

UV-DGM Motor Kontrol Algoritmasının ARM Cortex-M4 Tabanlı Mikrodenetleyici ile Gerçekleştirilmesi

Realization of SV-PWM Motor Control Algorithm using ARM Cortex-M4 Based Microcontroller

Sergen E. Arslan¹, Fatih E. Uzun¹, Koray Gürkan¹, Ali Acar², İhsan O. Yıldırım², Umut Güven², Erkan Atmaca¹, Sıddık Yarman¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
İstanbul Üniversitesi
kgurkan@istanbul.edu.tr

²Çamaşır Kurutma Makinası İşletmesi,
Arçelik A.Ş.
ihsanozan.yildirim@arcelik.com

Özet

Sabit mıknatıslı AC motorların sensörsüz şekilde sürüş tekniklerinden biri olan uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UV-DGM) yöntemi gerilim ve frekans kontrolü sağlaması, sinüzoidal darbe genişlik modülasyonuna göre az harmonik üretmesi nedeniyle tercih edilmektedir. UV-DGM yönteminde anahtarlama sürelerinin hesaplanması için karmaşık denklem çözümlerinin mikrodenetleyici tarafından belirli bir süre içerisinde yapılması gerekliliği algoritmanın pratik olarak gerçekleşmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada UV-DGM algoritmasının ARM Cortex-M4 tabanlı mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmesi ve motor üzerinde yapılan deneylere yer verilmiştir.

Abstract

Space vector pulse width modulation (SV-PWM), which is the one of the sensorless control techniques of the permanent magnet AC motors, is preferred because it provides voltage and frequency control and produces less harmonics than the sinusoidal pulse width modulation (S-PWM) technique, respectively. In SV-PWM method; the fact that results of the complex equations should be performed in a given period of time by the microcontroller to calculate the required switching time, makes it difficult to implement algorithm in practice. This study includes the implementation of SV-PWM algorithm using ARM Cortex-M4 based microcontroller and experiments conducted on a motor.

1. Giriş

Enerji verimlilik ilkeleri gereği ev elektroniğinde buzdolabı, klima, çamaşır ve bulaşık makinesi gibi alanlarda asenkron motorların yerini alan sabit mıknatıslı senkron motorların kontrol edilmesinde sensörlü ve sensörsüz kontrol yöntemleri mevcuttur. Kontrol yöntemi genel olarak motor uçlarına belirli bir şekilde akım verilmesi ile döner manyetik akının

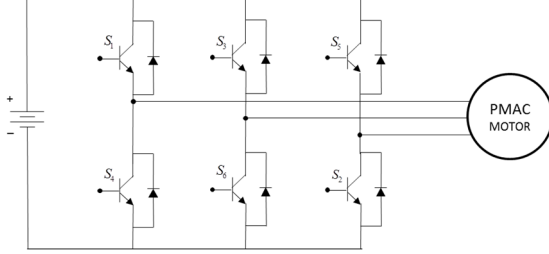
oluşturulmasına dayanır. Sensörlü kontrol yönteminde motorun üretimi sırasında yerleştirilmiş genellikle manyetik çalışan (hall-effect) sensörler ile motorun konumu doğrudan bilinir ve anahtarlama (komutasyon) için geribesleme bu şekilde alınır. Ancak bu sensörlerin gerek konumlandırılması gerekse de üretim sırasında montajı motor maliyetini artırmaktadır. Ek olarak sensörlü kontrolde motorun konum bilgisinin çözünürlüğü, motorun kutup ve sensör sayısı ile sınırlı olduğundan motorun dinamik yüklerle hızlı cevap verecek şekilde kontrol edilmesi mümkün olmamaktadır [1]. Sensörsüz kontrol yöntemlerinde ise motor konumu sargı akımları ve gerilimleri ile dolaylı olarak kestirilir ve manyetik akı buna göre oluşturulur. Bu yöntemlerden alan etkili kontrol (FOC) yönteminde kullanılan uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UV-DGM) sürüş tekniği sinüzoidal darbe genişlik modülasyonunu sürüş tekniğine göre daha az harmonik üretmesi nedeniyle tercih edilmektedir [2-5]. Aynı zamanda UV-DGM sürüş tekniği S-DGM sürüş tekniğine kıyasla besleme geriliminin %15 daha fazla verimli kullanılır [3-4]. UV-DGM algoritmasının gerçekleştirilmesinde anahtarlama sürelerinin hesaplanması için karmaşık denklem çözümlerinin yapılması zorunluluğu bulunmaktadır. Motor devrinin yüksek olduğu uygulamalarda hesap yükü ve işlem hızı kritik olmaktadır. Çalışmada UV-DGM yöntemi yüksek kapasiteli ARM Cortex-M4 tabanlı mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmiştir. Motor kontrolü için gerekli sürücü devre prototipi üretilerek algoritma başıncı gerçek bir motor üzerinde test edilmiştir.

