

# Vektör Denetimli Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun Uzay Vektör Darbe Genişliği Modülasyonu ile Performans Analizi

Güngör BAL\*, M. Cihat ÖZGENEL\*\*, Şevki DEMİRBAŞ\*  
\*Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü,  
06500 Teknikokullar, ANKARA  
\*\*Erzincan Üniversitesi Meslek Yüksekokulu, ERZİNCAN

## ÖZET

Bu çalışmada vektör denetimli kalıcı mıknatıslı senkron motor (KMSM)'un performansı incelenmiştir. Vektör denetimini gerçekleştirebilmek için Analog Devices firması tarafından geliştirilen ADMC 401 sayısal işaret işlemcili denetim kartı kullanılmıştır. Akım ve hız denetimi PI denetim algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Vektör denetim yöntemi ile KMSM'un yabancı uyarımlı DA motoruna benzer biçimde uyarım ve moment akımları birbirlerinden bağımsız olarak denetlenebilmiş ve motorun yüksek performansta çalışması sağlanmıştır. KMSM akım denetimli gerilim kaynaklı evirici (GKE) tarafından beslenmektedir. GKE'nin akım denetiminin sağlanmasında ve anahtarlama sırasının belirlenmesinde uzay vektör darbe genişliği modülasyonu (UVDGM) kullanılmıştır. KMSM değişik hız ve yük koşullarında çalıştırılarak gösterdiği performans incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler :** Kalıcı mıknatıslı senkron motor, vektör kontrol, uzay vektör darbe genişlik modülasyonu

## Performance Analysis of Vector Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor with Space Vector Pulse Width Modulation

### ABSTRACT

In this paper performance analysis of vector controlled permanent magnet synchronous motor(PMSM) has been investigated. ADMC 401 digital signal processor card developed by Analog Devices has been used for control algorithm. Current and speed have been controlled with PI controller. With the vector control method, exciting and torque currents of the PMSM have been controlled individually same as separately excited DC motors and high performance has been obtained. The PMSM has been supplied from current controlled voltage source inverter (VSI). Space vector pulse width modulation (SVPWM) technique has been used for controlling VSI current and determining switching sequence. The PMSM has been performed several speed and load conditions and then performance has been analysed. Test results obtained from experiment have also been summarized.

**Keywords :** Permanent magnet synchronous motor, vector control, space vector pulse width modulation

### 1. GİRİŞ

Doğru akım (DA) motorları, geçmişte endüvi ve alan sargı akımları kolayca denetlenebildiği için, değişken hız ve moment gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmıştır. Özellikle yabancı uyarımlı DA motoru hız ve momentte meydana gelebilecek ani değişimlere hızlı cevap verebilmesinden dolayı yüksek performans gerektiren uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Ancak DA motorlarının bu yeteneğine karşın motorun yapısından kaynaklanan bazı mahsurları da vardır. Motorda fırça ve kollektör düzeneğinin olması; beraberinde motorun yüksek hızlarda ve yarı ortalarda kullanılmaması gibi sakıncaları getirmiştir (1). Bunlara ilaveten motorun periyodik bakım gerek-

tirmesi de bir başka olumsuzluktur. Alternatif akım (AA) motorlarının DA motorlarına göre daha küçük boyutlarda üretilebilmeleri, daha az bakım gerektirmeleri gibi avantajları vardır. AA motorları içerisinde en çok kullanılan motor olan asenkron motor bakım gerektirmeyen fakat buna karşılık DA motoruna göre dinamik performansı düşük ve denetimi daha zor ve daha karmaşık olan bir motordur.

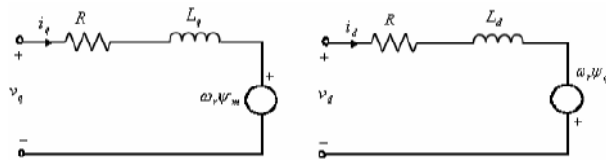
Kalıcı mıknatıslı senkron motor(KMSM)'lar, klasik senkron motorlardaki uyarım sargılarının yüksek mıknatısiyetli kalıcı mıknatıslarla değiştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. KMSM'lerde stator sargılarının beslenmesi evirici ile sağlanmaktadır. Eviriciler, girişlerine uygulanan doğru gerilimi genliği ve frekansı değişebilen genellikle bir veya üç fazlı alternatif akıma çevi-

ren güç elektroniği devreleridir. Eviricide kullanılan transistörlerin anahtarlanması, motorun rotor konumuna göre gerçekleştirilir. Bu yüzden KMSM'larda motor miline bağlı bir konum algılayıcı bulunmakta veya çeşitli tahmin yöntemleri kullanılarak motor konumu tahmin edilmektedir (2-4). Her iki durumda da rotorun konum bilgisi eviricide bulunan transistörlerin anahtarlanması işleminde kullanılmaktadır. Bir başka deyişle komütasyon, rotorun konum bilgisi kullanılarak evirici transistörlerinin uygun zamanlarda iletimde veya kesimde kalmasıyla sağlanmaktadır.

