

# SVPWM İNVERTERİN ÇOKLU DARBELER YÖNTEMİYLE HARMONİK ANALİZİ

**Mehmet YUMURTACI, Seydi Vakkas ÜSTÜN, Seçil VARBAK NEŞE**  
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, 03200, Afyonkarahisar

Geliş Tarihi : 30.01.2008

Kabul Tarihi : 15.12.2008

## ÖZET

Uzay Vektör Modülasyon (SVM) tekniği asenkron motor kontrolünde üç fazlı gerilim beslemeli inverter için popüler ve önemli bir PWM tekniğidir. Bu çalışmada Uzay Vektör PWM (SVPWM) inverterin çoklu darbeler yöntemini kullanarak yapılan harmonik analizi incelenmiştir. Çoklu darbeler yöntemi çıkış PWM dalga şeklinin her bir pozitif ve negatif darbesinin Fourier katsayılarını hesaplamakta ve tüm PWM çıkış sinyalinin Fourier katsayılarını hesaplamak için süperpozisyon ilkesini kullanarak birbirleriyle toplamaktadır. Harmonik genlikleri; doğrusallaştırma, tarama tabloları kullanımı ya da Bessel fonksiyonları olmaksızın bu yöntemle doğrudan hesaplanabilir. Bu çalışmada, değişken parametre değerleri için SVPWM uygulamasından elde edilen sonuçlar, çoklu darbeler yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler** : *SVPWM, Harmonik analizi, Çoklu darbeler yöntemi.*

## HARMONIC ANALYSIS OF SVPWM INVERTER USING MULTIPLE-PULSES METHOD

### ABSTRACT

Space Vector Modulation (SVM) technique is a popular and an important PWM technique for three phases voltage source inverter in the control of Induction Motor. In this study harmonic analysis of Space Vector PWM (SVPWM) is investigated using multiple-pulses method. Multiple-Pulses method calculates the Fourier coefficients of individual positive and negative pulses of the output PWM waveform and adds them together using the principle of superposition to calculate the Fourier coefficients of the all PWM output signal. Harmonic magnitudes can be calculated directly by this method without linearization, using look-up tables or Bessel functions. In this study, the results obtained in the application of SVPWM for values of variable parameters are compared with the results obtained with the multiple-pulses method.

**Keywords** : *SVPWM, Harmonic analysis, Multiple pulses.*

### 1. GİRİŞ

Darbe genişlik modülasyonu (PWM) inverterin ac çıkış geriliminin genlik ve frekansının kontrolü için kullanılan popüler bir tekniktir. Bu teknik değişken hızlı elektrik sürücülerini gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu

konudaki araştırmaların çoğu çeşitli şema ve tekniklerden dolayı modülasyon işleminin bir sonucu olarak oluşan harmonik bileşenlerinin belirlenmesi üzerinedir (Leedy and Nelms, 2006). SVPWM, gelişmiş yoğun hesaplamalı PWM tekniğidir. Bu teknik muhtemelen tüm PWM tekniklerinin en iyisidir. Üstün performans karakteristiklerinden dolayı son yıllarda giderek

