Fırat Üniv. Mühendislik Bilimleri Dergisi
30 (1), 183-191, 2018

Science and Eng. J of Fırat Univ.
30 (1), 183-191 , 2018

Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Parametre Tespiti

Hüseyin Yüce KÜRÜM[1*], Erhan AKIN[2]
[1]Nokia, İstanbul
[2]F.Ü. Müh. Fak. Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,Elazığ
[*]hykurum@gmail.com

(Geliş/Received: 25.08.2017;Kabul/Accepted: 01.11.2017)

Özet

Sabit mıknatıslı senkron motorun (SMSM) motor modeli gerektiren kontrol yöntemlerinde motor parametrelerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada manyetik doymayı göz önüne alarak sabit mıknatıslı senkron motorun online parametre tahmini incelendi. Önerilen yöntemde SMSM'nin parametreleri online (çevrimiçi) olarak tahmin edilir. Ayrıca, çevrimdışı parametre tahmin yöntemlerine göre doyma ve sıcaklığa bağlı değişen parametrelerin tahmini daha doğru yapılır. Sargı direnci, d-q eksen endüktansları ve rotor akısı gibi motor parametreleri tahmin etmek için akım enjeksiyon yöntemi kullanıldı. Bu yöntemle sıcaklığa bağlı olarak değişen direnç değerleri de akım enjeksiyonu ile anında ve yüksek doğrulukla tahmin edildi.

Anahtar Kelimeler: Sabit mıknatıslı senkron motor kontrolü, Doymaya bağlı endüktansı değişimi ve tahmini, Sıcaklığa bağlı direnç değişimi ve tahmini

Estimation Of Parameters For Permanent Magnet Senkron Motors

Abstract

Online parameter estimation of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) is important for motor control. In this study, the parameters of the motor are estimated correctly regardless of the reasons for the parameter changes. This method instantly estimat changing parameters depending on saturation or temperature. Thus, the control algorithm used by the method increases the efficiency of the motor drive to ensure much better performance in terms of speed range and dynamic response. In this study, the current injection method was used to estimate the winding resistance and dq inductance parameters. In this method, resistance values varying with temperature are estimated instantaneously and with high accuracy by current injection. In this study, considering the magnetic saturation, the inductance of the permanent magnet synchronous motor was calculated online regardless of any cause.

Keywords: Parameter estimation, Permanent magnet synchronous motor control, Saturation inductance change and estimation, Temperature-dependent resistance change and estimation.

1. Giriş

SMSM'ler yüksek güç yoğunluğu ve verim nedeniyle endüstrinin birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır[1-5]. Ancak yüksek motor akımı nedeniyle meydana gelen manyetik doymanın sonucu olarak motor sargı endüktansları değişmektedir. Motor sıcaklığının değişimi ile motor sargı dirençlerinde ve mıknatıs akısında da değişimler oluşmaktadır. Bu motor parametre değişimleri özellikle motor modelini kullanan yüksek performans sürücülerinde olumsuz sonuçlara sebep olmaktadır. Örneğin motor parametre değişimleri, algılayıcısız kontrol yöntemlerinde rotor ve hız konumunun hatalı bulunmasına, doğrudan moment kontrolünde motor akısının hatalı bulunmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle motor parametre tahmini çalışmaları büyük önem taşımaktadır.

SMSM'nin parametrelerinin belirlenmesi geleneksel olarak termokupl, manyetometre, yük test yatağı gibi ölçüm aletleri ile yapılabilir. Ancak SMSM çalışırken bu ölçümlerin yapılması çok zordur. Direk ölçüm yapılması mümkün olsa bile kullanılacak aletlerin pahalı ve karmaşık sistemlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Motor dururken yapılan ölçmelerle direnç ve endüktans değerleri belirlenebilir ancak mıknatıs akısı belirlenemez. Böylece SMSM parametrelerinin belirlerken

ilave ölçme sistemlerinin kullanılması yerine, sistem tanımlama methotları ile parametre tahmininin yapılması ideal bir teknolojidir.

SMSM'nin parametre tahmini için literatürde, genişletilmiş kalman filitresi, özyinelemeli en küçük kareler yöntemi, model referans adaptif sistem, sonlu elemanlar yöntemi, yapay sinir ağları, adaptif tahmin yöntemleri önerilmiştir. Genişletilmiş kalman filitresi ile motor parametre tahmininde gürültü ve kararsızlık problemi nedeniyle motorun gerçek parametrelerini belirlemede hatalar oluşmaktadır[6,7]. Özyinemeli en küçük kareler yönteminde de sistemin gürültü karakteristikleri etkili olmakta ve gürültülerden tahmin hataları oluşmaktadır [8,9]. Model referans adaptif sistem ile sargı direnci, endüktanslar ve mıknatıs akısı anlık olarak doğru tahmin edilebilmektedir. Ancak motor parametrelerinin doğru tahmini diğer motor parametrelerinin nominal değerlerine bağımlıdır [10,11]. Sonlu elemanlar yöntemi ile SMSM'nin parametrelerinin tahmininde ise büyük bir hesaplama yükü mevcut olmaktadır [12,13]. Yapay sinir ağları ile motor parametreleri tahmininde büyük eğitim kümelerine ve ağırlık ayarlamaları için daha fazla bilgiye ihtiyaç duymaktadır [14, 15]. Sinyal enjeksiyon yöntemleri ile SMSM'nin çevrimiçi parametre tahminleri son yıllarda bir çok çalışma mevcuttur [16,17, 18, 19]. Bu yöntemlerin ortak özelliği motor çalışırken momenti değiştirmeden bir akım sinyali enjekte ederek motorun kalıcı durum d-q modelinden faydalanılmaktadır.

