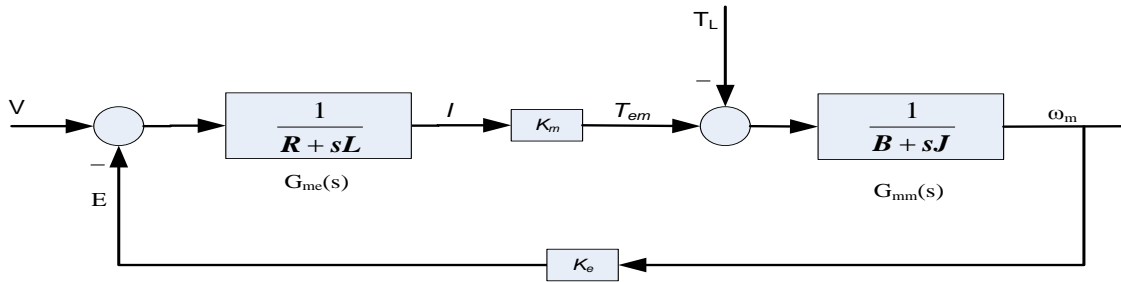
Şekil 3'te görülen modelin transfer fonksiyonu [$G_{mi}(s)$], Eşitlik 5'te verilmektedir.

$$G_{mi}(s) = \frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{1 + s \frac{K_{pi}}{K_{ii}}}{\frac{L}{K_{ii}} * \left[\frac{K_{ii}}{L} + \frac{K_{pi} + R}{L} s + s^2 \right]} \quad (5)$$

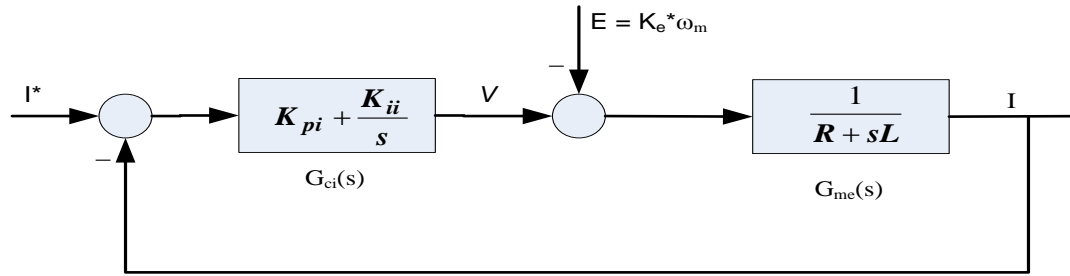
Sistemin karakteristik polinomunu, standart 2. mertebe sistem karakteristik polinomuna benzetilerek denetleyici katsayıları tespit edilmiştir.



Şekil 1. Motor sürücü ve denetim mimarisi (Motor drive and control architecture)



Şekil 2. FDA motorun modeli (BLDC Motor modeli)



Şekil 3. Sisteme akım denetim döngüsünün eklenmesi (Addition of the current control loop to the system)

$$s^2 + (2\zeta\omega_o)s + \omega_o^2 = s^2 + \left(\frac{K_{pi} + R}{L}\right)s + \frac{K_{ii}}{L}$$

$$\Rightarrow K_{ii} = L\omega_o^2 \quad (6)$$

$$K_{pi} = 2\zeta\omega_o L - R$$

K_{pi} : Akım denetleyicisinin oransal katsayısı
 K_{ii} : Akım denetleyicisinin integral katsayısı
 ω_o : Sistemin sönümsüz (doğal) salınım frekansı (rad/s)
 ζ : Sönümlenme oranı

Kullanılan elektrik motorunun faz endüktansı yaklaşık 25 μH 'dir. Sürücüye harici olarak 500 μH değerinde faz endüktansları eklenmiştir. Dolayısıyla elektriksel zaman sabitini oluşturan endüktansın değeri 525 μH 'dir. Motorun faz direnci yaklaşık 0,18 ohm olmasına karşın kullanılan endüktans ve kablolar nedeniyle ölçülen direnç değeri yaklaşık 0,5 ohm'dur. Bu durumda sistemin elektriksel zaman sabiti 1050 μs olarak elde edilir. Bir sistemin doğal salınım frekansı

seçilirken istenen sistem dinamikleri, kontrol edilecek sistemin kendi dinamikleri ve örnekleme frekansı dikkate alınmalıdır. Yönelim eyleyicileri, ihtiyaç duyulan sistem dinamikleri açısından değerlendirildiğinde oldukça yavaş sistemlerdir. Bu nedenle çok yüksek doğal salınım frekansı seçimine gerek yoktur. Ama sistemin kendi dinamikleri dikkate alındığında, daima akım döngüsünün doğal salınım frekansı, hız döngüsünün doğal salınım frekansından büyük olmalıdır [15]. Sistemin akım döngüsünün doğal salınım frekansı (ω_o) 2000 rad/s seçilmiştir. Sistem tepkisinin hızlı bir şekilde sönümlenmesi için kritik sönümlü tepki ($\zeta=1$) seçilmiştir. Bu koşullar altında akım denetleyicisinin katsayıları aşağıdaki şekilde elde edilmiş olur.

$$K_{ii} = (525 \times 10^{-6})(2000)^2 = 2100$$

$$K_{pi} = 21 \times 2000 (525 \times 10^{-6}) - 0.5 = 1,6$$

3.2. Akım Referansının Elde Edilmesi (Generating the Current Reference)

Değişken hızlı yönelim eyleyicilerinde volan hızının bilinmesi ve volan ivmesinin doğru kontrol edilmesi yönelimin sağlığı açısından önem taşımaktadır. Volan hızı, uygun algılayıcı veya tahmin yöntemleriyle elde edilmektedir. Bu çalışmada volan hızı, motora entegre Hall algılayıcılar kullanılarak hesaplanmaktadır.

