

Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Sürücü Uygulaması

Permanent Magnet Synchronous Motor Driver Application

Buğra ER¹, Okan BİNGÖL²

¹Kormas Elektrikli Motor A.Ş. TOSB OSB, Kocaeli
bugraer@kormas.com

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi
okanbingol@isparta.edu.tr

Özet

Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorlar yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, hızlı tepki süresi ve lineer moment karakteristiği gibi özellikleriyle yüksek performans gerektiren uygulamalarda oldukça geniş yer bulmaktadır. Bu çalışmada Gömülü Mıknatıslı Senkron Motorun uygulaması gerçekleştirilmiştir. Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor alan yönlendirmeli kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Gömülü Mıknatıslı Senkron Motoru için kontrol kartı ve sürücü devresi kartı tasarımı gerçekleştirilmiştir. Gömülü mıknatıslı senkron motor sürücüsü üzerinde zıt elektromanyetik kuvvet algılama devresi üzerinde iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirme yapılan faz sinyalleri verilmiştir.

Abstract

Permanent Magnet Synchronous Motors are widely used in applications requiring high performance with their features such as high power density, high efficiency, fast response time and linear torque characteristics. In this study, the application of Permanent Magnet Synchronous Motor has been carried out. Permanent Magnet Synchronous Motor is controlled by field oriented control method. Control card and driver circuit board design has been realized for Permanent Magnet Synchronous Motor. Improvements have been made on the opposing electromagnetic force sensing circuit on the permanent magnet synchronous motor driver. Improved phase signals are given.

1. Giriş

Günümüz dünyasında elektrik makineleri ev aletlerinden, ulaşım araçlarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Elektrik makineleri elektriksel enerjiyi mekaniksel enerjiye veya mekaniksel enerjiyi elektriksel enerjiye döndüren makineler olarak ifade edilir. Kendi aralarında hareketli ve hareketsiz elektrik makineleri olarak sınıflandırılır [1]. Doğru Akım Motorları kendi aralarında fırçalı ve fırçasız olarak gruplanır. Fırçasız motorlar ise motor yapıları ve kontrol algoritmalarına göre birbirinden farklılık göstermektedir. Rotor üzerinde yapılan değişiklikler ile motorun matematiksel modelinden sürüş parametrelerine kadar birçok etken değişmektedir. Rotor üzerinde yapılan değişiklikler ile iç rotorlu, dış rotorlu, gömülü mıknatıslı rotor ve spoke tip motor olarak isimlendirilebilir.

Motorlar aynı zamanda trapezoidal veya sinüzoidal kontrol yöntemleri ile beraber sürüş şekillerine göre de isimlendirilmektedirler.

Gömülü mıknatıslı senkron motor (GMSM) bazı endüstriyel uygulamalarda özellikle tercih edilmelerinin bir sebebi de yüksek dinamizm gerektiren uygulamalarda aynı güçteki üç fazlı asenkron motorlara kıyasla daha az hacimde aynı momenti üretebilmesidir. Ancak GMSM, üç fazlı asenkron motorlarda olduğu gibi elektrik şebekesinden doğrudan yol verme metodu ile kullanılamazlar. GMSM kontrol yöntemleri arasında Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) ve Doğrudan Moment Kontrolü (DMK) popüler yöntemler olarak sayılabilir [2]. Alan yönlendirmeli kontrol tekniği kullanılarak çeşitli kontrolör yapıları vasıtasıyla motorun üreteceği moment veya motorun hızı kontrol edilebilmektedir. Son yıllarda alan yönlendirmeli kontrol çalışmalarında birçok çalışma bulunmaktadır [3]. Motor kontrol uygulamalarında, DSP tabanlı mikrodenetleyiciler [4] ile beraber günümüzde yaygın olarak STM tabanlı mikrodenetleyici kullanılmaktadır. STM mikrodenetleyiciler, düşük maliyetli, düşük güç tüketimli, yüksek işlem kapasiteli olmaları ve hızlı cevap verme yetenekleri sayesinde motor sürücülerinde kullanılan pahalı işlemcilerle bir alternatif sunmaktadır [5].