AA motorların denetimlerinde akım denetimli gerilim kaynaklı eviriciler (GKE) önemli bir yere sahiptir. Akım denetim yöntemleri ve modülasyon tekniklerinde iyileştirme yapılarak evirici performansını buna bağlı olarak AA motorların performanslarını geliştirmek mümkündür. GKE'lerde modülasyon tekniği olarak genellikle darbe genişlik modülasyonu (DGM) kullanılmaktadır. Akım kontrol tekniği olarak ta en çok kullanılanlar histerisiz akım denetimi, rampa karşılaştırmalı denetim ve uzay vektör darbe genişliği (UVDGM) akım denetimidir (5). Bu çalışmada UVDGM tekniği kullanılarak KMSM'un denetimi yapılmış ve çeşitli çalışma koşullarında performans analizi yapılmıştır.

## 2. KMSM'UN VEKTÖR DENETİMİ

Vektör denetimi 1970'lerin başlarında asenkron motorlara uygulanarak asenkron motorların yabancı uyarımlı DA motoru gibi denetlenebileceğini göstermiştir. Ancak o yıllarda mikroişlemci ve güç elektroniği teknolojisi elemanları bu işlemi yerine getirebilmek için yeterli hıza ve güce sahip değildi. Günümüzde elektronik alanındaki hızlı gelişmeler sonucu vektör denetimi asenkron motorların yanında senkron motorlar gibi bir çok AA motorlarında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Vektör denetim yönteminde AA motor modeli rotor referans düzlemine aktarılarak buna uygun denetleyici tasarlamak suretiyle gerçekleştirilmektedir. Şekil 1'de KMSM'un rotor referans düzleminde eşdeğer devresi verilmiştir (6).



a) q eksenli eşdeğer devresi b) d eksenli eşdeğer devresi

Şekil 1. KMSM'un rotor referans düzleminde eşdeğer devresi

Şekil 1'deki eşdeğer devre kullanılarak motor gerilimleri;

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

şeklinde 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,  $\psi_d, \psi_q$  d-q eksenli manyetik akılarını,  $R$  stator direncini ve  $\omega_r$  rotor açısal hızını ifade etmektedir. Motorun d ve q eksenleri manyetik akıları;

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

ile ifade edilir. Burada  $\psi_m$  sabit mıknatıstan dolayı meydana gelen ortak manyetik akıdır. Eş.1 düzenlenerek motorun d ve q eksenlerindeki akımları eşitliğin sol tarafına alınıp denklem durum uzayı biçiminde yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eş.3'den motorun denetim büyüklüğü rotor referans düzlemindeki akımları ( $i_d$  ve  $i_q$ ) olduğu görülmektedir.

Motorun ürettiği elektromanyetik moment;

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

eşitliği ile ifade edilebilir. Burada  $P$  kutup sayısını göstermektedir. Eş.4'de motorun ürettiği momentin rotor manyetik akısına ve rotor referans düzlemi  $i_d, i_q$  akımlarına bağlı olduğu görülmektedir. KMSM'da rotor manyetik akısı mıknatıslar tarafından karşılandığından rotor manyetik akısı  $\psi_m$  sabittir. Ayrıca yüzey mıknatıslı senkron motorlarda d ve q eksenleri endüktansları eşit olduğundan ( $L_d = L_q$ ) Eş.4'deki moment ifadesi yüzey mıknatıslı senkron motorlarda;

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

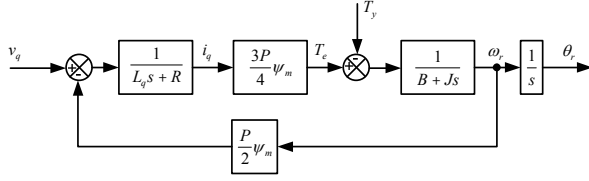
olarak yazılabilir. Böylece mıknatısları rotor yüzeyine yerleştirilmiş senkron motorda moment sadece rotor referans düzlemi q-ekseni ( $i_q$ ) akımına bağlı olmaktadır. Rotorun açısal hızı eşitlik 6 ile gösterilebilir.

