

Çok-seviyeli Eviricilerde Seviye Kaydırmalı PWM Anahtarlama Yöntemleri

Carrier Level Shift Based PWM Techniques in Multi-level Inverters

N. Onur Çetin¹, Ahmet M. Hava²

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

¹ocetin@eee.metu.edu.tr, ²hava@metu.edu.tr

Özet

Çok-seviyeli eviriciler yüksek verim, az kırırtı ve yüksek güç kalitesi gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok-seviyeli eviriciler arasında yaygın kullanılan yapılardan biri nötr noktası bağlantılı (NPC) eviricidir. Tercih edilen anahtarlama yöntemi PWM yöntemidir. PWM yönteminin uygulamasında da taşıyıcı seviye kaydırma tekniğine dayanan skaler PWM yöntemleri en basit ve uygulaması en kolay yöntemlerdir. Bu çalışmada beş-seviyeli NPC evirici için seviye kaydırmalı PWM anahtarlama yöntemleri gözden geçirilmekte ve çıkış harmonik başarımları incelenmektedir.

Abstract

Multi-level inverters are widely utilized in applications requiring high efficiency, low ripple, and high power quality. The neutral-point-clamped (NPC) inverter is a widely utilized topology among the multi-level inverters. The preferred switching technique is PWM technique. In the implementation, the scalar PWM based carrier level shifting methods are the simplest and easiest to implement methods. In this work, carrier level shift based PWM techniques are reviewed and their output harmonic performance is investigated for five-level NPC inverter.

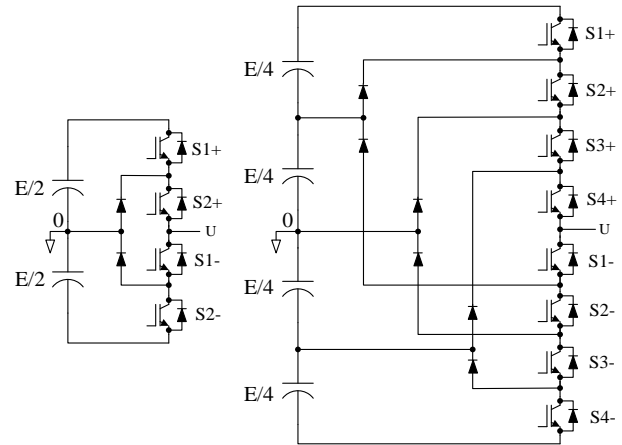
1. Uygulamalar, Topolojiler ve Donanımsal Özellikler

Eviriciler dc gerilimi ac gerilime çeviren güç elektroniği dönüştürücüleridir. Çok-seviyeli eviriciler, yapıdaki seviye sayısı artışı oranında çıkışlarında sinüse yakın gerilim üretirken, ideal bir dc-ac gerilim dönüştürücüsüne yaklaşırlar. Çok-seviyeli eviriciler yaklaşık 30 yıldır uygulama alanı bulmakta, güç ve akım/gerilim yelpazeleri ve buna paralel olarak uygulama alanları iyice genişlemektedir.

İlk çok-seviyeli eviriciler 1980'lerde tren tahrik sistemlerinde ve nötr noktası bağlantılı (NPC) üç-seviyeli üç fazlı sistem olarak uygulanmıştır [1] (Şekil 1). Burada kazanç, o günün yarı-iletken teknolojisi ile evirici gücünü ikiye katlamak ve megavat güç seviyesine ulaşmaktır. 1990'larda küçük ve büyük güçlü çok seviyeli eviriciler uygulamada yaygınca kullanılmaya başlanmıştır. Sanayide alçak ve orta gerilim motor sürücülerde üç-seviyeli NPC evirici yapısı kullanılmış, telekom güç kaynaklarında üç-seviyeli Viyana doğrultucu

yapısı kullanılmış, büyük güçlü orta gerilim motor sürücülerde de ardışıl bağlı H-köprü tipi beş ve üstü seviyeli eviriciler kullanılmıştır. 2000'li yıllarda güç düzeyleri ve evirici seviyeleri artık büyük değerlere ulaşmış, ardışıl bağlı H-köprünün elektrik şebekesi güç kalitesi uygulamaları onlarca megavat seviyelerini aşmış, HVDC'de kullanım başlamış, rüzgar türbini ve güneş enerji sistemlerinde ise megavat ve üstü güç seviyelerinde kullanım yaygınlaşmıştır. Alçak gerilim uygulamalarında ise kesintisiz güç kaynağı ve fotovoltaik enerji gibi uygulamalarda kullanım iyice yaygınlaşmış ve özellikle tercih edilir teknoloji olmuştur [1]-[4].