Bu çalışmada, alan yönlendirmeli kontrol yöntemi temel alınarak endüstriyel bir GMSM'un hız/pozisyon geri beslemeli kontrolünü gerçekleştirilmiştir. GMSM' a ait matematiksel model ve motor parametreleri verilmiştir. Motor kontrolü ve pozisyon geri beslemesini sağlayabilmek için zıt emk algılama devresi kullanılmıştır. Tasarlanan sürücü STM tabanlı olduğundan literatürdeki pahalı motor sürücülerine göre düşük maliyetli fakat alan yönlendirmeli kontrol işlemini başarıyla uygulayabilen bir alternatif olarak ortaya konmuştur. GMSM ve motor sürücüsü birlikte kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlara yer verilmiştir.

2. Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor

Bir GMSM'u analiz etmek ve kontrol etmek için öncelikle matematiksel modelini bilmek gereklidir.

Motor Model parametreleri olarak Çizelge 1'deki parametreler kullanılmıştır. Faz-nötr gerilimi parametresi olarak v_u, v_v, v_w ve faz-nötr akımları için ise i_u, i_v, i_w verilmiştir. GMSM

matematiksel modelinin giriş parametresi olarak; q eksenini stator gerilimi v_q , v_d , d, eksenini stator gerilimi üç faz voltajının Clarke ve Park transformasyonu ile dönüştürülmesiyle ve yük torku girilmiştir. Matematiksel modelin çıktısı olarak ise i_q ve i_d parametrelerine ters clark, ters park transformasyonları uygulanarak I_a, I_b ve I_c olarak gösterilen üç faz akım değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca mekanik rotor açısı θ_m , elektriksel rotor açısı θ_e ve rotor radyal hızı ω gözlemlenmiştir. GSM matematiksel modelinin bu çıktıları aynı zamanda sistemin geri beslemeleridir [6].

Çizelge 1’de i_a, i_b, i_c akımları 3-faz sabit referans düzleminde aralarında 120° faz farkı bulunan akımları, i_α, i_β gösterilmektedir. Birbirinden 90° faz farkı 2-faz sabit referans düzlem akımlarını, i_d, i_q akımları ise yine birbirinden 90° faz farklı 2-faz rotor referans düzlem akımını temsil etmektedir.

Motor yapısında bahsedildiği gibi rotoru mıknatıs ve saçlardan oluşturulmuştur stator ise sargılar bulunmaktadır. Motor fazları bu çalışmada u, v, w olarak adlandırılmıştır.

Motor modeli oluşturulurken belli kabullerde bulunarak matematiksel modelin daha net ifade edilebilmesi amaçlanmıştır. Bu kabuller dengeli sargı dağılımı ve saturasyonların ihmal edilmesi olarak özetlenebilir [7].

Dengeli üç fazlı bir sistemde u, v, w olarak isimlendirilen noktalarda gerilim ifadeleri toplamı sıfır olmalıdır. Üç faza sahip sistemde her bir faz için ilgili denklemler faz direncindeki gerilim düşümü ve endüktif bileşen olmaktadır. Gerilim düşümü faz direnci ve akımın çarpımı ile bulunurken, endüktif bileşen fazdaki akı değişimi olarak ifade edilebilir. İlgili ifade Denklem 1’de verilmiştir.

$$\begin{aligned} v_u &= i_u R + \frac{d\Phi_u}{dt}, \\ v_v &= i_v R + \frac{d\Phi_v}{dt}, \\ v_w &= i_w R + \frac{d\Phi_w}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

GSM matematiksel modeli için gömülü mıknatısların rotorda yer alması nedeniyle eşit bir relüktans yapısı oluşmaz. İlgili gömülü mıknatıslı rotor yapısı Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1: Gömülü Mıknatıslı Rotor

Dönüşümlerde bahsi geçen Clark dönüşüm matrisinin endüktans matrisine uygulanması ile a ve b ekseninde endüktans ifadelerine ulaşılır. Buradan yola çıkarak a ve b ekseninde endüktans hesabı elde edilir. Denklem 2 ve 3’de a ve b matrisi kullanılarak α ve β eksenleri olarak elde edilen ifade verilmiştir.

$$v_\alpha = i_\alpha R + L_{\alpha\beta} \frac{di_\alpha}{dt} + L_{\alpha\beta} \frac{di_\beta}{dt} - \omega_e \Phi_m \sin Q_e \quad (2)$$

$$v_\beta = i_\beta R + L_{\alpha\beta} \frac{di_\alpha}{dt} + L_{\alpha\beta} \frac{di_\beta}{dt} + \omega_e \Phi_m \cos Q_e \quad (3)$$