Bu çalışmada yüzey mıknatıslı SMSM'nin motor parametreleri id akımı enjekte ederek tahmini çevrimiçi yapılmıştır. Yapılan çalışmaların geçerliliği, Matlab/simulink benzetiminden alınan sonuçlarla ispat edilmiştir.

2. SMSM için Eşdeğer Devre ve Matamatiksel Model

Elektronik sürücülü SMSM tahrik sistemlerinde, akım ve konum sensörleri, güç elektroniği devresi ve denetleyicisi bulunur. Sensörler geri besleme ve istenen işlem için güç elektroniği devresini kontrol etmek için kullanılır.

Üç fazlı alternatif akım makinalarının gerilim denklemleri elde edildiğinde denklem içinde endüktans ifadelerinin olduğu görülür. Motorların endüktans değerleri, eğer rotor çıkıntılığı mevcutsa motorların davranışlarını tanımlayan bu diferansiyel denklemlerdeki endüktans katsayıları, rotor konumuna bağlı olarak değişim gösterir. Bu endüktans değişimleri motor denklemlerinin rotor düzleminde ifade edilmesiyle yok edilir.

Üç fazlı alternatif akım motorlarındaki modellemelerde kullanılan faz düzlemleri arasındaki dönüşümlerde motor dinamik eşitliklerinin daha kolay çözümü yapılabilmektedir. Faz dönüşüm işlemleri genellikle üç fazlı sabit düzlemden iki fazlı sabit düzleme (Clarke dönüşümü), iki fazlı sabit düzlemden üç faz sabit düzleme (Ters Clarke dönüşümü), iki veya üç fazlı sabit düzlemden iki fazlı rotor düzlemine (Park dönüşümü) ve iki fazlı rotor düzleminden iki ya da üç fazlı sabit düzleme (Ters Park) dönüşümü şeklinde gerçekleştirilir.

Modeli oluşturulacak makina, 3 fazlı yıldız bağlı stator sargıları ve sabit mıknatıslı bir rotora sahiptir. Stator sargıları 120° faz farklı yerleştirilmiş olup, hava aralığı alanının sinüzoidal dağıldığı kabul edilmiştir. Her sargının Ns sarım sayısı ve Rs sargı direncinin eşit olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca motora ait manyetik bozucu etkiler ihmal edilmiştir.

Motora uygulanan üç fazlı gerilimler arasında 120^0 dereceli açı bulunan sinüsoidal gerilimlerdir. Böylelikle stator gerilimleri;

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

faz sargı akıları;

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \psi_m \begin{bmatrix} \cos\theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Denklem (2), Denklem (1)'de yerine yazılır ise;

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \omega_e \psi_m \begin{bmatrix} \cos\theta_e \\ \cos(\theta_e - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

elde edilir. Burada v_a, v_b, v_c stator faz-nötr gerilimlerini, ψ_a, ψ_b ψ_c faz sargılarının toplam akılarını, i_a, i_b, i_c stator akımlarını, ψ_m sabit mıknatısların oluşturduğu manyetik akının

statora indirgenmiş genliğini, r_s stator direncini, L_s ise senkron endüktansı temsil etmektedir. θ_e rotorun elektriksel açısını temsil etmektedir.

Motorun elektriksel çıkış gücü ve elektromanyetik moment ifadesi;

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (4)$$

$$T_e = P_e/\omega_r \quad (5)$$

Burada θ_r mekanik rotor açısı, p ise motorun çift kutup sayısıdır. Hareket denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$T_e = T_y + J\frac{d\omega_r}{dt} + B_m\omega_r \quad (6)$$

Burada ω_r mekanik açısal hız, J atalet momenti, T_y yük momenti ve B motor ve dönen sistemin sürtünme katsayısıdır. θ_e elektriksel açı ile ω_e elektriksel açısal hız arasında bağıntılar aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \quad (7)$$

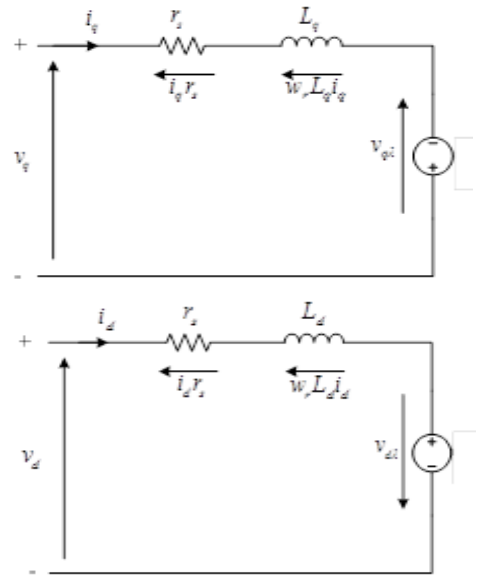
$$\theta_r = \frac{1}{p}\theta_e \quad (8)$$