Akım referansı ile sürme yönteminde en önemli konu, motor ivmesinin istenen hassasiyette ayarlanmasıdır. Bu çalışmada kullanılan yöntemde, ivmenin denetimi için motor tork bileşenlerinin uygun bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Uygun akım referansının tespiti için sistemin güç dengesi kullanılmıştır.

$$E_m * I_m = T_{em} * \omega_m = P_{out} \quad (7)$$

Elektrik makinasının ürettiği tork için elektromekanik tork eşitliği kullanılmıştır.

$$T_{em} = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (8)$$

Volan sisteminde mekanik yük olmadığından eşitlikteki T_L bileşeni sıfır alınmıştır.

$$I_m = \frac{(J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m)\omega_m}{E_m} = \frac{P_{acc} + P_{fr} + P_{wnd}}{E_m} \quad (9)$$

E_m : Zıt-EMK'nın tepe değeri (V)

I_m : Motor faz akımının tepe değeri (A)

P_{out} : Toplam çıkış gücü (watt)

P_{acc} : Hızlanma için harcanan güç (watt)

P_{fr} : Sürtünme kayıpları (watt)

P_{wnd} : Rüzgar kayıpları (watt)

Normalde sistem vakum ortamında çalışacaktır. Bu nedenle rüzgar kayıplarının (P_{wnd}) modele dahil edilmesi gerekmez. Fakat mevcut test düzeneği vakum ortamında olmadığı için bu çalışmada yapılan deneylerde rüzgar kayıpları da hesaplanmıştır. Manyetik yatak kullanılması durumunda mekanik sürtünme kayıplarının (P_{fr}) da modellenmesi gerekmektedir. Sürtünme ve rüzgar kayıplarının doğru hesaplanması durumunda ivmelenmeye harcanan güç ifadesinde, gerekli minimum ve maksimum hız değerleri ile bu değişim için geçen süre Δt formüle girdi olarak sağlanıp uygun ivmelenme torku için akım referansı elde edilebilir.

Kullanılan akım referansının üretilmesi yöntemi temel alınarak, (geçici bozuntulara karşı) daha gürbüz bir yöntem önerilmektedir. Motoru sürmek için kullanılan akım referansı Eşitlik 9 ile elde edilmektedir. Eşitlik 9'da, kayıp torklarının hesaplanmasında motor hızının kullanıldığı

görülmektedir. Motora herhangi bir geçici bozuntu (torku) etki ettiğinde, motor hızı düşecektir ve yeni akım referansının hesaplanmasında o anki hız değeri kullanılacaktır. Bu da, harici bir kontrol girdisi olmaksızın motorun istenilen hız değerine asla ulaşamaması anlamına gelmektedir. Önerilen yöntemde, kayıp tork değerlerinin hesaplanmasında kullanılan hız, takip edilmesi istenen hız değeridir. Bu durumda, motora harici bozuntu uygulandığında dahi, motor istenilen hız profiline uygun tork (akım) referansını üretecektir.

4. VOLAN MOTORUNUN HIZ REFERANSIYLA SÜRÜLMESİ (SPEED REFERENCE BASED DRIVE OF THE FLYWHEEL MOTOR)

Bu uygulamada, Şekil 1'de görülen klasik hız denetimi kullanılmaktadır. Referans hız profili genellikle rampa şeklindedir ve yönelim görevinin detaylarına göre ivmesi değişmektedir.

Hız denetleyicisinin transfer fonksiyonu Eşitlik 10'da ve hız denetim döngüsünün dâhil edildiği FDA motor modeli Şekil 4'te görülmektedir.

$$G_{cw}(s) = K_{pw} + \frac{K_{iw}}{s} \quad (10)$$

K_{pw} : Hız denetleyicisinin oransal katsayısı

K_{iw} : Hız denetleyicisinin integral katsayısı

Sistemin toplam transfer fonksiyonu [$G_s(s)$] aşağıdaki şekilde elde edilir.

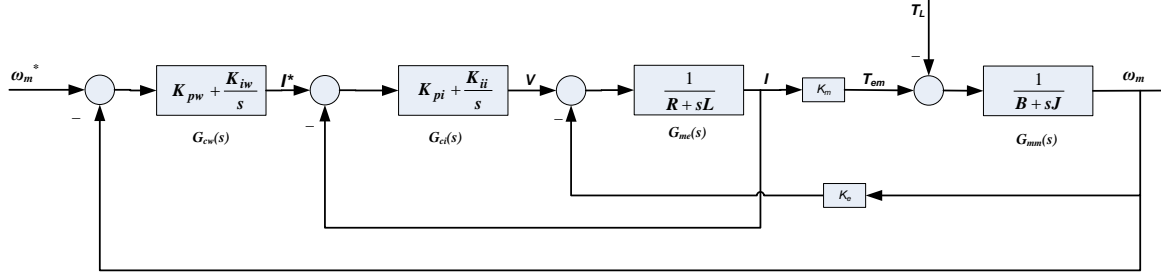
$$G_s(s) = \frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{1}{1 + s \left[\frac{B}{K_m K_{iw}} \right] + s^2 \left[\frac{RB}{K_m K_{ii} K_{iw}} \right]} \quad (11)$$

Elde edilen sistem, iki adet zaman sabitine sahiptir (elektiriksel ve mekanik zaman sabitleri) ve denetleyici katsayılarının ayarlanmasında yaygın olarak "double ratios" yöntemi kullanılmaktadır [14,15]. Bu yöntemde, transfer fonksiyonu genliğinin 1 olduğu bölgenin ($|G_s(s)| \approx 1$) büyütülerek, frekans bant aralığının genişletilmesi amaçlanmaktadır. Mevcut transfer fonksiyonu için yöntem aşağıdaki şekilde uygulanmaktadır.

$$\left[\frac{B}{K_m K_{iw}} \right]^2 = 2 \left[\frac{RB}{K_m K_{ii} K_{iw}} \right] \quad (12)$$

$$\Rightarrow K_{iw} = \frac{BK_{ii}}{2K_m R}$$

Ayrıca, denetleyici katsayılarının oranı (K_{pw}/K_{iw}), sistemin mekanik zaman sabitine (J/B) eşit alınmaktadır [15]. Bu eşitlik kullanılarak hız denetleyicisinin oransal katsayısı elde edilebilir.



Şekil 4. Model hız denetim döngüsünün eklenmesi (Speed control loop added system)

$$\frac{K_{pw}}{K_{iw}} = \frac{J}{B} \Rightarrow K_{pw} = \frac{JK_{ii}}{2K_m R} \quad (13)$$

Hız denetleyici katsayıları hesaplanırken motorun tork sabiti, veri sayfasından 7,85 mNm olarak alınmıştır. FAG firmasının verilerine göre 100°C rulman sıcaklığı ve 10000 rpm hızda yağın kinematik viskozitesi 13 mm²/s'dir. Rulman yağının viskozitesi, çevresel koşullara ve çalışma koşullarına bağlı bir değişkendir. Visköz sürtünme, (Nms cinsinden) aşağıdaki formülle elde edilmiştir [16].

$$B = \left[f_0 (v \omega_m)^{2/3} D_b^3 10^{-7} \omega_m \right] / \omega_m^2 \quad (14)$$

f_0 : Hıza bağımlı sürtünme katsayısı
 v : Rulman yağının kinematik viskozitesi (mm²/s)
 D_b : Rulmanın ortalama çapı (mm)

