

SPWM EVİRİCİ İLE SÜRÜLEN VEKTÖR DENETİMLİ KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORUN DİNAMİK ANALİZİ

Güngör BAL*, **M. Cihat ÖZGENEL****, **Şevki DEMİRBAŞ***

*Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, 06500 Beşevler/ANKARA

**Erzincan Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, 24100 ERZİNCAN

gunbal@gazi.edu.tr, mehcihat@atauni.edu.tr, demirbas@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 18.09.2009 ; Kabul/Accepted: 31.05.2010)

ÖZET

Bu çalışmada, sinüsoidal PWM (SPWM) denetimli bir gerilim kaynaklı eviriciden (GKE) beslenen kalıcı mıknatıslı senkron motorun (KMSM) dinamik analizi yapılmıştır. KMSM'a vektör denetim yöntemi uygulanarak, DA motorlarında olduğu gibi moment ve uyarım akım bileşenlerinin bir birinden bağımsız olarak denetlenmesi sağlanmıştır. Böylece motor performansının artırılması hedeflenmiştir. Akım ve hız denetimi PI denetim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Vektör denetim tekniğini gerçekleştirebilmek ve GKE'nin ihtiyaç duyduğu anahtarlama sinyallerini üretmek için Analog Devices firması tarafından geliştirilen ADMC401 sayısal işaret işlemcili denetim kartı kullanılmıştır. KMSM, değişik hız ve yük koşullarında çalıştırılarak elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve motorun dinamik analizi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalıcı mıknatıslı senkron motor, vektör denetim, sinüsoidal PWM,

DYNAMIC ANALYSIS OF VECTOR CONTROLLED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR DRIVEN WITH SPWM INVERTER

ABSTRACT

In this paper, dynamic analysis of permanent magnet synchronous motor (PMSM) fed by sinusoidal PWM (SPWM) controlled voltage source inverter (VSI) was studied. Similar to separately excited DC motor, torque and exciting currents are controlled individually by applying vector control technique to the PMSM. Consequently, improving the motor performance is aimed in this study. Currents and speed are controlled with PI controllers. A digital signal processor card ADMC401 developed by Analog Devices was used for implementing vector control algorithm and producing switching signal for VSI. The PMSM was operated under several speed and load conditions. Test results obtained from experiments are presented and then the dynamics of the drive system are also analyzed.

Key Words: Permanent magnet synchronous motor, vector control, sinusoidal PWM

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişte DA motorlarında endüvi ve alan sargı akımları kolayca ve birbirinden bağımsız olarak denetlenebildiğinden kapalı döngü denetim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmışlardır. Fakat günümüzde güç elektroniği ve mikroişlemci teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bir çok uygulamada DA motorları yerine AA motorları tercih edilmektedir.

AA motorlarının performansları değişik denetim yöntemleri kullanılarak artırılabilir. En çok kullanılan yöntemlerden birisi vektör denetim yöntemidir. Bu yöntemde, AA motoru yabancı uyarımlı DA motoru gibi denetlenebilmektedir. Vektör denetim yöntemi ilk olarak asenkron motorlara uygulanmış olmasına rağmen son zamanlarda bütün AA motorlarına uygulanabilmektedir.

Klasik senkron motorlardaki uyarım sargıları yerine kalıcı mıknatıslar kullanılırsa, kalıcı mıknatıslı

senkron motor (KMSM) elde edilir. Bu motorlar; küçük boyutlarda üretilebilmeleri, hafif olmaları ve aynı boyutlardaki asenkron motorlara oranla daha yüksek moment üretebilmeleri gibi üstünlüklerinden dolayı yüksek performans gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [1-2]. KMSM'ların yüksek moment üretebilmeleri için eviricide yer alan güç anahtarlarının iletme/kesime geçirilmesi işlemi rotor konum bilgisine göre gerçekleştirilmektedir. Bunun için KMSM'larda motor miline bağlı bir konum algılayıcı veya çeşitli tahmin yöntemleri kullanılmaktadır [3-7].

Akım denetimli gerilim kaynaklı eviriciler (GKE) AA motorların denetimlerinde önemli bir yere sahiptirler. Akım denetim yöntemleri ve modülasyon tekniklerinde iyileştirme yapılarak evirici performansını ve buna bağlı olarak AA motorların performanslarını geliştirmek mümkündür. GKE'lerde modülasyon tekniği olarak genellikle darbe genişlik modülasyonu (PWM) kullanılmaktadır [7]. Bu çalışmada sinüsoidal PWM (SPWM) tekniği kullanılarak KMSM'un hız denetimi deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve çeşitli çalışma koşullarında motorun tepkisi analiz edilmiştir.

2. VEKTÖR DENETİMİNİN KMSM'A UYGULANMASI (APPLICATION OF VECTOR CONTROL TO PMSM)

Alan yönlendirme denetimi olarak da adlandırılan vektör denetimi 1970'lerin başlarında asenkron motorlara uygulanmıştır. Bu yöntemle, asenkron motorların yabancı uyartımlı DA motorlara benzer olarak denetlenebileceği gösterilmiştir [7,8]. Yarıiletken elemanlardaki ve mikroişlemci sistemlerdeki sağlanan hızlı gelişmeler, vektör denetiminin AA motorlarına başarılı bir şekilde uygulanmasını mümkün kılmıştır [1-3,7-10]. Vektör denetim yönteminin uygulanması, alternatif akım motor modelinin rotor referans düzlemine aktarılmasını ve buna uygun denetleyici tasarımını gerektirir. KMSM'un rotor referans düzlemindeki eşdeğer devresi Şekil 1'de verilmiştir [11].