$$\omega_r = \frac{1}{p}\omega_e \quad (9)$$

Stator senkron endüktans, öz endüktans ve sargıların ortak endüktanslarının toplamıdır. Bu değerler θ_r'ye bağlı olarak değiştiğinden moment ve gerilim ifadelerinin çözümünü zorlaştırır. Bu nedenle denklemlerin çözümünü kolaylaştırmak için endüktans matrisi elemanlarının zamanla değişmediği bir eksen takımına geçirmek gerekir. Bu maksatla *dq0* dönüşümü yapılır. Bu dönüşüm yapıldıktan sonra endüktans matrisi elemanları sabit katsayılar haline gelmektedir.

2.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun dq0 Eşdeğer Devresi ve Modeli

SMSM serbest DC uyartımlı senkron makinalar gibi, genellikle *d-q* referans düzlemi içinde ele alınır. Makinanın eşdeğer devresi yaklaşık olarak serbest uyartımlı senkron makina ile aynıdır. *d-q* modelinde motor devresi Şekil 1'de gösterildiği gibi bağımsız iki devre gibi davranır.



Şekil 1. SMSM dq eşdeğer devresi

Denklem (3)'de verilen motorun gerilim denklemlerine Clarke ve Park dönüşümleri uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$V_d = r_s.i_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_r\psi_q \quad (10)$$

$$V_q = r_s.i_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_r\psi_d \quad (11)$$

Burada V_d ve V_q d ve q eksen gerilimlerini, i_d ve i_q, d ve q eksen akımlarını, ψ_d ve ψ_q ise d ve q eksen akılarını göstermektedir. Buradaki akı ifadeleri, Denklem (12) ve (13)'de tanımlanmıştır.

$$\psi_q = Li_q \quad (12)$$

$$\psi_d = Li_d + \psi_m \quad (13)$$

Bu ifadeler yukarıda yerlerine yazılacak olursa;

$$V_d = r_s.i_d + L_d\frac{d}{dt}i_d - \omega_e L_q i_q \quad (14)$$

$$V_q = r_s.i_q + L_q\frac{d}{dt}i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e\psi_m \quad (15)$$

olarak elde edilir. Elektriksel moment ifadesi ise;

$$T_e = \frac{3}{2}p\left[\psi_m i_q + \left(L_d - L_q\right)i_d i_q\right] \quad (16)$$

şeklinde elde edilir. Denklem (16) 'te P, makina rotor kutup çifti sayısıdır. Denklem (16) 'da tork üreten iki terim vardır. Birincisi mıknatıs akısının ve q-ekseni akımının etkileşiminden meydana gelen motorun ana torkudur. İkincisi, d ve q ekseni endüktansı arasındaki farka dayanır ve bu nedenle relüktans torku olarak adlandırılır. Bu ikinci bileşen, yüzey montajlı SMSM'lerde yaklaşık sıfır değerindedir. Kolaylık sağlamak için makina modelinin durum uzayı gösterimi şu şekilde elde edilebilir:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{V_q - r_s \cdot i_q - \omega_e \cdot (L_d \cdot i_d + \psi_m)}{L_q}$$

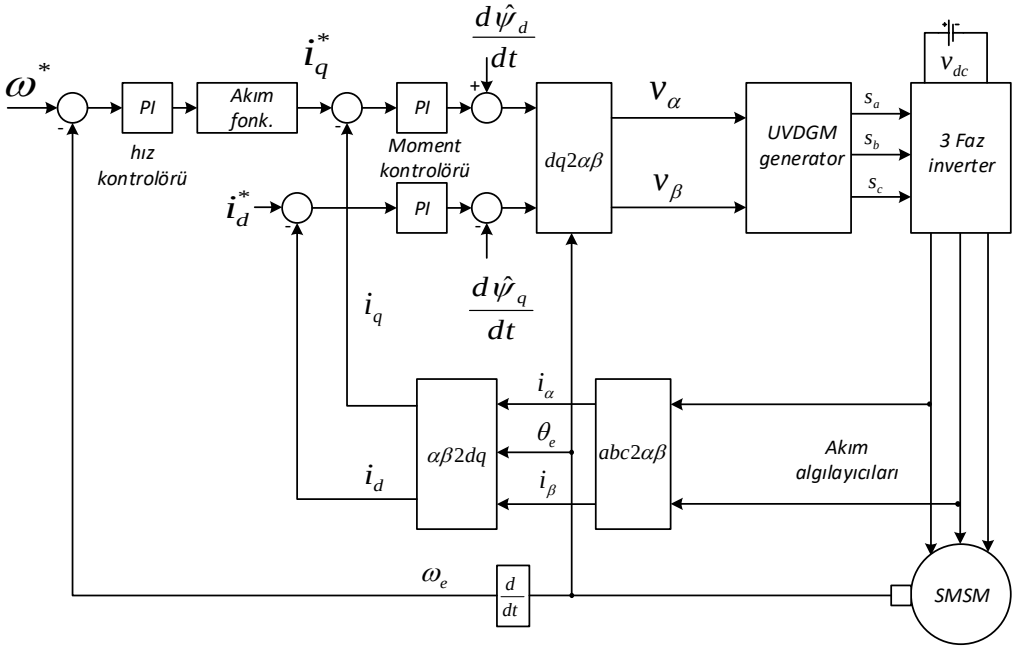
$$\frac{di_d}{dt} = \frac{V_d - r_s \cdot i_d + \omega_e \cdot L_q \cdot i_q}{L_d}$$

$$p\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{T_e - T_y}{J} \qquad (17)$$