Kullanılan rulmanın ortalama çapı 23,5 mm'dir, hız bağımlı sürtünme katsayısı ise 1,3 olarak veri sayfasından elde edilmiştir. Bu koşullarda viskoz sürtünmesi 4,33x10⁻⁴ Nms olarak elde edilir. Bu büyüklük, çevresel ve çalışma koşulları ile oldukça sıkı ilişkili bir büyüklüktür. Fakat denetleyici katsayılarının tespiti için mertebesinin bilinmesi yeterli olacaktır.

$$K_{iw} = \frac{(4,33 \times 10^{-4}) 2100}{2(7,85e-3) 0,5} = 115,8$$

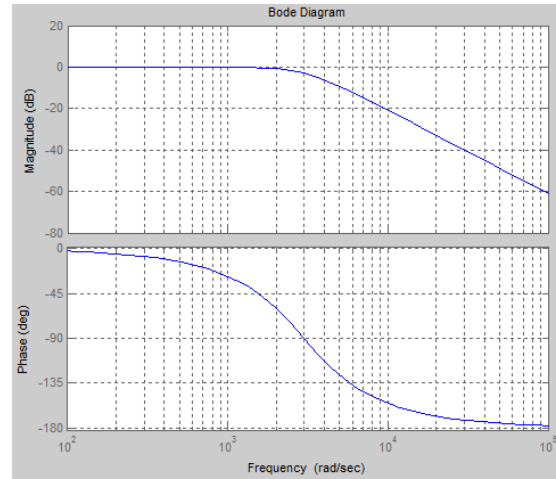
$$K_{pw} = \frac{(4,8 \times 10^{-4}) 2100}{2(7,85 \times 10^{-3}) 0,5} = 128,7$$

Elde edilen katsayılarla sistemin transfer fonksiyonu ($G_s(s)$) tekrar yazılabilir.

$$G_s(s) = \frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{1}{1 + (4,76 \times 10^{-4})s + (1,13 \times 10^{-7})s^2}$$

Elde edilen hız denetimli sistemin Bode diyagramı Şekil 5'te görülmektedir. Sistem kararlı bir yapıya sahiptir. Yaklaşık 2000 rad/s frekansına kadar transfer fonksiyonunun genliği 1'e eşittir. Bu da sistemin çıkışının, girişi aynen takip edebildiğini

göstermektedir. Genlik olarak sistem çıkışı, girişi takip edebiliyor olsa da giriş frekansına bağlı olarak faz farkı, herhangi bir faz kompanzatoru kullanılmadığı için mevcuttur. Köşe frekansında salınımlar gözlenmemektedir. Bode diyagramı, denetleyici katsayılarının uygun ayarlandığını göstermektedir.



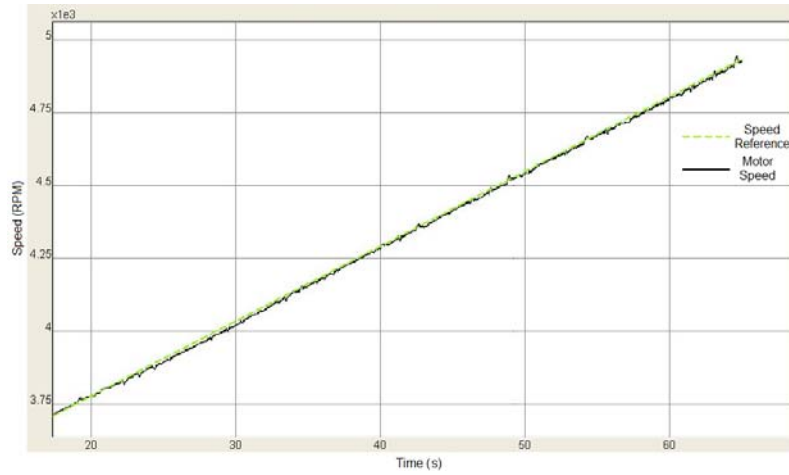
Şekil 5. Hız denetim modelinin Bode diyagramı (Figure 5. Bode plots of the speed controller)

5. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

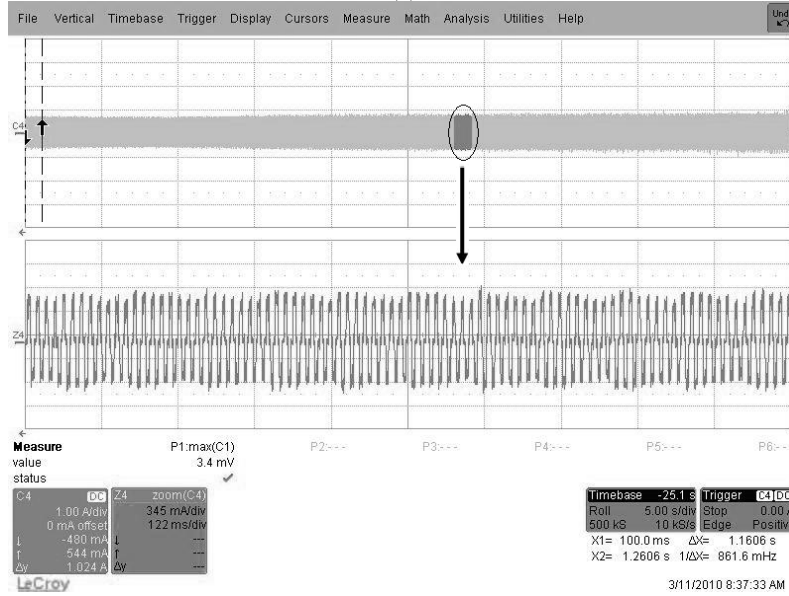
Yapılan deneysel çalışmada, aynı operasyon koşulları için volan motoru önce akım referansı ile ardından da hız referansı ile sürülmüştür. Operasyon süresince her iki sürme yönteminde de motorun 26,7 rpm/s ivme ile hızlanması beklenmektedir. Çalışmada, yukarıda katsayıları tespit edilen denetleyiciler kullanılmıştır.