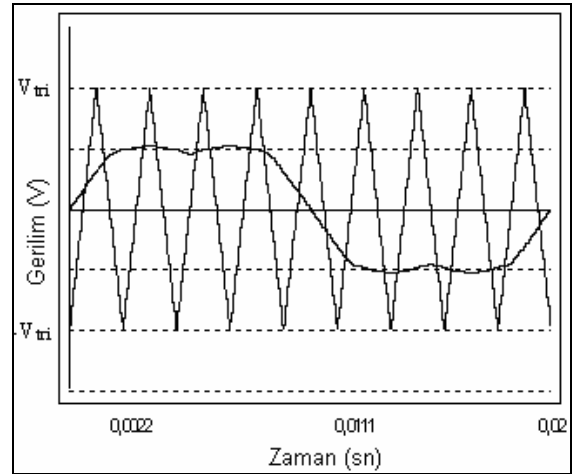
popüler olmaktadır. SVPWM genellikle mikroişlemcilerin gerilim dalga şekilleri üretmek için kullanıldığı vektör kontrollü sürücü uygulamalarında kullanılmaktadır (Boys ve Handley, 1990). Literatürde birçok makale olmasına rağmen SVPWM birçok güç elektroniği araştırmacısının ilgi odağı olmaya devam etmektedir (Rathnakumar v.d., 2005; Kanchan v.d., 2005). SVM ilk olarak 1980'lerin ortalarında ortaya çıkmıştır. Teknik, Van Der Broeck v.d. (1988) tarafından oldukça geliştirilmiştir. Van Der Broeck v.d., (1988) ilk olarak PWM için vektör yaklaşımı olarak kendi yöntemini geliştirmiştir. SVPWM inverterin harmonik analizi, çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmektedir (Bresnahan v.d., 1994; Moynihan v.d., 1998). Holmes ve Lipo (2003) çift Fourier yöntemini kullanan SVPWM dalga şekillerinin ayrıntılı harmonik analizini gerçekleştirmiştir. SVPWM inverterin çıkış dalga şekillerinin harmonik bileşenlerini belirlemede kullanılan analitik yöntemler PWM çıkış sinyali üzerinde Bessel fonksiyonlarının kullanımını ortaya çıkarmıştır (Moynihan v.d., 1998; Halasz v.d., 2003). Bu yöntemlerin ifadesini anlamak ve uygun bir şekilde kullanmak zor olabilmekte ve olası uygulama hatalarına yol açabilmektedir. Yöntemde analiz için çift Fourier serisi kullanılmaktadır. Çift Fourier serisi kullanımı, normalde gerilim dalga şeklinin belli harmonik bileşenlerini hesaplamak için üç ya da daha fazla terim içeren gerilim ifadelerini vermektedir. Bu terimler genellikle bilgisayar programıyla toplanmalı ve depolanmalıdır, buda daha fazla uygulama zamanı gerektirmektedir (Leedy ve Nelms, 2006).

Bu çalışma SVPWM inverterin çoklu darbeler yöntemini kullanarak harmonik analizini incelemeyi amaçlamaktadır. Uygulamayı gerçekleştirmek için dijital sinyal işleyici kontrolör (dsPIC30F2010) kullanılmıştır. İnverter çıkış değerleri: FFT (Hızlı Fourier Dönüşümü) katsayılarını elde etmek amacıyla MATLAB programı kullanılarak analiz edilmiştir.

## 2. UZAY VEKTÖR PWM İNVERTER

SVM tekniği temelde üç fazlı inverterler için PWM üretmede vektörel bir yaklaşım olarak geliştirilmiştir (Van Der Broeck v.d., 1986). Motora daha düşük toplam harmonik distorsiyonu ile daha yüksek gerilim sağlayan sinüs dalga üretimi için oldukça karmaşık bir tekniktir. Bu teknik, çıkış gerilim vektörünün yerleştirildiği bölgeye göre uzay vektörlerini sınırlandırmaktadır.