Denklem (17)'deki model, bir SMSM için biraz basitleştirilmiş bir modeldir. Bu modelde demir kayıplarının (fuko ve histerezis kayıpları) ihmal edilmesi simülasyonla elde edilen sonuçların doğruluğu üzerinde küçük bir hataya neden olur. Yapılan modellemelerde genellikle demir kayıpları ihmal edilir.

3. SMSM'nin Vektör Kontrolü

SMSM'lerin stator yapısı Asenkron Motorlar ile aynı olduğu için bu motorlara uygulanan kontrol yöntemlerinin tümü SMSM'lere de uygulanabilir. Bu çalışmada vektör kontrol yöntemi kullanılmıştır. Bu kontrol yönteminde motora uygulanacak olan değişken genlikli ve değişken frekanslı gerilimlerin elde edilmesi için darbe genişlik modülasyonu (DGM) kullanılmaktadır. DGM ile elde edilen sürme işaretleri, gerilim kaynaklı bir invertere uygulanmakta ve inverter çıkışında elde edilen değişken gerilim ve frekansa sahip gerilim SMSM'nin statoruna uygulanarak SMSM'nin kontrolü gerçekleştirilmektedir. DGM teknikleri ile çıkış akımının harmonikleri de kontrol edilebilmektedir [20,21]. SMSM'nin vektör kontrolü blok şeması Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. SMSM'nin vektör kontrolü

Motordan ölçülen hız ile referans hız arasındaki hata bir PI kontrolörüne girilerek, kontrolörün çıkışından motorun üretmesi gereken moment elde edilir. Yüzey montajlı SMSM'lerde d ve q ekseni endüktansları eşit olduğu için ($L_d = L_q$), d ekseni akımı sıfıra ayarlanırsa, moment Denklem (18) elde edilir.

$$T_e = \frac{3.P}{2}.\psi_m.i_q \quad (18)$$

Hız kontrolörünün çıkışından elde edilen moment ifadesini veren Denklem (18) kullanılarak, i_q referans akımı Denklem (19) ile elde edilir.

$$i_q^* = \frac{2 \cdot T_e}{3 \cdot P \cdot \psi_m} \quad (19)$$

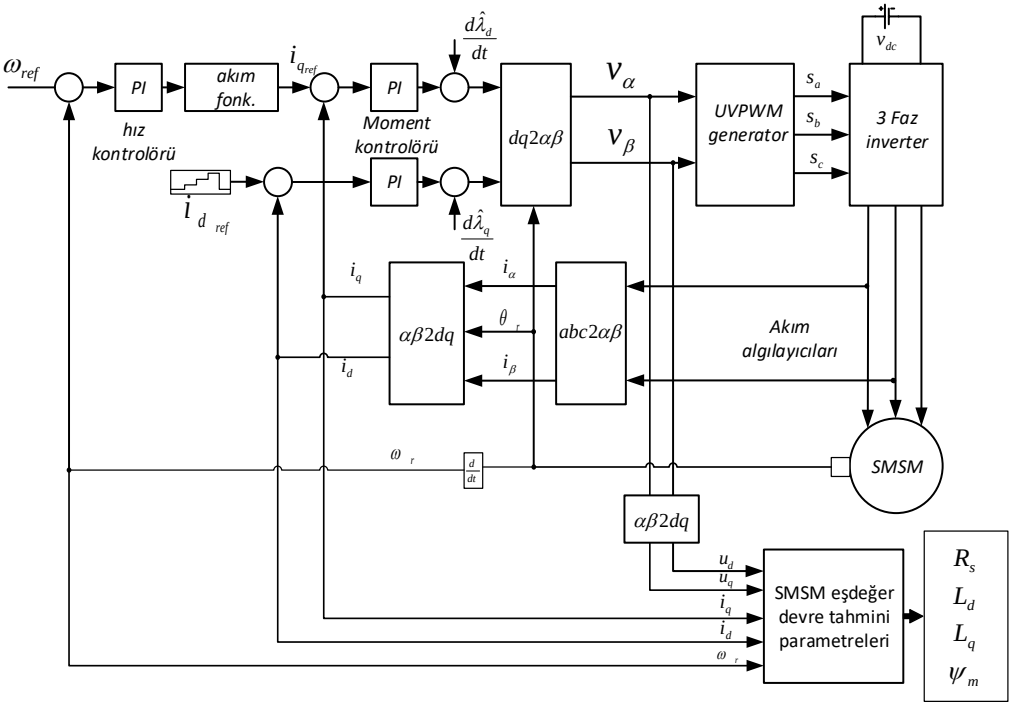
Referans i_q^* akımı ile motordan ölçülen i_q akımı arasındaki hata, moment kontrolörüne girilerek motora uygulanacak *d-q* gerilimleri elde edilir. Denklem (17)'de d ve q akıları yerine konulursa Denklem (20) elde edilir. Denklem (20) incelendiğinde i_q akımı ψ_d akısıyla, i_d akımı ise ψ_q akısıyla değişmektedir. i_q akımı ile i_d akımı birbirinden bağımsız kontrol edilebilmesi için ayrışım terimlerinin elde edilen gerilimlere eklenmesi gerekmektedir.