2. UV-DGM Yöntemi

UV-DGM yöntemi FOC ile uyumluluğu dolayısıyla sabit mıknatıslı senkron motorların inverter yapısında PWM üretim yöntemi olarak kullanılmaktadır. Şekil 1'de üç faz inverter ile beslenen PMAC motorun UV-DGM yöntemi ile kontrol edildiğini varsayalım. Bu yöntemde üç-faz büyüklükler α - β olmak üzere iki boyutlu düzleme indirgenmektedir. V_a , V_b , V_c gerilimleri faz gerilimlerini göstermek üzere;

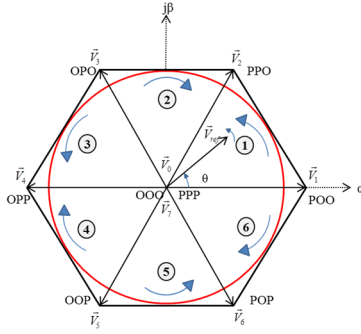
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 1 & -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 1: Üç faz inverter ile beslenen PMAC Motor

Şekil 1’de verilen yapı 2 seviyeli inverter yapısı için verilmiş olup bu yapıda 8 farklı vektör mevcuttur (Şekil 2). Bu uzay vektörlerinin 2’li kombinasyon oluşan 6 farklı sektör mevcuttur. Bu vektörlerden V_0 ve V_7 vektörleri sıfır çıkış gerilimi üretir. Bu nedenle bu vektörlere sıfır vektörü denir.



Şekil 2: Uzay Vektörleri

İstenen uzay vektörünü oluşturmak için kullanılan ana vektörler, bu vektörleri oluşturmak için DGM sinyali uygulanması gereken anahtarlama elemanları ve bunun sonucunda oluşan gerilimler Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1: Uzay vektörleri ve komutasyon tablosu

$\vec{V}_0$	[OOO]	S_1, S_3, S_5	$\vec{V}_0 = 0$
$\vec{V}_1$	[POO]	S_1, S_6, S_2	$\vec{V}_1 = (2/3)V_{da}e^{j0}$
$\vec{V}_2$	[PPO]	S_1, S_3, S_2	$\vec{V}_2 = (2/3)V_{da}e^{j(\pi/3)}$
$\vec{V}_3$	[OPO]	S_4, S_3, S_2	$\vec{V}_3 = (2/3)V_{da}e^{j(2\pi/3)}$
$\vec{V}_4$	[OPP]	S_4, S_3, S_5	$\vec{V}_4 = (2/3)V_{da}e^{j(3\pi/3)}$
$\vec{V}_5$	[OOP]	S_4, S_6, S_5	$\vec{V}_5 = (2/3)V_{da}e^{j(4\pi/3)}$
$\vec{V}_6$	[POP]	S_1, S_6, S_5	$\vec{V}_6 = (2/3)V_{da}e^{j(5\pi/3)}$
$\vec{V}_7$	[PPP]	S_4, S_6, S_2	$\vec{V}_7 = 0$

Şekil 2 ‘de α - β düzlemindeki vektörler (V_a , V_b) değişken V_{ref} genliği ve θ açısı ile ifade edilir;

$$V_{ref} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right) \quad (3)$$

V_{ref} vektörü ilgili sektörü oluşturan ana vektörlerin bileşkesi olarak oluşturulur. Ana vektörlerin genliği vektörün uygulanma süresi ile ayarlanır. Uygulanan DGM sinyalinin periyodu T_s ise V_{ref} vektörünün 1. Sektörde olduğunu varsayarsak V_1 vektörünün uygulanma süresi T_a , V_2 vektörünün uygulanması süresi T_b ve sıfır vektörünün uygulanma süresi T_0 olmak üzere;

