

Hafif İşbirlikçi Robotlarda Kullanılacak Eyleyici Sistem Parametrelerinin Doğrulanması için Oluşturulan MRS Fren Tabanlı Test Düzenegi

Mert Yılmaz, Mehmet Görkem Karabulut, Mehmet İsmet Can Dede
Makina Mühendisliği Bölümü
İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
İzmir, Türkiye

Email: {mert,yilmaz,gorkemkarabulut,candede}@iyte.edu.tr

Özetçe —Bu çalışma kapsamında, bir hafif işbirlikçi robotun eyleyici sistemi temel alınarak bir eyleyici sistem oluşturulmuştur. Fırçasız doğru akım motoru ve planet dişliden oluşan eyleyici sistem için, doğru akım motoruna indirgenmiş bir model ile kapsamlı fırçasız doğru akım motoru benzetim modelleri geliştirilmiştir. Bu modelleri doğrulamak için geliştirilen test düzeneginde eyleyici sisteme değişken yükler uygulanması gerekmektedir. Manyeto-reolojik sıvı tabanlı fren sistemi bu değişken yükleri uygulaması için test düzenegine eklenmiştir ve bu anlamda bilimsel yazında yeni bir tip test düzenegi oluşturulmuştur. Deney düzeneginin bir diğer önemli unsuru ise yeni geliştirilen bir manyeto-reolojik frenin de model doğrulama çalışmaları aynı test düzenegi kullanılarak yapılabilmesidir.

Anahtar Kelimeler—Fırçasız doğru akım motoru, sistem modelleme, model doğrulama, manyeto-reolojik sıvı tabanlı fren

I. GİRİŞ

İşbirlikçi robotlar endüstriyel otomasyonda yeni bir yaklaşımdır. Eyleyici sistem tasarımı, işbirlikçi robotların tasarımında önemli bir yer tutmaktadır ve halihazırda aktif bir araştırma alanıdır. Elektriksel eyleyici sistemler hafif işbirlikçi robotlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Fırçasız doğru akım motoru (FDAM) ve yüksek hız redüksiyon oranına sahip harmonik, sikloid veya planet dişlisi ikilisi işbirlikçi robotlarda eyleyici sistem olarak tercih edilmektedir. Bunun nedeni bu eyleyici sistem kombinasyonunun sıfıra yakın dişli boşluğuna ve düşük hacimlerde yüksek tork yoğunluğuna sahip olmasıdır.

Bu çalışmada, hafif işbirlikçi robotlarda kullanılacak bir eyleyici sistemin parametrelerinin deneysel doğrulanması için geliştirilmiş bir test düzenegi sunulmuştur. Parametrelerin doğrulanması için aşağıdaki akış takip edilmiştir:

- İşbirlikçi robotlarda kullanılan bir eyleyici sistem oluşturulmuştur
- Oluşturulan eyleyici sistemin modeli geliştirilmiştir
- Geliştirilen model test düzenegi üzerinde doğrulanmıştır.

Geliştirilen test düzeneginden beklenti eyleyici sisteme çalışma esnasında önceden belirlenmiş değişken yükleri uygulayabilmesidir. Bu tip deney düzeneklerinde eyleyici sisteme sağlanacak değişken yük çeşitli yöntemlerle

oluşturulabilmektedir. Bilimsel yazınlar incelendiğinde, sisteme yük sağlayan bu yöntemlerin jeneratör, fren, ağırlık v.b. araçlarla geliştirildiği görülmektedir. En çok uygulanan yöntemlerden biri, motor miliyle aynı eksene kaplin v.b. araçlarla bağlanan doğru akım (DA) jeneratörlerdir. Jeneratörler direnç gösteren elemanlarla (yük hücreleri, reosta v.b.) birlikte FDAM'ye karşı yük oluştururlar [1]–[7]. Yazında sık rastlanan bir diğer yöntem ise kullanıldığı uygulamaya göre değişkenlik gösteren frenleme yöntemidir. Bir çalışmada, yük olarak sıkıştırılmış hava soğutmalı ve gecikmeli (hysteresis) fren kullanılmıştır [8]. Yazında kendisine yer bulan bir diğer frenleme aracı ise Fuko frenidir. Bu frenin DA besleme gerilimi değiştirilerek FDAM'ye karşı ayarlanabilir yük uygulanan deney düzenekleri mevcuttur [9], [10]. Eddy akımı ya da girdap akımı olarak bilinen akım ile manyetik alan oluşturarak yük uygulamayı sağlayan frenler ise diğer sıklıkla kullanılan araçlardan biridir. Bazen yukarıda bahsi geçen araçlardan bazıları birlikte karşı yük oluşturmak için kullanılmıştır. Bu çalışmalardan ikisinde değişken yük olarak hem jeneratör hem de Eddy akımı freni kullanılmıştır [11], [12].

Buraya kadar bahsedilen çalışmalarda, yük ölçümü genellikle tork algılayıcılarıyla yapılmaktadır. Bazı çalışmalarda ise bu ölçümler dinamometreler aracılığıyla yapılmıştır. Bir çalışmada kuvvet koluna ağırlıklar asılarak yük yaratılmış ve bu yük ilk dinamometre olarak kabul edilen Proni fren dinamometresiyle ölçülmüştür [14].

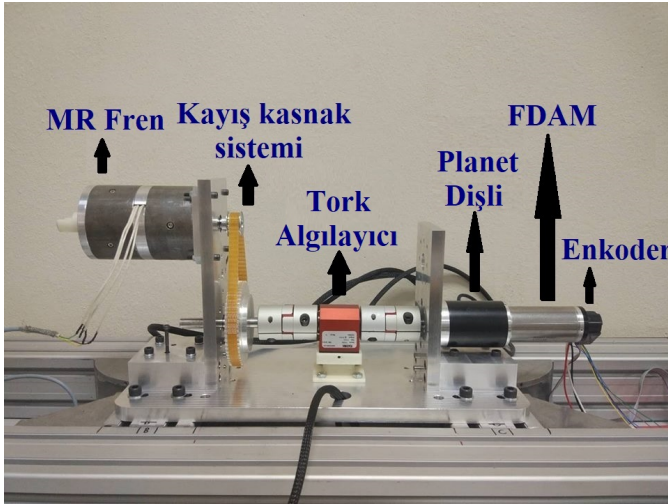
Yapılan incelemeler sonucunda deney sistemlerinde kullanılan yük oluşturma mekanizmaları arasında manyeto-reolojik sıvı (MRS) tabanlı bir fren sistemine rastlanmamıştır. Buna karşın, bu bildiride tanıtılan test düzenegi MRS tabanlı bir fren sistemi, tork algılayıcısı ve akım algılayıcılarından oluşmaktadır. Bu test düzenegini muadillerinden ayıran en önemli özellik, hem eyleyici sistem hem de MRS tabanlı fren sisteminin modellenmesine imkan sağlamasıdır. Eyleyici sistemin modellenmesi sırasında MRS tabanlı fren sistemi değişken yükleri uygulamak için kullanılırken, MRS tabanlı fren sisteminin modellenmesinde değişken yük, eyleyici sistem tarafından sağlanmaktadır. Bu iki sistemin arasına konumlandırılan tork algılayıcısı sayesinde, iki sistem arasında uygulanan anlık tork değerleri hızlı bir şekilde ölçülerek modelleme safhasında hesaba katılır. Tasarlanan test düzenegi

