

FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTOR SÜRÜCÜSÜ ANAHTARLAMA FREKANSININ MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİ

Buğra Er ^{1*}, Tuba Kocaer², Çağlar Acar³, Ahmet Fenercioğlu⁴

^{1,2,3} KORMAS Elektrikli Motor A.Ş. TOSB OSB, Kocaeli,

0000-0002-3982-5654: bugraer@kormas.com

0000-0003-4614-7158: tubakocaer@kormas.com

0000-0002-7849-4464: caglaracar@kormas.com

⁴ Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Tokat,

0000-0002-1522-6868: ahmet.fenercioglu@gop.edu.tr

*Sorumlu Yazar

Özet

Fırçasız Doğru Akım Motorları (FDAM) fırça ve kollektör içermediği için uzun ömürlü ve yüksek verimlidir. Birçok uygulamada fırçalı DA motorların yerini almaktadır. FDAM'un çalışabilmesi ve kontrol edilebilmesi için elektronik komütasyon gerekmektedir. Bu nedenle ilave bir elektronik sürücü ve rotor konum bilgisi gerekir. Sürücü alan etkili sensörlerden almış olduğu sayısal konum bilgisine göre ilgili fazı anahtarlara trapezoidal bir sinyal ile motoru sürmektedir. Bu durumda performansın donanım ve yazılımda optimize edilmesi gerekmektedir. Performans iyileştirme çalışmalarında, anahtarlama frekansı motor performansını doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada farklı anahtarlama frekanslarına göre motorun yüklenme testleri yapılmıştır. Bu testler 13 V DA gerilim altında motora düşük yükten aşırı yüklenmeye kadar belirli aralıklarda tork uygulanarak motorun akım, hız, verim ve güç değerleri ölçülmüştür. Testlerde anahtarlama frekansı değiştirilerek aynı tork değerlerinde hız ve akım değerleri yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Fırçasız motor performans verileri değerlendirilerek farklı yüklerde 10 kHz ve 15 kHz Anahtarlama frekansı değerlerinde iyileşmeler tespit edilmiştir. Motor sürücüsü 9 kHz ile başlayarak 15 kHz değerine ulaşacak şekilde optimize edilmiştir performansta daha iyi sonuçlar sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler; Fırçasız Doğru Akım Motor Sürücüsü, PWM Frekansı, Fırçasız Motor

1. Giriş

Fırçasız Doğru Akım Motoru (FDAM) yüksek kalkış momentine sahiptir ve değişken hızlı uygulamalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Fırçalar olmadan mekanik aşınma, ses ve sıcaklık minimize edilebilir. Kontrol algoritması Doğru Akım fırçalı motorlarına oranla oldukça karmaşıktır. Rotor konumunun algılanarak komütasyon işlemi yapılması gerekir. Rotor konumunun algılanabilmesi için sensörlü kontrolde alan etkili sensörleri kullanılır. Yükte kalkması gereken uygulamalarda alan etkili sensörleri kullanmak avantajlıdır. Motor kalkışı için üç adet sensörden gelen verileri değerlendirilerek uygun fazı tetikler. Hızlanmaya bağlı anahtarlama açılarının kontrolü zorunludur. Diğer taraftan, hızlanma oranı da yük özelliklerine bağlıdır. Başlangıç süresini kısaltmak sürülen yükün özelliklerine bağlı olduğu gibi uygulanan kontrol yöntemine de bağlıdır. Sadece akımlar kontrol edildiğinde, motor hızı sistemin mekanik dinamiklerine göre artacaktır. FDAM sürücü dalga formları gözlemlenerek optimum çalışma durumu sağlayacak kontrol karakteristiği elde edilebilir. FDAM tork karakteristiği, motor akımı ve hızına göre uygun, önceden hesaplanmış açma ve kapama açıları uygulanarak daha sonra çalışma sırasında optimize edilebilir. Bu kontrol metoduyla beraber trapezoidal bir sinyal ortaya çıkacaktır. Sürücü devresi üzerindeki anahtarlama frekansı etkisi motorun yük ve hızına bağlı olarak değişmektedir.