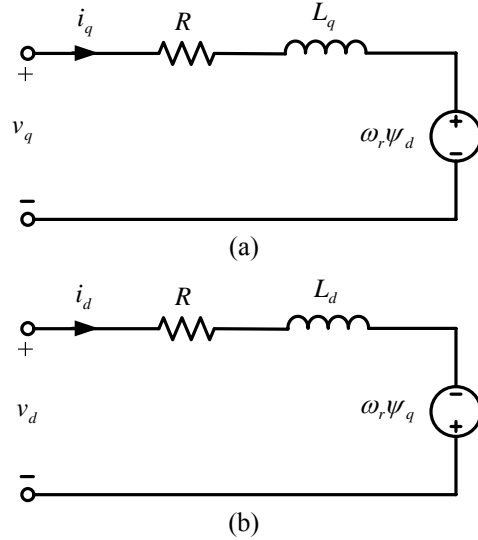
Şekil 1'deki eşdeğer devreden motor gerilimleri;

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

olarak yazılabilir. Burada; v_d, v_q giriş geriliminin d-q bileşenlerini, i_d, i_q faz akımlarının d-q bileşenlerini, L_d, L_q d-q eksenli endüktanslarını, ψ_d, ψ_q d-q eksenli manyetik akılarını, R stator direncini ve ω_r rotor açısal hızını temsil etmektedir. Stator faz sargılarının akımları ile rotordaki kalıcı mıknatıslar motorun d ve q-eksenleri manyetik akılarını sağlamaktadırlar.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada; ψ_m kalıcı mıknatıstan dolayı meydana gelen ortak manyetik akıyı temsil etmektedir.



Şekil 1. KMSM'un rotor referans düzlemindeki eşdeğer devresi; (a) q-ekseni, (b) d-ekseni (Equivalent circuit of PMSM at rotor reference frame; (a) for q-axis, (b) for d-axis)

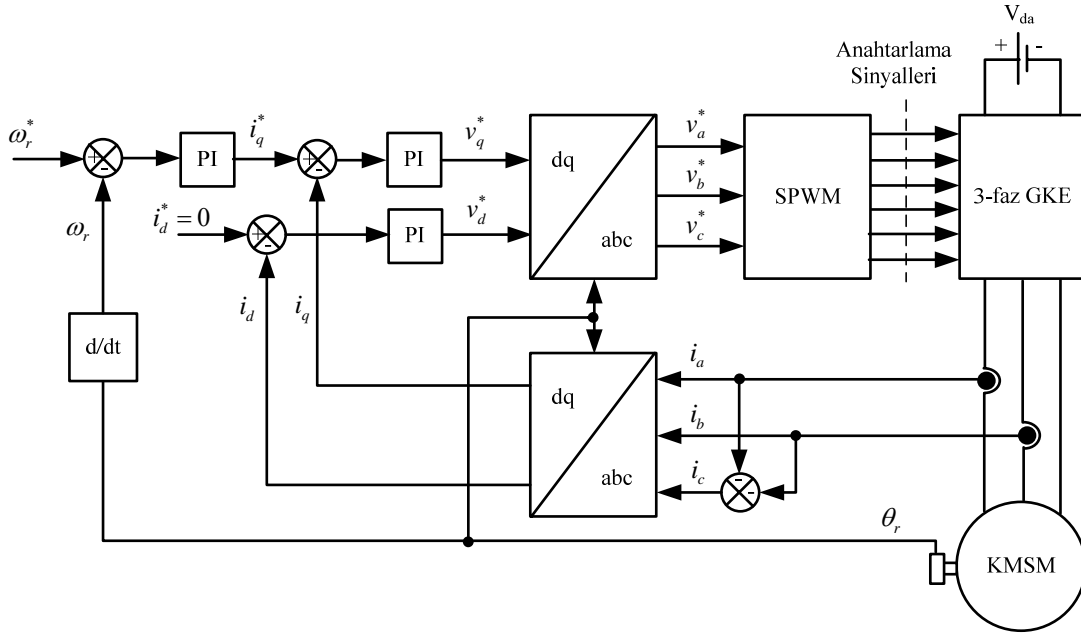
Eşitlik 1 yeniden düzenlenir ve motorun d ve q-eksenlerindeki akım bileşenleri eşitliğin sol tarafına aktarırsa, eşitlik durum uzayı biçiminde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi_m}{L_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_d}{L_d} \\ \frac{v_q}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Rotor referans düzlemindeki akım bileşenleri (i_d ve i_q) kullanılarak elektromanyetik moment Eşitlik 4'deki gibi basit hale getirilebilir.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (4)$$

Burada, P kutup sayısını göstermektedir. Eşitlik 4'e göre, motorun ürettiği momentin rotor manyetik akısı ile i_d ve i_q akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. KMSM'da rotor uyartımı kalıcı mıknatıs ile sağlandığından rotor manyetik akısı ψ_m sabit varsayılır. Mıknatısların rotor yüzeyine yerleştirildiği senkron motorlarda d ve q-eksenleri endüktanslarının eşit olduğu ($L_d = L_q$) varsayılır ve sonuçta üretilen moment ifadesi



Şekil 2. Vektör denetimli KMSM blok şeması (Block diagram of vector controlled PMSM)

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\psi_m i_q] \quad (5)$$

olarak daha basit şekilde yazılabilir. Böylece, mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş senkron motorda üretilen moment sadece rotor referans düzlemi q-ekseni (i_q) akımına bağlı olmaktadır. Rotorun açısal hız ve konum ifadeleri Eşitlik 6 ve Eşitlik 7'de verilmiştir.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_L - B\omega_r}{J} \quad (6)$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (7)$$

Burada; T_e elektromanyetik momenti, T_L yük momenti, J atalet momenti ve B sürtünme katsayısıdır.