kullanılarak FDAM ve planet dişliden oluşan işbirlikçi robot eyleyici sisteminin model doğrulaması hedeflenmiştir. Bu kapsamda, eyleyici sistemin iki farklı benzetim modeli oluşturulmuştur. İlk model, eyleyici sistemin DA motoruna indirgenmiş modelidir ve nispeten daha basit yapıdadır. İkinci model ise eyleyici sistemin tüm parametrelerini kapsamlı bir şekilde ele alan bir modeldir. Bu benzetim modellerinin doğrulanması sırasında denetleyici etkilerden kaçınmak için ilgili parametreler devre dışı bırakılmıştır. Bu sayede, oluşturulan benzetim modellerinin doğruluğu artırılmıştır.

Bu bildirinin ikinci kısmında tasarlanan test düzeneği tanıtılmıştır. Test düzeneğinin tanıtılmasının ardından eyleyici sistemin benzetim modelleri detaylı olarak verilmiştir ve ilgili parametreleri tanıtılmıştır. Bunu takiben test düzeneği ile birlikte yapılan model doğrulama testlerinin sonuçları paylaşılmıştır. Elde edilen sonuçlar tartışılarak bildiri sonlandırılmıştır.

II. DENEY DÜZENEĞİ YAPISI

Eyleyici sistemin testleri ve doğrulanması için oluşturulan test düzeneği birer FDAM, planet dişli, enkoder ve döner tip tork algılayıcısından oluşmaktadır. Bu bileşenlere ek olarak yük testlerini gerçekleştirmek amacıyla sisteme MRS tabanlı bir fren ve kayış kaskak sistemi eklenmiştir. Test düzeneğindeki bileşenlerden veri toplanması, motor ve MRS tabanlı frenin sürülmesi, veri toplama kartları ve harici servo sürücü aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve sistemdeki bilgileri ve sinyallerin akış diyagramı sırasıyla Şekil 1 ve 2’de verilmiştir.



Şekil 1: Deney düzeneği

Deney düzeneğini oluşturmanın temel amacı eyleyici sistem hakkında veri toplamak için testler yapmaktır. Toplanan bu veriler aracılığıyla bir işbirlikçi robotun eyleyici sistemi için oluşturulan modeller ve eyleyici sistemin parametreleri doğrulanacaktır. Eyleyici sistemde Maxon marka 393023 parça numaralı FDAM eyleyici olarak kullanılmıştır [15]. Bu motor sisteminde 3 adet Hall algılayıcısı ve motor rotorunun arka tarafında rotor pozisyonunu algılayan bir enkoder mevcuttur. FDAM özellikleri Tablo I’de verilmiştir.

Tablo I: Maxon EC 40, 170 Watt FDAM Özellikleri

Maxon Motor Verileri	Değeri	Birimi
Nominal voltaj değerleri		
Nominal Voltaj	24	V
Yüksüz hız	9840	rpm
Yüksüz akım	386	mA
Nominal hız	9120	rpm
Nominal tork	165	mNm
Nominal akım	7.39	A
Anma torku	2660	mNm
Anma akımı	115	A
Maksimum verim	89	%
Özellikler		
Fazlar arası terminal direnci	0.209	Ω
Fazlar arası terminal endüktansı	0.0843	mH
Tork sabiti	23.2	mNm/A
Hız sabiti	412	rpm/V
Hız/Tork değişim ölçüsü	3.71	rpm/mNm
Mekanik zaman sabiti	2.09	ms
Rotor eylemsizlik momenti	53.8	gcm ²
Kutup çifti sayısı	1	-
Faz sayısı	3	-

FDAM’nin ön tarafına Maxon marka 223095 parça numaralı planet dişli eklenmiştir. 3 kademeye ve yüksek aktarım oranına sahip olan bu dişli aktarma organı olarak kullanılmış ve dişlinin özellikleri Tablo II’de verilmiştir.

Tablo II: Maxon GP 52 C, 4–30 Nm Planet Dişli Özellikleri

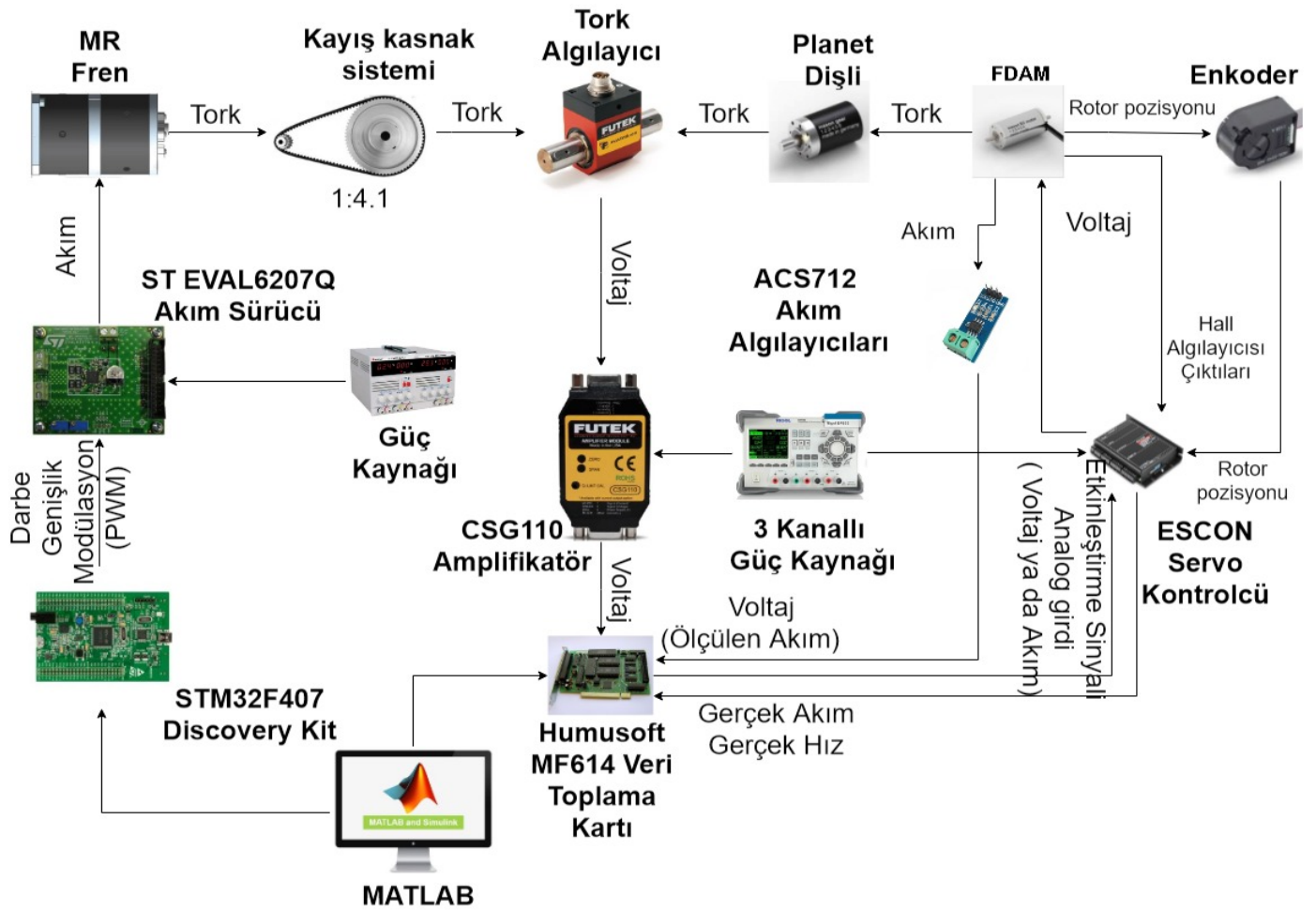
Maxon Dişli Verileri	Değeri	Birimi
Dişli verileri		
Aktarma oranı	113:1	-
Maksimum motor mili çapı	8	mm
Kademe sayısı	3	-
Maksimum devamlı tork	30	Nm
Dişli çıkışındaki maksimum kesikli tork	45	Nm
Maksimum verim	75	%
Yüksüz ortalama geri tepme	1.0	°
Kütle eylemsizlik momenti	9.3	gcm ²