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{V_q - r_s \cdot i_q - \omega_e \cdot \psi_d}{L_q}$$

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{V_d - r_s \cdot i_d + \omega_e \cdot \psi_q}{L_d} \quad (20)$$

4. SMSM'nin Devre Parameterelerinin Online Tahmin

SMSM'nin eşdeğer devre parametre tahminine ait blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. SMSM'nin eşdeğer devre parametrelerinin tahmin edilmesine ait blok diyagramı

Alan yönlendirmeli kontrolde motor alan akısı mıknatıs tarafındandan sağlandığı için, akıma göre maksimum momentin elde edilmesi için id akımı normal şartlarda sıfır değerinde tutulur. Yüzey mıknatıslı SMSM'de i_d akımının moment üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Bu nedenle i_d akımının belirli sınırlar içerisinde değiştirilmesi, motorun çalışması üzerinde güç kaybından başka herhangi bir etkiye sahip değildir. Bu yöntemde farklı değerlerde i_d akımı motora enjekte edilerek motor parametreleri tahmin edilir. Tahmin edilecek olan motor parametrelerinin kümesi Denklem (21)'de verilmiştir.

$$\theta = \begin{bmatrix} L_q \\ L_d \\ r_s \\ \psi_m \end{bmatrix} \quad (21)$$

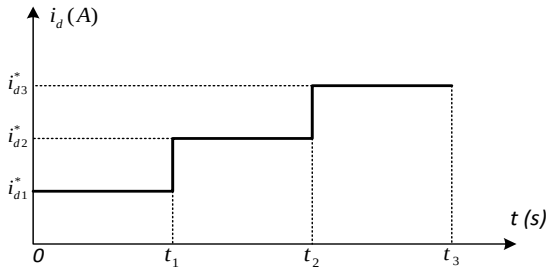
Motor eşdeğer devre parameterelerinin tahmininde SMSM'nin kalıcı durum denklemleri Denklem (22)'de verilmiştir.

$$v_{dk} = R_s \cdot i_{dk} - \omega_k \cdot L_q \cdot i_{qk}$$

$$v_{qk} = R_s \cdot i_{qk} + \omega_k \cdot L_d \cdot i_{qk} + \omega_k \cdot \psi_m$$

$$k = 1,2,3 \qquad (22)$$

Buradaki k indiksi, enjekte edilen her bir i_d akımı için yapılan her bir ölçmeyi göstermektedir. Motor parametre tahmini için enjekte edilen i_d akımları Şekil 4. de gösterilmiştir.



Şekil 4. Parametre tahmini için enjekte edilen i_d akımları

Referans i_d akımlarının enjekte edilmesinden sonra motorun geçici rejiminin sona erdiği andan itibaren v_d, v_q, i_d, i_q ve ω değerleri ölçülür. Bu ölçülen değerlerin anlık değerlerini almak gürültülerden dolayı hatalı parametre tahminlerine sebep olur. Bu nedenle belirli bir zaman içinde alınan değerlerin ortalama değerlerini veya DC bileşenlerini hesaplamak parametre tahmininde daha doğru bir sonuç verir. i_d akımı için bu ortalama değer, Denklem (23) ile elde edilir.

$$mean\,(i_d) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} i_{dn} \qquad (23)$$

Ölçmelerin yapılacağı Δt süresince, T_s anahtarlama peryoduna bağlı olarak Denklem (24)'de verildiği gibi N tane örnek alınarak ölçülen değerlerin ortalama değerleri bulunur.

$$N = \frac{\Delta t}{T_s} \qquad (24)$$

Yüzey mıknatıslı silindir kutuplu SMSM'lerde L_d ve L_q değerleri birbirine eşit olup r_s, L ve ψ_m olarak üç parametre tahmini yapılır.

Enjekte edilen akım değerlerine göre L_d ve L_q değerleri her bir ölçmede manyetik saçdaki doymadan dolayı farklı değerler alabilir. Bu nedenle her enjekte edilen i_d akım değerine göre L_d ve L_q için Denklem (25) yazılabilir.

$$L_d = L_{d0} - \beta_d \cdot i_d - \alpha_q \cdot i_q$$

$$L_q = L_{q0} - \beta_q \cdot i_q - \alpha_d \cdot i_d \qquad (25)$$

Burada β_d, β_q öz endüktans, α_q, α_d karşılıklı endüktans terimleridir. Karşılıklı endüktans çok küçük değerde olduklarından dolayı ihmal edilebilir. Denklem (25), Denklem (22)'de yerine konulduğunda Denklem (26) elde edilir.