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

Burada  $T_y$  yük momenti,  $J$  atalet momenti ve  $B$  sürtünme katsayısıdır. Rotor konumu;

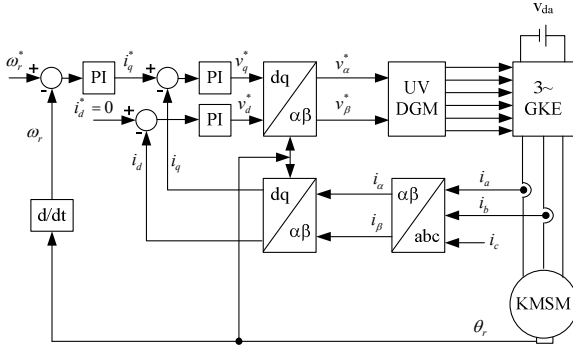
$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad [1] \quad (7)$$

ifade edilebilir. Rotor referans düzlemine göre KMSM'un blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Rotor referans düzlemine göre KMSM'nin blok şeması

KMSM'nin rotor referans düzleminde ki matematik modeli kullanılarak gerçekleştirilen vektör denetimi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. KMSM'nin vektör denetim diyagramı

Şekilde, motor hattından (stator referans düzleminde) iki faz akımı ölçülmüş, diğer faz akımı ise

akımı ( $i_q^*$ ) bulunur. Moment bileşeni referans akımı gerçek  $i_q$  akımı ile karşılaştırılıp PI denetleyiciden geçirilerek motorun q-ekseni geriliminin referans değeri ( $v_q^*$ ) bulunur. Rotor referans düzlemi d-ekseni akımı ( $i_d^*$ ) sıfır alındığından rotor d-ekseni gerilim referans değeri de sıfır alınmıştır. Rotor referans düzlemi q-ekseni geriliminin referans ( $v_q^*$ ) değeri ters Park transform bloğunda iki faz sabit referans ( $\alpha\beta$ ) düzlemine rotor konumu kullanılarak çevrilir. İki faz sabit düzlemdeki gerilim değerleri kullanılarak UVDGM yöntemi ile GKE'nin anahtarlama sıraları ve süreleri belirlenmektedir.

### 3. UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU

Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM), uzay vektör yöntemini kullanarak 3-faz gerilim kaynaklı eviricide kullanılan güç anahtarlarının uygun sıra ile anahtarlama konumudur. 3-faz gerilim kaynaklı eviricide 8 farklı anahtarlama konumu vardır. Çizelge 1'de 3-faz GKE'nin anahtarlama konumlarına sabit düzlemde çıkış gerilimleri verilmiştir.

Çizelge 1. Evirici anahtarlama pozisyonuna göre sabit düzlem çıkış gerilimleri

Anahtar Konumu	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_\alpha$	$V_\beta$	Vektör
1	0	0	0	0	0	$\vec{V}_0$
2	0	0	1	$-V_{da}/3$	$-V_{da}/\sqrt{3}$	$\vec{V}_1$
3	0	1	0	$-V_{da}/3$	$V_{da}/\sqrt{3}$	$\vec{V}_2$
4	0	1	1	$-2V_{da}/3$	0	$\vec{V}_3$
5	1	0	0	$2V_{da}/3$	0	$\vec{V}_4$
6	1	0	1	$V_{da}/3$	$-V_{da}/\sqrt{3}$	$\vec{V}_5$
7	1	1	0	$V_{da}/3$	$V_{da}/\sqrt{3}$	$\vec{V}_6$
8	1	1	1	0	0	$\vec{V}_7$

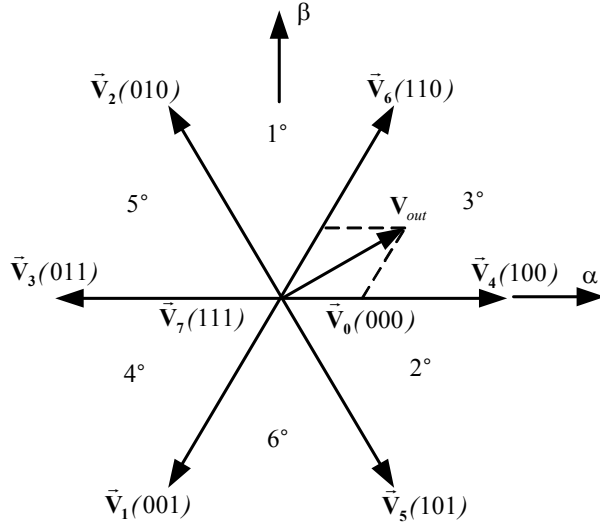
$i_c = -(i_a + i_b)$  bağıntısından elde edilmiştir. Üç faz stator akımı ilk önce Clarke dönüşümü ile iki faz sabit düzleme ( $\alpha\beta$ ) daha sonra Park dönüşümü ile rotor referans düzlemine çevrilerek stator akımlarının rotor referans düzlemi  $i_d$  ve  $i_q$  akım bileşenleri bulunmuştur. Park dönüşümünde konum algılayıcıdan elde edilen rotor konumu kullanılmıştır. Rotor konumundan rotor hızı hesaplanmak suretiyle bulunmaktadır. Rotorun hızı referans hız ile karşılaştırılıp PI denetimden geçirilir. Böylece rotor referans düzleminde motorun moment üreten

Çizelge 1'den görüldüğü gibi  $\vec{V}_0$  ve  $\vec{V}_7$  vektörlerinde çıkış gerilimleri sıfırdır. Bu yüzden sadece 6 aktif vektör vardır. Bu vektörler Şekil 4'te görüldüğü gibi uzay vektörü şeklinde ifade edilebilir. Komşu vektörler arasında kalan ve  $1^\circ$  den  $6^\circ$ 'ya kadar numaralandırılan alan sektör olarak ifade edilmektedir.

