

# HARMONİK OPTİMAL UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK AYARI

*Murat Karabacak<sup>1</sup>, Bilal Saraçoğlu<sup>2</sup>, H. İbrahim Eskikurt<sup>3</sup>, Metin Kesler<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Düzce Meslek Yüksekokulu Endüstriyel Elektronik Bölümü  
Düzce Üniversitesi, Merkez/Düzce  
muratkarabacak@duzce.edu.tr

<sup>2</sup>Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi  
Düzce Üniversitesi, Konuralp/Düzce  
bilalsaracoglu@duzce.edu.tr

<sup>3</sup>Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik Bilgisayar Eğitimi  
Sakarya Üniversitesi, Esentepe/Sakarya  
eskikurt@sakarya.edu.tr

<sup>4</sup>Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi  
Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe/Kocaeli  
metinkesler@kou.edu.tr

Hesaplamalar sonucunda bulunan sonuçlar, enerji kalitesi ve motor performansı açısından analiz edilmiştir.

## Özet

Asenkron motor sürücülerin en önemli kısmını evirici oluşturmaktadır. Eviriciler, beslenme şekillerine göre; Gerilim Ara Devreli Evirici (GADE) ve Akım Ara Devreli Evirici (AADE) olmak üzere iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Asenkron motorların hız denetiminde genellikle GADE'ler kullanılmaktadır. Eviriciler, doğru gerilimden alternatif gerilim elde etmek ve bu alternatif gerilimin genlik ve frekansını denetlemek için kullanılmaktadır. Evirici ile bu işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için çeşitli Darbe Genişlik Ayarı (DGA) yöntemleri kullanılmaktadır. Bu DGA yöntemleri arasında Uzay Vektör DGA (UVDGA) yöntemi, mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler sayesinde günümüzde en çok kullanılan DGA yöntemi haline gelmiştir. UVDGA yöntemi, diğer DGA yöntemleri ile karşılaştırıldığında verimli doğru akım (DA) bara gerilimi kullanımı, yüksek harmonik performansı ve düşük anahtarlama kayıpları gibi belirli üstünlüklere sahiptir. Bu çalışmada, GADE'den beslenen tipik üç fazlı bir asenkron motorun, mikrodenetleyici tabanlı UVDGA yöntemi kullanılarak açık çevrim skaler (v/f) hız denetimi, çift mertebeli harmonikler elimine edilerek deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Evirici çıkışındaki faz gerilimi ve hat akımları hall-effect gerilim ve akım algılayıcıları ile ölçülerek örneklenmiştir. Algılayıcılardan elde edilen veriler aracılığı ile gerilim ve akımdaki harmonik dağılımları, Toplam Harmonik Bozunum (THB)' lar ve temel dalga genlikleri hesaplanmıştır.