$$v_{dk} = r_s \cdot i_{dk} - \omega_{ek} \cdot (L_{q0} - \beta_q \cdot i_{qk}) \cdot i_{qk}$$

$$v_{qk} = r_s \cdot i_{qk} + \omega_{ek} \cdot (L_{d0} - \beta_d \cdot i_{dk}) \cdot i_{dk} + \omega_{ek} \cdot \psi_m \qquad k = 1,2,3 \qquad (26)$$

Denklem (26)'da altı tane bilinmeyen olduğuna göre altı denklem elde etmek gerekir. Bu durumda üç tane i_d akımı enjekte edip motor parametrelerinin tahmini için kullanılan lineer denklem matrisi, Denklem (27)'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} i_{d1} & -\omega_{e1}\cdot i_{q1} & \omega_{e1}\cdot {i_{q1}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ i_{q1} & 0 & 0 & \omega_{e1}\cdot i_{d1} & -\omega_{e1}\cdot {i_{d1}}^2 & \omega_{e1} \\ i_{d2} & -\omega_{e2}\cdot i_{q2} & \omega_{e2}\cdot {i_{q2}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ i_{q2} & 0 & 0 & \omega_{e2}\cdot i_{d2} & -\omega_{e2}\cdot {i_{d2}}^2 & \omega_{e2} \\ i_{d3} & -\omega_{e3}\cdot i_{q3} & \omega_{e3}\cdot {i_{q3}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ i_{q3} & 0 & 0 & \omega_{e3}\cdot i_{d3} & -\omega_{e3}\cdot {i_{d3}}^2 & \omega_{e3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_s \\ L_{q0} \\ \beta_q \\ L_{d0} \\ \beta_d \\ \psi_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{d1} \\ v_{q1} \\ v_{d2} \\ v_{q2} \\ v_{d3} \\ v_{q3} \end{bmatrix} \qquad (27)$$

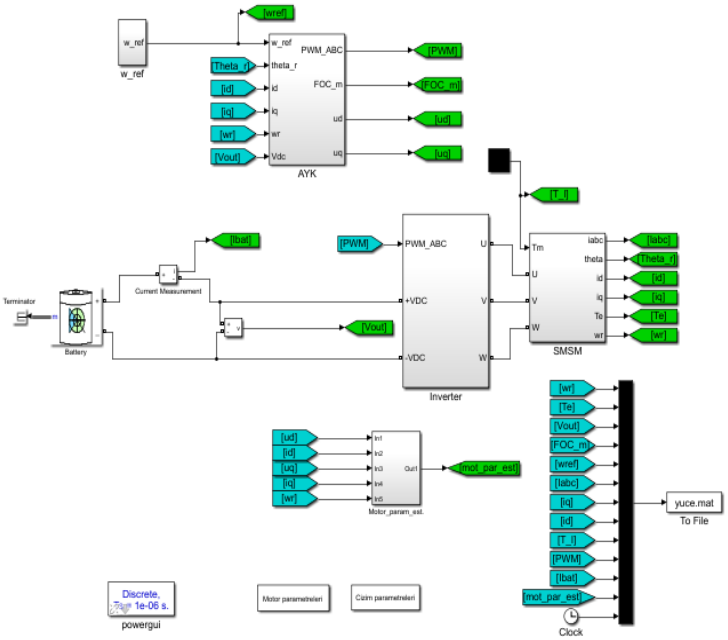
v_d ve v_q gerilimleri, alan yönlendirmeli kontrol bloğunda hesaplanır. Inverter nonlineerliği v_d ve v_q gerilimleri hesaplanırken dikkate alınır.

Şekil 4'de görüldüğü gibi SMSM'ye *0- t_1* aralığında i^*_{d1} akımı, *t_1- t_2* aralığında i^*_{d2} akımı, *t_2- t_3* aralığında i^*_{d3} enjekte edilmektedir. Enjekte edilen her bir i_d referans akımında sonra SMSM kalıcı duruma ulaşması için bir süre beklenmelidir. Motor kalıcı duruma ulaştıktan sonra, v_d ve v_q gerilimleri, i_d ve i_q akımları ve ω_e açısal hızı Denklem (23) kullanılarak ölçülür. Böylece Denklem (27) çözülerek bilinmeyen parametreler elde edilir. Denklem (25) ile

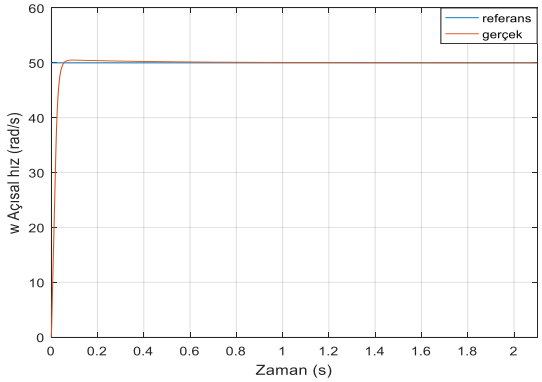
manyetik doymanında hesaba katıldığı endüktanslar hesaplanır.