5.1. Volan Motorunun Hız Referansı ile Sürülmesi (Speed Reference Based Drive of The Flywheel Motor)

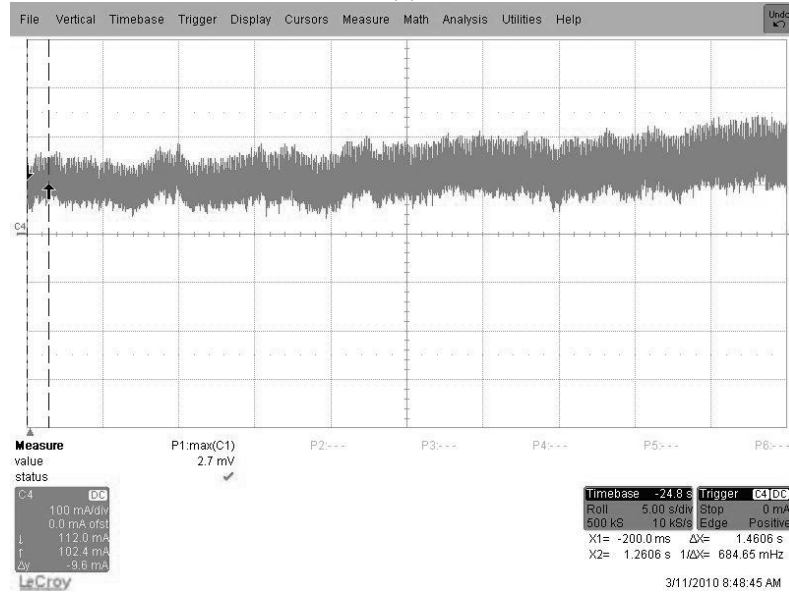
Şekil 1'de görülen mimari kullanılmış ve "SW" anahtarı ile "Hız denetleyicisi" bloğunun çıkışı seçilmiştir. Referans hız profili olarak, ivmesi 26,7 rpm/s olan bir rampa fonksiyonu oluşturulmuş ve bu referansla motor sürülmüştür. Söz konusu operasyon koşullarında motor hızı, faz akımı ve bara akımı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 6'da görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 6. Hız referansı ile sürülen motorun performans grafikleri, (a) Motor hızı, (b) Motor faz akımı (osiloskop ekran çıktısı, 1 A/div ve 345 mA/div (yakınlaştırılmış)), (c) Sürücü bara akımı (osiloskop ekran çıktısı, 100 mA/div) (Operation waveforms of the motor driven by speed reference: (a) Motor speed, (b) Motor phase current (oscilloscope screen shot, 1 A/div and 345 mA/div (zoom)), (c) Drive bus current (oscilloscope screen shot, 100 mA/div).)

Motorun, referans hız profilini başarılı bir şekilde takip ettiği görülmektedir. Maksimum hız salınımı, 20 rpm civarında ölçülmüştür. Faz ve bara akımlarının hıza bağlı olarak arttığı, faz akımının uygun bir şekilde regüle edildiği ve akım grafiklerinde anlık değişimlerin olmadığı görülmüştür.

Daha sonra volana harici bozuntu torku uygulanmış ve sistemin tepkisi gözlenmiştir. Söz konusu koşullarda motor hızı, faz akımı ve bara akımı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 7'de görülmektedir.

Elektrik motoru, harici bozuntuya karşı koyma eğilimi göstermektedir. Bozuntu uygulandığı anda volan hızı, referanstan yaklaşık 1000 rpm kadar uzaklaşmış, daha sonra, yaklaşık 40 saniye içinde hız referansını takip etmeye devam etmiştir. Bu sırada, doğal olarak faz ve bara akımlarında salınımlar gözlenmiş, fakat volan hızındaki geçici durum bittikten sonra akım da kararlı duruma ulaşmıştır. Akımdaki geçici durum salınımları uydu güç sistemi için istenmeyen bir durumdur. Bunu engellemek için düşük akım sınırı kullanılabilir, fakat yüksek hızlardaki akım ihtiyacı nedeniyle, bu yöntem de uygun değildir.

5.2. Volan Motorunun Akım Referansı ile Sürülmesi (Current Reference Based Drive of The Flywheel Motor)

Şekil 1'de görülen mimari ve akım referansının elde edilmesi için Eşitlik 9 kullanılmıştır. Sürtünme ve rüzgar kayıpları için aşağıda verilen ampirik formüller kullanılmıştır [16, 17]. Kayıp güçlerin birimleri watt olarak verilmiştir.

$$P_{fr} = \left[f_0 \left(v \frac{30}{\pi} \omega_m \right)^{2/3} D_b^3 10^{-10} \omega_m \right] + \left[\omega_m K_{fr} F D_b \right] \quad (15)$$

$$P_{wnd} = \frac{1}{64} C_M \rho \omega_m^3 D_b^5 \quad (16)$$

K_{fr} : Sürtünme katsayısı (0,001 – 0,005)

F : Rulmana etki eden kuvvet (N)

C_M : Tork sabiti

ρ : Havanın yoğunluğu (kg/m³)

D_b : Volan çapı (m)

Hızlanma torku için maksimum hız 10000 rpm ve minimum hız 2000 rpm seçilmiştir. Bu hız değişiminin 5 dakikada olması beklenmektedir. Bu koşullarda ivme ve hızlanma torku (T_{acc}) aşağıdaki şekilde elde edilir (hız değişimi doğrusaldır).

$$\frac{\Delta \omega}{\Delta t} = \frac{(10^4 - 2000)\pi / 30}{5 \cdot 60} = 2.8 \text{ rad} / \text{s}^2 \quad (26.7 \text{ rpm} / \text{s})$$

$$T_{acc} = J \frac{\Delta \omega}{\Delta t} = (4.8 \times 10^{-4}) 2.8 = 1.34 \text{ mNm}$$

Söz konusu operasyon koşullarında motor hızı, faz akımı ve bara akımı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 8'de görülmektedir.

Hesaplanan referans akım değerine bağlı olarak faz akımının başarılı bir şekilde regüle edildiği görülmektedir. Buna bağlı olarak, maksimum hız salınımı 20 rpm civarında ölçülmüştür.

Daha sonra volana, harici bozuntu torku uygulanmış ve sistemin tepkisi gözlenmiştir. Söz konusu koşullarda motor hızı ve faz akımı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 9'da görülmektedir.

Öngörülen 3 adet temel tork bileşeni mevcuttur. Bunlar hızlanma, sürtünme ve rüzgar torklarıdır. Dolayısıyla akım bileşeni, bu temel tork bileşenleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Sürtünme ve rüzgar bileşenlerinin hesaplanmasında, o anki volan hızı kullanılmıştır. Dolayısıyla, bozuntu sonucu volan hızının düşmesi ile sürtünme ve rüzgar tork bileşenleri de yeni hıza göre hesaplanmıştır. Bu nedenle sistem, bozuntuya karşı gürbüz bir davranış gösterememiştir. Bu durum, faz akım grafiğinde de görülmektedir. Hızın düşmesi ile birlikte, faz akımının değeri de düşmüş ve son değerden itibaren (hızlanmaya bağlı olarak) artmaya devam etmiştir.