UVDGM algoritmasının gerçekleştirilmesinde ilk olarak çıkış gerilim vektörünün hangi sektörde bulunduğu belirlenmesi gerekir. Bu makalede sektörlerle

rin belirlenmesi aşağıdaki şekilde gerçekleştirilmiştir [7].

$$\begin{aligned} \text{IF } V_{an}^* > 0 &\Rightarrow A := 1, & \text{ELSE } A &:= 0 \\ \text{IF } V_{bn}^* > 0 &\Rightarrow B := 1, & \text{ELSE } B &:= 0 \\ \text{IF } V_{cn}^* > 0 &\Rightarrow C := 1, & \text{ELSE } C &:= 0 \\ \text{sektör} &:= A + 2B + 4C \end{aligned}$$



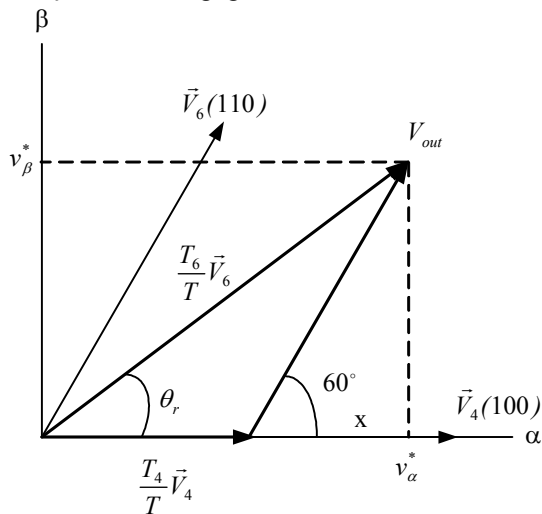
Şekil 4. Gerilim uzay vektörü

İkinci olarak istenilen gerilim değerini elde etmek için komşu gerilim vektörlerinin ne kadar süre ile aktif kalacağını belirlemek gerekmektedir. Şekil 5’de 3° sektör için gerilim vektörleri gösterilmiştir.

Şekil 5’ten çıkış gerilim vektörünün ortalama değeri

$$\int_0^T \vec{V}_{out} dt = \int_0^{T_4} \vec{V}_4 dt + \int_{T_4}^{T_4+T_6} \vec{V}_6 dt + \int_{T_4+T_6}^T \vec{V}_0 dt$$

şeklinde yazılabilir. Eş. 8’deki son terim sıfır olduğundan, integral işleminden sonra çıkış geriliminin değeri Eş. 9’da verildiği gibi olacaktır.



Şekil 5. Çıkış gerilim vektörünün bileşenleri

$$\vec{V}_{out} = \frac{T_4}{T} \vec{V}_4 + \frac{T_6}{T} \vec{V}_6$$

Her bir sektör için çıkış gerilimi benzer şekilde hesaplanmaktadır. Her komşu vektörün uygulanma süresi  $T_4$ ,  $T_6$  ve  $T_0$  çıkış geriliminin sabit düzlemdeki değerleri kullanılarak Eş. 10 verilen şekilde bulunabilir.

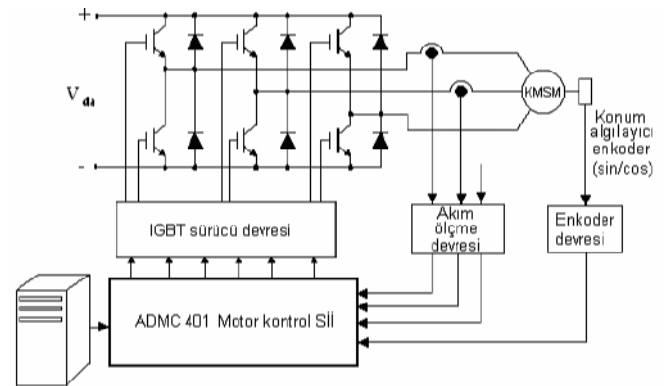
$$T_4 = \frac{T}{2V_{da}} (3V_{\alpha}^* - \sqrt{3}V_{\beta}^*)$$

$$T_6 = \sqrt{3} \frac{T}{V_{da}} V_{\beta}^*$$

$$T_0 = T - T_4 - T_6$$

#### 4. VEKTÖR DENETİMLİ KMSM DENEYİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Şekil 6’da uygulaması gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı verilmiştir. Deneyde LENZE firmasının üretimi olan ve Çizelge 2’de özellikleri verilen yüzey mıknatıslı KMSM kullanılmıştır. Motorun konum bilgileri motor miline bağlı sin/cos enkoder ile elde edilmiştir. Akım bilgilerini elde etmek için motor hattına 2 adet akım algılayıcı bağlanmış ve diğer akım  $i_c = -(i_a + i_b)$  bağıntısından elde edilmiştir.