Şekil 1’de kullanılan fırçasız doğru akım motoru ve Şekil 2’de kullanılan sürücü gösterilmiştir. Sürücü üzerinde besleme girişi, faz çıkışları, alan etkili sensör beslemesi, alan etkili sensör girişi ve hız bilgisi girişi bulunmaktadır. Kart yapısı; Mikroişlemci, MOSFET sürücü, MOSFET ve Regülatörlerden oluşmaktadır. Gerekli donanım hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 1: Fırçasız doğru akım motoru



Şekil 2: FDAM sürücüsü

Bekiroglu ve Dalgın (2020) çalışmasında FDAM hız ve konum kontrollerini algoritma tabanlı bir kontrolör kullanılarak gerçekleştirmiştir. Motorun konum verilerini elde etmek için alan etkili sensörleri kullanılmıştır. Kontrol sisteminde sinüs ve trapezoidal referans modelleri kullanmışlardır. Önerilen kontrol sistemi, motorun konum kontrolü yanında hız kontrolü için de çalıştırılmıştır. Geliştirilen hız ve konum kontrol yöntemi hem trapezoidal hem de sinüzoidal komütasyon teknikleri için test edilmiştir. Bu komütasyon tekniklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı yük ve çalışma koşulları altında motorun hız ve konum sonuçları elde edilmiştir.

Papathanasopoulos ve arkadaşları (2020), kritik uygulamalarda FDAM sürücüsünün güvenilir durum izlemesi için alternatif bir yaklaşım önermiştir. Alan etkili pozisyon sensörü tabanlı sürücülere odaklanarak, dengesiz sistem çalışması teşhisi için veri odaklı bir yaklaşım sunulmaktadır.

Zhang ve ark (2020), FDAM özelliklerine ve çalışma prensibine göre, donanım ve yazılım açısından fırçasız DA motorun bir sürücü kontrolörü tasarlanmıştır. Kontrol sistemi, güç kaynağı devresi, sürücü devresi ve algılama devresi dahil olmak üzere mikroişlemci olarak STM32F103RBT6 kullanılmıştır.

Su ve ark. (2019) çalışmasında, güç devresi, sürücü izolasyon devresi, iletişim devresi ve koruma devresi dahil olmak üzere çekirdek olarak STM32 mikro işlemcisi ile kontrol sistemini tasarlanmıştır. Güç kaynağı ve filtre devresi, güç kaynağı dalgalanmasını azaltarak güç kaynağının kararlılığını arttırmak için tasarlanmıştır.

Pindoriya ve ark. (2018), FPGA kullanarak fırçasız doğru akım motor sürücü tasarımını ve uygulamasını gerçekleştirmiştir. FPGA, dijital darbe genişlik modülasyonu kontrol tekniğini kullanarak altı darbeli üç fazlı bir eviriciyi çalıştırır. Bu kontrol stratejisi basit ve güçlüdür, akım sensörü gerektirmeden motor kontrolü sağlanmıştır. Önerilen tekniğin simülasyonu MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiş ve karşılık gelen sonuçlar FPGA kartının deneysel sonuçları ile doğrulanmıştır.