PWM yaklaşımdaki farkı,  $\alpha - \beta$  düzleminde gerilimin uzay vektör gösterimine dayanmaktadır.  $\alpha - \beta$  bileşenleri dönüşümlerle bulunmaktadır (Ogasawara v.d., 1989). Anahtarlama anının belirlenmesi  $\alpha - \beta$  düzleminde anahtarlama vektörlerinin gösterimine dayanan SVM tekniği kullanılarak gerçekleştirilmektedir. SVM tekniği yoğun hesaplama dayanan gelişmiş bir PWM tekniğidir ve sürücü uygulamaları için tüm PWM tekniklerinin en çok kullanılanıdır (Youn ve Kwon, 1999; Rathnakumar v.d., 2005). SVPWM aynı debara gerilimi için daha yüksek çıkış gerilimine, daha düşük anahtarlama kayıplarına ve daha iyi harmonik performansına sahip olduğundan değişik üç fazlı inverter uygulamaları için tercih edilen PWM tekniği olmuştur (Shu v.d., 2007). Ancak, bu klasik SVPWM yaklaşımı uygulamasını gerçekleştirmek zor olabilmektedir. SVPWM gerçekleştirilmesi, Park dönüşümlerinin, sektör hesaplarının, altıgen durumların ve vektör ayrıştırmalarının kullanılmasını gerektirmektedir. Literatürde birçok araştırmacı tarafından gösterildiği gibi SVPWM'in gerçekleştirilmesi için yeni bir yöntem olan "taşıyıcı tabanlı" yaklaşım kullanılabilir (Van Der Broeck, 1991; Panaitescu ve Mohan, 2002). Taşıyıcı tabanlı yöntem basit ve uygulaması kolaydır. Bu yüzden bu çalışmada SVPWM üretmek için taşıyıcı tabanlı yöntem kullanılmıştır. Üçgen taşıyıcı sinyal ve kontrol sinyalinin dalga şekilleri Şekil 1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Üçgen dalga şekli ve kontrol sinyali.

Şekil 1'de gösterilen kontrol sinyali ( $v_{cn}$ ) denklem (1) ile ifade edilebilmektedir (Leedy ve Nelms, 2006).

$$v_{\text{cnt}}(t) = \begin{cases} \frac{3}{2}M \sin \omega t, & 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{2}M \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right), & \frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2}M \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right), & \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} \\ \frac{3}{2}M \sin \omega t, & \frac{5\pi}{6} \leq \omega t \leq \pi \end{cases} \quad (1)$$

M modülasyon indeksi ve  $\omega$  açısal frekanstır. Açısal frekans denklem (2)'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\omega = 2\pi f_1 \quad (2)$$

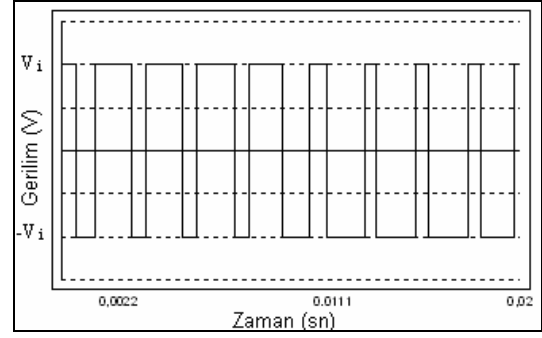
$f_1$  inverter çıkışının istenen temel dalga frekansdır. Denklem (1)'de tanımlanan kontrol sinyalinin kalan kısmı yarım dalga simetrisi kullanılarak bulunmaktadır. Şekil 1'de gösterilen üçgen dalga şekli,  $f_s$  sabit frekans ve  $V_{\text{tri}}$  sabit genlikte tutulmaktadır.  $f_s$  frekansı ayrıca inverterin taşıyıcı frekansı ya da anahtarlama frekansı olarak da bilinmektedir; değeri anahtarlama elemanlarının çalışma frekans aralığına göre seçilmektedir. Frekans modülasyon oranı denklem (3) ile ifade edilmektedir.

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (3)$$

Denklem (1)-(3)'teki değişkenler biliniyorsa, PWM çıkış sinyali Şekil 1'deki dalga şekilleri karşılaştırılarak üretilebilmektedir.  $V_{\text{cnt}} > V_{\text{tri}}$  olduğunda, PWM çıkış sinyali değeri  $+V_i$ 'dir.  $V_i$  inverterin DC giriş gerilimidir.  $V_{\text{cnt}} < V_{\text{tri}}$  olduğunda, PWM çıkış sinyalinin değeri  $-V_i$  olmaktadır. Şekil 1'deki dalga şekillerinin karşılaştırılmasından üretilen çıkış PWM sinyali Şekil 2'de gösterilmektedir (Leedy ve Nelms, 2006).