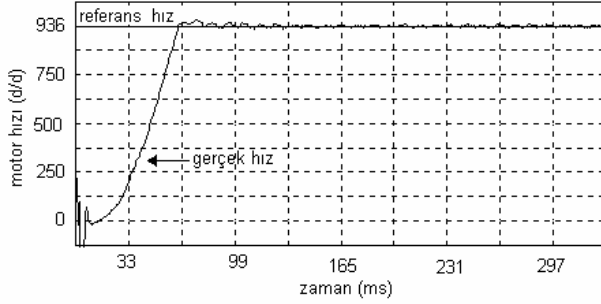
Şekil 6. Uygulaması gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı

Çizelge 2. Deneyde kullanılan kalıcı mıknatıslı senkron motorun özellikleri

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 kg·m <sup>2</sup>	d,q edüktansları	L <sub>d</sub> =L <sub>q</sub> =16 mH
Stator sarğı direnci	5,2 Ω	Gerilim	330 V
Rotor manyetik akısı (ψ)	0,345 Weber	Anma gücü	1,1 kW

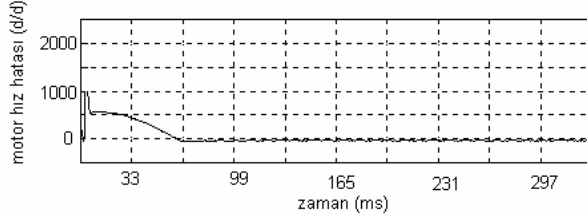
Motorun hız ve akım denetim algoritmaları Analog Devices firması tarafından geliştirilen ADMC 401 sayısal işaret işlemci (Sİİ) kartı kullanılarak gerçekleştirilmiştir(8).

Akım denetim tekniği olarak UVDGM kullanılarak motorun denetiminde evirici girişine 140 V doğru gerilim uygulanmıştır. Motor önce yüksüz olarak çalıştırılıp motorun hız, moment, hız hatası, konumu incelenmiştir. Şekil 7’de yüksüz olarak çalışan motorun hız tepkisi verilmiştir.



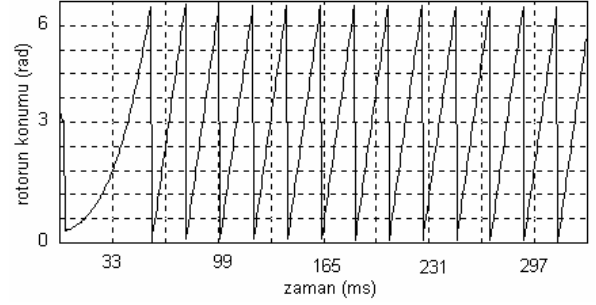
Şekil 7. Yüksüz çalışan motorun hız tepkisi

Şekil 7’de motor yüksüz kalkınmış 936 d/d olan referans hızı 66 ms’de yakalamış ve motor hızı kararlı hale gelmiştir. Şekil 8’de motorun hız hatası verilmiştir. Motorun ilk çalışma anında hız hatası, motor durduğundan en yüksek değeri olan 936 d/d olmuştur. Motorun kalkınmasına ve referans hızı yakalamasına paralel olarak hız hatası, motor hızının referans hızı yakaladığı an olan 66 ms’de sıfır olmuştur. Bu andan sonra motor hızında bir değişim olmadığından hız hatasında da bir değişiklik olmadığı görülmüştür.