Günümüzde, çok-seviyeli eviriciler yüksek verim, az kırırtı, yüksek güç kalitesi, az dv/dt, düşük ortak mod gerilimi, vb. uygulamalarında tercih edilen teknolojiler arasında önde gelmektedir. Çok-seviyeli eviriciler arasında da en yaygın kullanılanları NPC (Şekil 1) ve ardışıl bağlı H-köprü topolojileri olmuştur. Viyana ve T-tipi üç-seviyeli dönüştürücüler ise daha dar bir alanda ve genellikle alçak gerilim uygulamalarında kullanım bulmaktadır. Uçan kondansatörlü çok-seviyeli evirici tipi ise, büyük güç ve gerilimlerde az da olsa kullanım bulmaktadır. Kıyıcı hücreli (yarım köprülü) ardışıl bağlı modüler çok-seviyeli eviriciler (MMCC) ise yeni gelişip yaygınlaşmaya başlamıştır [2], [3].



Şekil 1: NPC üç (sol) ve beş (sağ) seviyeli eviriciler (tek faz gösterim).

Çok-seviyeli eviricilerde birkaç unsur teknolojik özellik bakımından ön plandadır. İlk olarak bu eviricilerin donanımsal yapısı geleneksel güç elektroniği devrelerinden farklılıklar gösterir. Modüler yapı ve çok seviyelilikten dolayı, çok katlı ve az kaçak induktanslı dc bara yapısı, artan anahtar sayısından dolayı boyutu büyüyen kapı sürme ve koruma devreleri teknolojik açıdan belirleyici ve diğerlerinden farklılaştırıcı özelliklerdir. DC baranın tek değil, çok parçadan oluşması, kondansatörlerin birbirine bağlandığı terminaller üzerinden kondansatörlere akımların akması nedeniyle kondansatörlerde akım stresleri ve gerilim dengesizliği yüksektir ve tasarım bu stres ve dengesizlikler dikkate alınarak yapılmalıdır.

Çok-seviyeli eviricilerin güç devresi donanımındaki yapısal farklılık, sistemdeki elektronik devrelerde de farklılık gerektirir. Sayısı normal eviriciye göre yüksek olan anahtarların denetimi için hem elektronik donanımda hem de yazılımda özel tasarımlar gereklidir. DSP ve FPGA gibi yongaları kullanarak verimli ve güvenilir anahtarlama şablonları üretilir ve anahtar kapıları sürülür. Sistem denetimi (örneğin motor hızının vektör yöntemle denetimi) bakımından diğer eviricilerden temel fark dc bara gerilim dengesizliklerini gidermek üzere algoritmalar olup, geleneksel denetim algoritmalarına eklemelerle bu hedefe ulaşılır. Ancak anahtarlama yöntemleri bakımından geleneksel evirici anahtarlama yöntemleri yeterli ve uygun değildir. Çok-seviyeli eviricilere uygun anahtarlama yöntemleri gereklidir. Bu çalışmada çok-seviyeli eviriciler için anahtarlama yöntemleri incelenecektir.