FDAM’yi sürmek için kullanılan Maxon marka 409510 parça numaralı ESCON 50/5 servo kontrolcü aynı zamanda motora ait bazı özellikleri (motor hızı ve motorun çektiği akım v.b.) anlık olarak çıktı verme özelliğine de sahiptir. Bu servo kontrolcü Hall algılayıcı ve enkoder sinyal kanallarına ek olarak 12-bit çözünürlüklü iki adet analog girdi kanalına sahiptir. Ayrıca, motor parametreleri (motor hızı ve motorun çektiği akım) servo kontrolcüyle birlikte çalışan ESCON Studio yazılımı aracılığıyla ayarlanabilmektedir.

Humusoft MF614 kartı sistemde veri toplama kartı olarak kullanılmıştır. MATLAB yazılımındaki Gerçek Zamanlı Araç Kutusu (İng: Real-Time Windows Target) ile uyumlu çalışabilen bu kart bilgisayara PCI kartı olarak bağlanmıştır. Veri toplama kartının özellikleri Tablo III’te verilmiştir [16].

Sistemde tork algılayıcı bileşeni olarak Futek marka TRS300 kodlu tork sensörü kullanılmıştır. Döner tipte olan çift mil çıkışlı bu tork algılayıcısı, 10 Nm’ye kadar tork değeri ölçebilen ve 955 Nm/rad burkulma direngenliği değerine sahip bir sensördür. Bu sensör gerinim ölçer teknolojilerinden faydalanmaktadır ve iletişim bileziği aracılığıyla 3000 rpm değerine kadar çalışmaktadır [17].

Futek marka CSG110 kodlu amplifikatör, genel amaçlı bir



Şekil 2: Sistemin akış diyagramı

Tablo III: Humusoft MF614 veri toplama kartı özellikleri

Humusoft MF614 Veri Toplama Kartı Özellikleri
Seçilen 4 farklı girdi aralığında ($\pm 10V$, $\pm 5V$, $0-10V$, $0-5V$) 100 kHz'e kadar 12 bit A/D dönüştürücü
8 kanallı çoklu girdi birleştirici ve örnekleme/tutma devresi
$\pm 10V$ çıktı aralığında 12 bit D/A dönüştürücü
8 bit dijital girdi ve çıktı portları
4 adet dört evreli enkoder ile 5er adet zamanlayıcı ve sayaç

yükseltici olmasına ek olarak döner tip tork algılayıcısı için bir kalibrasyon aracıdır. Bu yükseltici ilgili uygulamaya göre kullanıcıya çoklu çıktılar sağlar. Çıktı seçenekleri voltaj olarak ± 5 VDC, ± 10 VDC, akım olarak ise $0 - 20$ mA, $4 - 20$ mA, $0 - 16$ mA, $5 - 25$ mA şeklindedir. Test düzeneğinde çıktı seçeneği ± 5 VDC olarak belirlenmiştir. CSG110 kodlu amplifikatör 2 mV/V değerindeki sinyali $\pm 5V$ değerinde bir analog sinyale yükseltir. Bu yükseltici aynı zamanda alçak geçiren bir filtreye sahiptir. Tork algılayıcısı, yükseltici üzerinde bulunan Wheatstone köprüsü ve değişebilen dirençlere göre kalibre edilebilmektedir [17].

Deney düzeneğinde yer alan 3 adet ACS712 model akım algılayıcı modül FDAM'nin faz akımlarını doğrulamak için

deney düzeneğinde kullanılmışlardır. Hall etkisi kaynaklı bu doğrusal akım algılayıcıları alternatif ve doğru akımları algılayabilirler. Bu sensörler, bir Hall algılayıcılı devre ile uygulanan akımın meydana getirdiği manyetik alanın iletildiği bakır bir iletim yolundan oluşmaktadır. Algılayıcı içine entegre edilen Hall devreleri akımı algılar ve onu orantılı bir voltaj değerine dönüştürür. 5 A, 20 A, ve 30 A akım değerine kadar ölçüm yapabilen bu algılayıcı modüllerden 5 A kapasiteli olanı her fazda faz sargısına seri olarak bağlanmıştır [18].

Deneysel testler yük altında sisteme verilen voltaj ya da akım girdi sinyaline göre sırasıyla voltaj ve akım modlarında eyleyici sistemi çalıştırmak için tasarlanmıştır. Böylece motorun çektiği akım, rotor konumu ve hızı gibi birçok bilgi bu testlerden edinilmiştir. Bu bilgilerin akış diyagramı Şekil 2'de gösterilmiş ve bundan sonraki kısımda detaylı olarak anlatılmıştır.