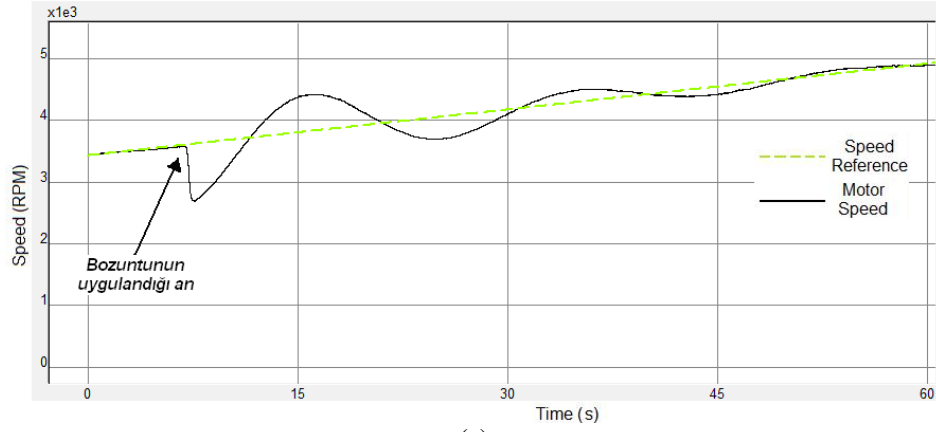
Önerilen gürbüz akım denetimi yönteminde Eşitlik 15 ve 16'da görülen motor hızı (ω_m) parametresinin yerine referans hız (ω_{ref}) parametresi kullanılmıştır. Bu durumda, sürtünme ve rüzgar kayıp tork bileşenleri aşağıdaki şekilde yeniden yazılabilir.

$$P_{fr} = \left[f_0 \left(v \frac{30}{\pi} \omega_{ref} \right)^{2/3} D_b^3 10^{-10} \omega_{ref} \right] + \left[\omega_{ref} K_{fr} F D_b \right] \quad (17)$$

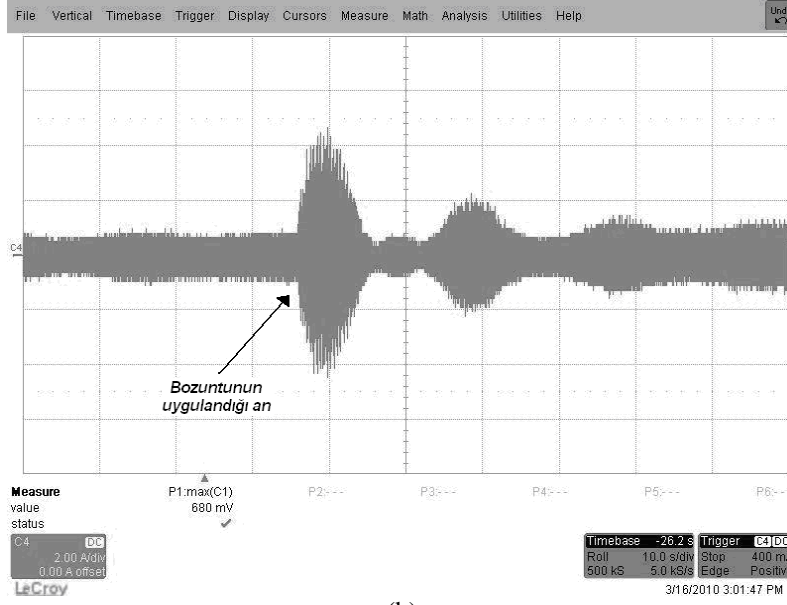
$$P_{wnd} = \frac{1}{64} C_M \rho \omega_{ref}^3 D_b^5 \quad (18)$$

Önerilen yöntemle, harici bozuntunun olmadığı durumlarda sistem tepkisi klasik akım denetimi ile benzer sonuçlar vermiştir. Volana, harici bozuntu torku uygulanmış ve sistemin tepkisi gözlenmiştir. Söz konusu koşullarda motor hızı, faz akımı ve bara akımı ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları, Şekil 10'da görülmektedir.

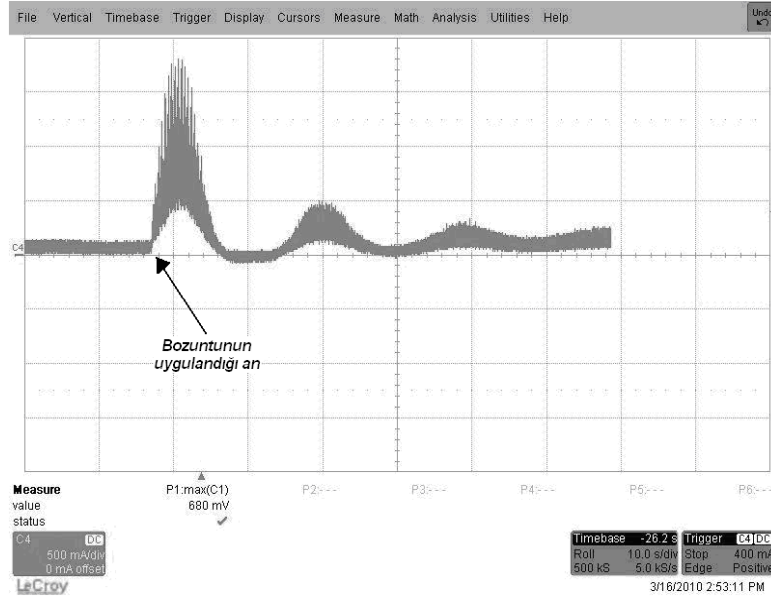
Bozuntu uygulandıktan sonra volan hızı referans değere yakınsamaktadır. Kullanılan rulman yağının yapısından dolayı, geniş bir hız aralığında yağ akışkanlığından kaynaklanan sürtünme kayıplarının tahmin edilmesi oldukça zordur. Yağ akışkanlığı çevresel koşullarla sıkı bir ilişki içindedir. Bu nedenle çalışma anında yağ akışkanlığı değişiklik göstermektedir. Bu da, artan hızlarda sürtünme tork değerinin tahmininde hataya neden olmaktadır. Sonuç olarak, referans hızı takip etmek mümkün olamamaktadır.



