



# *Gömülü Mıknatıslı Senkron Motor Sürücü Uygulaması*

**KORMAS Elektrikli Motor A.Ş. TOSB OSB, Kocaeli,**

**Buğra ER**

**Isparta Uygulama Bilimler Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**Bölümü, Isparta,**

**Okan BİNGÖL**

Günümüz dünyasında elektrik makinaları ev aletlerinden, ulaşım araçlarına kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Elektrik makinaları elektriksel enerjiyi mekaniksel enerjiye veya mekaniksel enerjiyi elektriksel enerjiye döndüren makineler olarak ifade edilir. Kendi aralarında hareketli ve hareketsiz elektrik makinaları olarak sınıflandırılır . 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.

Bu çalışmada, alan yönlendirmeli kontrol yöntemi temel alınarak endüstriyel bir GSM’ın hız/pozisyon geri beslemeli kontrolünü gerçekleştirilmiştir. GSM’ 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. GSM ve motor sürücüsü birlikte kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmış ve sonuçlara yer verilmiştir.

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

$$\begin{aligned} v_a &= i_a R + L_{a\beta} \frac{di_a}{dt} + L_{a\beta} \frac{di_\beta}{dt} - \omega_e \Phi_m \sin Q_e \\ v_\beta &= i_\beta R + L_{a\beta} \frac{di_a}{dt} + L_{a\beta} \frac{di_\beta}{dt} + \omega_e \Phi_m \cos Q_e \end{aligned}$$

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. GSM matematiksel modelinin giriş parametresi olarak; q eksen stator gerilimi  $v_q$ , d, eksen 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 clarke, ters park transformasyonları uygulanarak  $I_a, I_b$  ve  $I_c$  olarak gösterilen üç faz akım değerleri gözlemlenmiştir. Ayrıca mekanik rotor açısı  $\theta_m$ , elektriksel rotor açısı  $\theta_e$  ve rotor radyal hızı  $\omega$  gözlemlenmiştir. GSM matematiksel modelinin bu çıktıları aynı zamanda sistemin geri beslemeleridir [6].

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

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

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

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

Zamana bağılı değişen akım göz önünde bulundurulduğunda, akı değişimindeki ifade kullanılarak akımın zamana bağılı 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, endüktansa bağılı akım değişimi ve ilgili akıların elektriksel hızı ile çarpılarak elde edilen gerilim  $d$  ve  $q$  düzlemlerinde Denklem 5 ve 6'da verilmiştir.

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



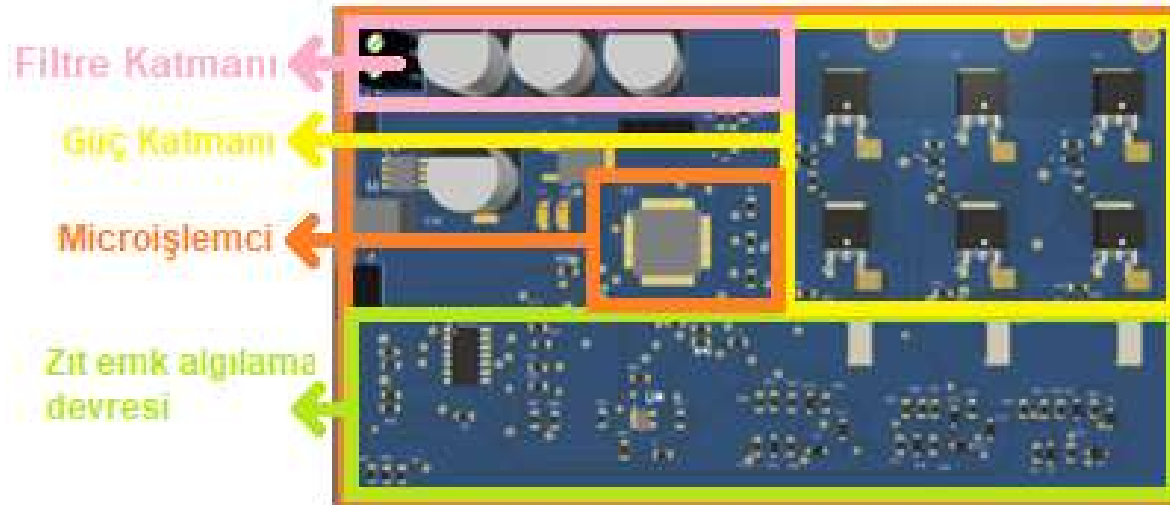


GMSM matematiksel modeli için gömülü mıknatısların rotorda yer alması nedeniyle eşit bir relüktans yapısı oluşmaz. İlgili gömülü mıknatıslı rotor yapısı Şekil 1’de verilmiştir