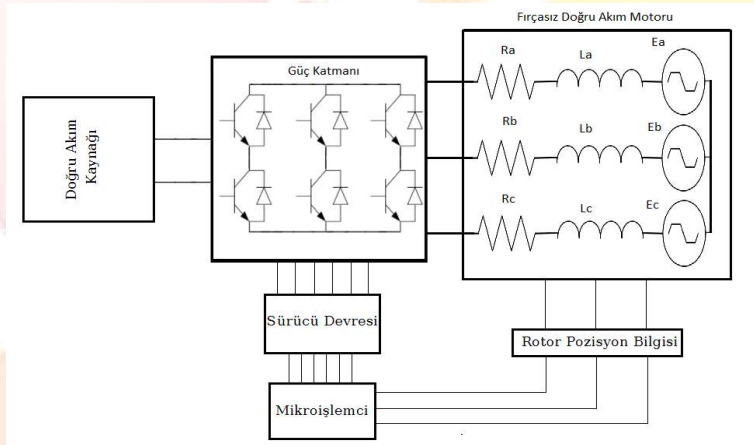
Kolano ve Ark. (2021), Fırçasız motorun sensörlü kontrolünde rotorunun konumunu belirleyen elemanların hatalı performans göstermesi veya arızalanması durumunda olumsuz etkileri azaltmak için çalışmıştır. Ctibor ve ark. (2019) Fırçasız motorun sürücüsü STM32 ARM mikro denetleyici kullanılmıştır. Uygulama yapısını, kullanılan sürücülerini ve çevre birimlerini ve uygulanan kademeli kontrol yapısını açıklamıştır. Echle ve ark. (2020), trapezoidal ters-emf dalga formuna sahip bir

eksenel akıllı motor için FDAM sürücü yöntemlerinin karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır. 120 derece iletimli FDAM modunun en iyi verimlilik performansına sahip olduğu göstermiştir.

Bu çalışmada farklı anahtarlama frekanslarına göre motorun yüklenme testleri yapılmıştır. Bu testler 13 V DA gerilim altında motora düşük yükten aşırı yüklenmeye kadar belirli aralıklarda tork uygulanarak motorun akım, hız, verim ve güç değerleri ölçülmüştür. Testlerde anahtarlama frekansı değiştirilerek aynı tork değerlerinde hız ve akım yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Fırçasız motor performans verileri değerlendirilerek farklı yüklerde 10 kHz ve 15 kHz Anahtarlama frekansı değerlerinde iyileşmeler tespit edilmiştir. Motor sürücüsü 9 kHz ile başlayarak 15 kHz değerine ulaşacak şekilde optimize edilmiştir performansta daha iyi sonuçlar sağlanmıştır.

2. Motor Kontrol Yapısı

FDAM yapıları gereği elektronik olarak kontrol edilir ve doğru akım komütasyonu için kontrol işleminde rotor pozisyon bilgisi gerekir. Bu çalışmada alan etkili sensörleri kullanılarak pozisyon bilgisi alınmıştır. Fırçasız DA motorların kontrolünde, iki ayrı kapalı çevrim kullanılır. Birincisi, iç kontrol çevrimidir ve burada motor akımı veya momentini kontrol edilir. Bu amaçla, motor faz sargılarının akımları sürekli takip edilerek, referans akımı izlemesi sağlanır. İkincisi ise, dış kontrol çevrimidir. Bu çevrimde, motor hızı kontrol edilir. Geri besleme olarak, pozisyon sensörlerinden alınan gerçek motor hız ve konum bilgisi hız denetleyicisinde işlenmektedir.



Şekil 3: FDAM sürücü şematik diyagramı

Şekil 3’de gösterilen FDAM sürücünün şematik diyagramı verilmiştir. Üç faz dengeli sistemlerde açılı ile rotor relüktanslarında herhangi bir değişiklik olmadan nominal akımda çalışıldığı varsayıldığında gerilim denklemleri (1), (2), (3) nolu eşitlikler ile verilmiştir.

$$V_a = R_a I_a + L_a \left(\frac{dI_a}{dt} \right) + E_a \quad (1)$$

$$V_b = R_b I_b + L_b \left(\frac{dI_b}{dt} \right) + E_b \quad (2)$$

$$V_c = R_c I_c + L_c \left(\frac{dI_c}{dt} \right) + E_c \quad (3)$$

Burada ; V_a, V_b, V_c Giriş faz gerilimleri (V), I_a, I_b, I_c Stator faz akımları (A), E_a, E_b, E_c zıt EMK (V) dir. $L_a = L_b = L_c = L_s$, Henry cinsinden armatür endüktansları ve $R_a = R_b = R_c = R$, ohm cinsinden armatür dirençleridir