Park dönüşümü uygulanarak a ve b düzleminde d ve q düzlemine geçiş yapılır. Sargılarda oluşan gerilim düşümü, rotor pozisyon değişimlerinde akıya bağlı gerilim ve zıt emk kullanılarak d ve q eksenini gerilim denklemi oluşturulur. İlgili eksenindeki i_d, i_q endüktansları ve mıknatıs akısı referans alınarak Denklem 4 elde edilir [7].

$$v_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Zamana bağlı değişen akım göz önünde bulundurulduğunda, akı değişimindeki ifade kullanılarak akımın zamana bağlı türevi ifade edilebilir. Park dönüşümü yardımıyla elde edilen matrislerin çarpımları ve akı denklemlerinin hesaba katılmasıyla d ve q eksenlerinde denklemler elde edilebilir. Elde edilen denklemler yorumlandığında direnç üzerinde oluşan gerilim düşümü, endüktans bağlı akım değişimi ve ilgili akıların elektriksel hızı ile çarpılarak elde edilen gerilim d ve q düzlemlerinde Denklem 5 ve 6’da verilmiştir.

$$v_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (5)$$

$$v_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \Phi_m) \quad (6)$$

Motorun ürettiği tork formülü Denklem 7’de verilmiştir. GSM yapısında rotor tasarımında relüktans farkından oluşan tork ise Denklem 8’de verilmiştir [7].

$$T_e = \frac{3}{2} N (i_q (L_d i_d + \Phi_m) - i_d L_q i_q) \quad (7)$$

$$T_e = \frac{3}{2} N (i_q \Phi_m + i_q i_d (L_d - L_q)) \quad (8)$$

Motor faz akımlarının sinüsoidal modülasyonunu sağlamak için rotor pozisyonu belirlenmelidir. Bu nedenle enkoder, alan etkili sensörler veya zıt emk algılama devreleri kullanılabilir. Kullanılan yöntem ile eşzamanlı olarak PI kontrolör çalıştırılır. Sargılardaki akımlar sinüsoidal ve 120° faz geçişli olmalıdır. PI kontrolördeki çıkış, Darbe genişlik modülasyonu (DGM) düzenleyicide işlenerek nihai anahtarlama elemanı sinyaline dönüştürülür. Yarım köprü topolojisinde bağlı anahtarlama elemanları yardımıyla motorun iki faz terminaline uygulanır. Motorun üçüncü faz terminaline uygulanan gerilim, ilk iki faz terminaline uygulanan gerilimlerin toplamının negatifine eşittir [7].

Çizelge 1’de çalışmada kullanılan GSM’ye ait motor parametreleri verilmiştir. Şekil 2’de motor görseli verilmiştir.

Çizelge 1: Motor parametreleri

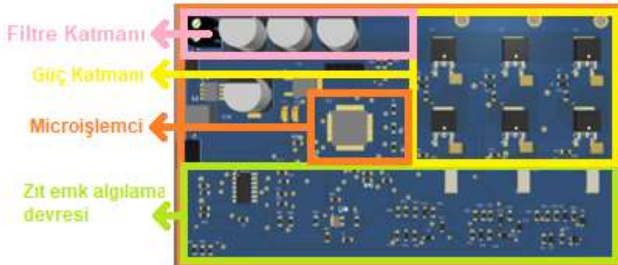
Nominal Hız	4000	rpm
Nominal Gerilim	26	V
Stator sargı faktörü	0.866025	
d Ekseni reaktif endüktansı	5395.06	nH
q Ekseni reaktif endüktansı	5395.06	nH
d Ekseni endüktansı	27593.9	nH
q Ekseni endüktansı	27593.9	nH
Faz direnci	0.0282124	ohm
d Ekseni zaman sabiti	191230	ns
q Ekseni zaman sabiti	191230	ns