Sistem, ESCON kontrolcünün özelliği olan voltaj ve akım modlarında sürülmüştür. Seçilen moda göre, referans girdi olarak seçilen voltaj ya da akım sunucu bilgisayarda kullanılan MATLAB programı aracılığıyla Humusoft veri toplama kartından servo kontrolcüye gönderilir. Akım algılayıcılar, ESCON sürücü ve Humusoft veri toplama kartı, eyleyici sistemin üzerindeki akımı ölçmek için testlerde kullanılmıştır. Her iki

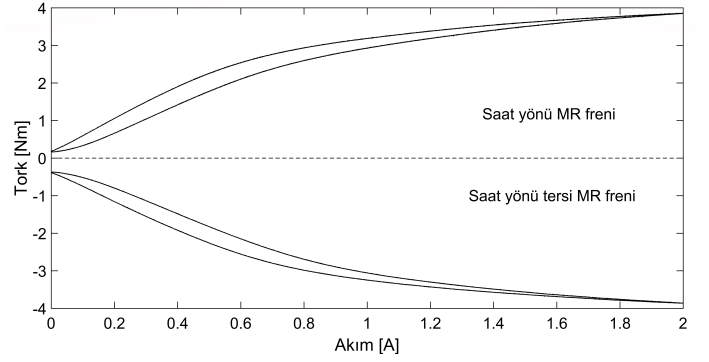
çalışma yönteminde de (voltaj veya akım) Humusoft veri toplama kartından servo kontrolcüye bir dijital etkinleştirme sinyali ve referans girdi olan voltaj ya da akım isteğine göre kalibre edilmiş analog voltaj gönderilmektedir.

Deney düzeneği kurulumunun ilk adımı olarak motor parametreleri ESCON servo kontrolcüye ESCON Studio Başlangıç Sihirbazı aracılığıyla kaydedilmektedir. Planet dişlinin maksimum sürekli hız değeri 6000 rpm olduğu için, motorun maksimum izin verilen hızı bu değer olarak ayarlanmıştır. Dijital artımlı enkoderin çözünürlüğü her dönüş için 500 sayım olarak belirlenmiştir. Hız kontrol modu, durağan akım-direnç kompanzasyonu seçilse de modelde kontrol etkilerinden kaçınmak için kompanzasyon katsayısı sifıra ayarlanmıştır. Öte yandan her iki çalışma yönteminde iki analog çıktı vardır. Bu çıktılardan biri ölçülen hız değeri olup ± 4 V'luk hız sinyali değeri ± 6000 rpm değeriyle eşleştirilmiştir. Diğer çıktı ise ölçülen akım değeridir ve ± 4 V'luk akım sinyali değeri ± 4 A değeriyle eşleştirilmiştir. Rotor konum bilgisi rotorun arka tarafına eklenen enkoder ile elde edilmektedir. Bu ölçüme göre ESCON servo kontrolcü tarafından motorun hızı hesaplanmaktadır. Motorun hız ve akım ölçümleri kontrolcüde işlenir ve analog kanallarla vasıtasıyla veri toplama kartına gönderilmektedir. Bunlara ek olarak, motorun faz sargı akımları, her faz sarıgısına seri olarak bağlanan özdeş akım algılayıcıları aracılığıyla ölçülmekte ve ölçülen akımlar kontrolcüde olduğu gibi analog kanallar ile veri toplama kartına gönderilmektedir. Böylece, iki ölçüm tekniği kıyaslanarak mevcut akım değerlerini doğrulama imkanı sağlanmaktadır.

Eyleyici sistemini değişken yükler altında gözlemlemek için ise test düzeneğine bir MRS tabanlı fren eklenmiştir. Söz konusu fren her iki yönde bağımsız şekilde ve kontrol edilebilen değişken seviyelerde direnç torku uygulayabilen bir yapıya sahiptir. MRS tabanlı fren sisteminin çalışma prensibi manyeto-reolojik sıvının manyetik alan etkisi altında viskozitesinin değişmesine dayanır. Bu özellik sayesinde MRS tabanlı fren sistemi elektrik akımı ile kontrol edilebilen direnç torku oluşturabilmektedir. Test düzeneğinde kullanılan MRS tabanlı fren sistemi tek yönde direnç torku oluşturabilen çoklu silindirik yapıya sahip iki adet MRS tabanlı frenenden oluşmaktadır. Silindirik frenler güç aktarım miline birbirine ters yönde çalışacak şekilde tek yönlü rulmanlarla yataklanmıştır. Bu sayede fren milinin hareket yönüne bağlı olarak o yöndeki harekete direnç oluşturacak şekilde tek bir MRS freni ile kavrama gerçekleştirilebilmektedir [19]. MRS fren özellikleri Tablo IV'te verilmiştir. Çift yönlü MRS tabanlı frenin akım-tork ilişkisi Şekil 3'te gösterilmiştir.

Tablo IV: MRS tabanlı fren özellikleri

Kategori	Özellikler
Ürün ağırlığı	3.57 kg
Maksimum tork (2 A değerinde)	3.8 Nm
Minimum tork (0 A değerinde)	0.15 - 0.4 Nm
Bant genişliği	63 rad/s
Dış çap	80 mm
Uzunluk	124 mm
Sargı tel çapı	0.5 mm
Maksimum akım	2 A
Sargı sayısı	450
Manyeto-reolojik malzeme	MRF-122EG
Manyetik malzeme	AISI 1008 çeliği
Anti-manyetik malzeme	SS 304, AA 2204



Şekil 3: Çift yönlü MRS tabanlı frenin akım-tork ilişkisi

Fren sisteme 3.84 Nm değerine kadar yük sağlasa da daha önce yapılan ölçümlere göre ve Şekil 3'te görüldüğü gibi ancak 2.5 Nm değerine kadar uygulanan akıma karşı oluşturduğu yük doğrusala yakın değerlerdedir. Doğrusal çalışma aralığı baz alınarak MR fren çıkış miline 4.1 aktarma oranlı bir kayış kasnak sistemi eklenmiş ve eyleyici sisteme direnç gösteren tork değeri yaklaşık 10 Nm mertebesine kadar yükseltilmiştir. Bunun nedeni ise tork algılayıcısının, giriş ve çıkış mili arasında en fazla 10 Nm değerinde bir burulmayı ölçebilmesidir. Kayış kullanılmasından dolayı sisteme esneklik eklenmiştir. Ancak, eyleyici sistemin modellenmesine yönelik testler sırasında, eyleyici sistemin uyguladığı torklar motorun çıkış miline direkt bağlanmış olan tork algılayıcısından ölçüldüğü için söz konusu esneklikle ilgili bozucu etkiler ölçümleri etkilememiştir. ST L6207Q devresi akım sürücü olarak kullanılmıştır ve frenin uyguladığı direnç tork değeri bu şekilde kontrol edilmiştir. Bu akım sürücüsü, sunucu bilgisayardan gelen isteklerin STM32F407 Discovery kartı tarafından işlenerek darbe genişlik modülasyonu (PWM) girdi sinyalleri şeklinde sürücü devreye gönderilmesiyle kontrol edilmektedir. Tork algılayıcısı, geniş çaplı kasnağın çıkış mili ile planet dişlinin çıkış mili arasındaki burulmayı yani tork değerini ölçmektedir. Tork algılayıcısının çıkış voltajı CSG110 amplifikatörü aracılığıyla ± 5 VDC değerine yükseltilmektedir. Amplifikatörün çıkışı veri toplama kartının analog kanalı aracılığıyla sunucu bilgisayarda gözlemlenmiştir.