$$\vec{V}_{ref}.T_s = \vec{V}_1.T_a + \vec{V}_2.T_b + \vec{V}_0.T_0 \quad (4)$$

$$T_s = T_a + T_b + T_0 \quad (5)$$

eşitlikleriyle V_{ref} vektörü oluşturulur. Bütün sektörler göz önüne alındığında T_a , T_b , T_0 süreleri genel olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$T_a = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(k \frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (6)$$

$$T_b = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_{da}} T_s \sin\left(\theta - \frac{(k-1)\pi}{3}\right) \quad (7)$$

$$T_0 = T_s - T_a + T_b \quad (8)$$

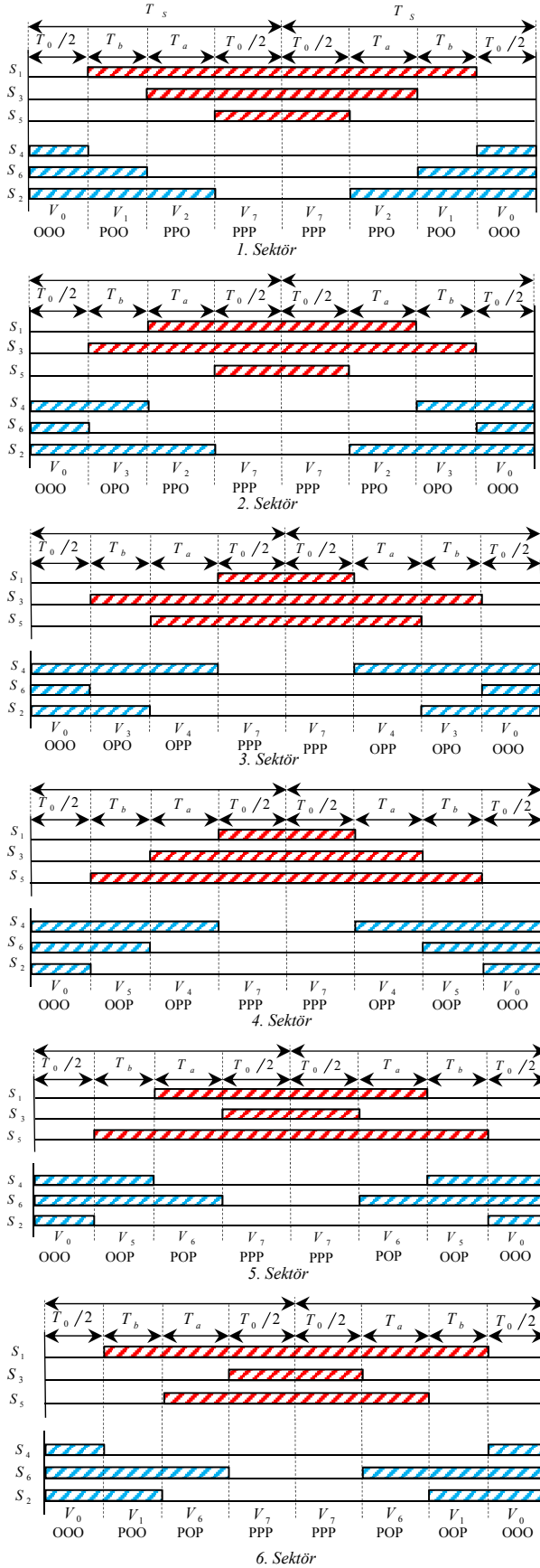
$$\theta = \theta - (k-1)\pi/3 \quad (9)$$

Burada k değeri ve θ açısının ilgili sektöre göre alacağı değerler Çizelge 2’de verilmiştir.

Çizelge 2: θ açısının alacağı değerler

θ	k
$0^\circ \leq \theta < 60^\circ$	1
$60^\circ \leq \theta < 120^\circ$	2
$120^\circ \leq \theta < 180^\circ$	3
$180^\circ \leq \theta < 240^\circ$	4
$240^\circ \leq \theta < 300^\circ$	5
$300^\circ \leq \theta < 360^\circ$	6

T_a , T_b , T_0 sürelerinin hesaplanmasının ardından DGM işaretlerinin anahtarlama elemanlarına hangi şekilde uygulanacağı Şekil 3’de verilmiştir. DGM işareti sağa, sola hızlı ya da simetrik olarak üretilebilir. Şekil 3’de simetrik üretilmiş DGM işaretleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi DGM işaretini simetrik yapabilmek için iki T_s kullanılmaktadır.