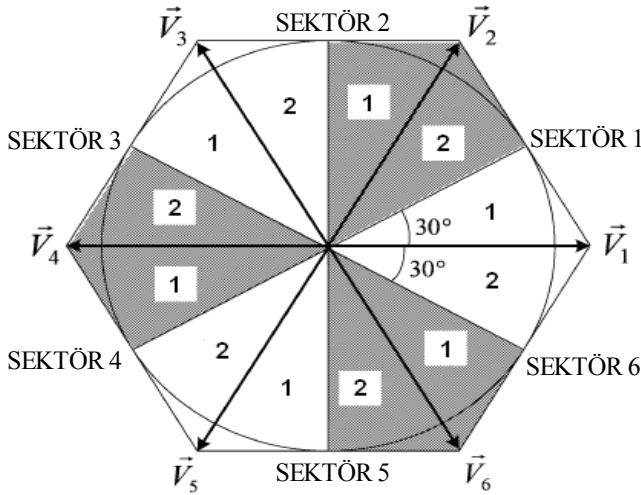
## 1. Giriş

Günümüz endüstrisinde, değişken hızlı sürücü sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç elektroniği ve mikroişlemci tabanlı denetim alanında yaşanan hızlı gelişmeler sonucu, endüstrideki birçok doğru akım motorlu hız denetim uygulamalarının yerini; yapıları basit, sağlam, ucuz ve daha az bakım gerektiren asenkron motorlu hız denetleyici uygulamaları almaktadır. Asenkron motorun skaler hız denetim yöntemi, kolay uygulanabilirliği açısından günümüzde en bilinen ve yaygın olarak kullanılan hız denetim yöntemidir [1]. Bu yöntemin temel özelliği; sıfır ile anma değeri arasındaki hızlarda statora uygulanan gerilimin frekansa (v/f) oranının, dolayısıyla hava aralığı akısının sabit tutularak indüklenen momentin sabit tutulmasıdır. Anma hızının üstündeki hızlarda gerilimin sabit tutulup frekansın artırılması, dolayısıyla hava aralığı akısının zayıflatılması yoluyla hız denetimi yapılabilir. Skaler denetimin en büyük sakıncası, 3-5 Hz'lik düşük frekanslarda stator direncinde düşen gerilimin faz gerilimine olan bağıl etkisinin artması sonucu anma momentinin azalmasıdır. Bunun için, düşük frekanslarda v/f oranı stator direnci göz önüne alınarak bir miktar artırılır. Mikroişlemci teknolojisindeki gelişmeler sayesinde üç fazlı eviricilerin DGA

denetimi için, 1982 yılında Pfaff, Weschta ve Wick tarafından Uzak Vektör Darbe Genişlik Ayarı (UVDGA) önerilmiştir [2]. UVDGA yöntemi, sinüzoidal DGA yöntemine göre, DA bara geriliminin verimli kullanımı ve harmonik performansı açısından önemli üstünlüklere sahiptir. UVDGA yöntemine ait daha ileri seviyedeki gelişmeler, Van der Broeck, Skudenly ve Stanke [3] tarafından sağlanmış ve üç fazlı evirici uygulamalarında kullanılan en önemli DGA yöntemi haline gelmiştir [4].

## 2. UVDGA Yöntemi

UVDGA yöntemi ile evirici çıkış gerilimi istenilen genlik ve frekansta elde edilebilmektedir. UVDGA yöntemi, daha az THB, daha geniş doğrusal ayar aralığı, daha verimli DA bara gerilimi kullanımı gibi önemli üstünlüklere sahiptir [4,5,6]. UVDGA yönteminde, üç fazlı gerilimler, Clarke dönüşümü kullanılarak, kartezyen koordinat sisteminde ( $\alpha$ - $\beta$  uzayı) bir uzay vektörü ile temsil edilmektedir. Vektörün genliği ve faz açısı, bu üç fazlı büyüklüklerin anlık değerleri ile belirlenmektedir. Eğer üç fazlı büyüklükler dengeli ise, gerilim uzay vektörü sabit genlik ve açısal hıza sahiptir [5]. Şekil 2.1’de, bir eviricide bulunan sekiz farklı anahtarlama durumunu temsil eden sekiz farklı anahtarlama vektörü bulunmaktadır. Bu vektörlerin altı tanesi “aktif vektörler” ( $V_1...V_6$ ) kare dalga çalışmada faz gerilimlerini temsil eder. Diğer iki vektör sıfır durum vektörleridir. Bu vektörlerin anahtarlama durumları eviriciye uygulandığında yüke gerilim uygulanmamış olur. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, üç fazlı bir eviricide maksimum sekiz anahtarlama vektörü ve buna bağlı olarak da sekiz anahtarlama biçimi bulunmaktadır.