Şekil 2: Gömülü Mıknatıslı Motor

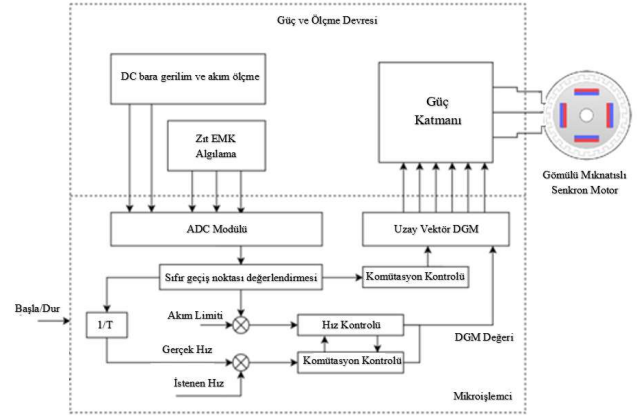
3. GSM Sürücü Uygulaması

Sensörsüz rotor pozisyonunu algılama tekniği ile indüklenen zıt emk'nın sıfır geçiş noktalarının tespit edilmesini ve GSM'in kontrol edilmesini sağlayan sürücü devre kartının Altium çizimi açıklamalarıyla beraber Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3: Sürücü Devre Kartı Çizimi

İki faz arasında zıt emk sıfır geçiş noktaları algılanır. Zıt emk sıfır geçişi algılama ile konum tespit edilir. Sıfır Geçiş algılama, anahtarlama elemanlarının anahtarlama ile üretilen gerilim artışlarını filtrelemek için yazılım ile DGM sinyalinin merkezine senkronize edilir [8]. Başlangıç olarak rotor bilinen bir pozisyona hizalanır. Bir sonraki aşamada rotor konum geri bildirim olmadan başlatılır. Rotor hareket ettiğinde, zıt emk elde edilir, minimum sayıda doğru komütasyon elde edildikten sonra komütasyon şemasına göre döngü içerisinde çalışma moduna geçilir ve normal çalışma algoritmaları koşulu. İstenen sayıda doğru komütasyon elde edilmezse zıt emk doğrulama algoritmasına dönülür ve yeterli koşul elde edilene kadar bu döngü sürer.



Şekil 4: GSM Sürücü Diyagramı

Sensörsüz algoritmanın çalışmaya başlatılmasının ardından mikroişlemcinin ADC, DGM vb. modülleri başlatılır. Akış diyagramında da görünen bayrak işlemlerinin tamamlanmasıyla akışta motor sürücü yazılımı çağırılır, sürücü yazılımı çalışmaya başladığında sabit hız sağlanır. Zıt emk sıfır geçişleri ile komütasyon arasındaki algoritmanın diyagramı Şekil 4' de verilmiştir.

Komütasyon süreci, zıt emk sıfır geçişinin başarılı bir şekilde yakalanmasını sağlayan kısımdır, yeni komütasyon zamanı hesaplanır ve son olarak, komütasyon gerçekleştirilir. Rotorun kilitlenmesinden dolayı motorun sonraki komütasyonlara geçmemesi durumunda belirlenen süre kadar beklenir ve rotorun kilitli olduğu tespit edilirse enerji kesilir. Bu durum yüksek akım ve rotor pozisyonunda hareket olmaması ile bulunabilir. Başlangıç zıt emk algılama tekniği, rotor konumunun sensörsüz bir şekilde algılanmasını sağlar, ancak sürücünün geri bildirim olmadan başlatılması gerekir. Sensörsüz kontrol için bu problem indüklenen voltajın genliğinin motor hızıyla orantılı olmasından kaynaklanır. Bu nedenle zıt emk çok düşük bir hızda algılanamaz ve özel bir başlatma algoritması gerekir [8]. Üç fazın herhangi ikisi ile başlatılabilir [9].

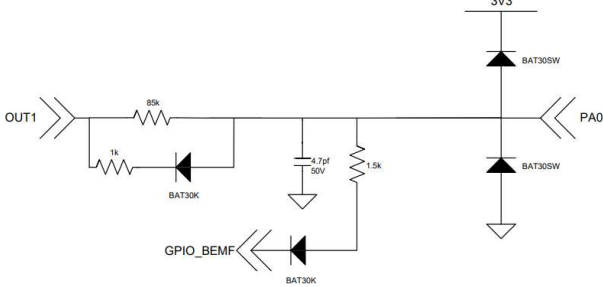
Motor uygulamalarında kullanılan gerilim kaynaklı eviriciler için anahtarlama elemanı kontrollünde kare dalga veya darbe genişlik modülasyonu tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) yönteminin kullanıldığı eviricilerde frekans kontrol edilebilir fakat genlik kontrol edilemez [10].