Şekil 3:Sektörlere göre uygulanacak DGM işaretleri

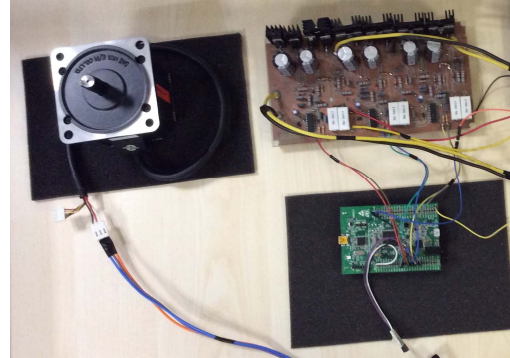
3. Donanım ve Yazılım

UV-DGM yönteminin gerçekleştirilmesinde anahtarlama sürelerinin hesaplanması için karmaşık denklem çözümlerinin yapılması zorunluluğu bulunmaktadır. Motor devrinin yüksek olduğu uygulamalarda hesap yükü ve işlem hızı açısından mikrodeneleyici kapasitesi kritiktir. Çalışmada UV-DGM yöntemi yüksek kapasiteli ARM Cortex-M4 tabanlı mikrodeneleyici (STM32F407VGT6) ile gerçekleştirilmiştir [6]. Mikrodeneleyici 32-bit FPU (Floating Point Unit), 12 bit ADC, 6'dan fazla UDG kanalı ve yüksek işlemci hızına (168 MHz) sahiptir. İki seviyeli üç faz inverter devresinde iki MOSFET paralel olacak şekilde toplam 12 adet IRF3205 MOSFET [7] ve 3 adet IR2110 MOSFET sürücü [8] kullanılmıştır. Inverter bu uygulamada 10 kHz anahtarlama işaretlerinde çalıştırılmış olup, sabit çalışma aralığı 500 Watt'a kadardır. Anahtarlama işaretleri arasındaki ölü zaman 300 nanosaniye'dir. Uygulamada Şekil 4'te görülen 6 kutuplu, 24V, 300W PMAC motor kullanılmıştır [9].



Şekil 4:B91A-30B0 PMAC Motor

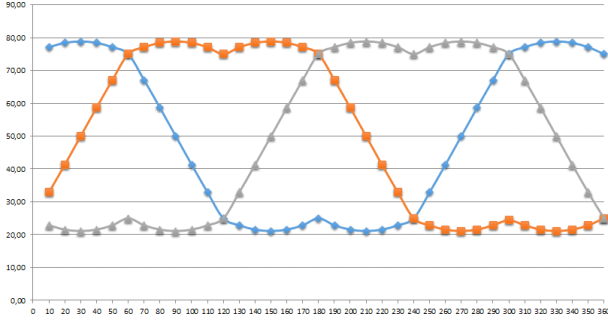
Motor kontrolü için gerekli sürücü devre prototipi üretilerek algoritma başarımı bu motor üzerinde test edilmiştir. Test düzeneği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5:Test Düzeneği

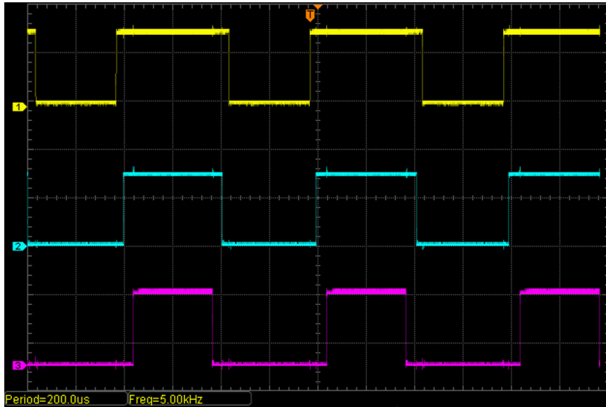
4. Deneysel Sonuçlar

Testler açık çevrimde yapılmıştır. Dönüştürücü kartı 24V DC ile beslenilmiştir. Anahtarlama frekansı 5 kHz olarak belirlenmiştir. Sinyaller dönüştürücü kartına verilmeden önce osiloskop ile incelenmiş ve doğruluğundan emin olunmuştur. S_1, S_3, S_5 anahtarlama elemanlarına 360 derece boyunca verilen UV-DGM işaretlerinin uzay vektörünün her açı değeri için aldıkları darbe genişlikleri değerleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: 360 derece boyunca verilen darbe genişlikleri