Şekil 2.1: Üç fazlı eviricinin durağan referans ekseninde sekiz farklı anahtarlama vektörü

### 2.1. Anahtarlama zamanlarının hesaplanması

UVDGA yönteminde ilk adım, uzay vektörün bulunduğu sektörün belirlenmesidir. Bu, Şekil 2.1’den görüleceği gibi,  $\theta$  açısının belirlenmesi ile yapılabilmektedir.  $\theta$  açısı,  $\alpha$ - $\beta$

eksenlerinin kullanılması ile, denklem (2.1)’de gösterildiği gibi, bulunabilir.

$$\theta = \arctan^{-1} \left( \frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (2.1)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.2)$$

Referans uzay vektör ( $V_{ref}$ ) saat yönünün tersine  $\omega$  açısal hızı ile dönmektedir.  $f$ , evirici çıkışındaki temel dalga frekansıdır.  $V_{ref}$  uzay vektörün  $\omega$  açısal dönme hızı ile, evirici çıkışındaki temel dalga frekans, genliği ile de evirici çıkışındaki gerilimin genliği ayarlanır.  $V_{ref}$  vektörünün içinde bulunduğu sektör hangi anahtarların tetikleneceğini belirler. Sektör belirlendikten sonra, o sektöre ait iki adet aktif ve iki adet sıfır durum vektörleri aracılığıyla, anahtarlama süreleri belirlenir. Şekil 2.1.’de görüldüğü gibi uzay vektörün 1. sektörde bulunduğu düşünülecek olursa; kendisine komşu durumda bulunan iki aktif vektör ve sıfır durum vektörü ile çözümlenebilir. Çıkış geriliminin elde edilmesi için iki komşu vektörün kullanılması zorunlu olmamakla birlikte bu şekilde yüksek harmonik performansı elde edilebilmektedir.  $V_{ref}$  vektörü,  $\omega$  açısal hızı ile, denklem (2.2)’de verildiği gibi dönmektedir. Birinci sektör için referans uzay vektör denklem (2.3)’deki gibi ifade edilir.

$$\int_0^{T_s} \vec{V}_{ref} dt = \int_0^{T_a} \vec{V}_1 dt + \int_{T_a}^{T_a+T_b} \vec{V}_2 dt + \int_{T_a+T_b}^{T_s} \vec{V}_0 dt \quad (2.3)$$

Uzay vektör yukarıdaki üç vektörün bileşkesi olarak ifade edilir.  $T_0$  süresi boyunca sıfır durum vektörlerinden biri,  $T_a$  süresi boyunca  $V_1$  vektörünün,  $T_b$  süresi boyunca  $V_2$  vektörünün anahtarlama durumları eviriciye uygulanır. Denklem (2.3)’de  $V_0=V_7=0$  olduğu dikkate alınır, denklem (2.3), denklem (2.4)’deki gibi sadeleştirilir.

$$\vec{V}_{ref} = \frac{1}{T_s} (\vec{V}_1 T_a + \vec{V}_2 T_b) \quad (2.4)$$

$\alpha$ - $\beta$  eksenlerinin kullanılması ile,

$$T_s \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = T_a \frac{2}{3} V_d \begin{bmatrix} \cos((k-1)\pi/3) \\ \sin((k-1)\pi/3) \end{bmatrix} + T_b \frac{2}{3} V_d \begin{bmatrix} \cos(k\pi/3) \\ \sin(k\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

olarak yazılır. Denklem yeniden düzenlenecek olursa,

$$T_s \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} V_d \begin{bmatrix} \cos((k-1)\pi/3) & \cos(k\pi/3) \\ \sin((k-1)\pi/3) & \sin(k\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

elde edilir. Buradan anahtarlama süreleri,

$$\begin{bmatrix} T_a \\ T_b \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3} |V_{ref}| T_s}{V_d} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{k\pi}{3} - \omega t\right) \\ \sin\left(\omega t - \frac{(k-1)\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

olarak elde edilir. Denklem (2.5), (2.6) ve (2.7)' de k değişkeni sektör numarasını temsil etmektedir. Sıfır durum vektörlerinin uygulanma süresi ise aşağıdaki gibi bulunur.