### 3. ÇOKLU DARBELER YÖNTEMİ

Çoklu darbeler yöntemi, verilen PWM dalga şeklinin harmonik içeriğine bakılmaksızın geçerli olan genel bir yöntemdir. Yöntem literatürde bulunan diğer yöntemlerden daha az karmaşık ve uygulaması daha kolaydır. Analize başlamak için çoklu pozitif ve negatif darbelerden oluşan Şekil 2'deki dalga şekli incelenebilir. Şekil 2'de gösterilen PWM dalga şeklinin harmonik analizi, dalga şekli ayrı ayrı analiz edilen çoklu pozitif ve negatif darbelere ayrılarak yapılabilmektedir.



Şekil 2. SVPWM çıkış dalga şekli.

Şekil 2'deki gibi bir PWM dalga şekli pozitif darbe ve negatif darbe şekillerinin toplamından oluşmaktadır. Şekil 2'deki gibi bir sinyalin Fourier serisini bulmak için gereken PWM sinyalinin içerdiği her bir pozitif ve negatif darbenin Fourier katsayıları bulunmakta ve tüm PWM sinyalinin Fourier katsayılarını elde etmek için toplanmaktadır. Tüm PWM sinyalinin toplam Fourier katsayıları denklem (4)-(6) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$a_0 = \sum_{j=1}^{K_p} \frac{1}{T} A b_{pj} - \sum_{j=1}^{K_N} \frac{1}{T} A b_{Nj} \quad (4)$$

$$a_n = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{K_p} \frac{2A}{\pi n} \left[ \cos\left(\frac{2\pi n}{T} a_{pj} + \frac{\pi n}{T} b_{pj}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{T} b_{pj}\right) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{K_N} \frac{2A}{\pi n} \left[ \cos\left(\frac{2\pi n}{T} a_{Nj} + \frac{\pi n}{T} b_{Nj}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{T} b_{Nj}\right) \right] \quad (5)$$

$$b_n = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{K_p} \frac{2A}{\pi n} \left[ \sin\left(\frac{2\pi n}{T} a_{pj} + \frac{\pi n}{T} b_{pj}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{T} b_{pj}\right) \right] - \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{K_N} \frac{2A}{\pi n} \left[ \sin\left(\frac{2\pi n}{T} a_{Nj} + \frac{\pi n}{T} b_{Nj}\right) \sin\left(\frac{\pi n}{T} b_{Nj}\right) \right] \quad (6)$$

$K_N$  negatif darbelerin sayısı,  $K_p$  pozitif darbelerin sayısı,  $a_N$  negatif darbenin başlangıç zaman gecikmesi,  $b_N$  negatif darbenin darbe genişliği,  $a_p$  pozitif darbenin başlangıç zaman gecikmesi,  $b_p$  pozitif darbenin darbe genişliğidir (Leedy ve Nelms, 2006). SVM ile üretilmiş PWM sinyalinin Fourier serisi tek bir cosinüs serisi olarak ifade edilebilmektedir:

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left( \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t - \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)\right) \quad (7)$$

Kesişim noktalarını belirlemek için, Şekil 1'deki üçgen dalga için bir denklem kurulması gerekmektedir. Sinyalin zaman ekseninde kesişimlerin kaydırılmasıyla, değişen pozitif ve negatif eğimlere sahip düz hatlardan oluştuğu

düşünülebilmektedir. Bu düşünceyi bilgisayar yazılımıyla gerçekleştirmek için üçgen dalga şekli denklem (8) ile ifade edilebilmektedir.