4. Zıt EMK Algılama Devresi

Zıt emk Algılama devresi fazın sıfır geçişini, terminal voltajının yarım DC-bara voltajı seviyesini geçtiği an tespit edilebilir. Burada ground ve 3v3 hattından giriş sinyaline uygulanan diyotlar, kondansatörler ve dirençler filtre görevi görür. Aynı zamanda bu elemanlar sinyalin gerilimi ve akımını sınırlar.

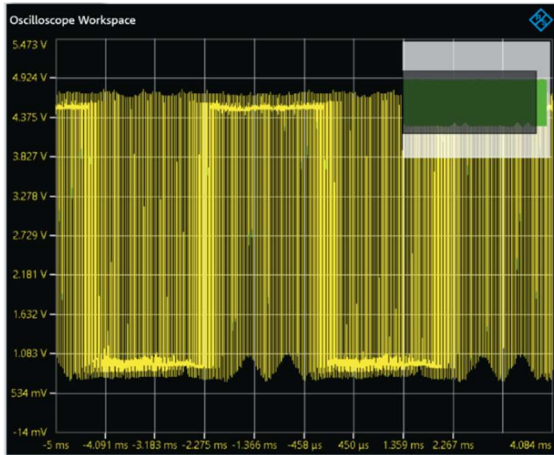
Zıt emk algılama devreleri verilmiştir. Burada OUT1, motorun üç fazından herhangi bir fazı olarak ifade edilebilir. PA0 motor sürücü tarafında belirli dönüşümlerin uygulanacağı analog pindir. Her bir faz için filtre edilerek ortak olarak oluşturulan GPIO_BEMF ise her bir faz sinyalinden elde edilen ortak giriştir. Bu giriş aynı zamanda kontrolü tarafından da analog olarak okunmaktadır.

Devre topolojileri geliştirilerek diyotlar ile negatif ve pozitif taraf için sınırlama yaparken aynı zamanda oluşan zıt emk sinyallerinin de harcanması ve filtrelenmesi amacıyla Şekil 5’ de verilen yapı kurulmuştur. Filtre amaçlı 4.7pF kapasitör eklenerek devre nihai hale getirilmiştir. Motor kalkışlarında ise GPIO_BEMF olarak ifade edilen girişten ortak girişten yararlanılır.



Şekil 5: GSM Sürücü üzerinde kullanılan zıt emk Algılama devresi

GSM kontrolü için güç katmanına UVDGM uygulanmaktadır [9]. GSM çalışmaya başladığı andan itibaren osiloskop ile filtre edilmiş noktadan alınan ölçümler Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 6’da verilen sinyal grafiği PA0 noktasından alınmıştır. Sinyali diyotunun maksimum voltajını alacak şekilde diyot ve kondansatör yardımıyla filtre edilmiştir.



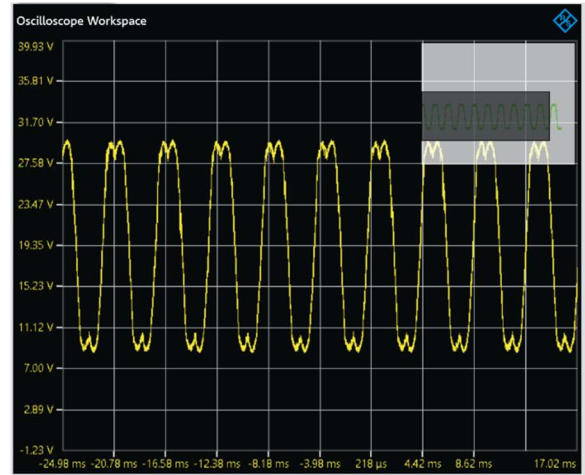
Şekil 6: Filtre edilmiş ve sınırlandırılmış faz sinyali

5. GSM Sürücü Testi

Bu çalışmada bir GSM motorunun sensörsüz sürücü ile kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu kontrolcü tasarımında sürücü sistem tasarımı, kontrol algoritmalarının ve yazılımlarının oluşturulması, sürücü sisteminin baskı devre kartı tasarımı ve deney düzeneği ile bir GSM’ un tasarlanan sürücü ile çalıştırılarak sonuçların gözlemlenmiştir. GSM sürücü devresi Şekil 7’de verilmiştir.