(a)

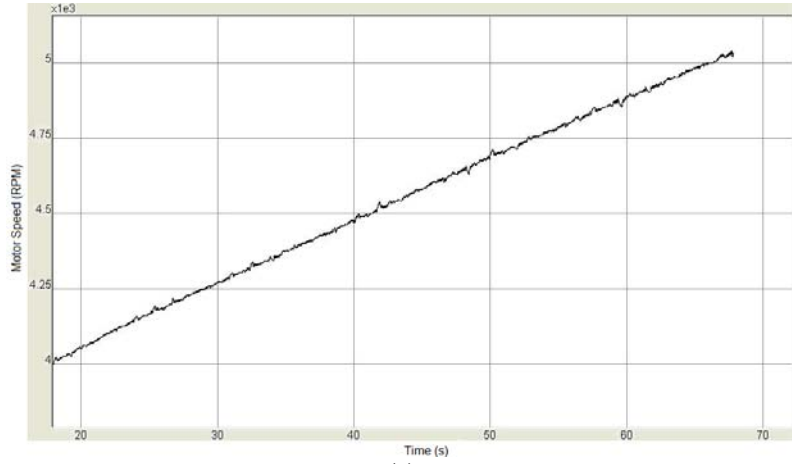


(b)

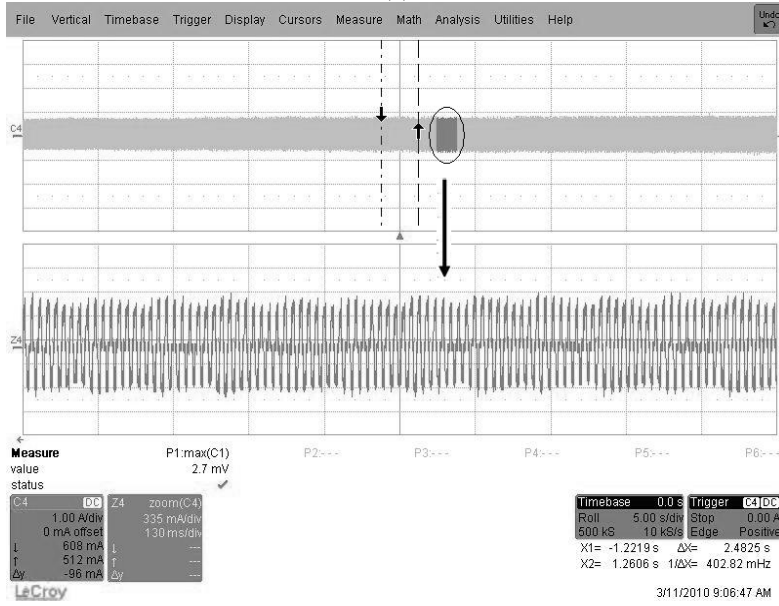


(c)

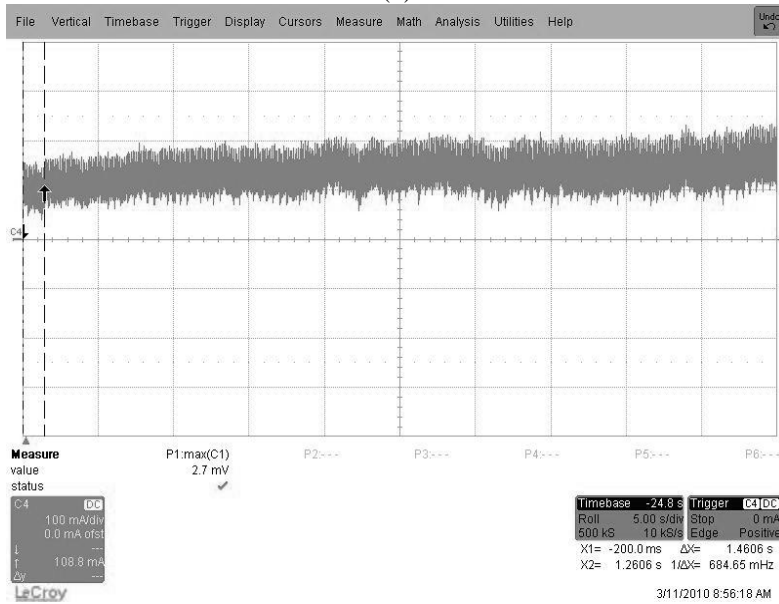
Şekil 7. Hız referansıyla sürülen ve harici bozuntu uygulanan motorun performans grafikleri, (a) Motor hızı, (b) Motor faz akımı (osiloskop ekran çıktısı, 2 A/div), (c) Sürücü bara akımı (osiloskop ekran çıktısı, 500 mA/div) (Operation waveforms of the motor driven by speed reference with external disturbance: (a) Motor speed, (b) Motor phase current (oscilloscope screen shot, 2 A/div), (c) Drive bus current (oscilloscope screen shot, 500 mA/div).)



(a)

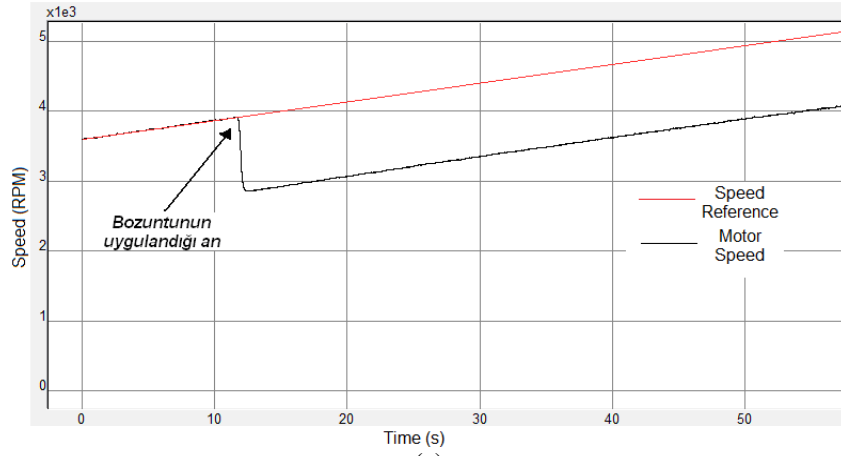


(b)

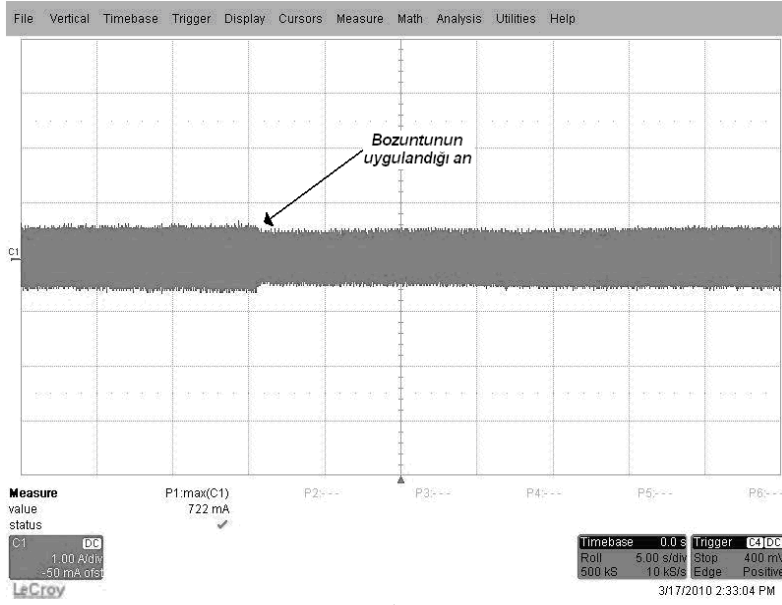


(c)