Vektör denetim yönteminin KMSM'a uygulanmasına yönelik blok şeması Şekil 2'de verilmiştir. Blok şemasından da görüldüğü gibi vektör denetiminin uygulanabilmesi için öncelikle motor üç-faz stator akımları ile rotor konumu bilgilerine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, kullanılan motorun stator faz sargılarının dengeli olduğu ve motor faz akımlarından ikisinin (stator referans düzleminde) ölçülerek diğer faz akımının $i_c = -(i_a + i_b)$ bağıntısından elde edilebileceği varsayılmıştır. Üç-faz stator akımları, rotor referans düzlemine Park dönüşümü ile aktararak stator akımlarının rotor referans düzlemindeki i_d ve i_q akım bileşenleri elde

edilmiştir. Park dönüşümü için konum algılayıcısından elde edilen rotor konum bilgisi kullanılmıştır. Rotor hızı, rotor konumundan hesaplanarak elde edilmiştir. Rotorun gerçek hızı ile referans hız karşılaştırılmış ve hız hatası PI denetleyicinin girişine uygulanmıştır. PI çıkışında ise rotor referans düzlemindeki moment üreten akım bileşeninin referans değeri (i_q^*) elde edilmiştir. i_q^* ile gerçek i_q akımı karşılaştırılmış, akım farkı PI denetleyicisinin girişine uygulanarak çıkışından referans q-ekseni gerilim değeri (v_q^*) elde edilmiştir.

KMSM'larda uyarım kalıcı mıknatıslar tarafından sağlandığından, mıknatıslanma (uyarım) akımı oldukça düşük olmaktadır. Bu nedenle rotor referans düzlemindeki referans uyarım akım bileşeni olan d-ekseni akımı (i_d^*) sıfır alınmış ve bu değer motor faz akımlarından elde edilen i_d akımı ile karşılaştırılarak d-ekseni akım hatası elde edilmiştir. Uyarım akım hatası bir PI denetleyici yardımıyla d-ekseni referans gerilim değerine (v_d^*) dönüştürülmüştür. v_q^* ve v_d^* referans gerilim değerlerine ters Park transformasyonu uygulanarak, üç-faz referans gerilimleri elde edilmiştir. Üç-faz referans gerilim sinyalleri sinüsoidal PWM (SPWM) bloğu içerisinde yüksek frekanslı üçgen dalga ile karşılaştırılarak gerilim kaynaklı evirici (GKE) için anahtarlama sinyalleri üretilmiştir.

3. KMSM'UN VEKTÖR DENETİMİ İÇİN DENEY DÜZENEGİ (EXPERIMENTAL SETUP FOR VECTOR CONTROLLED PMSM)

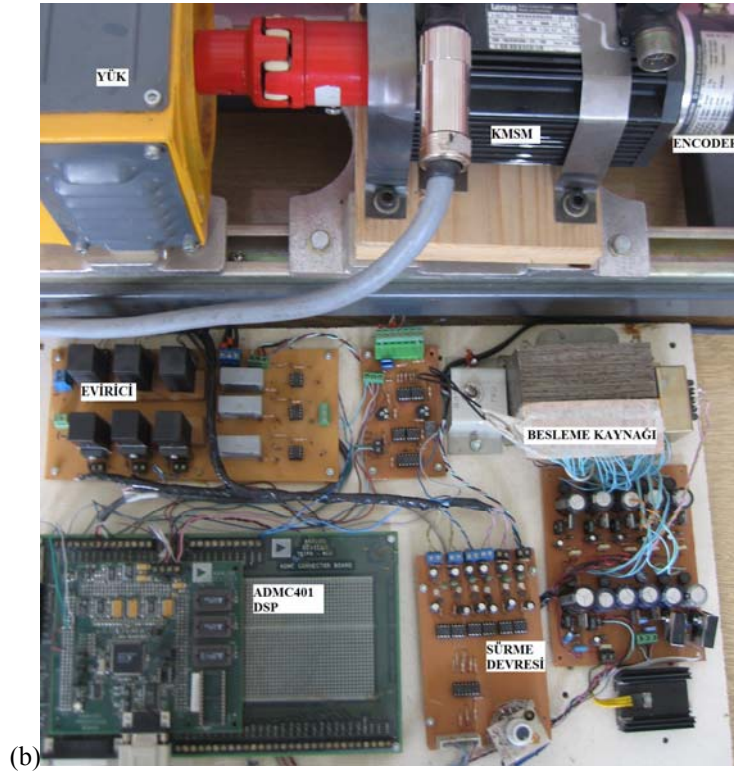
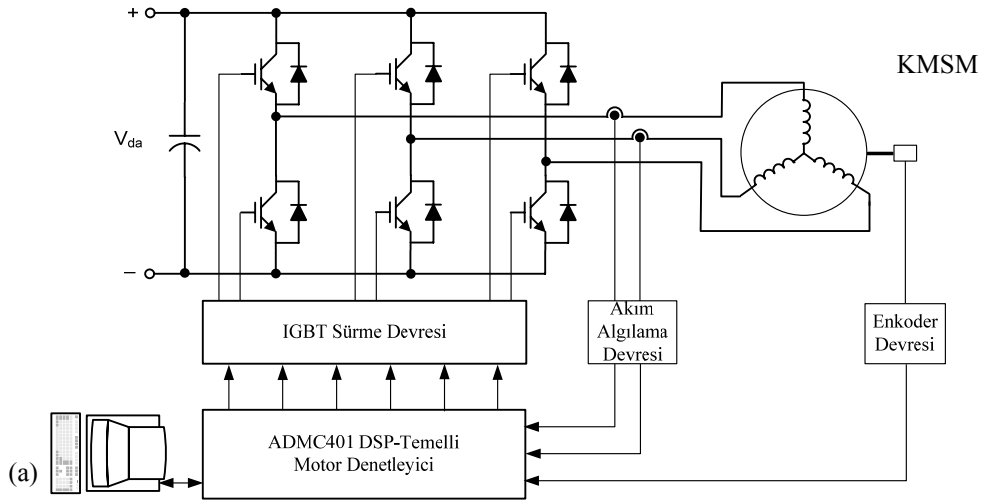
Deneysel çalışma için gerçekleştirilen düzeneğin blok şeması ve fotoğrafı Şekil 3(a) ve (b)'de verilmiştir [12]. Deneyde kullanılan KMSM, Lenze firması