$$T_0 = T_s - T_1 - T_2 \quad (2.8)$$

## 2.2. Genlik ayarı

Denklem (2.7) genlik ayarı ( $m$ ) cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$T_a = T_s m \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \quad (2.9)$$

$$T_b = T_s m \sin(\theta) \quad (2.10)$$

Buradaki  $m$  genlik ayarı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$m = \frac{\sqrt{3}V_{ref}}{V_d} \quad (2.11)$$

Genlik ayarının maksimum değerini bulabilmek için referans uzay vektörün maksimum genliğini bulmak gereklidir. Bunun için uzay vektörün herhangi bir sektörün tam ortasında (iki komşu vektörle arasındaki  $30^\circ$  açı iken) olduğu düşünülür. Böylece maksimum genlik ayarı,

$$m_{max} = \frac{\sqrt{3}}{V_d} \frac{1}{\sqrt{3}} V_d = 1 \quad (2.12)$$

olarak bulunur.  $0 \leq m \leq 1$  iken eviricinin çıkış gerilimi ile genlik ayarı doğru orantılı değişir. UVDGA yönteminde doğrusal bölge için, eviricinin çıkışından alınabilecek maksimum değerler aşağıda sıralanmıştır. UVDGA yöntemi ile evirici çıkışında oluşturulan faz ve fazlar arası gerilimlerin temel bileşenin etkin değerinin alabileceği maksimum değerler sırasıyla,

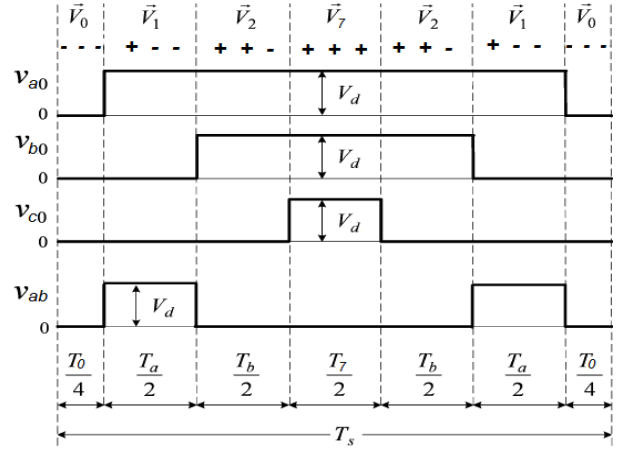
$$V_{aN_{max}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}}V_d\right)}{\sqrt{2}} \cong 0.408V_d \quad (2.13)$$

$$V_{abeklin} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}V_d\right)\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 0.707V_d \quad (2.14)$$

olarak bulunur. Bu durumda  $220V$  luk bir şebekeye bağlı bir GADE' nin çıkışından, fazlar arası  $220V$ ,  $380V$  luk bir şebekeye bağlı GADE' den ise  $380V$  elde edilebilir.

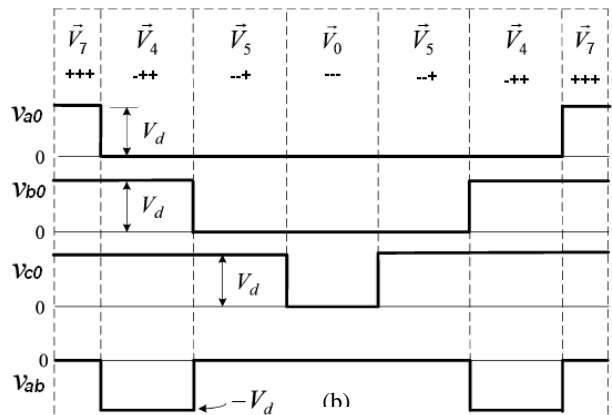
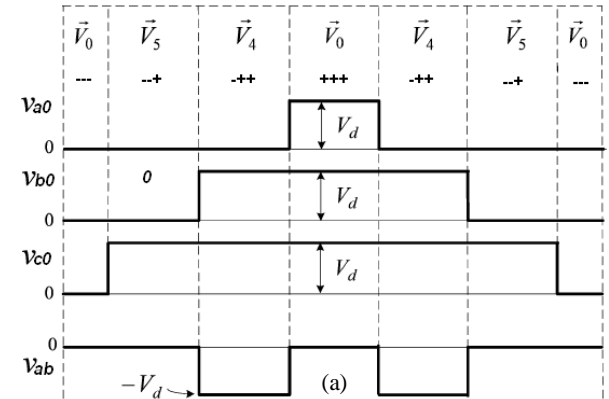
## 2.3. Anahtarlama Sırası