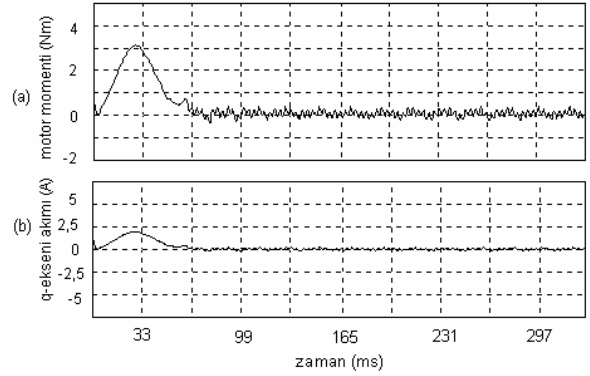
Şekil 8. Yüksüz olarak çalışan motorun hız hatası

Şekil 9’da verilen motorun konumunda konum, motorun çalışmaya başlamasıyla birlikte sıfırdan itibaren yükselmeye başlamış  $2\pi$  konumuna yaklaşık olarak 54 ms’de ulaşmıştır. Motor ilk çalışmaya başladığı andan itibaren hızı kararlı oluncaya kadar konum da bir gecikme olmuş hızın kararlı olmasıyla birlikte konum sıfırdan  $2\pi$  konumuna gelme süreleri eşit olarak değişmeye başlamıştır.



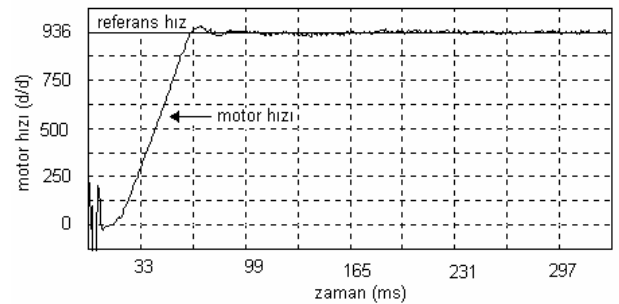
Şekil 9. Yüksüz çalışan motorun konumu

Şekil 10’da motor momentini ve moment akım bileşeni  $i_q$  akımı verilmiştir. Moment  $i_q$  akımı meydana getirdiğinden moment ve  $i_q$  akımının değişiminin aynı olduğu görülmüştür. Şekil 10’da motor ilk kalkınma anında yüksek moment ürettiği daha sonra momentin hızın yükselmesiyle birlikte düştüğü görülmüştür. Motor yüksüz olarak çalıştığı için  $i_q$  akımı motorun kayıplarını karşılayacak kadar düşük bir değerde kalmıştır.

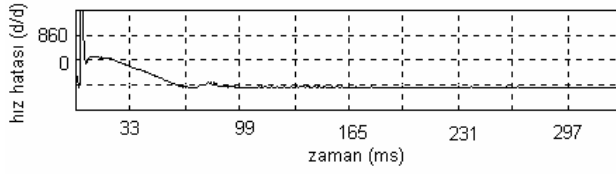


Şekil 10. Yüksüz olarak çalışan motorun momentini q-ekseni akımı

Şekil 11’deki hız tepkisinde motora 1 Nm yük uygulanmış motor yüklü olarak çalıştırılmıştır. Yüklü olarak çalışan motorun referans hızı yakalaması 66 ms’de olmuş fakat referans hızı çok az bir miktar geçmiş daha sonra hız için PI programı motorun hızını düşürmüş hız çok az bir salınım yaptıktan sonra referans hızı yakalamıştır.

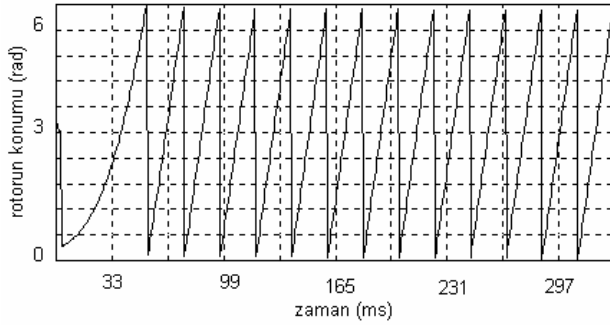


Şekil 11. 1 Nm yüklü motorun hız tepkisi



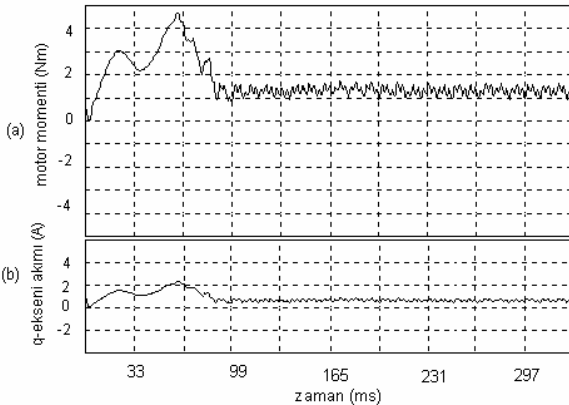
Şekil 12. Yüklü çalışan motorun hız hatası

Şekil 12'de yüklü çalışan motorun hız hatasında motorun referans hızı yakalamasıyla birlikte sıfır olmuştur. Motorun hızı çok küçük bir salınım yaptıktan sonra referans hızı yakaladığı için hız hatasında da çok az bir salınım olmuştur.