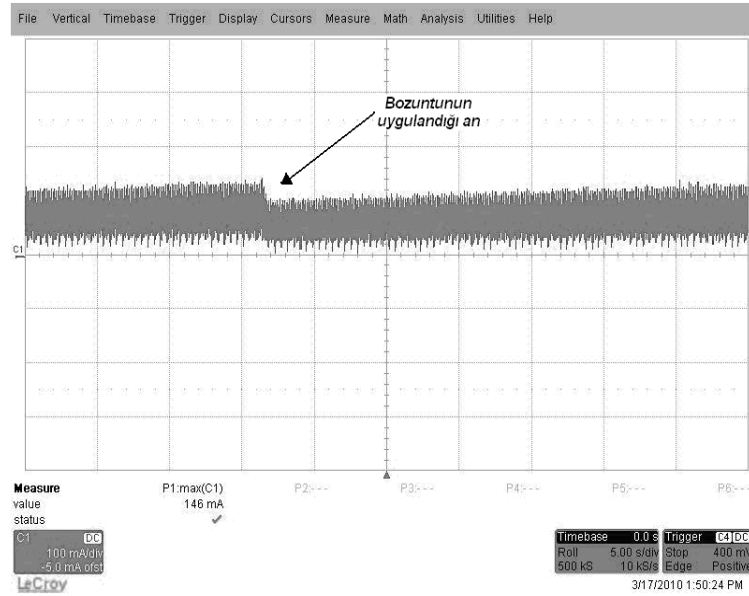
Şekil 8. Akım referansı ile sürülen motorun performans grafikleri, (a) Motor hızı, (b) Motor faz akımı (osiloskop ekran çıktısı, 1 A/div ve 335 mA/div (yakınlaştırılmış)), (c) Sürücü bara akımı (osiloskop ekran çıktısı, 100 mA/div) (Operation waveforms of the motor driven by current reference: (a) Motor speed, (b) Motor phase current (oscilloscope screen shot, 1 A/div and 335 mA/div (zoom)), (c) Drive bus current (oscilloscope screen shot, 100 mA/div).)



(a)

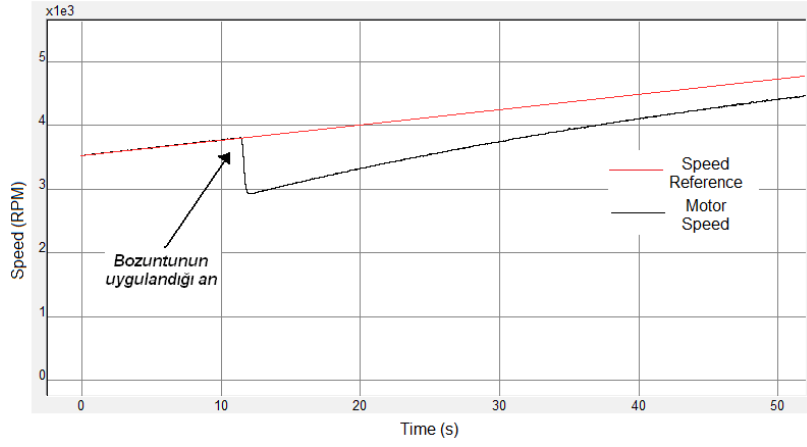


(b)

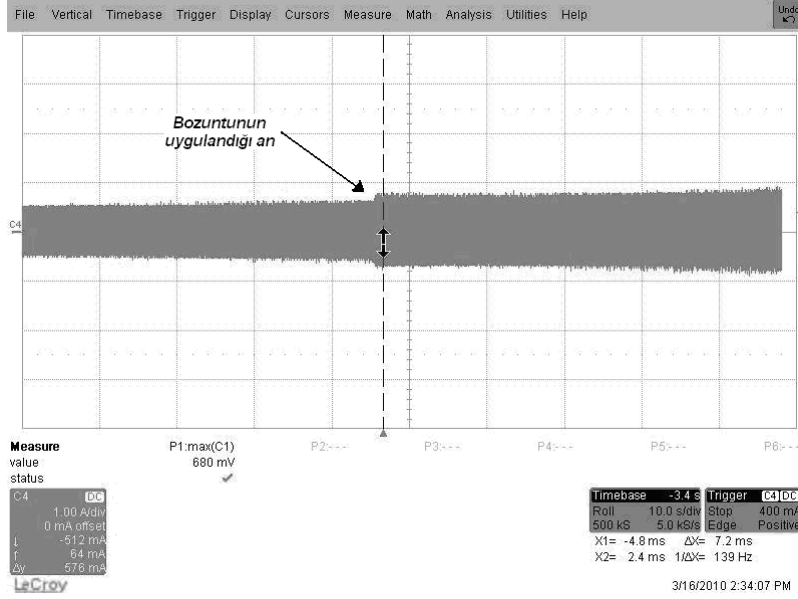


(c)

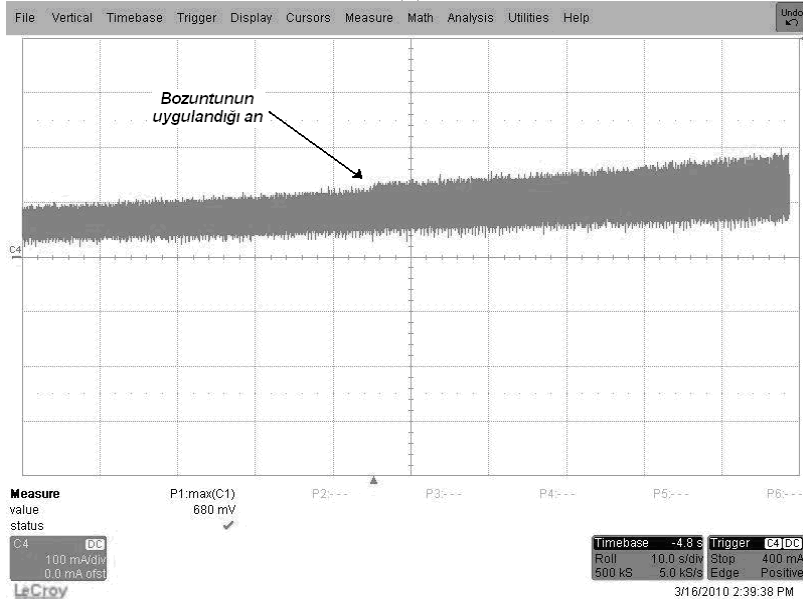
Şekil 9. Akım referansıyla sürülen ve harici bozuntu uygulanan motorun performans grafikleri, (a) Motor hızı, (b) Motor faz akımı (osiloskop ekran çıktısı, 1 A/div), (c) Sürücü bara akımı (osiloskop ekran çıktısı, 100 mA/div) (Operation waveforms of the motor driven by current reference with external disturbance: (a) Motor speed, (b) Motor phase current (oscilloscope screen shot, 1 A/div), (c) Drive bus current (oscilloscope screen shot, 100 mA/div).)