FDAM ilk adımda dirence ve endüktansa bağlı olarak (1), (2), (3) formüllerinde yer verilen formüller kullanılmıştır. Armatür üzerindeki endüktans zamana bağlı bir değişken olup anahtarlama frekansı ile doğrudan bağlantılıdır. Üzerinde çalışılan FDAM için endüktansı ağırlıklı olmak üzere gerekli özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1: Fırçasız doğru akım motoru özellikleri

Parametre	Değer	Birim
Nominal Hız	4000	Rpm
Nominal Gerilim	13	V
Stator sargı faktörü	0.866025	
d eksenli reaktif endüktansı Lad	5395.06	nH
d eksenli reaktif endüktansı Laq	5395.06	nH
d eksenli endüktansı L1+lad	27593.9	nH
d eksenli endüktansı L1+laq	27593.9	nH
Armatür kaçak endüktansı L1	22198.9	nH
Sıfır dizi endüktansı L0	4095.96	nH
Armatür faz direnci R1	0.0282124	Ohm
d eksenli zaman sabiti	191230	Ns
q eksenli zaman sabiti	191230	Ns

Fırçasız DA motor, sabit mıknatıslı bir rotora sahip ve elektronik komütasyon için rotor pozisyonu bilinmesi gereklidir. Döner manyetik alan rotor pozisyonuna göre anahtarlanan yarı iletken elemanlar ile kontrol edilir. Fırçasız DA motorlarda kutup değişimi yarı iletken anahtarlarla elektronik olarak yapılır. Sensör konumlarına göre tetiklenecek ilgili fazlar Tablo 2’de verilmektedir. Bu tetiklemeler sonucu motor trapezoidal sinyal ile beraber sürülür. Fırçasız DA motorlarda komütasyon altı adımdan oluşur. Her bir adım 60° ar derecelik elektriksel aralıklara denk gelir ve iki sargı enerjilendirilir. Anahtarlama adımlarının sırasını rotor konumu belirler. Bu yüzden fırçasız DA motorlarda kontrol için rotor konumunun bilinmesi esastır.

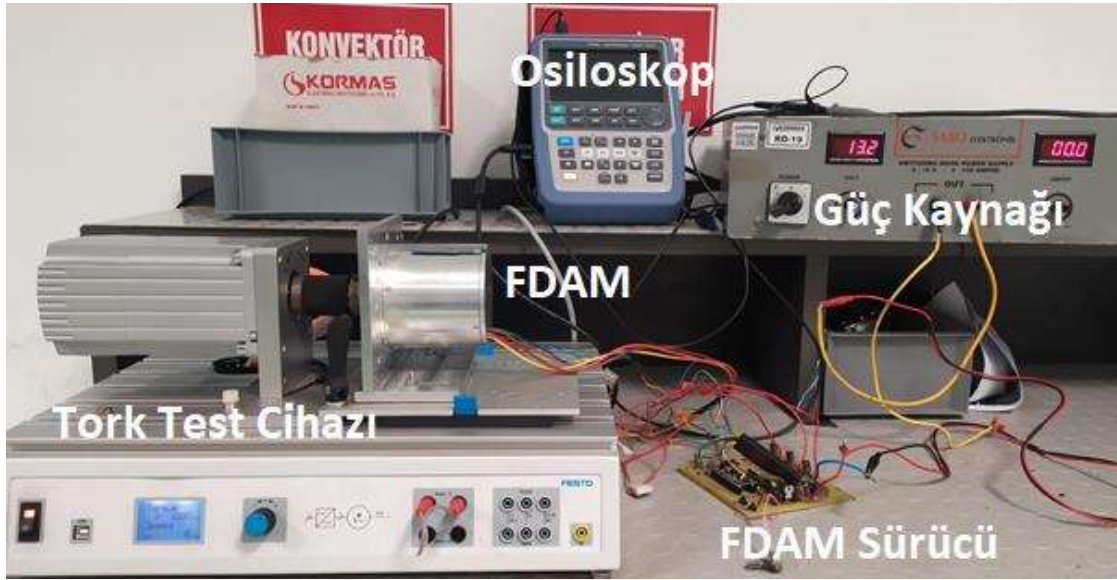
Tablo 2: Sensor konumları ve ilgili fazlar