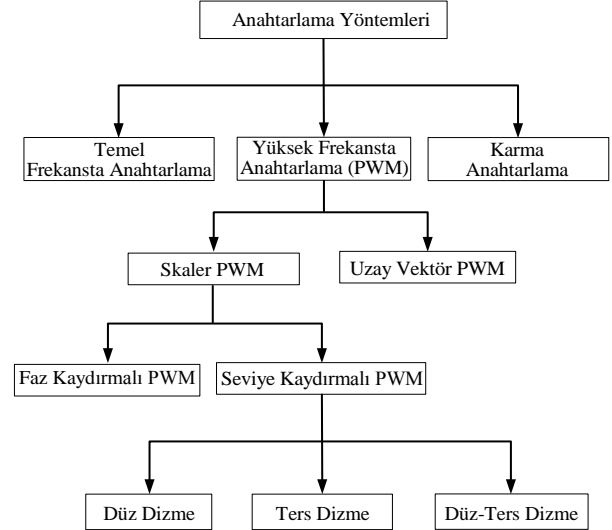
2. Anahtarlama Yöntemleri

Eviricilerde anahtarlama şablonları çeşitli ölçütler dikkate alınarak şekillendirilir. Çıkış gerilim kırırtısının azlığı, anahtarlama sayısının ve dolayısıyla anahtarlama kayıplarının azlığı, çıkış gerilim darbeleri arasındaki mesafenin miktarı, ortak mod geriliminin şiddeti ve değişim miktarı, gerilim doğruluk bölgesinin genişliği, vb. özellikler bu ölçütleri oluşturur. Her bir uygulamada bu ölçütlerden biri ya da birkaçı öncelikli alınıp, anahtarlama şablonları bu ölçütlere göre belirlenir. Belirlenen bir anahtarlama şablonunun uygulanması var olan donanım ve yazılım kabiliyetlerine bağlı olarak çeşitli biçimlerde gerçekleştirilebilir.

Anahtarlama şablonları anahtarlama yöntemleri ile verimli biçimde tasarlanır. Anahtarlama yöntemleri; önceden programlanan eniyileştirilmiş açılarla düşük frekansta (temel frekansına yakın frekansta) anahtarlama yöntemi, yüksek frekansta (PWM) anahtarlama yöntemi ve ikisinin karışımından oluşan karma yöntem olarak üç sınıfta incelenir [5] (Şekil 2). Eniyi açılı yöntemi düşük frekanslı anahtarlama yapar ve özellikle çok yüksek güç ve seviyeli eviricilerde tercih edilir. Götürüsü yöntemin dinamik tepki açısından zayıf olmasında, getirisi ise enaz anahtarlama kayıpları itibarı ile enerji veriminin yüksek olmasındadır. PWM yöntemi çıkış temel frekansına göre oldukça yüksek oranda bir anahtarlama frekansı ile anahtarlar ve birkaç megavat ve altındaki güçlerde yaygınca kullanılır. Karma yöntem ise, adından anlaşılacağı üzere, her iki yöntemi de kullanır ve uygulandığı güç aralığı da benzer biçimde orta güçlerdir.

Uygulamada en çok miktarda çok-seviyeli eviriciler birkaç megavat ve altında güçlerde kullanılır. Dolayısıyla, en yaygın

anahtarlama yöntemi de PWM yöntemidir. Yöntemin getirileri evirici çıkış gerilim kırırtılarının ve dolayısıyla akım kırırtılarının azlığı, devrelerde tasarlanan süzgeçlerinin boyut ve maliyetlerinin azlığı, evirici dinamik tepkisinin hızlı oluşudur. Uygun tasarım ile enerji verimi, özellikle çok-seviyeli evirici uygulamasında çok yüksek değerlere varır, ve yüksek frekansta anahtarlamanın en büyük götürüsü olan anahtarlama kaybından dolayı verim düşüklüğü de etkisini kaybeder. Dolayısıyla yöntem oldukça yaygınlaşmaktadır.



Şekil 2: Çok seviyeli eviricilerde anahtarlama yöntemlerinin sınıflandırılması.