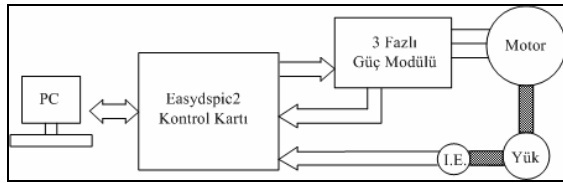
$$v_{tri}(n, t) = (-1)^{n+1} \left( \frac{4V_{tri}}{T_s} \right) t + (-1)^{n+2} (V_{tri} + 2V_{tri}(n-1)) \quad (8)$$

n bilgisayar programında kullanılan indeks sayısı ve  $T_s$  üçgen dalganın periyodudur (Leedy ve Nelms, 2006). Kesişim noktalarını elde etmek için  $v_{cnt}-v_{tri}$  ifadesinin işaret değiştirdiği t anları C++ programı ile bulunmaktadır. Bu kesişim noktaları PWM sinyal darbelerinin kenarlarını belirlemektedir. Bu noktada, çoklu darbeler yöntemini uygulamak için gereken sadece zaman gecikmelerini ve darbelerin genişliklerini belirlemek amacıyla kesişim noktalarını kullanılmaktadır.

#### 4. DENEY SETİ

Deney seti üç fazlı asenkron motor ve bu motorun akuple elemanıya bağlı olduğu generatörden oluşmaktadır. 0.55 kW, 1.8A, 50 Hz,  $\cos \phi = 0.82$  üç fazlı sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan işlemci dsPIC30F2010 Dijital Sinyal İşlemci (DSP) kontrolördür. DSP kontrolöre 10MHz'lik bir kristal bağlıdır. İşlemci USB portu aracılığıyla PC ile haberleştirilmiştir. Bu uygulama devresinin blok diyagramı Şekil 3'te gösterilmektedir. Stator gerilimi ve frekans SVPWM tekniği kullanılarak ayarlanmıştır.

DSP kontrolörün PWM çıkışı genlik ve hız değerleri kullanılarak SVPWM tekniği ile hesaplanmıştır. Ölü zaman kontrolör tarafından oluşturulmaktadır. Ölü zamanın değeri  $5 \mu s$  olacak şekilde bir register tarafından belirlenmektedir.



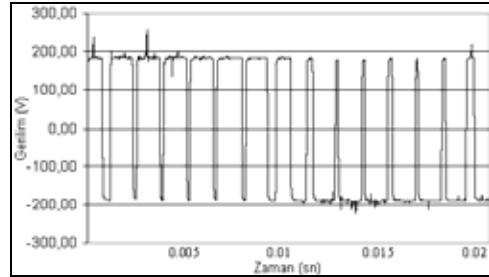
Şekil 3. Uygulama devresinin blok diyagramı.

DSP kontrolör programı MPLAB IDE ortamında assembly ve C programlama dilinde yazılmıştır.

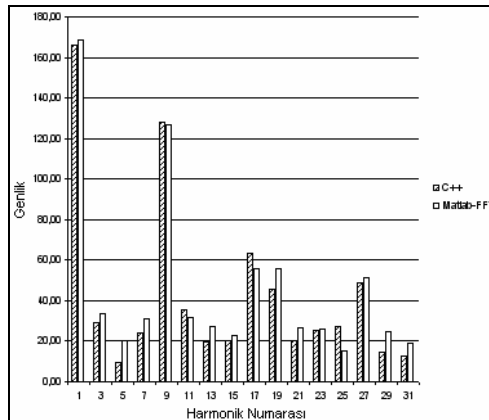
#### 5. HESAPLANAN VE DENEYSEL SONUÇLAR

Kontrol sinyali denklem (1), taşıyıcı dalga şekli denklem (8) ve çoklu darbeler yöntemini uygulamak için kullanılan denklem (4)-(7) ifadeleri Şekil 2'de gösterilen gibi bir PWM sinyalinin harmonik bileşenlerini hesaplamak amacıyla C++ programında kodlanmıştır. C++ programı ayrıca kesişim noktalarını, zaman gecikmelerini ve darbe genişliklerini bulmak için yazılmıştır. C++ programı ile üç farklı M ve  $m_f$  değerleri kullanılarak sonuçlar üretilmiştir.  $V_i = 188V$ ,  $V_{tri} = 1V$  ve  $f_1 = 50Hz$  değerleri tüm denemeler için sabit tutulmuştur. İlk deneme için kullanılan diğer parametreler:  $M = 0,6$  ve  $m_f = 15$ 'tir. İkinci deneme için kullanılan parametreler  $M = 0,9$  ve  $m_f = 15$ 'tir. Üçüncü deneme için kullanılan parametreler  $M = 0,6$  ve  $m_f = 9$ 'dur.