tarafından üretilmiş olup motorun özellikleri ve bilgileri Tablo 1'de verilmiştir. Motorun konum bilgileri motor miline bağlı sin/cos enkoder ile elde edilmiştir. Akım bilgilerini elde etmek için motor giriş fazlarından ikisine akım algılayıcılar bağlanmış ve

diğer faz akımı $i_c = -(i_a + i_b)$ bağıntısından elde edilmiştir.

Tablo 1. Deneyde kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron motora ait özellikler ve bilgiler (Data of PMSM used in the experiment)

Üretici firma	Lenze	Kutup sayısı	6
Moment	2,8 Nm	Anma akımı	2,3 A
Hız	3800 d/d	Anma frekansı	190 Hz
Atalet momenti	0,00012 kgm ²	d,q edüktansları	$L_d=L_q=16$ mH
Stator sargı direnci	5,2 Ω	Gerilim	330 V
Rotor manyetik akısı (ψ)	0,345 Weber	Anma gücü	1,1 kW



Şekil 3. Deney düzeneğinin (a) blok şeması, (b) fotoğrafı (Block diagram and photograph of experimental setup)

Motorun hız ve akım denetim algoritmalarını uygulamak için Analog Devices firmasının bir ürünü olan ADMC 401 sayısal işaret işlemci (DSP) kartı [13,14] kullanılmıştır. Motorun giriş gücü denetimi için kullanılan eviricinin girişine 160V DA gerilimi uygulanmıştır. 1200V, 25A ters serbest dönüşüm diyotlu tekli IGBT'den altı adet kullanılarak gerilim kaynaklı evirici gerçekleştirilmiştir. IGBT'lerin sürülmesi ve ADMC401 motor kontrol işlemcisini güç devresinden yalıtım için Hewlett Packard firmasının ürettiği IGBT sürücü ve aynı zamanda optik izolatör olan (HCPL-3150) kullanılmıştır. Deneyde akım algılayıcı olarak Honeywell firmasının ürettiği olan CSNE151-100 akım algılayıcı kullanılmıştır. Konum algılayıcı olarak Thalheim firmasının ürettiği ve rotorun bir devrinde 1024 adet sinüs ve kosinüs sinyalleri üreten sinüsoidal konum algılayıcı (enkoder) kullanılmıştır. Böylece çözünürlük artmakta, rotorun her konumu hatasız olarak sayısal işaret işlemciye aktarılmaktadır. Akım denetiminde SPWM tekniği kullanılmıştır. Motor değişik hız ve yük şartlarında çalıştırılmış; motorun hız, hız hatası, akım ve moment tepkileri ADMC401 kartının osiloskop (plot) özelliği kullanılarak çizdirilmiş ve incelenmiştir.

ADMC401 Sayısal İşaret İşlemci (DSP) özellikleri [14]

Motor kontrolü için geliştirilen ve Analog Devices firması tarafından üretilen ADMC401 sayısal işaret işlemcisi ve çevre birimleri ile motor kontrol sayısal işlemci kartı kullanılmıştır. Sayısal işaret işlemci kartının teknik özellikleri aşağıda özetlenmiştir.

- 26 MIPS Fixed-Point DSP çekirdek, tek çevrim komut işleme (38.5 ns)
- 16-Bit ALU, 2K*24 dahili program hafızası RAM, 1K*16-Bit dahili veri hafızası RAM, 2K*24-Bit dahili program hafızası ROM
- 8 adet analog giriş, 8-Bit çok kanallı pipeline flash ADC (dönüştürme süresi 2µs)
- 3-faz 16-Bit PWM ünitesi
- Konum algılayıcı enkoder girişleri için programlanabilir filtre

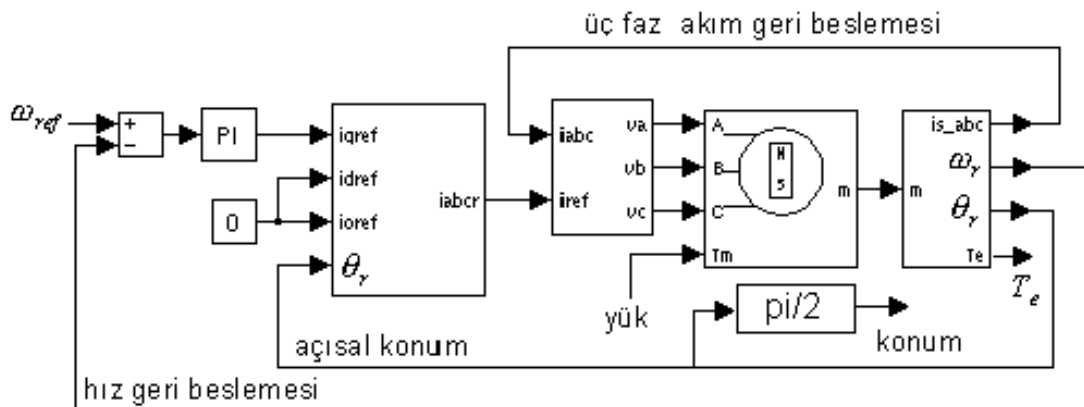
- 24 adet bağımsız programlanabilir genel amaçlı giriş çıkış
- Seri haberleşme
- Osiloskop (plot-grafik çizdirme) fonksiyonu

4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL SONUÇLAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneyel çalışma öncesi KMSM'un bilgisayar simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında tasarımcıya çok büyük kolaylıklar sağlayan Matlab/Simulink paket programı tercih edilmiştir. Şekil 4'de simülasyon çalışmasının blok şeması verilmiştir [12].