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. Önerilen akım referans yöntemiyle sürülen ve harici bozuntu uygulanan motorun performans grafikleri, (a) Motor hızı, (b) Motor faz akımı (osiloskop ekran çıktısı, 1 A/div), (c) Sürücü bara akımı (osiloskop ekran çıktısı, 100 mA/div) (Operation waveforms of the motor driven by suggested current reference method with external disturbance: (a) Motor speed, (b) Motor phase current (oscilloscope screen shot, 1 A/div), (c) Drive bus current (oscilloscope screen shot, 100 mA/div).)

Mevcut deneysel çalışmada da bu hata gözlenmektedir. Yağsız rulmanlar (veya ince yağlı rulmanlar) kullanılarak hem büyük bir kayıp bileşeni devre dışı bırakılmakta, hem de vakum ortamında gaz çıkışının önüne geçilmektedir.

Hızın referansa yakınsaması, akımdaki değişimlerin bir sonucudur. Klasik akım denetiminden farklı olarak, bozuntu uygulandığında bu etkiyi gidermek için akım (faz ve bara akımları) değeri artmaktadır. Sürtünme torklarının hesaplanmasında referans hızın kullanılması, sistemi geçici harici bozuntulara karşı gürbüz hale getirmiştir. Akımda anlık olarak büyük değişimlerin oluşmaması, güç sistemi açısından da tercih edilmesini sağlamaktadır.

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Değişken hızlı uydu yönelim eyleyicilerinde, yönelim kararlılığı için volan hızının kararlılığı çok önemlidir. Bunun için, harici bozuntulara karşı gürbüz bir denetim yönteminin kullanılması önem taşımaktadır. Ayrıca, eyleyicinin uydu güç sisteminde anlık akım değişimlerine neden olmaması da önemli bir seçim ölçütü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, eyleyici motoru sürme yöntemlerinin farklı avantajlara sahip olduğu görülmüştür. Hız referansıyla sürme yöntemi, harici bozuntulara karşı gürbüzlük sağladığı halde güç sisteminde oluşturduğu akım salınımları bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmıştır. Klasik akım referansıyla sürme yönteminin güç sistemi açısından uygun olduğu fakat harici bozuntulara karşı dayanıksız olduğu görülmüştür. Önerilen akım referansıyla sürme yönteminde ise her iki yöntemin (hız ve klasik akım denetimi) avantajları tek bir yöntemde birleştirilmiştir. Önerilen yöntemle harici bozuntulara karşı gürbüzlük sağlanmış ve bunun yanında uydu güç sisteminde de akım salınımlarından kaçınılmıştır. Bu avantajların kaynağı, önerilen yöntemin hız denetim yöntemi kadar dinamik bir yöntem olmamasıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Patel, M.R., **Spacecraft Power Systems**, CRC Press, New York, USA, 2005.
2. Kenny, B.H., Kascak, P.E., Jansen, R., Dever, T., "A Flywheel Energy Storage System Demonstration for Space Applications", **International Electric Machines and Drives Conference**, Madison, USA, June 1-4, 2003.
3. Schaub, H., Junkins, J.L., "Singularity Avoidance Using Null Motion and Variable-Speed Control Moment Gyros", **Journal of Guidance Control and Dynamics**, Vol. 23, Issue 1, Jan.-Feb. 2000.
4. Wang, S., Yang, G., Li, T., "Research of the Flywheel Motor Driver in Satellite Attitude Control System", **ISSCAA 2006 – 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics**, Harbin, China, 19-21 Jan. 2006.
5. Chou, M.C., Liaw, C.M., "Development of Robust Current 2-DOF Controllers for a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive With Reaction Wheel Load", **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 24, No. 5, May 2009.
6. Kenny, B.H., Santiago, W., "Filtering and Control of High Speed Motor Current in a Flywheel Energy Storage System", **Second International Energy Conversion Engineering Conference**, Rhode Island, USA, August 16-19, 2004.
7. Altay, A., Tekinalp, O., "Spacecraft Energy Storage and Attitude Control", **Proceedings of the 2nd International Conference on Recent Advances in Space Technologies**, Istanbul, Turkey, June 09-11, 2005.
8. Pan, Z.Y., Luo, F.L., "Steady State Reference Current Determination Technique for Brushless DC Motor Drive System", **IEE Proc.-Electr. Power Appl.**, Vol. 152, No. 6, November 2005.
9. Donescu, V., Neacsu, D.O., Griva, G., "Design of a Fuzzy Logic Speed Controller for Brushless DC Motor Drives", **ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Varşova, Polonya, 1996.
10. Wu, H., Sun, X., Ji, Y., "Precise Speed Control of Brushless DC Motors Based on Optimal Control", **Proceedings of the 2008 IEEE/ASME – International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics**, Xian, China, July 2-5, 2008.
11. Rodriguez, F., Emadi, A., "A Novel Digital Control Technique for Brushless DC Motor Drives", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 54, No. 5, October 2007.
12. Dixon, J.W., Leal, I.A., "Current Control Strategy for Brushless DC Motors Based on a Common DC Signal", **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 17, No. 2, March 2002.
13. Krishnan, R., **Electric Motor Drives**, Prentice Hall, New Jersey, ABD, 2001.
14. Krishnan, R., **Permenant Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives**, CRC Press, New York, ABD, 2010.
15. Vukosavic, S.N., **Digital Control of Electrical Drives**, Springer, New York, ABD, 2007.
16. **FAG Rolling Bearings**, Schaeffler Group Industrial, Schweinfurt, Germany, 2006.
17. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcova, V., **Design of Rotating Electrical Machines**, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2008.