Klasik UVDGA yönteminde anahtarlama işlemine, her zaman bir sıfır durum vektörü ile başlanır ve diğer sıfır durum vektörü ile bitirilir. Hangi sıfır durum vektörü ile başlanılıp hangisi ile bitirileceği keyfidir. Şekil 2.2' de, 1. sektör için simetrik anahtarlama biçimi verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi eviricideki güç anahtarlarının doluluk oranları,  $T_a$ ,  $T_b$  ve  $T_0$ ' in toplamlarından oluşmaktadır.



Şekil 2.2 : Sektör 1 için simetrik UVDGA anahtarlama düzeni

Şekil 2.2' den görüldüğü gibi bu dalga şekli yarı dalga simetrisine sahip değildir. Yarı dalga simetrisi oluşturarak çift mertebeli harmonikleri yok etmek için iki tür anahtarlama sırasının kombinasyonu birlikte kullanılır. Şekil 2.3 a ve b' de 1. Tür ve 2. tür anahtarlama kombinasyonları 4. sektör için verilmektedir.

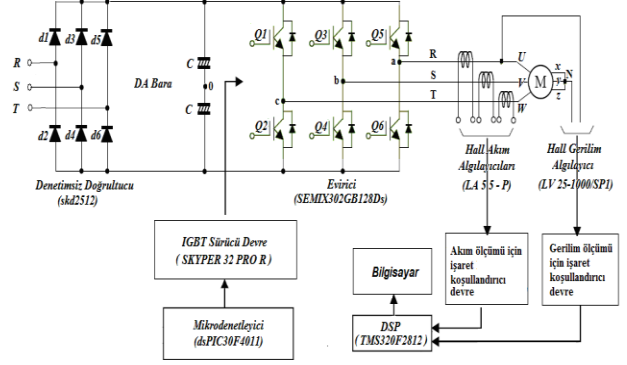


Şekil 2.3 : Sektör 4 için (a) 1. ve (b) 2. tür çift mertebeli harmonik eliminasyonu UVDGA anahtarlama sırası

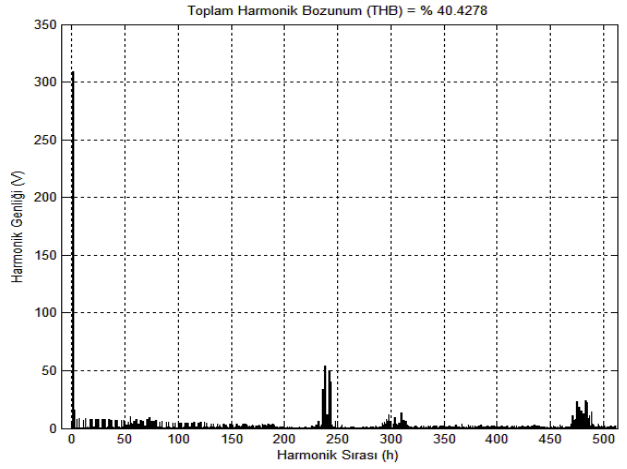
Şekil 2.3’ de verilen anahtarlama sıraları, Şekil 2.1’ de görüldüğü gibi, yarı dalga simetrisi oluşacak şekilde sektörler dağıtılır. Sonuç olarak evirici çıkış faz geriliminde çift mertebeli harmonikler oluşmaz. Üç ve üçün tek katlarında bulunan harmonikler de fazlar arasında gözükmez. Böylece fazlar arasında üç, üçün tek katlarında bulunan ve çift mertebeli harmonikler elimine edilmiş olur.