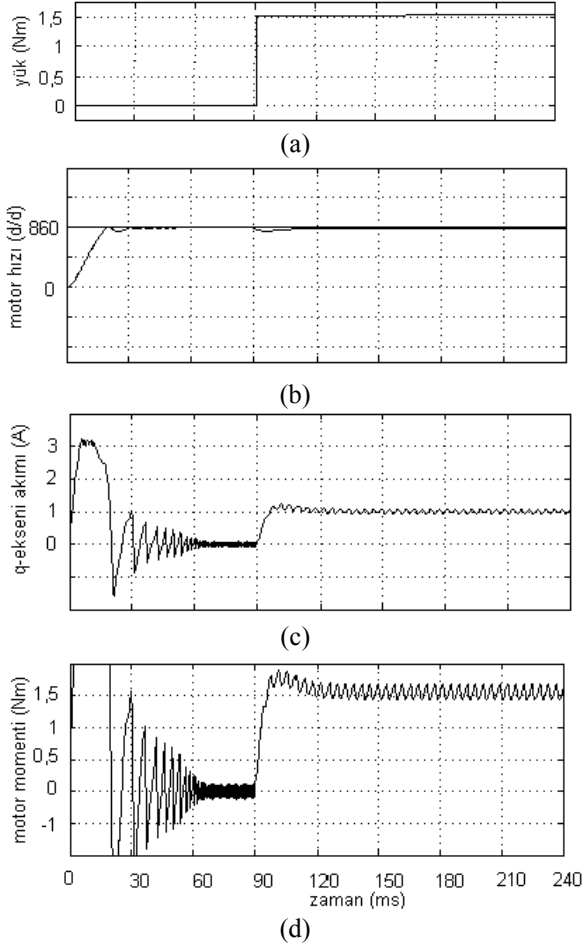
Simülasyonda kullanılan motor parametreleri, deneyde kullanılacak gerçek motorun parametreleridir. Hem simülasyonda hem de deneyde hız PI denetleyicisinin oransal kazancı 0,25 ve integral kazancı 20 olarak alınmıştır.

Deneyel çalışmalar ile uyumluluğu göstermek amacıyla burada simülasyon çalışmalarından sadece bir durum için sonuçlar verilmiştir. Motor önce 860d/d hız referansında yüksüz olarak çalıştırılmış daha sonra motora 1,5Nm yük uygulanmış ve motorun dinamik davranışı Şekil 5'de verildiği gibi olmuştur. Şekil 5(a)'da gösterildiği gibi motor önce yüksüz olarak çalıştırılmış ve çalışma anından 90ms sonra motora 1,5Nm yük uygulanmıştır. Yükün uygulandığı anda motor hızında çok küçük bir azalma olmuş, PI denetleyici motor hızını tekrar referans hıza getirmiştir, Şekil 5(b). Motorun yol alırken yüksek akım çektiği, daha sonra akımın salınımlı bir şekilde azalarak kayıpları karşılayacak kadar küçük bir değere düştüğü Şekil 5(c)'de gözlenmiştir. Akıma benzer olarak üretilen moment de akımla beraber azalmış ve motora yük uygulanıncaya kadar küçük bir değerde kalmıştır. Motora yük uygulandığı anda hem i_q akımı hem de üretilen moment artmıştır. Yükün motora uygulandığı andaki moment ve i_q akımındaki artışı ilk yol alma anındaki gibi salınımlı olmamış, motor yol aldıktan sonra yük uygulandığı için üretilen moment ve i_q akımı düzgün bir artış göstermiştir,



Şekil 4. KMSM'un simülasyonu için blok şeması (Block diagram for simulation of PMSM)

Şekil 5(c,d). Simülasyon çalışmasında motor, verilen referans hızlara yüksüz ve yüklü durumlarda çok kısa sürelerde ulaşarak yüksek tepki gerektiren uygulamalarda başarı ile kullanılabilirliğini göstermiştir.



Şekil 5. Simülasyon sonuçları: yüksüz yol alan ve sonra yüklenen motorun yük momenti, hızı, q-ekseni akımı ve ürettiği moment eğrileri (Simulation results: speed, speed error, q-axis current and generated torque graphs for the motor starting without load and working with load)