3. PWM Yöntemleri

Taşıyıcı tabanlı PWM yöntemlerinde anahtarlama frekansı sabit tutulur ve her anahtarlama periyodunda referans ve çıkış gerilimlerinin ortalama değerleri eşit yapılır. Bu amacı gerçeklemek için skaler ve uzak vektör yöntemlerinden biri kullanılabilir. Skaler yöntem, anahtarlama frekansındaki taşıyıcı üçgen ile istenen çıkış işaretini temsil eden (istenen çıkış gerilimi şiddeti ve frekansında) modülasyon dalgalarının karşılaştırılmasına ve kesişme noktalarında anahtarlama yapmaya dayanır. Vektör yöntem de, evirici anahtar setlerinin her bir konumu için karmaşık sayı uzayında bir evirici vektörü oluşturulması, referans işaretin de bir vektörle temsil edilmesi ve referans-çıkış vektör volt-saniyelerin eşit yapılması için çıkış geriliminin vektör olarak programlanmasına dayanır. Birinci yöntem uygulama olarak kolay, ikinci yöntem anahtarlama şablonlarının başarımları hakkında doğrudan görsel açıdan fikir vermesi bakımından eğitsel yönüyle faydalıdır ancak uygulaması zordur. Bu iki farklı yöntemle birbirine eşdeğer anahtarlama şablonları oluşturmak da olanaklıdır. Dolayısıyla hangi yöntemin seçileceği tasarımcının seçeneğidir ve uygulamada genellikle skaler yöntem uygulama kolaylığı açısından tercih edilir.

Çok-seviyeli eviricilerde, skaler anahtarlama yöntemlerinde faz başına taşıyıcı üçgen sayısı evirici seviyesine bağlı olarak değişir. N seviyeli eviricide faz başına aynı şiddet ve aynı frekansta N-1 adet taşıyıcı üçgen kullanılır. Bu üçgenlerin şiddeti, birbirlerine göre konumları, ve karşılaştırıldıkları modülasyon dalgalarının sayısı ise skaler yöntemler arasındaki farklılıkları belirler. Bu özellikleri skaler anahtarlama

yöntemlerini ikiye ayırır; seviye kaydırma ve faz kaydırma yöntemleri [5]. Seviye kaydırma yönteminde taşıyıcılar dikey olarak dağıtılır ve her bir taşıyıcı $V_{dc}/(N-1)$ 'lik DC bara seviyesini kapsayacak şekilde üstüste bitişik olarak yerleştirilir (şekil 3). Bu yöntemde taşıyıcılar 3 farklı şekilde yerleştirilebilir. Düz dizme yönteminde (PD) bütün taşıyıcılar aynı fazdadır. Ters dizme yönteminde (POD) modülasyon dalgasının sıfır referansının üstündeki taşıyıcılar sıfır referansının altındakilere göre 180° faz kaydırılır. Düz-ters dizme yönteminde (APOD) ise, her bir taşıyıcı bitişikindeki taşıyıcıya göre 180° faz kaydırılır. Faz kaydırma yönteminde ise taşıyıcılar birbirinden $360^\circ/(N-1)$ faz kaydırılmış olarak yerleştirilir. Uygulamada en çok seviye kaydırma yöntemi kullanılır.