Deneyel uygulamadan alınan inverter çıkış geriliminin dalga şekli Şekil 4'te gösterildiği gibidir. Inverterin PWM çıkış sinyalinin Fourier analizi MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir. Çoklu darbeler yöntemi ile hesaplanan sonuçlar ve gerçek değerler için MATLAB da bulunan sonuçlar Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.  $m_f=15$ ,  $f_s=750Hz$  için inverter çıkış gerilimi.



Şekil 5.  $M=0.9$  ve  $m_f=9$  için harmonik spektrumu.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada çoklu darbeler yöntemi kullanan SVPWM inverterinin harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Bu harmonik analizi yöntemi PWM sinyalinin çoklu pozitif ve negatif darbelerden oluştuğu fikrine dayanmaktadır. PWM sinyalinin harmonik bileşenlerinin doğrudan hesaplanmasını sağlayan tek bir cosinüslü Fourier serisi, C++ gibi bir bilgisayar yazılımıyla kolayca uygulanabilmektedir.

Bu yöntemden elde edilen sonuçlar gerçek değerlerle MATLAB da bulunan deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

Sunulan yöntem genel bir yöntem olup, PWM çıkış dalga şekline ait farklı harmonik spektrumları için de kullanılabilir. Bu yöntem de, diğer yöntemler için gerekli olan arama tablolarına, lineer yaklaşımlara, iterasyon işlemlerine, Bessel fonksiyonlarına ve harmonik bileşenlerin toplamına ihtiyaç olmaması uygulama kolaylığı sağlamaktadır.

C++ ve deneysel sonuçlar ekte Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

## 7. EKLER

Tablo 1.  $M=0.6$  ve  $m_f=15$  için, C++ ve deneysel sonuçlar.

Harmonik Numarası	Gerilimin Genliği (V)	Gerilimin Genliği (V)	$\Delta V$ (V)
1	111,15	112,14	-1,00
3	20,62	23,18	-2,56
5	0,45	0,78	-0,33
7	0,28	0,95	-0,68
9	0,95	2,76	-1,81
11	7,32	10,21	-2,89
13	13,44	14,60	-1,16
15	187,74	185,58	2,17
17	15,35	14,55	0,80
19	10,99	10,38	0,61
21	2,04	1,63	0,41
23	0,43	1,97	-1,54
25	4,04	6,49	-2,44
27	18,03	19,11	-1,08
29	73,92	73,36	0,55
31	71,59	73,37	-1,79

Tablo 2.  $M=0.9$  ve  $m_f=15$  için C++ ve deneysel sonuçlar.

Harmonik Numarası	Gerilimin Genliği (V)	Gerilimin Genliği (V)	$\Delta V$ (V)
1	167,92	168,31	-0,38
3	35,31	34,51	0,79
5	2,44	1,49	0,95
7	3,90	2,18	1,73
9	2,49	4,65	-2,17
11	14,91	21,34	-6,43
13	24,61	30,51	-5,90
15	125,51	126,85	-1,34
17	31,21	30,57	0,64
19	23,58	21,51	2,07
21	5,43	4,26	1,17
23	2,24	5,39	-3,15
25	12,07	16,95	-4,88
27	21,84	22,05	-0,21
29	60,77	55,78	4,98
31	48,59	55,64	-7,05

Tablo 3.  $M=0.6$  ve  $m_f=9$  için C++ ve deneysel sonuçlar.