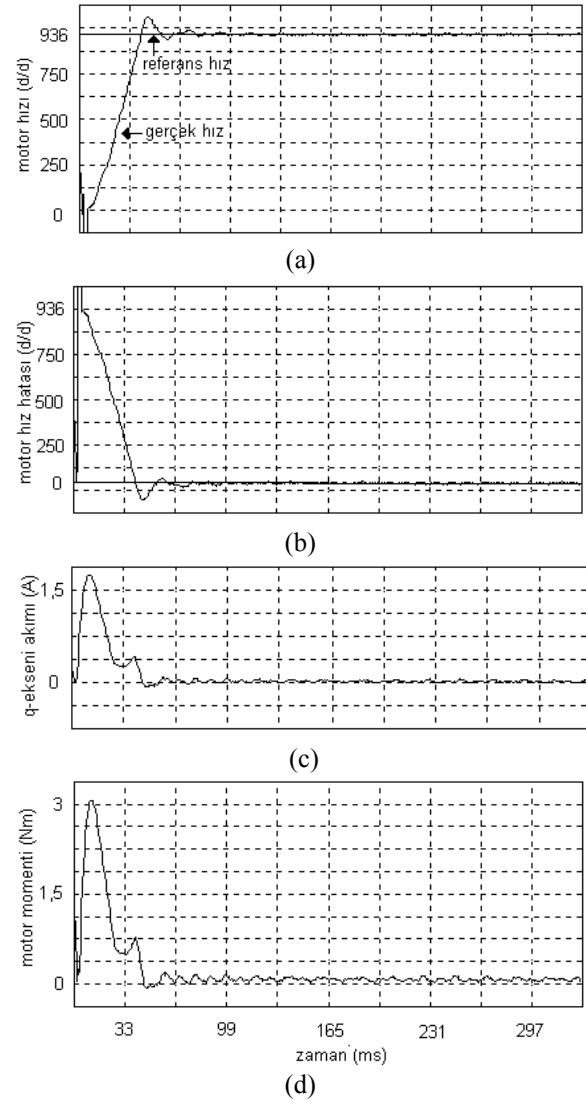
Deneysel çalışmada, vektör denetimli KMSM'a sinüsoidal PWM tekniği ile uygulanan akımın denetimi gerçekleştirilmiştir [12]. Motorun değişik hız ve yüklerdeki tepkileri deney sonuçlarına göre değerlendirilmiştir.

(i) Yüksüz yol alma:

İlk olarak motor 936d/d referans hızla ve yük ünitesi motor miline bağlı değilken çalıştırılmıştır. Şekil 6(a)'da yüksüz çalışan motorun hız tepkisi verilmiştir. Rotor, referans hızı yaklaşık 41ms'de yakalamış ve kısa süreli bir salınım yaptıktan sonra 60ms dolayında artık referans hız seviyesinde kararlı çalışmaya devam etmiştir. Şekil 6(b)'de gösterilen hız hatası 936d/d gibi yüksek bir değerle başlamış, rotorun hızlanmasıyla sıfıra doğru azalmış, gerçek hızın referans hızı kısa bir süre için aşması nedeniyle hız hatası negatif değer almış ve PI denetleyicisi daha

sonra hız hatasının sıfıra çok yakın olmasını sağlamıştır.

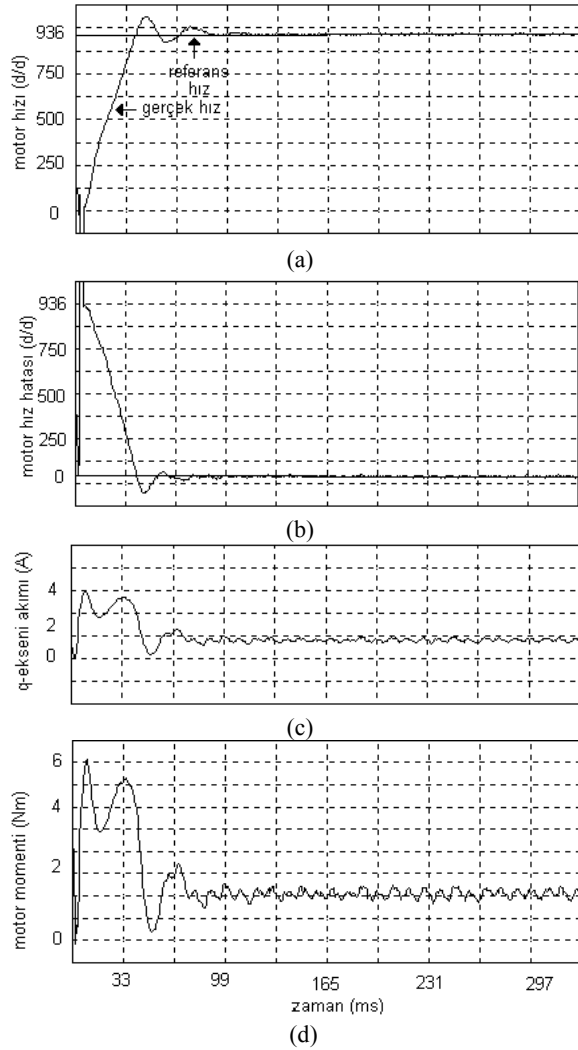
Şekil 6(c) ve (d)'de moment bileşeni olarak adlandırılan q-ekseni akımı ve üretilen moment eğrileri verilmiştir. Motorun momenti ilk çalışma anında başlangıç momentini karşılamak üzere yüksek olmuş, daha sonra hızın kararlı hale gelmesiyle moment azalmış ve kararlı durumuna ulaşmıştır. Hem moment hem de momenti oluşturan akım sadece motorun sürtünmesini ve kayıplarını karşılayabileceği çok küçük değere kadar düşmüştür. Dikkat edilirse, moment ile q-ekseni akımının aynı değişim özelliğine sahip oldukları görülmektedir.



Şekil 6. Yüksüz çalışan motorun gerçek hız, hız hatası, q-ekseni akımı ve ürettiği moment eğrileri (Real speed, speed error, q-axis current and generated torque graphs for unloaded motor)

(ii) Yüklü yol alma:

Şekil 7(a)'da, 1Nm yük altında yol alan motorun hız tepkisi verilmiştir.