III. BENZETİM MODELLERİ

Bu kısımda, yük altındaki sistem için önerilen sisteme sağlanan voltaj girdisine göre elde edilen hız çıkışını araştırmak için kullanılan iki farklı benzetim modeli oluşturma tekniğine değinilmiştir. Bu modelleme yöntemleri şöyledir:

- DA motoru eşdeğer modeli
- Kapsamlı FDAM modeli

A. DA Motoru Eşdeğer Modeli

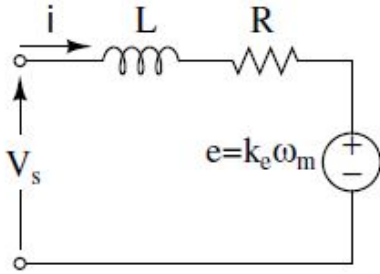
DA motoru eşdeğer modelinde, FDAM'nin 3 fazlı yapısı tek fazlı yapıya indirgenmiştir. Bu nedenle, DA motoru eşdeğer modelinde aşağıda verilen (1)'den (8)'e kadar olan DA motor denklemleri temel alınmıştır. Bir DA motorunun eşdeğer devresi Şekil 4'te verilmiştir. V_s , i , R ve L sırasıyla DA besleme voltajı, armatür akımı, armatür direnci ve armatür endüktansdır. Motora ters elektromotor kuvvet ise e harfi

ile belirtilmiştir. Motor (1) ve (2) numaralı denklemlere göre matematiksel olarak modellenebilir.

$$V_s = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemlerde, T_e , k_f , J , T_L terimleri sırasıyla elektrik motorunun oluşturduğu torku, viskoz sürtünme sabitini, rotor eylemsizlik momentini ve yük torkunu belirtmektedir.



Şekil 4: DC motor eşdeğer devresi

Ters elektromotor kuvvet ve elektrik motorunun oluşturduğu tork sırasıyla (3) ve (4)'teki denklemlerde gösterildiği şekilde elde edilir.

$$e = k_e \omega_m \quad (3)$$

$$T_e = k_t \omega_m \quad (4)$$

k_e ve k_t terimleri sırasıyla motorun ters elektromotor sabiti ile tork sabitini temsil eder. DA motorunu modellemek için (1) ve (2) numaralı denklemler aşağıdaki şekilde yeniden düzenlenir.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i - \frac{k_e}{L}\omega_m + \frac{1}{L}V_s \quad (5)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{k_t}{J}i - \frac{k_f}{J}\omega_m - \frac{1}{J}T_L \quad (6)$$

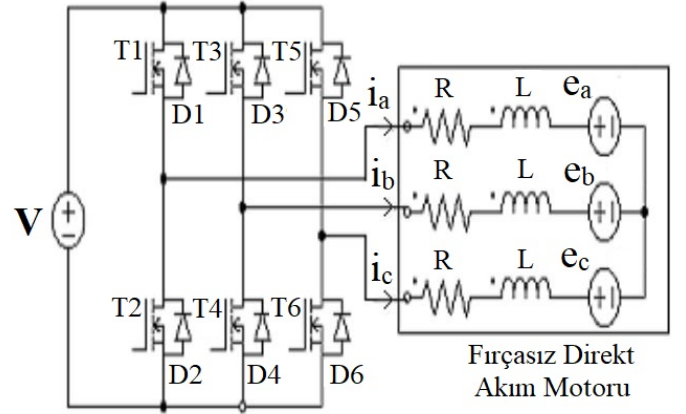
DA motorunun matematiksel modeli durum uzayı yaklaşımıyla (7) ve (8) numaralı denklemlerde olduğu gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_e}{L} & 0 \\ \frac{k_t}{J} & -\frac{k_f}{J} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ T_L \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \\ T_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ k_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

B. Kapsamlı FDAM Modeli

Kapsamlı modelde, FDAM'nin 3 fazlı yapısı ve planet dişlisi detaylı olarak modellenmiştir. Bu model akım üretme, ters elektromotor kuvvet üretme, mekanik, komütasyon ve evirici alt sistemlerinden oluşmaktadır. Akım üretme alt sisteminde, faz akımları (9)'dan (11)'e kadar olan denklemlere göre elde edilmiştir. Motorun hızı (12) ve (16) numaralı denklemlere göre mekanik alt sistem içinde belirlenmiştir. Sonrasında ise ters elektromotor kuvveti (13)'ten (15)'e kadar olan denklemlere göre üretilmiştir. Komütasyon ve evirici alt sistemlerinde ise faz voltajları (20)'den (22)'ye kadar olan denklemlere ve rotor konum açısına göre belirlenmiştir. FDAM'nin akım komütasyonu için kullanılan 6 adımlı evirici devresi ve FDAM'nin eşdeğer devresi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5: FDAM eşdeğer devresi

Şekil 5'te sol kısımda görülen $T1$ ve $D1$ 'den $T6$ ve $D6$ 'ya kadar görülen elektronik bileşenler, FDAM'nin sürülmesini sağlayan 6 adımlı evirici devresidir. T ve D ile simgelenen bileşenler sırasıyla mosfetleri ve diyotları temsil etmektedir. i_a , i_b ve i_c faz akımlarını, e_a , e_b ve e_c FDAM'nin ters elektromotor kuvvet voltajlarını, R ve L ise FDAM'nin faz direncini ve endüktansını simgelemektedir. V ise FDAM'ye sağlanan besleme voltajıdır.

3 fazlı FDA motorun eşdeğer devresinin matematiksel modeli aşağıdaki denklemlere göre elde edilir:

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{di}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (9)$$

$$V_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{di}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (10)$$

$$V_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{di}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (11)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (12)$$

Denklemlerde a , b , ve c fazları belirtirken, V , i , ve e simgeleri sırasıyla fazlar arası voltajı, faz akımlarını ve faz ters elektromotor kuvvet voltajlarını belirtmektedir. T_e ve T_L ise elektrik motorunun oluşturduğu tork ve yük torkunu ifade etmektedir. R ve L simgeleri sırasıyla faz dirençlerini ve endüktanslarını belirtmektedir. J rotorun eylemsizlik momentini, k_f viskoz sürtünme sabiti ve ω_m rotor hızıdır. Faz ters elektromotor

kuvvet voltajları ve elektrik motorunun oluşturduğu tork şu şekilde yazılır:

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e) \quad (13)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (14)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m Tr(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \quad (15)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} [Tr(\theta_e) i_a + Tr(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) i_b + Tr(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) i_c] \quad (16)$$

k_e ve k_t motorun ters elektromotor kuvvet ve tork sabitleridir. θ_e elektriksel açı değeri olmakla beraber rotor açısı ve motor kutup çifti sayısının çarpımı ile elde edilir ($\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$). $Tr(\cdot)$ fonksiyonu ters elektromotor kuvvetin testere dişi biçimli dalgasıdır. Testere dişi biçimli dalga'nın detaylı formülü şu şekilde yazılır:

$$e_a = \begin{cases} (6E/\pi)\theta_e & 0 < \theta_e < \pi/6 \\ E & \pi/6 < \theta_e < 5\pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 6E & 5\pi/6 < \theta_e < 7\pi/6 \\ -E & 7\pi/6 < \theta_e < 11\pi/6 \\ (6E/\pi)\theta_e - 12E & 11\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (17)$$

$$e_b = \begin{cases} -E & 0 < \theta_e < \pi/2 \\ (6E/\pi)\theta_e - 4E & \pi/2 < \theta_e < 5\pi/6 \\ E & 5\pi/6 < \theta_e < 9\pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 10E & 9\pi/6 < \theta_e < 11\pi/6 \\ -E & 11\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (18)$$

$$e_c = \begin{cases} -E & 0 < \theta_e < \pi/6 \\ -(6E/\pi)\theta_e + 2E & \pi/6 < \theta_e < \pi/2 \\ -E & \pi/2 < \theta_e < 7\pi/6 \\ (6E/\pi)\theta_e - 8E & 7\pi/6 < \theta_e < 9\pi/6 \\ E & 9\pi/6 < \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (19)$$

(9)'dan (11)'e kadar olan voltaj denklemleri birbirinin kombinasyonu şeklindedir. (20) numaralı denklemde belirtilen akım ilişkisinin yardımıyla voltaj denklemleri (21) ve (22) numaralı denklemlerde görüldüğü gibi 2 denkleme indirgenebilir.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (20)$$

$$V_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{di}{dt} (i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (21)$$

$$V_{bc} = R(i_a + 2i_b) + L \frac{di}{dt} (i_a + 2i_b) + e_b - e_c \quad (22)$$

Buraya kadar ifade edilen denklemler baz alınarak FDAM'nin durum uzay modeli, durum denklemi olarak (23) numaralı denklem şeklinde ve çıktı denklemi (24) numaralı denklem şeklinde yazılır.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{\omega}_m \\ \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_t}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} - e_{ab} \\ V_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (24)$$

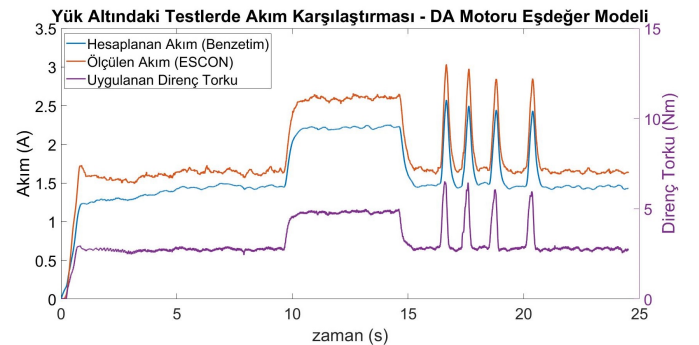
IV. MODEL DOĞRULAMA SONUÇLARI

Önceki bölümde, belirlenen eyleyici sistem için hazırlanan iki benzetim modeli hakkında bilgi verilmişti. Eyleyici sistem benzetim modellerini doğrulamak için bazı testler yapılmıştır. Bu kapsamda, önceden belirlenen sabit voltaj girdisine rampa fonksiyonu ile çıkan bir girdi FDAM için belirlenmiştir. FDAM girdisi sabit voltaj seviyesine ulaştıktan sonra hem MRS tabanlı fren ile hem de fren ile tork algılayıcısı arasındaki kaplin kısa zaman aralıklarında tutulup serbest bırakılarak FDAM'nin hareketine karşı direnç torku uygulanmış ve sistemin yük altında çalışması sağlanmıştır. Kaplinin tutularak yük uygulanmasının sebebi insan robot etkileşiminde gerçekleştirilecek olası yük etkilerini benzetime dahil etmektir.

Deneylerde eyleyici sistemin çektiği akım, servo kontrolcü ve ayrıca motor sargılarına seri olarak bağlanan akım algılayıcıları ile elde edilmiştir. Buna ek olarak motorun çıkış milinin hızı servo kontrolcü tarafından hesaplanarak kayıt altına alınmıştır. Sisteme uygulanan girdiler ile deneysel sonuçlar kaydedilmiş ve aynı girdiler benzetim modellerine verilerek deneysel sonuçlar ile benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar, ilerleyen kısımlarda paylaşılmıştır.

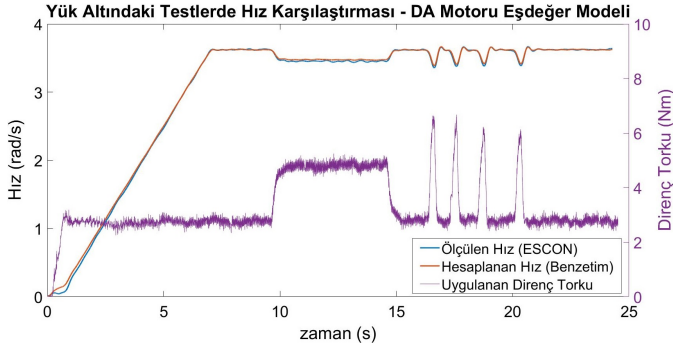
A. DA Motoru Eşdeğer Modeli Test Sonuçları

Benzetim çalışmaları, Matlab 9.1 (R2018A) ve Simulink programında *ode4(Runge - Kutta)* çözücüsü kullanılarak 0.001 saniyelik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Benzetim çıktılarında uygulanan direnç torkuna göre akım ve hız değerlerinin değişimi incelenmiştir. Aynı girdi için deneysel ve benzetim testlerinde elde edilen akım değişimleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Sisteme uygulanan ve tork algılayıcısı aracılığıyla ölçülen direnç torku Şekil 6'da sağ tarafta yer alan y-ekseninde gösterilmiştir. Sisteme uygulanan voltaj girdi sinyali yerine direnç torkunun verilmesi sebebi, hız ve akım değişimlerinin direkt olarak direnç torkuyla alakalı olmasından kaynaklanmaktadır. MRS tabanlı fren aracılığıyla direnç torku sisteme 9. ve 15. saniyeler arasında, ve kaplin tutularak ise 15. saniyeden sonra 4 kere direnç torku uygulanmıştır. Bu süreler haricinde gözlemlenen akım değeri, MRS tabanlı frenin boştaki sürtünme karakteristiğinden kaynaklanmaktadır. Servo kontrolcünün akım ölçüm sonuçları ve benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.2737 A mertebesinde dir. Bu hata büyük ölçüde servo kontrolcünün akım sinyal değerinin ortalama değerini vermesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 6: DA motoru eşdeğer modeli yüklü test akım sonuçları