Sensor Lojik Konumları				Sürücü Çıkışları					
HA	HB	HC	YÖN	GLA	GLB	GLC	GHA	GHB	GHC
1	0	1	1	/PWM	0	1	PWM	0	0
1	0	0	1	0	/PWM	1	0	PWM	0
1	1	0	1	1	/PWM	0	0	PWM	0
0	1	0	1	1	0	/PWM	0	0	PWM
0	1	1	1	0	1	/PWM	0	0	PWM
0	0	1	1	/PWM	1	0	PWM	0	
1	0	1	0	1	0	/PWM	0	0	PWM
1	0	0	0	0	1	/PWM	0	0	PWM
1	1	0	0	/PWM	1	0	PWM	0	0
0	1	0	0	/PWM	0	1	PWM	0	0
0	1	1	0	0	/PWM	1	0	PWM	0
0	0	1	0	1	/PWM	0	0	PWM	0

Çalışmada kullanılan motor, 150 W mekanik güç 12/8 oluk-kutup kombinasyonuna ile 3500 d/d etiket değerlerine sahiptir ve santrifüj pompa tahrikinde kullanılmaktadır. Bu motorun Festo DriveLab motor test cihazı yardımıyla tork testleri gerçekleştirilmiştir. Festo test sistemindeki servo motor mili kaplin vasıtasıyla test motoruna bağlanır. Servo motoru test motoruna belirlenen aralıklarla yük uygular ve test motorunun çektiği akım, hız, çalışma gerilimi ve uygulanan yük torku kaydedilerek tork testi gerçekleştirilir.

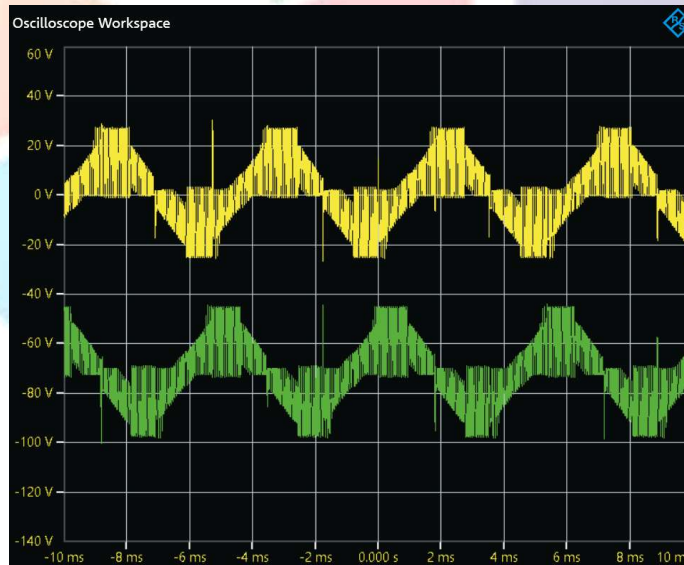
12V FDAM sürücüsü ile birlikte çalıştırılmıştır. Festo tork testi ölçüm cihazına bağlanan motorun yük altındaki davranışı gözlenmiş olup, motorun tork, hız, güç ve verim gibi grafikleri elde edilmiş

ve motorun çalışma eğrisi çıkarılmıştır. Tork testi düzeneği Şekil 4’de verilmiştir. Motora ait tork testi sonuçlarının frekansa göre değişimini Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’de gösterilmiştir.