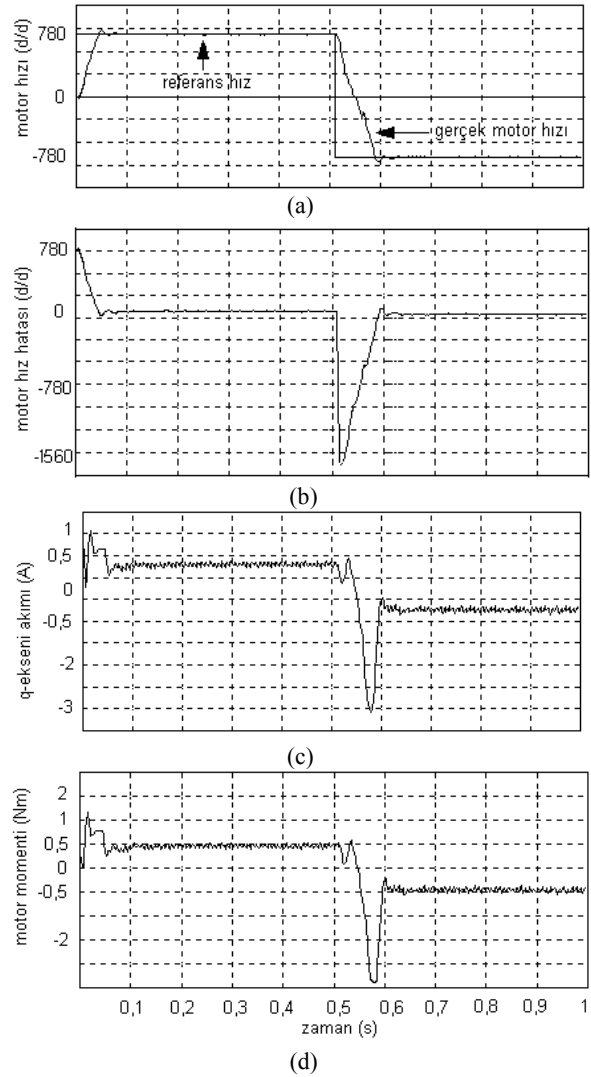


Şekil 7. 1Nm yükü başlatan motorun gerçek hız, hız hatası, q-ekseni akımı ve ürettiği moment eğrileri (Real speed, speed error, q-axis current and generated torque graphs for motor starting with 1Nm load)

Hız referansı yine basamak şeklinde 936d/d olarak verilmiştir. Motora gerilim uygulandığında, motor hızı sıfırdan yükselmeye başlamış, referans hızı 41ms'de yakalamış ve referans hızı aşmış, PI denetleyicisi hız hatasına göre motorun hızını düşürmüştür. Rotor hızı çok küçük bir salınım yaptıktan sonra 90ms dolayında referans hız seviyesinde çalışmasını sürdürmüştür. Şekil 7(b)'de, motorun hız hatası verilmiştir. Hız hatası ilk çalışma anında 936d/d olmuş, motor hızlandıkça hata azalmış ve motor hızı referans hıza sabitlenince hız hatası yaklaşık sıfır olmuştur. Şekil 7(c)'de q-ekseni akımı, Şekil 7'de ise motorun ürettiği moment verilmiştir. Motor, ilk yol alma anında yüksek akım çekmiş ve yüksek moment üretmiş, daha sonra hızın kararlı olmasıyla akım ve moment normal yük değerlerine düşmüştür.

(iii) Farklı hızlarda çalışma:

Bu denemede, motor basamak şeklinde 780d/d referans hız ve 0.5Nm yükü ileri yönde yol aldıktan ve kararlı duruma ulaştıktan sonra referans hız aniden



Şekil 8. Hız ters çevrildiğinde motorun gerçek hız, hız hatası, q-ekseni akımı ve ürettiği moment eğrileri (Real speed, speed error, q-axis current and generated torque graphs for motor with speed reverse)

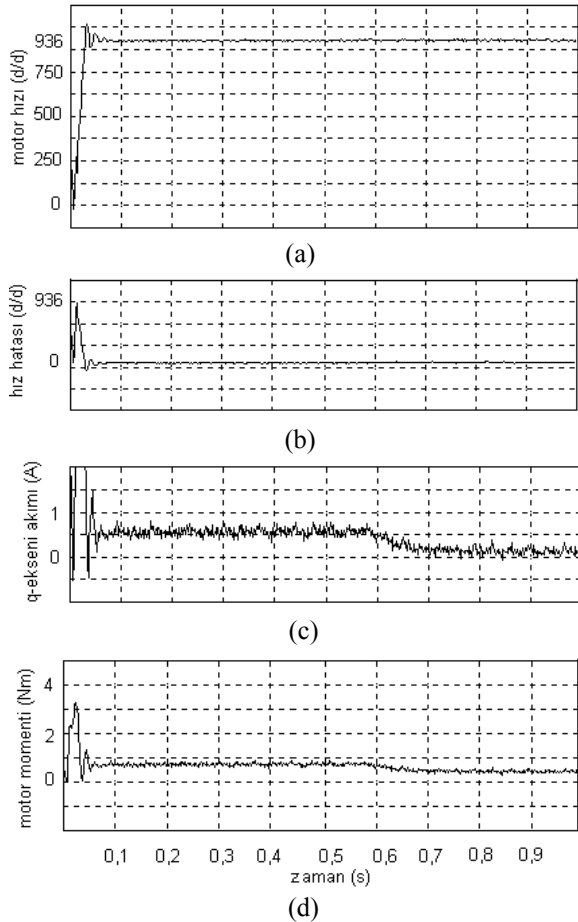
tersine (-780d/d) çevrilmiş ve böylece motorun bu değişime karşı gösterdiği tepki incelenmiştir. Şekil 8(a)'da verilen motorun hız tepkisi incelendiğinde, motorun başarılı bir şekilde referans hızdaki ani değişimleri izlediği görülmüştür.