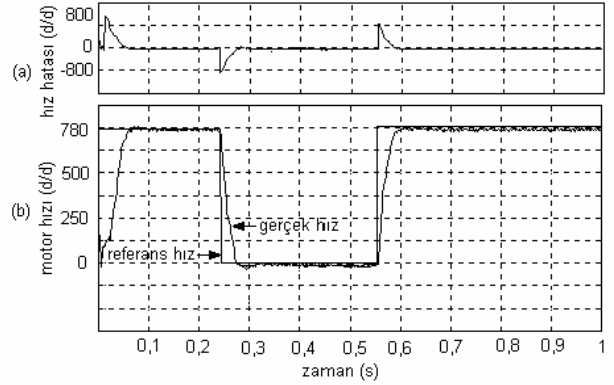
Şekil 13. 1 Nm yüklü çalışan motorun konumu

Şekil 13'de görülen motorun konumunda konumun kararlı hali 21 ms'dir. İlk kalkınma anından itibaren konumun kararlı hale ulaşmasında bir gecikme olmuş daha sonra konum hızın referans hızı yakalamasıyla konum kararlı halini almıştır. Şekil 14'de motorun momentini ve moment akımı  $i_q$ 'nin değişimi verilmiştir. Şekilde ilk kalkınma anında motor kalkınma momentini karşılayabilmek için fazla akım çekmiş motor hızlandıkça çekilen akım azalmış ve buna bağlı olarak motor momentini de önce yüksek olmuş daha sonra hızın kararlı olmasıyla birlikte moment akımı yük akımı seviyesine düşüncü motorun ürettiği moment de yük momentine değerine düştüğü görülmüştür.

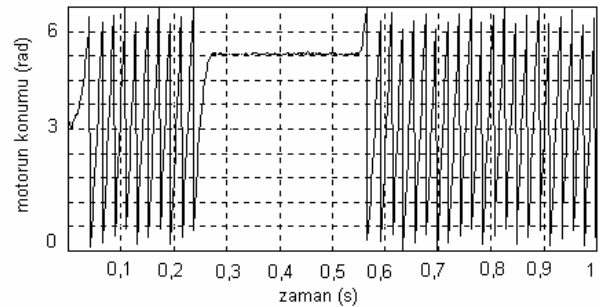
Şekil 14.1 Nm yüklü çalışan motorun momentini ve  $i_q$  akımı

Motor yüklü çalıştıktan sonra motora 0,5 Nm yük ve 780 d/d kare dalga şeklinde hız referansı uygulanmış motorun tepkisi incelenmiştir. Şekil 15'de

motora uygulanan referans hız, hız hatası ve motorun tepkisi verilmiştir. 0,5 Nm yüklü olarak kare dalga şeklinde hız referansında çalışmaya başlayan motor referans hızı yaklaşık 50 ms'de yakalamış ve ilk çalışma anında en yüksek değeri olan 780 d/d'dan başlayan hız hatası, rotor hızının referans hızı yaklaşımasıyla azalarak sıfır olmuştur. Motor referans hızı 0,2 sn izlemiş daha sonra 0,25 s'de referans hızı sıfıra düşürülmüş ve motor, sıfır olan yeni hız referansını hemen izlemiş motor hızı da yaklaşık 22 ms'de sıfıra ulaşmıştır. Bu arada hız referansı aniden sıfır yapıncı motorun hız hatası aniden negatif yönde 780 d/d olmuştur ancak motor çok sürede 22 ms'de sıfır olan referans hızına ulaşarak hız hatasını tekrar sıfır yapmıştır. Hız referansı 0,3 s sıfır yapıldıktan sonra 0,55 s'de motora aynı değerde (780 d/d) yönde yeniden hız referansı verilmiş bu anda motor durur halinde olduğundan hız hatası önceki gibi pozitif yönde 780 d/d olmuş fakat hızın sıfırdan başlayıp referans hızı 50 ms sonra yakalamasıyla, hız hatası sıfır olduğu görülmüştür.



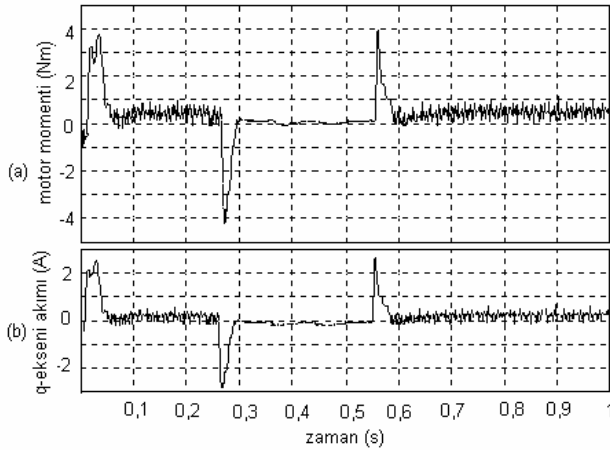
Şekil 15. Kare dalga hız referansında hız tepkisi ve hız hatası