Şekil 4: FDAM tork testi düzeneği

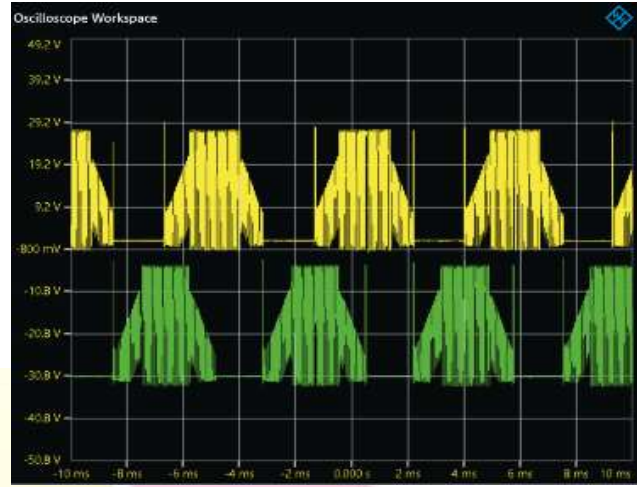
Faz grafikleri frekans farklarını gösterebilme amacıyla %50 doluluk oranına sahip darbe genişliği modülasyonlu (DGM) sinyali ile alınmıştır. Motorun Faz-Faz grafikleri ise %94 doluluk oranına sahip DGM Şekil 5’de gösterilmiştir. Grafikleri osiloskop ekranından alabilmek için Rohde & Schwarz arayüzü kullanılmıştır. Trapezoidal faz sinyali içerisindeki anahtarlama sıklığı frekans olarak ifade edilir. Grafiklerde frekans farkları açıkça görülmektedir. Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da trapezoidal faz sinyali üzerindeki anahtarlama sayısı açıkça fark edilmektedir. Anahtarlama frekansını değiştirmek yazılımsal olarak ön ölçekleyici kaydedicisi ile sağlanmaktadır. Anahtarlama frekansı belli bir faz sinyali içindeki sıklığı ifade etmektedir. Bu da motorun endüktansı ve zaman sabitine bağlı olarak verileri doğrudan etkilemektedir. Aynı zamanda frekans ise ses değişimi de gerçekleşmektedir.