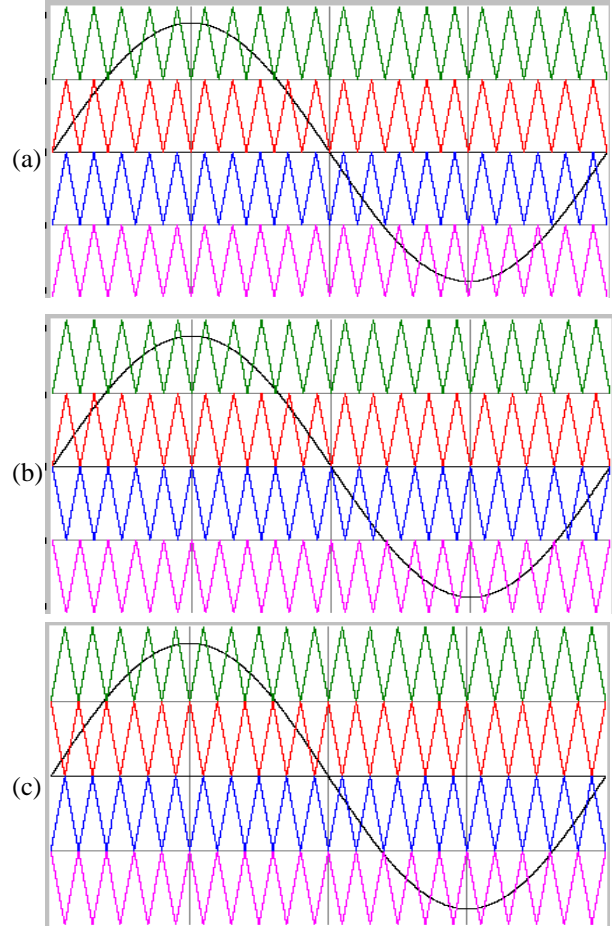
Şekil 3'te beş seviyeli bir evirici için seviye kaydırma yöntemlerinin uygulanışı gösterilmiştir. En üstten en alta doğru taşıyıcı üçgenler V_{tr1} 'den V_{tr4} 'e doğru dizilmek üzere, eviricinin bir bacağına anahtar konumu referansla üçgenleri karşılaştırma sonucu Çizelge 1'de gösterildiği gibi olur. Şekilden görüleceği üzere, modülasyon dalgası olarak Sinüs PWM (SPWM) modülasyon dalgası kullanılmıştır. Sinüs dalgasına sıfır bileşen işareti eklenerek üç fazlı üç iletkenli yükler için az kırırtı, yüksek gerilim doğrusalığı, düşük anahtarlama kaybı vb. özellikleri taşıyan SVPWM ve DPWM gibi diğer modülasyon dalgaları da benzer biçimde kullanılabilir. İki-seviyeli evirici PWM yöntemlerinden iyi bilinen bu yöntemler çok-seviyeli evirici uygulamasına kolayca taşınabilir. Bu kısımda görüldüğü üzere, çok-seviyeli eviricilerde skaler yöntemle PWM uygulamak oldukça kolaydır. Ancak seviye kaydırma yöntemleri arasındaki başarımların farkını, ve değişik modülasyon dalgalarının başarımların farkını bir bakışta kestirmek oldukça güçtür. Zira skaler yöntemde görsellik bakımından başarımların göstergeleri oldukça zayıftır. Bu amaçla bir sonraki bölümde bilgisayar benzetimleri ile yöntemlerin başarımlarını nicel olarak değerlendirilecektir.

Çizelge 1: Beş seviyeli NPC evirici anahtarlama durumları ("1": İletimde ve "0": Kesimde)

Koşul	Anahtarlama durumu	Faz gerilimi (V_{U0})
$V_{ref} > V_{tr1}$	$S_{1+}=1, S_{2+}=1, S_{3+}=1, S_{4+}=1$	$+V_{dc}/2$
$V_{tr1} > V_{ref} > V_{tr2}$	$S_{1+}=0, S_{2+}=1, S_{3+}=1, S_{4+}=1$	$+V_{dc}/4$
$V_{tr2} > V_{ref} > V_{tr3}$	$S_{1+}=0, S_{2+}=0, S_{3+}=1, S_{4+}=1$	0
$V_{tr3} > V_{ref} > V_{tr4}$	$S_{1+}=0, S_{2+}=0, S_{3+}=0, S_{4+}=1$	$-V_{dc}/4$
$V_{tr4} > V_{ref}$	$S_{1+}=0, S_{2+}=0, S_{3+}=0, S_{4+}=0$	$-V_{dc}/2$