### 3. Deneysel Çalışma ve Sonuçlar

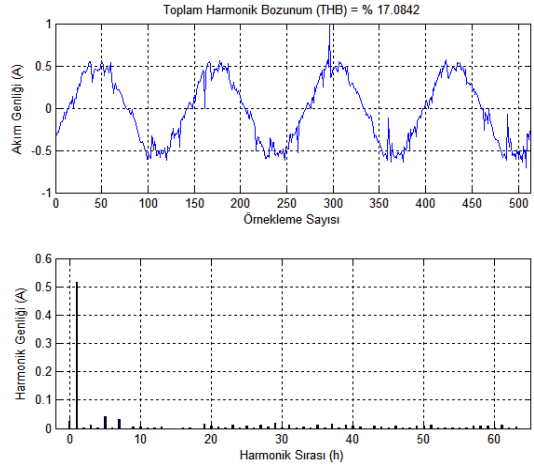
Deneysel çalışma, plaka değerleri; 0,25kW, 220V/380V, 1,2AV/0,70A,  $\Delta/Y$ ,  $\cos \varphi = 0.78$ ,  $n = 2840$  d/dak olan üç-fazlı yüksüz bir asenkron motor üzerinde, 50, 25 ve 5 Hz çalışma ve 12 kHz sabit anahtarlama frekanslarında UVDGA yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama devresinin prensip şeması, Şekil 3.1’ de asenkron motor sürücü devresinin resmi Şekil 3.2’ de verilmektedir. Devrede, üç-fazlı diyotlu denetimsiz doğrultucu kullanılarak doğrultucu çıkışında 535 V DA bara gerilimi elde edilmiştir. Bu gerilim, eviriciden beslenen 380V Y bağlı bir asenkron motor için uygun değeri oluşturmaktadır. Değişen yük durumlarında evirici giriş geriliminin sabit kalabilmesi için doğrultucu çıkış uçlarına paralel olarak eşdeğer 450 V, 6800  $\mu$ F değerinde seri iki adet kapasitör bağlanmıştır. Evirici çıkışındaki akım ve gerilimler LEM marka (LA 55-P) akım ve (LV 25-1000/SP1) gerilim algılayıcıları ile ölçülmüştür. Bu algılayıcılardan alınan analog işaretler, akım ve gerilim koşullandırma devrelerine gönderilerek burada DSP’ nin algılayabildiği maksimum sınırlar olan 0 - 3V aralığına ölçeklendikten sonra DSP (TMS320f2812)’ nin analog girişlerine uygulanmaktadır. Analog girişlerden alınan veri DSP içinde işlenip, bilgisayarın paralel portu üzerinden Code Composer Studio (CCS: Program Yazılım Ortamı) programı içine aktarılarak akım ve gerilim grafiklerine dönüştürülmektedir. Bu veriler MATLAB programına dizi olarak girilerek FFT uygulanmış ve harmonik analizleri yapılarak grafikleri elde edilmiştir. Mikrodenetleyici olarak, Microchip firmasının dsPIC30f4011 sayısal işaret denetleyicisi kullanılmıştır. dsPIC30f4011; motor denetim arayüzü, 30MHz komut işleme hızı, 1MHz çevrim ve 10bit çözünürlükte analog-sayısal çeviriciler gibi gelişmiş özelliklere sahip 16 bitlik bir mikrodenetleyicidir. IGBT sürme devresi için gerekli DGA tetikleme işaretleri, UVDGA yazılımının bu denetleyici içinde çalıştırılması aracılığı ile üretilmiştir. Şekil 3.6’ da deneysel çalışmada kullanılan uygulama devresi verilmektedir.