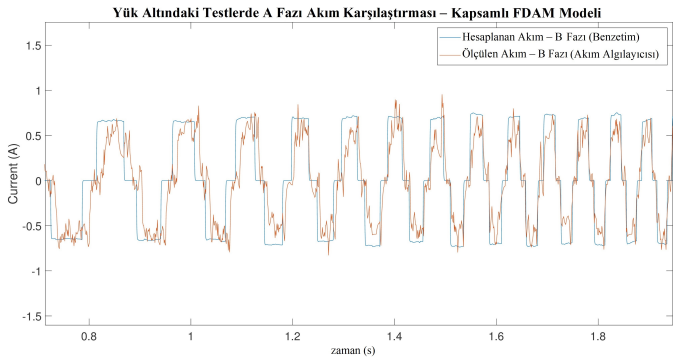
Yük altında yapılan deneysel testler ile benzetim testleri sonucunda elde edilen hız çıktılarının karşılaştırması Şekil 7’de gösterilmiştir. İstemli olarak sisteme uygulanan direnç torkuna ek olarak eyleyici sistemin sabit bir yüke sahip olduğu Şekil 7’de de görülmektedir. Tüm bu yüklerin toplamı tork girdisi olarak benzetim modeline verilse de, sistemin dinamiğinden kaynaklı bir gecikme geçici rejim tepkisi kısmında gecikmeye neden olmuştur. Öte yandan, uygulanan torktaki değişime bağlı olarak görülen sistem hızındaki değişimler birbirine benzerlik içermektedir. Servo kontrolcü aracılığıyla ölçülen hız sonuçları ile benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.0249 rad/s mertebesindedir.



Şekil 7: DA motoru eşdeğer modeli yüklü test hız sonuçları

B. Kapsamlı FDAM Modeli Test Sonuçları

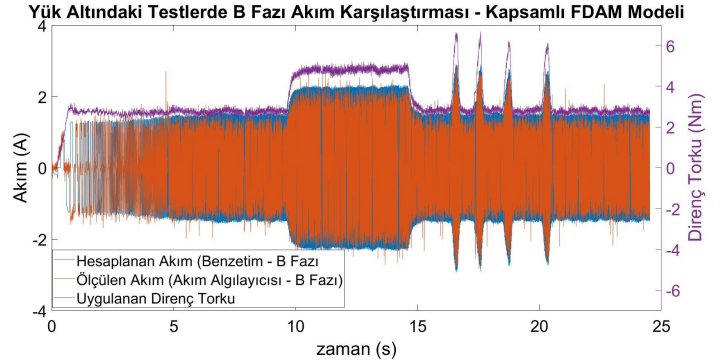
Kapsamlı FDAM modeli benzetim çalışmaları, Matlab 9.1 (R2018A) ve Simulink programında *ode4(Runge – Kutta)* çözücü kullanılarak 0.000001 saniyelik adımlarla gerçekleştirilmiştir. Aynı deney girdileri bu benzetim testinde de aynı şekilde kullanılmıştır. Yapılan testlerde elde edilen akım değişimleri Şekil 8 ve 9’da gösterilmiştir. Şekil 8’de A fazı sargısında, akım algılayıcısı ile ölçülen ve benzetim sonuçlarıyla elde edilen akım değerleri karşılaştırılmıştır ve bu akımların aynı fazda oldukları tespit edilmiştir. Eyleyici sisteme uygulanan direnç torkuna karşı deneylerde ve benzetim testlerinde elde edilen akım değişimleri B fazı sargısı için Şekil 9’da verilmiştir. Motorun tüm faz sargıları için elde edilen test ve benzetim sonuçları Şekil 10’da görülmektedir.



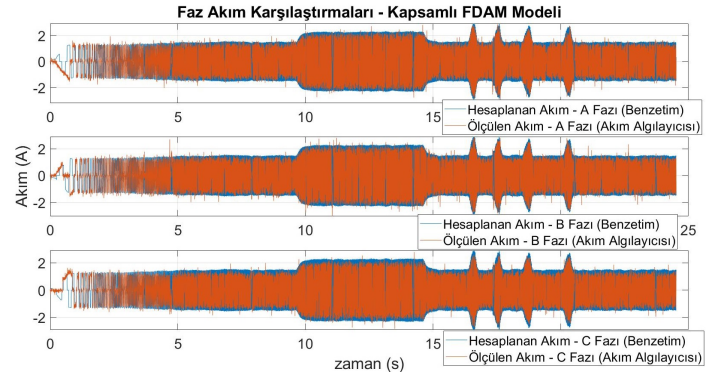
Şekil 8: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testte motor A sargısı aynı fazlı akım sonuçları

Yük altında yapılan deneysel testler ile benzetim testleri sonucunda elde edilen motor hızlarının karşılaştırması Şekil

11’de gösterilmiştir. İstemli olarak sisteme uygulanan direnç torkuna ek olarak eyleyici sistemin sabit bir yüke sahip olduğu Şekil 11’de de görülmektedir. Tüm bu yüklerin toplamı tork girdisi olarak benzetim modeline verilse de, sistemin dinamiğinden kaynaklı bir gecikme geçici rejim tepkisi kısmında gecikmeye neden olmuştur. Öte yandan, uygulanan torktaki değişime bağlı olarak görülen sistem hızındaki değişimler birbirine benzerlik içermektedir. Servo kontrolcü aracılığıyla ölçülen hız sonuçları ile benzetim sonuçları arasındaki hatalarının karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) 0.0217 rad/s mertebesindedir. Bu modelleme yöntemiyle indirgenmiş modele göre hızlar açısından daha yüksek doğrulukta sonuçlar elde edilmiştir.



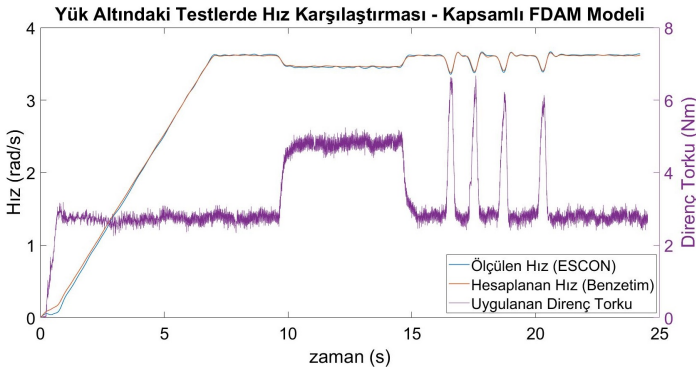
Şekil 9: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testte motor B fazı akım sonuçları



Şekil 10: Kapsamlı FDAM modelinde yüklü testlerde tüm fazların akım sonuçları

V. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada hafif işbirlikçi robotlarda kullanılacak bir eyleyici sistemin modelinin doğrulanması amacıyla geliştirilmiş bir test düzeneği tanıtılmıştır. Test düzeneğinin eyleyici sisteme uygulanacak değişken yükleri uygulayabilmesi beklenmektedir. Bilimsel yazın incelendiğinde, sisteme çeşitli yük sağlama yöntemlerine rastlanılmıştır ancak MRS tabanlı bir fren sistemine rastlanılmamıştır. Çalışmada kullanılan MRS tabanlı fren her ne kadar fren çift yönlü olarak yük sağlama işini görsün de, büyük çaplı kasnağın çıkış mili ile tork algılayıcısının milini bağlayan kaplinin elle tutulup bırakılması vasıtasıyla sisteme direnç torku uygulanmıştır. Böylece, olası



Şekil 11: Kapsamlı FDAM modeli yüklü testlerde hız sonuçları

insan-robot etkileşimini yansıtacak istemsiz yüklerin benzetimi de yapılmıştır.