Şekil 8(b) incelendiğinde, referans hızdaki ani değişikliklerde hız hatasının en yüksek değerine ulaştığı, ancak motorun kısa sürede hız hatasını giderdiği açıkça görülmektedir. Şekil 8(c) ve (d)'de ise referans hızdaki ani değişikliklere karşı motorun tepkisini izleyebilmek için q-ekseni akımı ve üretilen moment eğrileri gösterilmiştir. Verilen yük ve hız değerlerinde, motor ilk yol almada yüksek moment üretmiş, hız kararlı olunca moment azalarak yük momenti olan 0,5Nm değerine düşmüş ve bu andan sonra düzgün ve kararlı olarak 0,5Nm momentini üretmeye devam etmiştir. 0,51s'de motora sıfır hız referansı ve arkasından hiç beklemeden geri yönde hız referansı uygulanınca, motor ters yönde dönmeyi sağlayabilmek için yol alma momentine göre çok

yüksek ve ters yönde bir moment üretmiştir. Hem durma momentini hem de geri yönde dönme momentini motor aynı anda üretmiş ve momentin ikisi de aynı yönde olunca momentin değeri yüksek olmuştur. Bununla birlikte momenti meydana getiren i_q akımı da ilk kalkınma anına göre dönüş yönünün durmaksızın değişmesi sırasında çok daha yüksek olmuştur, Şekil 8(c).

(iv) Farklı yüklerde çalışma:

Deneyin bu kısmında, motorun 0,8Nm yükte başlatılmasına ve daha sonra yükün kaldırılmasına yönelik motorun tepkileri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. 0.8Nm yüklü ve sonra yüksüz çalıştırılan motorun gerçek hız, hız hatası, q-ekseni akımı ve ürettiği moment eğrileri (Real speed, speed error, q-axis current and generated torque graphs for the motor with 0.8Nm load and without load)

Şekil 9(a)'da görüldüğü gibi motorun ilk yol alma anında hızda küçük bir salınım olmuş ve yükün motordan kaldırıldığı an olan 0,6s'de motorun hızında dikkate değer değişim olmamıştır. Bu durum Şekil 9(b)'de verilen hız hatası eğrisinden de da görülmektedir. Motor referans hızı yakaladıktan sonra hız hatası sürekli olarak yaklaşık sıfırda kalmıştır. Şekil 9(c) ve (b)'de gösterilen motorun i_q akımı ve ürettiği moment eğrilerinden motorun başlangıçta

yüksek akım çektiği ve yüksek moment ürettiği, motor referans hızda kararlı çalışmaya başladığında akımın ve momentin verilen yük momentine değerine düştüğü anlaşılmaktadır. Motordan yükün kaldırıldığı 0,6s'de motorun momenti azalmış ve sürtünme ve rüzgar kayıplarını karşılayacak kadar bir moment üretmeye devam etmiştir.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, SPWM denetimli bir GKE'den beslenen KMSM'un dinamik davranışı incelenmiştir. Vektör denetim yöntemini KMSM'a uygulayabilmek için KMSM denklemleri iki faz rotor düzlemine aktarılmış ve motorun yabancı uyartımlı DA motoruna benzer bir şekilde denetimi gerçekleştirilmiştir. KMSM öncelikle yüksüz ve yüklü olarak sabit basamak hız referansında çalıştırılmıştır. Hem yüksüz hem de yüklü durumda motorun hızlı bir şekilde yol alarak referans hızı yakaladığı ve düzgün bir şekilde referans hızı takip ettiği görülmüştür. Motorun değişken hızlardaki tepkisini denemek amacıyla motorun devir yönü aniden değiştirilecek şekilde kare dalga biçimli bir referans hız uygulanmış ve motor yüklü olmasına rağmen referans hızdaki değişimi kısa sürede yakalayarak izlemeye devam etmiştir. Deneysel sonuçlar, KMSM'un değişken hız ve yük uygulamalarında yüksek dinamik tepkiye sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sharma, R.K., Sanadhya, V., Behera, L., Bhattacharya, S., "Vector Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor," **IEEE Conference & Exhibition on Control, Communication and Automation (INDICON)**, Kanpur/INDEA, vol.1, 81-86, 11-13 Dec. 2008
2. Mohamed, Y.A.-R.I., "Design and Implementation of a Robust Current-Control Scheme for a PMSM Vector Drive with a Simple Adaptive Disturbance Observer", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol.54, no.4, 1981-1988, Aug. 2007
3. Şevki DEMİRBAŞ, "Sürekli Mıknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Hız Denetimi", **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Dergisi**, Cilt 15, No 3, 747-755, Temmuz 2002
4. Acarnley P.P. and Ertugrul N, "Rotor Position Estimation in PM Motors", **International Conference on Electrical Machines(ICEM)**, Manchester/UK, 622-626, 1992
5. Fu M. and Xu L., "A Novel Sensorless Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Digital Signal Processor", **IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)**, Dayton, OH, USA, Vol 1, 403-408, 14-17 July 1997
6. Matsui N. and Shigyo M., "Brushless DC Motor Control without Position and Speed Sensors",

- IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol 28, No 1, 120-127, 1992
7. Bal G., Özgenel M.C., Demirbaş Ş., “[Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi](#)”, **Politeknik Dergisi**, Cilt 10, No 1, 07-13, 2007
 8. Wang H., Xu W., Yang G. and Li J., “Variable-Structure Torque Control of Induction Motors Using Space Vector Modulation”, **Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)**, Cilt 87, No 3, 93-102, Feb. 2005
 9. Vas P., **Vector Control of AC Machines**, Clarendon Press, Oxford, 1990
 10. Simon E., “Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor Using TMS320F240”, **Texas Instrument Application Report SPRA588**, (1999)
 11. Pillay P. and Krishnan R., “Modeling of Permanent Magnet Motor Drives”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 35, No 4, 537-541, 1988
 12. Özgenel M.C., “Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Vektör Kontrol Tekniği ile Denetimi”, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Doktora Tezi, 2003.
 13. “Referans Frame Conversions with the ADMC401”, **Analog Devices Application Note**, AN401-11, 2000
 14. “Single-Chip, DSP-Based High Performance Motor Controller, ADMC401”, **Analog Devices Note**