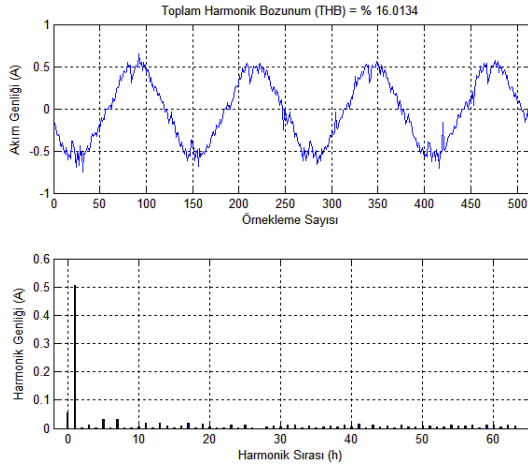
Şekil 3.1: Asenkron motor sürücü devresinin prensip şeması



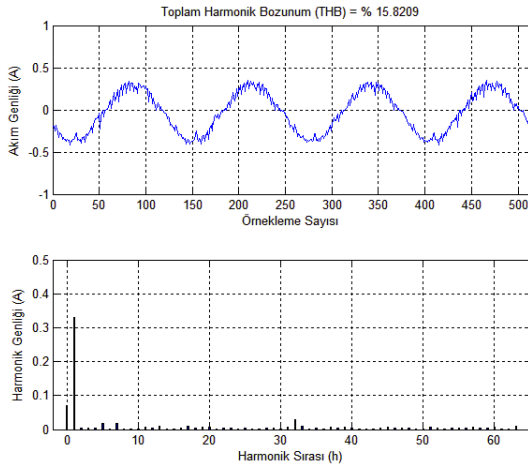
Şekil 3.2: f=50Hz ve m=1 durumunda, CCS programı ile elde edilen R fazı gerilim grafiği



Şekil 3.3: f=50Hz ve m=1 durumunda R fazı hat akımı, harmonik dağılımı ve THB

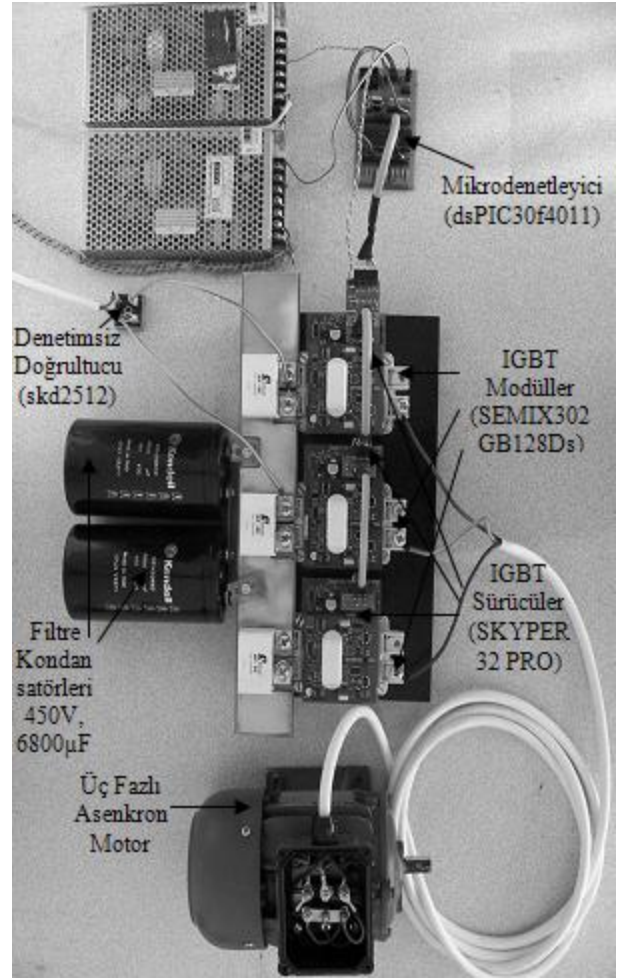


Şekil 3.4:  $f=25\text{Hz}$  ve  $m=0,5$  durumunda R fazı hat akımı, harmonik dağılımı ve THB