Eyleyici sistemi analiz etmek için iki benzetim modeli kullanılmıştır. Bir test prosedürü belirlenmiş ve sisteme yük uygulanarak bu test deney düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sisteme verilen girdiler ve sistemin ölçülen çıktıları kaydedilip aynı girdiler benzetim modellerine verilmiş ve benzetim sonuçlarıyla ölçüm sonuçları karşılaştırılarak model doğrulaması çalışması yapılmıştır.

Önceden değinildiği üzere testler, değişken yük altında yapılmıştır. DA eşdeğer motor modelinin akım sonuçları incelendiğinde ölçüm sonuçları ve benzetim testi sonuçları arasında farklar olduğu görülmektedir. Bu farklar, servo kontrolcünün akım sinyalinin ortalama değerini vermesinden kaynaklanmaktadır. Kapsamlı FDAM modelinde ise motorun besleme kabloları üzerine yerleştirilen akım algılayıcı ölçümleri ile benzetim sonuçları birbirine yakındır. Eyleyici sistemin hız çıktıları incelendiğinde iki modelin de değişken yük altındaki hız karakteristikleri birbirine benzerdir. Buna karşın, iki modelin hızlarının hatalarının karesinin ortalamasının karekök (RMSE) değerleri karşılaştırıldığında bu değerler kapsamlı FDAM modelinde daha az olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak bir çıkarım yapmak gerekirse her iki modelin de kendilerine göre tercih edilebilir yanları mevcuttur. DA motoru eşdeğer modeli, indirgenmiş bir model olup uygulaması kolay ve az zaman olan bir yöntemdir. Öte yandan, kapsamlı FDAM modeli, isminden de anlaşılacağı üzere 3-fazlı FDAM'nin detaylı modellenmesini içermektedir. Bu benzetim modeli, deneysel ölçümlere en yakın sonuçları vermesinin yanında sistem hakkında ek bilgileri de (faz akımları ve statorun ters elektromotor kuvvet voltajları v.b.) sağlamaktadır. Test düzeneğine açısından, bu tarz eyleyici sistem doğrulama test düzeneklerinde daha önce değişken yük sağlamak için kullanılmamış bir sistem olan MRS tabanlı fren kullanılarak yazına yeni bir yöntem sunulmuştur. Bir diğer önemli nokta ise, MRS tabanlı fren eyleyici sistemin modelinin doğrulanmasında kullanıldığı gibi bir eyleyici sistem kullanılarak da aynı test düzeneği ile yeni bir MRS tabanlı frenin modelinin doğrulanması gerçekleştirilebilir. Bunlara ek olarak, bu çalışmada elde edilen modeller sayesinde gelecek çalışmalarda, insan-robot etkileşimi senaryolarında kullanılacak uyumlu bir denetleyici tasarımı yapılması hedeflenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] S.M. Ramesh Balaji and C. Muniraj, "Implementation of PI Controller for 3Phase BLDCM Drive Using FPGA," Int. J. Rec. Emb. Sys. (IJRES), vol. 4, No. 1, pp. 42-54, March 2015.
- [2] C. M. Paweł, D. Ignacy, and P. Marcin, "Laboratory tests of a PM-BLDC motor drive," Sel. Prob. of Elec. Eng. Elec. (WZEE), pp. 1-6, September 2015.
- [3] A. V. den Bossche, D. V. Bozalakov, T. Vyncke, and V. C. Valchev, "Programmable Logic Device Based Brushless DC Motor Control," Proc. 14th Eur. Conf. Pow. Elec. App., 1-10, August 2011.
- [4] S. Chen and C. Kuo, "Design and implementation of double-integral sliding-mode controller for brushless direct current motor speed control," Sage J. Adv. Mech. Eng., vol. 9, pp. 11, 2011.
- [5] W. Abed, S. Sharma, R. Sutton, and A. Motwani, "A Robust Bearing Fault Detection and Diagnosis Technique for Brushless DC Motors Under Non-stationary Operating Conditions," J. Cont., Auto. Elec. Sys., vol. 26, pp. 241-254, June 2015.
- [6] E. Çelik and N. Öztürk, "Attenuating saturated-regulator operation effect of brushless DC motors through genetic-based fuzzy logic estimator," Turkish J. Elec. Eng. Comp. Sci, vol. 26, pp. 3208-3224, November 2017.
- [7] Ö. Üstün, Ö. C. Kivanc, S. Senol, and B. Fincan, "On Field Weakening Performance of a Brushless Direct Current Motor with Higher Winding Inductance: Why Does Design Matter?," Energies J., vol. 11, pp. 3119, November 2018.
- [8] M. V. Ramesh, J. Amarnath, S. Kamakshiah, B. Jawaharlal, and G. S. Rao, "Speed Torque characteristics of Brushless DC motor in either direction on load using ARM controller," Book: ISGT2011-India, pp. 217-222, December 2011.
- [9] H. Erdal and B. Doğan, "DC Motor Parametrelerinin Deney Tabanlı Belirlenmesi ve Parametre Belirleme Sonuçlarının İyileştirilmesi," J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ., vol. 3, pp. 589-598, 2012.
- [10] Y. Bektaş and N. F. O. Serteller, "Brushless direct current (BLDC) motor driving experimental set," J. Energy Edu. Sci. Tech. Part A: Energy Sci. Res., vol. 2011, pp. 455-466, February 2011.
- [11] A. Kurdoglu, "Brushless DC Motor Speed Control Circuit Design," MSc Thesis 2007.
- [12] A. S. Çabuk, Ş. Sağlam, and Ö. Üstün, "Impact of Various Slot-Pole Combinations on an In-Wheel BLDC Motor Performance," Electrica J., vol. 17, pp. 3369-3375, June 2017.
- [13] O. Mohammed, "A Study of Control Systems for Brushless DC Motors," MSc Thesis, 2014.
- [14] M. Yılmaz, "Analysis and Modeling of an Actuation System to be used in Light-weight Collaborative Robots," MSc Thesis, 2019.
- [15] "Maxon Motor Catalog, Maxon Motor AG Product Catalog website - <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>," 2019.
- [16] "Humusoft website - <https://www.humusoft.cz/datacq/>," 2019.
- [17] "Futek website - <http://www.futek.com/index.aspx>," 2019.
- [18] "Allegro MicroSystems, LLC - <https://www.allegromicro.com/>," 2019.
- [19] M. G. Karabulut and M. İ. C. Dede, "Design and experimental validation of an MR-fluid based brake for use in haptics," Actuator 2018, 16th Int. Conf. on New Act., pp. 1-5, June 2018.