Harmonik Numarası	Gerilimin Genliği (V)	Gerilimin Genliği (V)	$\Delta V$ (V)
1	111,90	112,24	-0,34
3	19,03	23,08	-4,05
5	3,70	9,99	-6,29
7	10,74	14,80	-4,06
9	186,94	185,54	1,40
11	17,82	14,63	3,19
13	9,97	12,46	-2,49
15	16,06	19,46	-3,40
17	76,10	73,32	2,78
19	68,45	73,50	-5,06
21	16,92	19,61	-2,69
23	14,96	19,78	-4,82
25	25,07	25,60	-0,54
27	26,02	26,63	-0,61
29	23,71	26,67	-2,96
31	13,43	23,07	-9,64

## 8. KAYNAKLAR

Bresnahan, K., De La Parra, H.Z., Teodorescu, R. and Evans, P.D. 1994. Harmonic analysis of svm and experimental verification in a general purpose induction motor test rig. In Proceeding of 5th International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives. pp. 352-356.

Boys, J.T. and Handley, P.G. 1990. Harmonic analysis of space vector modulated PWM waveforms. IEE Proceedings. 137 (4), 197-204.

Halasz, S., Varjasi, I. and Zakharov, A. 2003. Novel voltage spectra investigation of space vector modulation technique. In Proceeding of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. pp. 2660-2665.

Holmes, D.G. and Lipo, T.A. 2003. Pulse width modulation for power converters: principles and practice. Willey-IEEE.

Kanchan, R.S., Baiju, M.R., Mohapatra, K.K., Ouseph, P.P. and Gopakumar, K. 2005. Space vector PWM signal generation for multilevel inverters using only the sampled amplitudes of reference phase voltages. IEE Proceedings - Electric Power Applications. 152 (2), 297-309.

Leedy, A.W. and Nelms, R.M. 2006. Harmonic analysis of a space vector PWM inverter using the method of multiple pulses. IEEE ISIE, Montreal, Quebec, Canada. pp. 1182-1187.

Leedy, A.W. and Nelms, R.M. 2006. Harmonic analysis of three-level sinusoidal PWM inverter using the method of pulse pairs. IEEE ISIE, Montreal, Quebec, Canada. pp. 1188-1193.

Moynihan, J.F., Egan, M.G. and Murphy, J.M.D. 1998. Theoretical spectra of space-vector-modulated waveforms. IEE Proceedings – Electric Power Applications. 145 (1), 17-24.

Ogasawara, O., Akagi, H. and Nabel, A. 1989. A novel PWM scheme of voltage source inverters based on space vector theory. In Proc. EPE European Conf. Power Electronics and Applications. pp. 1197–1202.

Panaitescu, R.C. and Mohan, N. 2002. A simple space-vector PWM algorithm for VSI-fed ac motor

drives. In Proceedings of the 17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. pp. 72-75.

Rathnakumar, D., Lakshmana Perumal, J. and Srinivasan, T. 2005. A new software implementation of space vector PWM. In Proceedings of IEEE SoutheastCon. pp. 131-136.

Shu, Z., Tang, J., Guo, Y., Lian, J. 2007. An efficient SVPWM algorithm with low computational overhead for three phase inverters. IEEE Transactions on Power Electronics. 22 (5), 1797-1805.

Van Der Broeck, H.W., Skudenly, H.C. and Stanke, G.V. 1986. Analysis and realization of a pulse width modulator based on the voltage space vectors. In Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Denver, CO. pp. 244-251.

Van Der Broeck, H.W., Skudenly, H.C. and Stanke, G.V. 1988. Analysis and realization of a pulse width modulator based on the voltage space vectors. IEEE Transactions on Industry Applications. 24 (1), 142-150.

Van Der Broeck, H.W. 1991. Analysis of the harmonics in voltage fed inverter drives caused by PWM schemes with discontinuous switching operation. In Proceedings of the 3rd European Conference on Power Electronics and Applications. pp. 261-266.

Youm, J.H. and Kwon, B.H. 1999. An effective software implementation of the space-vector modulation. IEEE Trans. Ind. Electron. 46 (4), 866-868.