Şekil 3.5:  $f=5\text{Hz}$  ve  $m=0,1$  durumunda R fazı hat akımı, harmonik dağılımı ve THB

Şekil 3.3, 3.4 ve 3.5' de sırasıyla 50Hz, 25Hz ve 5Hz' de hat akımları ve akım harmonik grafikleri verilmektedir.



Şekil 3.6: Asenkron motor sürücü devresi

$f=50\text{Hz}$   $m=1$  durumunda;

- Hat akımlarının genliği 0,51A,
- Hat akımlarının THB' u 17,08%,
- Motor faz geriliminin temel dalgasının etkin değeri 218V,
- Motor faz geriliminin THB' u 40,42%, olarak elde edilmiştir.

$f=25\text{Hz}$   $m=0,5$  durumunda;

- Hat akımlarının genliği 0,51A,
- Hat akımlarının THB' u 16,65% olarak elde edilmiştir.

$f=5\text{Hz}$   $m=0,1$  durumunda;

- Hat akımlarının genliği 0,34A,
- Hat akımlarının THB' u 15,7% olarak elde edilmiştir.

#### 4. Sonuçlar

UVDGA yönteminde  $m=1$   $f=50\text{Hz}$  durumunda, asenkron motorun bir faz sargısında indüklenen gerilimin temel dalgasının etkin değerinin 218V olduğu görülmüştür. Bu durumda 220V/380V etiket değerine sahip bir asenkron motorun çalışma gerilimi, 50Hz için yaklaşık olarak sağlanabilmektedir. Dolayısıyla 50Hz alışma frekansında motorun anma momentini üretebileceği görülmüştür.  $f=5\text{Hz}$  ve  $m=0,1$  için, UVDGA yöntemi ile elde edilen hat akım genliği 0,34A' e düşmüştür. Akımdaki bu azalma motorun milinde indüklenen momentin düştüğünü göstermektedir. Bu nedenle, 5Hz gibi düşük çalışma frekanslarında anma momentini elde edebilmek için  $v/f$  oranı stator direncinin büyüklüğü göz önüne alınarak artırılmalıdır. UVDGA yönteminde kullanılan anahtarlama şekli ile yarı dalęa simetrisi sağlanarak evirici çıkışı faz ve hat gerilimlerinde çift mertebeli harmonikler yok edilmiştir. Bununla birlikte hat gerilimlerinde üç ve üçün tek katlarındaki harmoniklerin de yok olduğu görülmüştür. Böylece harmonikler açısından optimum bir skaler denetim yöntemi elde edilmiştir.

#### 5. Kaynaka

- [1] Bose, B.K., Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice hall, USA, 2001.
- [2] Plaff, G. Weschta, A. and Wick, A., ‘‘Design and Experimental Results of a Brushless AC Servo Drive’’, IEEE Transactions on Industrial Applications, IA-22., 814-822, 1984.
- [3] Van der Broeck, H.W., Skudelny, H.C. and Stanke, G., ‘‘Analysis and Realization of a Pulse Width Modulator Based on Voltage Space Vectors’’, IEEE Transactions on Industrial Applications, IA-21., 562-570, 1988.
- [4] Kazmierkowski, M.P., Krishnan, R. and Blaabjerg, F., Control In Power Electronics, Academic press, USA, 2002.
- [5] Sani, A.M., ‘‘Advanced Modulation Techniques for Power Converters’’, Master of Science University of Manitoba, Manitoba, 2007.
- [6] Holmes, G.D. and Lipo, T.A., Pulse Width Modulation for Power Converters – Principle and Practise, IEEE Press Series on Power Engineering, USA, 2003.