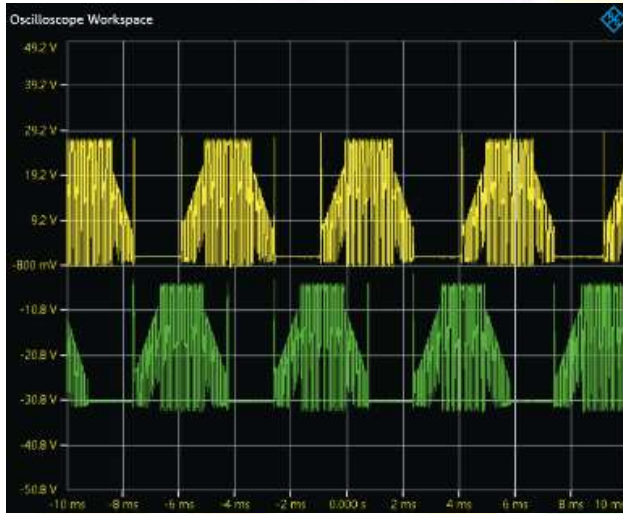
Şekil 5: Faz-Faz grafiği



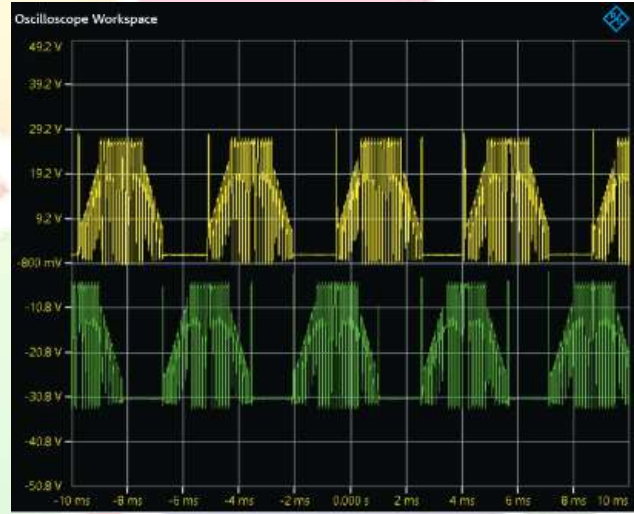
Şekil 6: %50 DGM 20 kHz



Şekil 7: %50 DGM 15 kHz



Şekil 8: %50 DGM 12 kHz



Şekil 9: %50 DGM 8 kHz

Anahtarlama frekansı olarak motor sarımdaki bobin endüktansına göre seçilmesi gereken anahtarlama frekansı vardır. FDAM sürüşünde kalkıştan itibaren 9kHz'den başlayarak 15 kHz'e ulaşması belirlenmiştir. FDAM yükünden ötürü kalkışlarda nispeten düşük frekans tercih edilmektedir. Nominal hızında ise 15 kHz'in daha iyi olduğu kararlaştırılmıştır. Çalışmalarda 10 kHz- 15 kHz- 20 kHz anahtarlama frekanslarında motor yüklenmiştir. Çıkan veriler Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5 olarak çıkış grafikleri ile beraber kaydedilmiştir.

Anahtarlama frekansı olarak motor sarımdaki bobin endüktansına göre seçilmesi gereken anahtarlama frekansı vardır. Motor sürüşünde kalkıştan itibaren 9 kHz'den başlayarak 15 kHz'e ulaşması belirlenmiştir. Motor yükünden kaynaklı, kalkışlarda nispeten düşük frekans tercih edilmektedir. Nominal hızında ise 15 kHz'in daha iyi olduğu kararlaştırılmıştır. Çalışmalarda 10 kHz-15 kHz-20 kHz anahtarlama frekanslarında motor yüklenmiştir.

Tablo 3: DGM frekansı = 10 kHz

Tork	Hız	Akım	Gerilim	P _{giriş}	P _{çıkış}	Verim
0.17 Nm	3810 d/d	8.1 A	13 V	105.30 W	67.83 W	64%
0.27 Nm	3590 d/d	11.1 A	13 V	144.30 W	101.51 W	70%
0.36 Nm	3390 d/d	13.6 A	13 V	175.44 W	127.81 W	73%
0.45 Nm	3170 d/d	17.4 A	13 V	226.20 W	149.39 W	66%
0.55 Nm	3200 d/d	19.4 A	13 V	265.78 W	184.32 W	69%
0.63 Nm	2470 d/d	23.2 A	13 V	283.04 W	162.96 W	58%

Tablo 4: DGM frekansı = 15 kHz

Tork	Hız	Akım	Gerilim	P _{giriş}	P _{çıkış}	Verim
0.17 Nm	3860 d/d	8.5 A	13 V	110.50 W	68.72 W	62%
0.29 Nm	3610 d/d	11.8 A	13 V	153.40 W	109.64 W	71%
0.34 Nm	3480 d/d	13.5 A	13 V	175.50 W	123.91 W	71%
0.44 Nm	3220 d/d	16.9 A	13 V	219.70 W	148.37 W	68%
0.50 Nm	3190 d/d	19.0 A	13 V	248.90 W	167.04 W	67%
0.54 Nm	3176 d/d	20.2 A	13 V	274.72 W	179.61 W	65%
0.64 Nm	3300 d/d	23.1 A	13 V	300.30 W	221.18 W	74%
0.69 Nm	2540 d/d	26.1 A	13 V	334.08 W	183.54 W	55%
0.79 Nm	2380 d/d	30.0 A	13 V	396.00 W	196.90 W	50%
0.83 Nm	2310 d/d	31.2 A	13 V	424.32 W	200.79 W	47%
0.89 Nm	1862 d/d	35.1 A	13 V	431.73 W	173.55 W	40%
0.95 Nm	1736 d/d	38.4 A	13 V	503.04 W	172.71 W	34%

Tablo 5: DGM frekansı = 20 kHz

Tork	Hız	Akım	Gerilim	P _{giriş}	P _{çıkış}	Verim
0.17 Nm	3900 d/d	8.6 A	13 V	112.66 W	69.43 W	62%
0.27 Nm	3680 d/d	11.5 A	13 V	150.65 W	104.05 W	69%
0.39 Nm	3350 d/d	15.4 A	13 V	200.20 W	136.82 W	68%
0.49 Nm	3250 d/d	18.7 A	13 V	250.58 W	166.77 W	67%
0.57 Nm	2550 d/d	23.4 A	13 V	285.48 W	152.22 W	53%