5. Benzetim ve Sonuçlar

Şekil 5'de SMSM'nin eşdeğer devre parameterelerinin tahmin edildiği Matlab/Simulink benzetimi verilmiştir. Benzetimde örnekleme zamanı $1e^{-6}$ s, anahtarlama frekansı 5 Khz alınmıştır. DC gerilim kaynağı olarak anma gerilimi 360 V olan batarya kullanılmıştır.Yapılan benzetimde inverter, SMSM elektriksel model olarak kullanılmıştır. Benzetimde SMSM'nin sargı direnci $r_s = 0.0107\Omega$, sargı endüktansı $L_s = 0.031H$,mıknatıs akısı $\psi_m = 0.11150Wb$ olarak alınmıştır. Atalet momenti $J = 5.12Kgm^2$, sürtünme katsayısı $B = 0.0003743$ Nms, olarak alınmıştır. Yapılan benzetimden alınan değerler bir dosyaya yüklenmiş, daha sonra matlab komutları ile çizdirilmiştir.

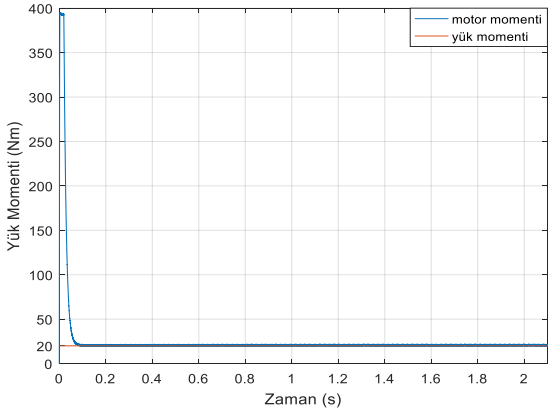


Şekil 5. SMSM'nin eşdeğer devre parameterelerinin tahmin Matlab/Simulink benzetimi



Şekil 6. SMSM hız zaman değişimi

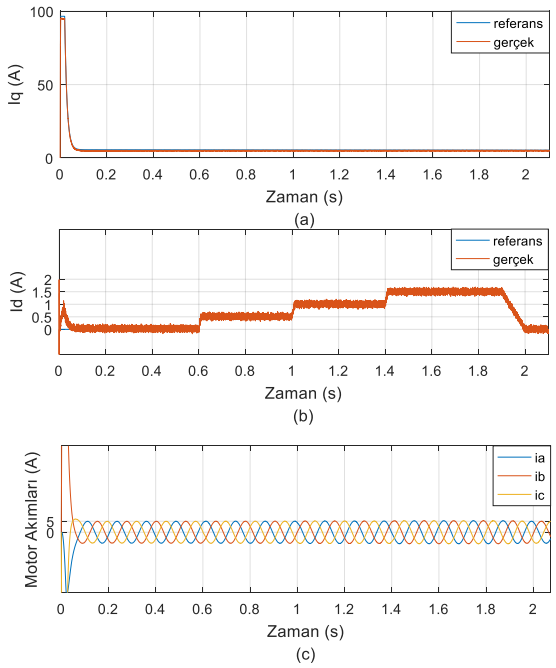
Şekil 6'da verilen 50 rad/s referans hız için motorun gerçek hızı verilmiştir. Yaklaşık olarak 0.07 s sonra motorun geçici rejimini tamamlamış, hız 50 rad/s hıza ulaşmıştır.



Şekil 7. SMSM'un zaman moment değişimi

Motor 20 Nm yük altında çalıştırılmış ve motorun ürettiği moment Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 8'de motor akımları verilmiştir. Şekil 8.a'da i_q akımı incelendiğinde, başlangıçta motorun referansı yakalamak için momenti üreten i_q akımı büyükken daha sonra motor yükünü karşılayacak değerde sabitlenmiştir.



Şekil 8. SMSM'un çalışma akımları

Şekil 8.b'de i_d akımının değişimi verilmiştir. Akıma göre maksimum momentin elde edilmesi için i_d akımı sıfırda tutulur, ancak SMSM'nin eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi için i_d akımı sırasıyla 0.5A, 1A ve 1.5A olması istenmiştir. i_d akımı istenen referans akımlarını hemen yakaladığı Şekil 8.b'de açıkça görülmektedir. Şekil 8.c'de ise motor üç faz akımları görülmektedir.

Elde edilen SMSM'nin eşdeğer devre parametreleri tahmin sonuçları Tablo.1'de verilmiştir.

Tablo1. Akım enjeksiyonu ile SMSM'nin eşdeğer devre parametreleri

	Motorun gerçek parametre değerleri	Motorun tahmin edilen parametre değerleri	Hata
r_s	0.107 Ω	0.11168 Ω	0.00468 Ω
L_s	0.0031 H	0.0026 H	0.0005 H
ψ_m	0.1151Wb	0.1177Wb	0.0026Wb

6. Sonuç

Bu çalışmada SMSM'nin yüksek performans sürücülerinde motor parametrelerinin tahmin edilmesi için akım enjeksiyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile SMSM'nin eşdeğer parametrelerinin tahmin edilmesi için farklı i_d akımları motora uygulanarak gerilim, akım ve hız bilgileri kullanılarak, motor kalıcı denklemlerinden faydalanılmıştır. Benzetim sonuçları yöntemin geçerliliğini ispatlamaktadır. Enjekte edilen i_d akımı motorun gücüne göre değişim göstermektedir. Küçük bir motor için büyük i_d akımlarının enjekte edilmesi motorun yanması ile sonuçlanabilir.