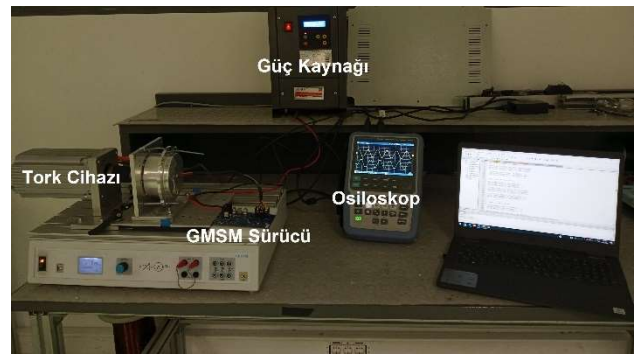


Şekil 7: GSM Sürücü



Şekil 8: Faz-Ground arası sinyali

GSM uygulanan iken faz ve sıfır noktası arasındaki osiloskop görüntüsü Şekil 8’de verilmiştir. Burada sinüs sinyali ile motor kontrolü sağlandığı görülmektedir. 26V ile beslendiği durumda faz gerilimi için 26V yüksüz durumda 1.6A yükte ise 7A’de testler gerçekleştirilmiştir. Yük için tork cihazı kullanılmıştır. Testlerin gerçekleştirildiği ortam Şekil 9’de verilmiştir.



Şekil 9: Devre kartı ve motor testleri

6. Sonuçlar

Bu çalışmada gömülü miktatsız senkron motorun matematiksel modeli çıkartılmıştır. Motor alan yönlendirmeli kontrol yöntemi ile kontrol edilmiştir. Motor sürücü devresi uzay vektör DGM

yöntemi ile kontrol edilmiştir. Bu yöntem ile sinüsoidal sinyal elde edilerek tork dalgalanmalarının önüne geçilmesi sağlanmıştır. Uzay vektör DGM yöntemi Keil u5 kullanılarak Stm32 serisi 32 bitlik mikroişlemcide gerçekleştirilmiştir. StmWorkBench ve CubeMx programlarında aktif olarak kullanılmıştır. Motor sürücü PCB prototip üretimi sağlanarak değerleri verilen motor üzerinde testleri ve çalışmaları sağlanmıştır. PCB kart tasarımı Altium Designer üzerinden yapılmıştır. Altium programı üzerinde 3D görsel paylaşılmıştır. Mikroişlemci yapısında dâhil bulunan MOSFET sürücüler kullanılmıştır. Zıt emk sinyali ve motor kontrolü sırasında elde edilen sinyaller ile sürüş anında motor fazlarına verilen sinyaller yorumlanmıştır.

Teşekkür: Bu çalışma KORMAS Elektrikli Motor San.Tic. A.Ş. Ar-Ge Merkezinde Hamle programı kapsamında 1219040 numaralı proje ile TÜBİTAK TEYDEB tarafından desteklenmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Markovic, M., Hodder, A., & Perriard, Y. (2009, September). An analytical determination of the torquespeed and efficiency-speed characteristics of a BLDC motor. In 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (pp. 168-172). IEEE.
- [2] Brandstetter P., Neborak I., Kuchar M. 2017. Analysis of Steady-State Error in Torque Current Component Control of PMSM Drive. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 17 (2): 39-46.
- [3] Zhang X., Xiaohua X., Yao R. 2015. Field Oriented Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on DSP Experimental Platform, The 27th Chinese Control and Decision Conference, 23-25 Mayıs, Qingdao.
- [4] Wang Z., Chen J., Cheng M., Chau K. T. 2016. FieldOriented Control and Direct Torque Control for Paralleled VSIs Fed PMSM Drives with Variable Switching Frequencies. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31 (3): 2417-2428.
- [5] Belhamel L., Buscarino A., Cucuccio A., Fortuna L., Rascona G. 2020. Model-Based Design Streamlines for STM32 Motor Control Embedded Software System. 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, 29 Haziran-2 Temmuz, Prague, Czech Republic.
- [6] Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, 30(4), 920–926.
- [7] Pillay P., Krishnan R., 1988. Modeling of Permanent Magnet Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 35 (4): 537-541.
- [8] Prokop, L. ve Chalupa, L., (2015). 3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x, First Edition, Freescale Semiconductor, Arizona.
- [9] Damodharan, P., Sandeep, R. ve Vasudevan, K., (2008). “Simple position sensorless starting method for brushless DA motor”, *IET Electronics on Power Applications*, 1:49-55.
- [10] Ahmed W., Ali S. 2013. Comparative Study of SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) & SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) Based Three Phase Voltage Source Inverters for Variable Speed Drive. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 24-26 Haziran, Karachi.