3. Sonuç

Bu çalışma verimli, düşük maliyetli ve güvenilir bir kullanım ile sürülen FDAM'da frekansa bağlı olan değişimleri incelemektedir. FDAM'ın hızını kontrol etmek için rotor pozisyon bilgisine bağlı olarak ilgili fazların anahtarlama elemanlarına DGM sinyali uygulanarak motor sürüşü sağlanır. STM32F031 Mikroişlemci yapısı ile beraber frekans değişiklikleri için ön ölçekleyici kaydedicisini barındırır. Elde edilen sonuçlar yüklü kalkış anlarında motorun düşük frekanslı olmasının yüksek frekansa oranla daha iyi sonuç verdiğini göstermiştir. Yük dengesi sağlanmış motorda ise en optimal frekansın sağlanması öncelikli olmalıdır. Deneysel gösterim sonuçları basılan devre kartı üzerinde motor sürüş gerçekleştirilirken akımın osiloskop çıktıları paylaşılmıştır. Osiloskoptan alınan grafiklerde 8kHz den itibaren 20 kHz'e kadar çeşitli grafikler verilmiştir. Bu grafikler faz toprak ve faz-faz şeklinde verilmiştir. Faz-toprak grafiklerinde anahtarlama frekansı değişikliği açıkça görülmektedir. Bu çalışmada motor dinamik modeline ve barındırdığı endüktans ile anahtarlama frekansı ilişkisine yer verilmiştir. Gerçekleştirilen motorun verileri paylaşılmıştır. Bu sayede 13V FDAM'ın sensörlü kontrolü ve yükte kalkışının frekans sayesinde iyileştirilmesi sağlanmıştır. Böylece yüklü kalkışlarda DGM frekansı düşük, motor yol aldıktan sonra yüksek frekansa geçilmektedir.

4. Kaynakça

- Bekiroglu, E., Dalkin, A. (2020). Comparison of Trapezoidal and Sinusoidal PWM Techniques for Speed and Position Control of PMSM. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 18(4), 207-216.
- Ctibor, J., Vorel, P., Knobloch, J., & Pazdera, I. (2019). BLDC Motor Control with Cascade Structure Utilizing ARM MCU. *IEEE International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE)* pp. 61-65

Echle, A., Gong, Y., Terfurth, J., & Parspour, N. (2020). FEA-Based Comparison of BLDC and BLAC Modes for an Axial Flux Motor with Trapezoidal BEMF. In IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (pp. 2694-2701). IEEE.

Kolano, K., Drzymała, B., & Geça, J. (2021). Sinusoidal Control of a Brushless DC Motor with Misalignment of Hall Sensors. Energies, 14(13), 3845.

Papathanasopoulos, D. A., Mitronikas, E. D., Giannousakis, K. N., & Dermatas, E. S. (2020). An Alternative Approach for Condition Monitoring of Brushless DC Motor Drives. In 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM) (Vol. 1, pp. 1280-1286). IEEE.

Pindoriya, R. M., Mishra, A. K., Rajpurohit, B. S., & Kumar, R. (2018). FPGA based digital control technique for BLDC motor drive. In 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) (pp. 1-5). IEEE.

Su, Z., Xiao, Y., & Zhang, Y. (2019). The Design of orchard spraying control system based on STM32. In 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (pp. 799-803). IEEE

Zhang, F., Kong, X., Li, F., & Zhang, Y. (2020). The Design of Controller for BLDC Based on STM32. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 446, No. 4, p. 042047). IOP Publishing.

NOT: Bu yayın, KORMAS Elektrikli Motor San.Tic.A.Ş. Ar-Ge Merkezinde tamamlanan 7190809 numaralı “Fırçasız Doğru Akım Motorlu Manyetik Kavramalı Pompa Tasarımı” projesi kapsamındaki Ar-Ge çalışmalarından elde edilmiştir.