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

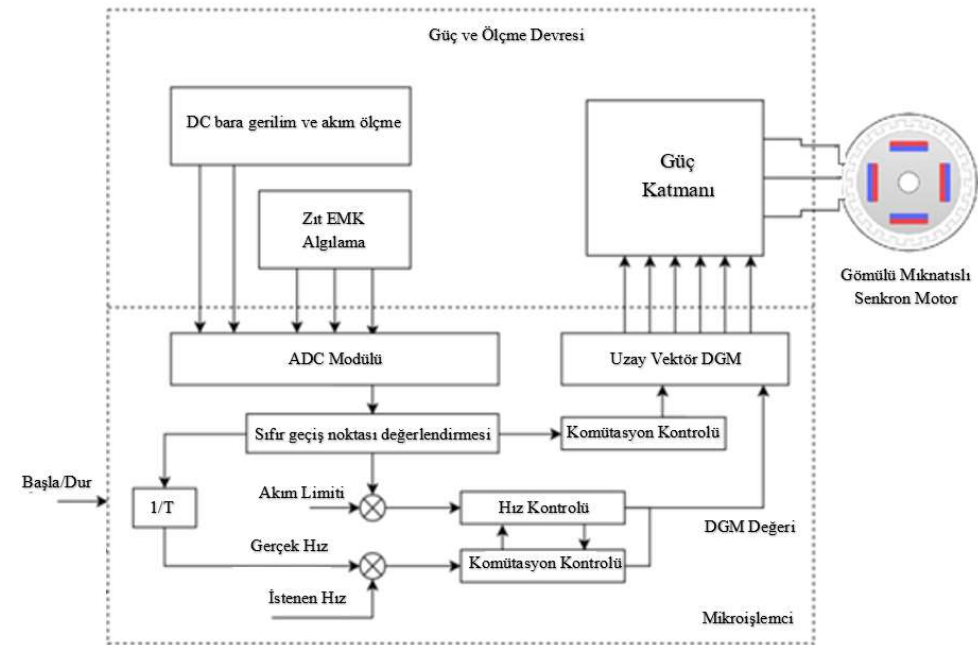


Sensörsüz rotor pozisyonunu algılama tekniği ile indüklenen zıt emk' nın sıfır geçiş noktalarının tespit edilmesini ve GSM' in kontrol edilmesini sağlayan sürücü devre kartının Altium çizimi açıklamalarıyla beraber Şekil 3'de verilmiştir.





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.



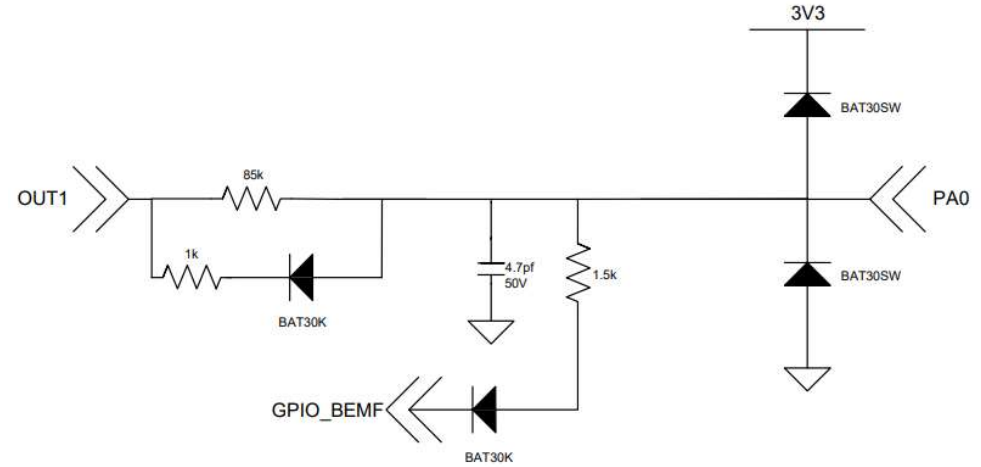
Komütasyon süreci, zıt emk sıfır geçişinin başarılı bir şekilde yakalanmasını sağlayan kısımdır, yeni komütasyon zamanı hesaplanır ve son olarak, komütasyon gerçekleştirilir. Rotorun kilitlenmesinden dolayı motorun sonraki komütasyonlara geçmemesi durumunda belirlenen süre kadar beklenilir ve rotorun 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 modülasyon tekniği sıklıkla kullanılmaktadır. Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) yönteminin kullanıldığı eviricilerde frekans kontrol edilebilir fakat genlik kontrol edilemez [10].