Şekil 7'de ise yine S_1 , S_3 , S_5 anahtarlama elemanlarına uygulanan UV-DGM işaretlerinin osiloskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 7: UV-DGM işaretlerinin osiloskop görüntüsü

PMAC motor ile yapılan deneylerde motor kalkışını yapmak için ayrı bir arayüz programı yazılmış ve girilen V_{ref} ve θ çözünürlüğü değerleri değiştirilerek kalkış sağlanmıştır. θ çözünürlük değeri motora verilen elektrik sinyalin frekansını belirlemekte kullanılmaktadır. Örneğin değere 2 verildiğinde UV-DGM sinyali, bir turdaki 360 dereceyi tamamlarken 2'şer derecelik aralıklar ile uygulanır ve elektrik sinyalinin bir periyodu oluşturulurken 180 adet UV-DGM işareti uygulanmış olur. UV-DGM işaretinin frekansı sabit olduğundan elektrik sinyali oluşturulurken kullanılan UV-DGM işaretinin sayısı değiştirilerek motora verilen sinyalin frekansı ayarlanır. Test düzeneği ile testler yapılırken başta motora düşük frekanslı sinüzoidal akım işaretleri uygulanmış bu sayede motorun stator manyetik alanı ile rotor manyetik denkleştirilmiştir. Ardından arayüz programı kullanılarak motorun hızı aşama aşama artırılmıştır. Motorun dönmesiyle elde edilen sinüzoidal akım sinyali Şekil 8'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen veriler Çizelge 3'de gösterilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi ölçülen RPM değerler ile istenen değerler arasında en fazla 1 RPM hata payı vardır.

5. Sonuç

PMAC motorun UV-DGM sürüş tekniği ile açık çevrimde dönmesi ARM Cortex-M4 tabanlı mikrodeneleyici ile gerçekleştirilmiş, sinüzoidal akım işaretleri oluşturmak için UV-DGM sinyalleri kullanılmıştır. Kalkışta düşük frekanslı sinüzoidal akım sinyalleri uygulanmış daha sonra motor hızı aşama aşama artırılmıştır. Bu sürüş tekniği ve elde edilen

deneysel veriler, ileri seviye kontrol teknikleri ile motor sürülmesi konusunda mikroişlemci kapasitesi ve algoritma konusunda bir alt yapı teşkil etmektedir.



Şekil 8: Motor faz akımı

Çizelge 3: Deney sonuçları tablosu

PWM_F(Hz)	θ Çözünürlüğü	Vref	E. sinyali f (Hz)	Motor f (Hz)	RPM	Ölçülen RPM
5000	1,00	0,054	13,88	2,31	138,8	139
5000	2,00	0,100	27,77	4,62	277,7	278
5000	4,00	0,160	55,54	9,25	555,5	556
5000	5,00	0,185	69,4	11,57	694,4	695
5000	10,00	0,331	138,8	23,14	1388,8	1389
7000	5,00	0,357	97,2	16,2	972,2	971
8000	5,00	0,379	111,1	18,51	1111,1	1112
9000	5,00	0,328	125	20,8	1250	1250

6. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı ile desteklenmektedir. (Proje No: 5150011)

7. Kaynaklar

- [1] J. Zambada, "Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC", Microchip Technology Inc., 2005.
- [2] Neacsu, D.O., "Space vector modulation –An introduction", The 27th Annual conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'01, Colorado, USA, 2001, sayfa:1583-1592.
- [3] H. R. Pouya and H. Mokthari, "Control of Parallel Three-phase Inverters Using Optimal Control and SVPWM Technique", Proc. Of 2009 IEEE International Conference on Industrial Electronics ISIE, Seoul, Korea, 2009.
- [4] S. Patel and R.G. Hoft, "Generalized Techniques of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I ---Harmonic elimination", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 9, 1973.
- [5] K.V. Kumar, P. Angel Michael, Joseph P John and Dr. S. Suresh Kumar, "Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM Control for Three Phase Inverter", 2006.
- [6] STM32F4 Discovery, www.st.com
- [7] IRF3205 Katalog, www.irf.com
- [8] IR2110 Katalog, www.infineon.com
- [9] EXCEM Motor, www.mugul.com