Şekil 16. Kare dalga hız referansında motorun konumu

Şekil 16'daki motor konumunda motor  $\pi$  konumundan itibaren çalışmaya başlamış  $2\pi$  konumuna kararlı konumlara göre gecikme ile ulaşmış daha sonra konum sıfır olmuş sıfırdan tekrar  $2\pi$  konumuna yükselme zamanı kısalmış bundan sonra konumun sıfırla  $2\pi$  arasında değişimleri aynı sürelerde olduğu görülmüştür. Konum sıfırdan  $2\pi$  'ye doğru çıkarken motora sıfır hız referansı uygulanmıştır. Motor hızında yavaşlama olduğundan motorun konumu da yavaş yükselmiş ve motorun durduğu anda motor konumu  $2\pi$  konumuna çok yakın bir yerde olmuştur. Motor 0,3 s durduktan sonra motora tekrar aynı yönde ve aynı hızda

hız referansı uygulanınca motor durduğu yerden çalışmaya başlamış, konum çok kısa sürede  $2\pi$  konumuna ulaşmış, daha sonra sıfıra düşmüş ve sıfırdan  $2\pi$  konumuna yükselmesinde hıza paralel olarak çok kısa bir gecikme olmuş, fakat bu gecikmeden sonra hızın kararlı olmasıyla konumun kararlı ve aynı sürelerde değiştiği izlenmiştir. Şekil 17'de görülen motorun momenti ve moment akımı, ilk kalkınma anında motor kalkınma momentini karşılamak için yüksek moment üretmiş ve bu moment karşılayabilmek için yüksek akım çekmiştir. Hızın referans hızı yakalamasıyla moment azalarak yük momentine kadar düşmüş, buna bağlı olarak çekilen akım da yük akımı değerine düşmüştür. Motora sıfır hız referansı verilince motor durmuş, fakat durma momentini karşılamak için motor negatif yönde yüksek moment üretmiş, buna bağlı olarak moment akımı da negatif olmuştur. Motora tekrar 780 d/d hız referansı verilince, ilk kalkınma anındaki gibi motor yüksek moment üreterek çalışmış, buna bağlı olarak moment akımı yüksek olmuş, fakat referans hızı yakalanmasıyla moment ve akım normal yük değerlerine düşmüştür.



Şekil 17. Kare dalga hız referansında motor momenti ve moment akımı

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada UVDGM denetimli bir GKE'den beslenen KMSM'nun performansı incelenmiştir. KMSM

denklemleri iki faz rotor düzlemine aktarılmış ve vektör denetim yöntemi ile motorun yabancı uyartımlı DA motoru gibi denetlenmesi sağlanmıştır. KMSM öncelikle sabit hız referansında yüklü ve yüksüz olarak çalıştırılmıştır. Motorun her iki durumda da hızlı bir şekilde kalkınarak referans hızı yakaladığı ve referans hızı düzgün olarak takip ettiği görülmüştür. Motorun değişken hızlardaki performansını test etmek için motora kare dalga referans hız uygulanmış ve motorun yüklü ve yüksüz durumda referans hızın çok ani değişmesine rağmen referans hızı düzgün olarak izlediği görülmüştür. UVDGM'nun motor performansı üzerindeki etkisinin görülebilmesi için motorun değişik akım denetim ve modülasyon teknikleri kullanılarak test edilmesi gerekmektedir. Bu konu ile ilgili çalışmamız devam etmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

1. Vas P., Vector Control of AC Machines, Clarendon Press, Oxford, 1990
2. Şevki DEMİRBAŞ, Sürekli Miknatıslı Senkron Motorun Konum Algılayıcısız Hız Denetimi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Dergisi, 15 (3), 747-755
3. Acarnley P.P. and Ertugrul N, Rotor Position Estimation in PM Motors, International Conf. on Electrical Machines, 622-626, 1992
4. Fu M. and Xu L., A Novel Sensorless Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Digital Signal Processor, Aerospace and Electronics Conference, 403-408, 1997
5. Matsui N. and Shigyo M., Brushless dc Motor Control without Position and Speed Sensors, IEEE Transactions on Industry Applications, 28(1), 120-127, 1992
6. Pillay P. And Krishnan R., Modeling of Permanent Magnet Motor Drives, 35 (4), 537-541, 1988
7. Simon E., Implementation of a Speed Field Oriented Control of 3-phase PMSM Motor Using TMS320F240, Texas Instrument Application Report SPRA588, (1999)
8. Analog Devices, Referans Frame Conversions With the ADMC401, Application Note, AN401-11, 2000