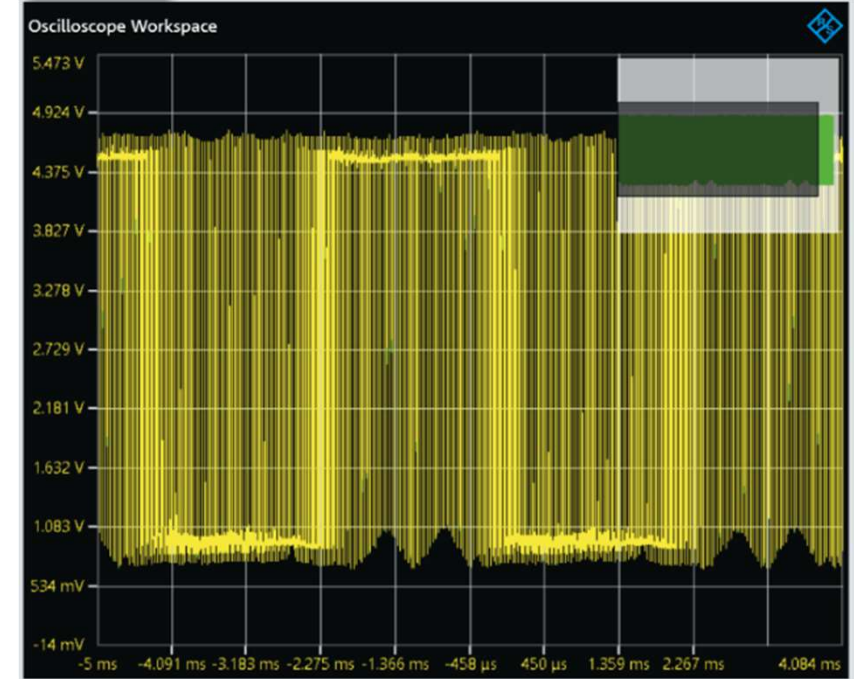
Zıt emk Algılama devresi fazın sıfır geçişini, terminal voltajının yarım DC-bara voltajı seviyesini geçtiği an tespit edilebilir. Burada ground ve 3v3 hattından giriş sinyaline uygulanan diyotlar, kondansatörler ve dirençler filtre görevi görür. Aynı zamanda bu elemanlar sinyalin gerilimi ve akımını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