7. Kaynaklar

[1] **Yanhui Xu, Ulrich Vollmer, Amir Ebrahimi, Nejila Parspour,** 2012**,** Online Estimation of the Stator Resistances of a PMSM with Consideration of Magnetic Saturation, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012), 25-27 October, Iasi, Romania, p. 360-365

[2] **Yanhui Xu, Nejila Parspour, and Ulrich Vollmer,** 2014**,** Torque Ripple Minimization Using Online Estimation of the Stator Resistances With Consideration of Magnetic Saturation, IEEE Trans. On Industrial Electr., Vol. 61, No. 9, p.5105-1514, September

[3] **Guodong Feng, Chunyan Lai, and Narayan C. Kar,** 2016, A Novel Current Injection-Based Online Parameter Estimation Method for PMSMs Considering Magnetic Saturation, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 52, No. 7, July 2016.

[4] **Kan Liu, Member, IEEE, and Z. Q. Zhu, Fellow,** 2015, Mechanical Parameter Estimation of Permanent-Magnet Synchronous Machines With Aiding From Estimation of Rotor PM Flux Linkage, IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 51, No. 4, p.3115-3125, July/August

[5] **Akın, E.,** 1994, Stator akısı üzerinden asenkron motorun rotor akısı alan yönlendirmesi için bir yöntem, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

[6] **B**. N. Mobarakeh, F. Meibody-Tabar, and F. M. Sargos, "Mechanical sensorless control of PMSM with online estimation of stator resistance," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 40, no. 2, pp. 457–471, Mar./Apr. 2004.

[7] **Y. C. Shi**, **K. Sun, L. P. Huang, and Y. Li**, "Online identification of permanent magnet flux based on extended Kalman filter for IPMSM drive with position sensorless control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 11, pp. 4169–4178, Nov. 2012.

[8] **Q. Liu and K. Hameyer**, "A fast online full parameter estimation of a PMSM with sinusoidal signal injection," in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo., 2015, pp. 4091–4096.

[9] **G. Pellegrino**, **A. Vagati, P. Guglielmi, and B. Boazzo,** "Performance comparison between surface-mounted and interior PM Motor drives for electric vehicle application," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 59, no. 2, pp. 803–811, Feb. 2012.

[10] **B. Thierry**, **L. Nicolas, N. M. Babak and M. T. Farid,** "Online identification of PMSM parameters: Parameter identifiability and estimator comparative study," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 4, pp. 1944–1957, Jul./Aug. 2011.

[11] **Y. Zhang**, **Z. Yin, X. Sun and Y. Zhong**, "On-line identification methods ofparameters for permanent magnet synchronous motors based on cascade MRAS," in Proc. 9th Int. Conf. Power Electron. ECCE Asia, Seoul, Korea, Jun. 2015, pp. 345–353.

[12] **M Polat**, **E Öksüztepe, H K**, "Switched reluctance motor control without position sensor by using data obtained from finite element method in artificial neural network", Electrical Engineering 98 (1), 43-54,2016.

[13] **Öksüztepe E**, **Omac Z, K. H**, "Sensorless vector control of PMSM with non-sinusoidal flux using observer based on FEM" Electrical Engineering 96 (3), 227-238,2014.

[14] **Öksüztepe E**, **Omac Z, Polat M, Celik H, Selcuk AH, K. H,** "Sensorless field oriented control of nonsinusoidal flux-distribution permanent magnet synchronous motor with a FEM based ANN observer", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 24 (4), 2994-3010, 2016.

[15] **Christian Kral, IEEE, Anton Haumer, and Sang Bin Lee,., 2014,** A Practical Thermal Model for the Estimation of Permanent Magnet and Stator Winding Temperatures, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 29, No. 1, p.455-464, Jan.

[16] **K. Liu**, **Q. Zhang, J. Chen, Z. Zhu, and J. Zhang,** "Online multiparameter estimation of nonsalient-pole PM synchronous machines with temperature variation tracking," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 5, pp. 1776–1788, May 2011.

[17] **G. L. Wang**, L. Z. Qu, H. L. Zhan, J. Xu, L. Ding, G. Q. Zhang, and D. G. Xu, "Self-commissioning of permanent magnet synchronous ma-chine drives at standstill considering inverter nonlinearities," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 12, pp. 6615–6627, Dec. 2014.

[18] **S. D. Wilson**, **P. Stewart, and B. P. Taylor**, "Methods of resistance estimation in permanent magnet synchronous motors for real-time thermal management," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 3, pp. 698–707, Sep. 2010.

[19] **D. D. Reigosa**, **F. Briz, P. Gacia, J. M. Guerrero, and M. W. Degner,** "Magnet temperature estimation in surface PM machines using high-frequency signal injection," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, no. 4, pp. 1468–1475, Aug. 2010.

[20] **Öksüztepe E**, **K. H**, "Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Moment Dalgalanmalarının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Oluşturulan Akı Modelinin Kullanılmasıyla Azaltılması", Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Dergisi 25 (1-2),2009.

[21] **Arun Gandhi,Timothy Corrigan,** 2011, Recent Advances in Modeling and Online Detection of Stator Interturn Faults in Electrical Motors, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 58, No. 5, p.1564-1575 May.