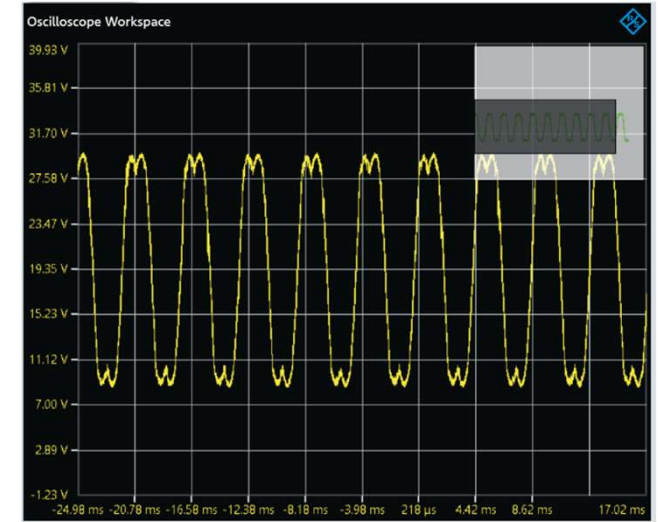


GMSM kontrolü için güç katmanına UVDGM uygulanmaktadır [9]. GMSM çalışmaya başladığı andan itibaren osiloskop ile filtre edilmiş noktadan alınan ölçümler Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 6’da verilen sinyal grafiği PA0 noktasından alınmıştır. Sinyal diyotunun maksimum voltajını alacak şekilde diyot ve kondansatör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

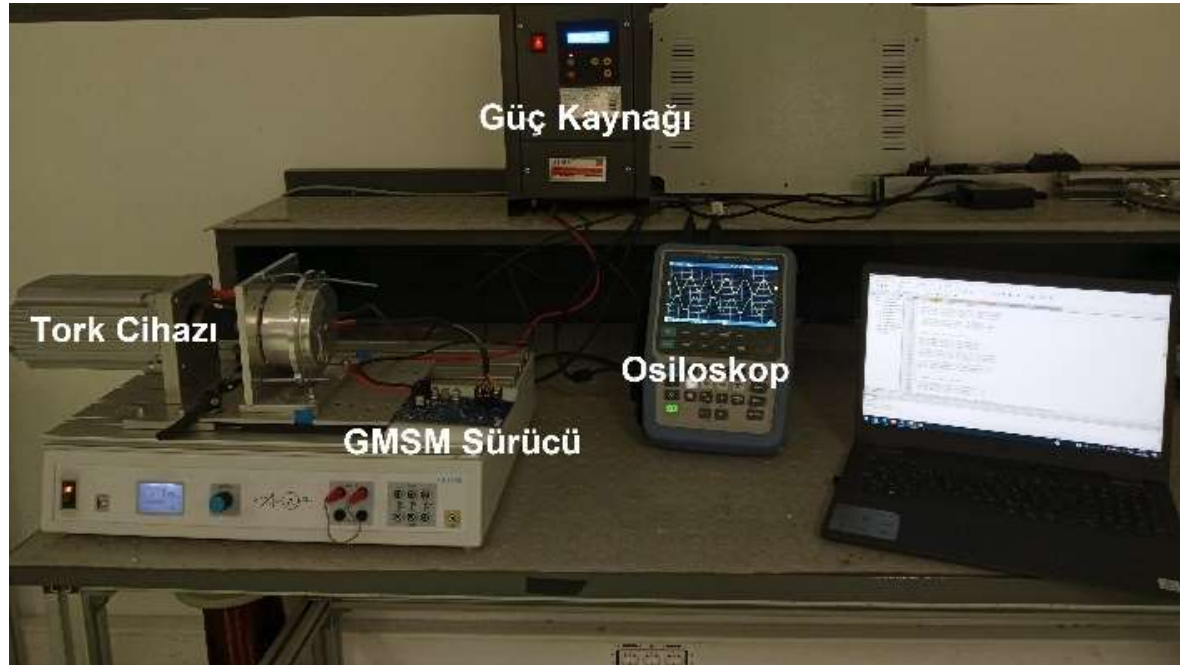




Bu çalışmada bir GSM motorunun sensörsüz sürücü ile kontrol sistemi tasarlanmıştır. Bu kontrolcü tasarımında sürücü sistem tasarımı, kontrol algoritmalarının ve yazılımlarının oluşturulması, sürücü sisteminin baskı devre kartı tasarımı ve deney düzeneği ile bir GSM' un tasarlanan sürücü ile çalıştırılarak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



GMSM uygulanır iken faz ve sıfır noktası arasındaki osiloskop görüntüsü Şekil 8’da 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.



Bu çalışmada gömülü mıknatıslı 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 mikro işlemcide 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. Mikro işlemci 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.



**TEŞEKKÜR EDERİZ**