4. Benzetimler

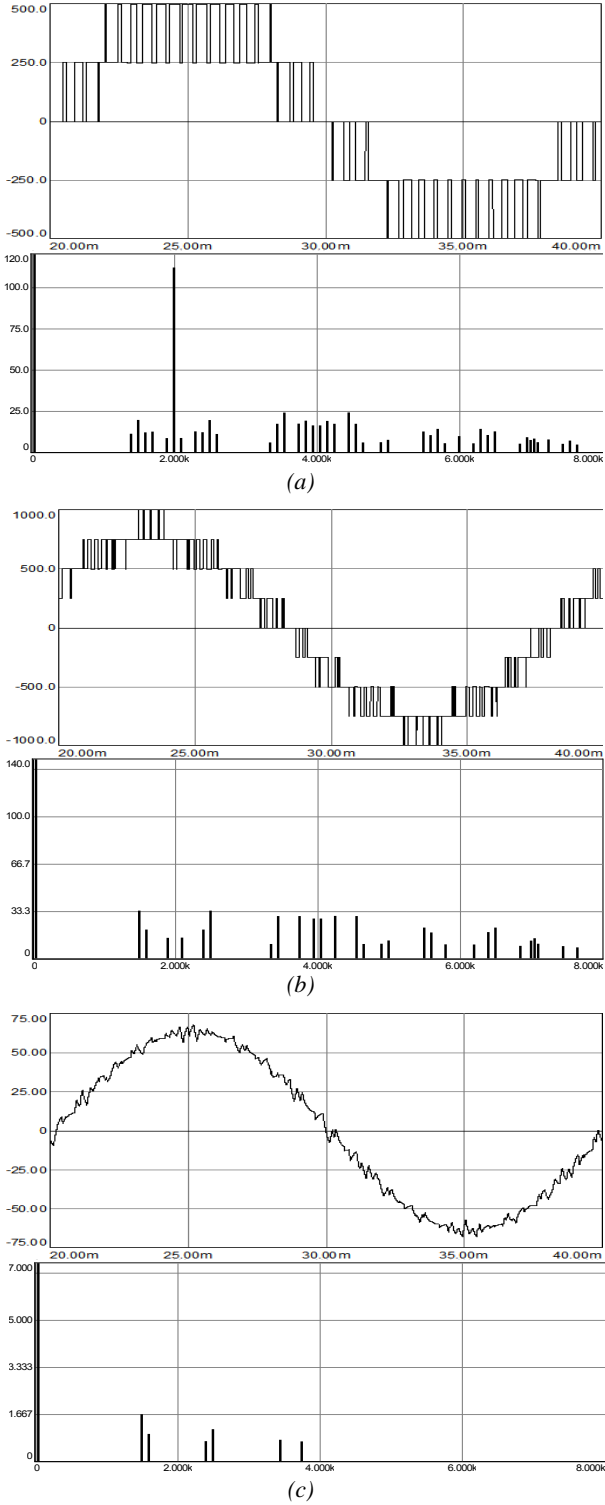
Seviye kaydırmalı yöntemlerin başarımlarını incelemek için Ansoft Simplorer 7.0 yazılımında benzetim yapılmıştır. Benzetimde üç fazlı beş seviyeli NPC evirici ve çıkışında yıldız bağlı L-R yük (faz başına 1 mH + 7 Ω) kullanılmıştır. Çıkış gerilim frekansı 50 Hz'dir (Güç katsayısı 0.99'dur). Evirici dc barası 1000V ile beslenmiştir. Modülasyon dalgası olarak SPWM modülasyon dalgası kullanılmıştır. Taşıyıcı frekansı (f_c) 2 kHz'dir. Benzetimler 0.7 modülasyon indis (M_i) koşulunda yapılmıştır. M_i çıkış geriliminin elde edilebilecek en yüksek gerilim değerine ($2V_{dc}/\pi$) oranı olarak tanımlanmıştır [$M_i = V_{faz-tepe}/(2V_{dc}/\pi)$].



Şekil 3: SPWM faz başına modülasyon işareti ve taşıyıcı dalgaları, (a) Düz dizme (PD), (b) Ters dizme (POD), (c) Düz-ters dizme (APOD).

Şekil 4-6'da sırasıyla PD, POD ve APOD yöntemlerinin benzetim grafikleri gösterilmektedir. Faz gerilimi (V_{U0}), faz-arası gerilimi ve faz akımının zaman ekseninde bir temel periyotta dalga şekilleri, ve altlarında frekans spektrumları (hepsi tepe değerler) bulunmaktadır. Frekans spektrumları 8 kHz'e ($4f_c$) kadar alınmıştır. Daha yüksek frekans harmonikleri ihmal edilebilir düzeydedir. Frekans spektrumlarında harmonik bileşenler incelendiği için grafikler temel bileşenler dışarıda kalacak şekilde dikey eksen genişletilerek alınmıştır. $M_i=0.7$ durumunda faz-arası gerilimi temel bileşeni 600 V_{rms}, faz akımı 48 A_{rms} olmaktadır. Toplam üç-faz güç 50 kW'tır.

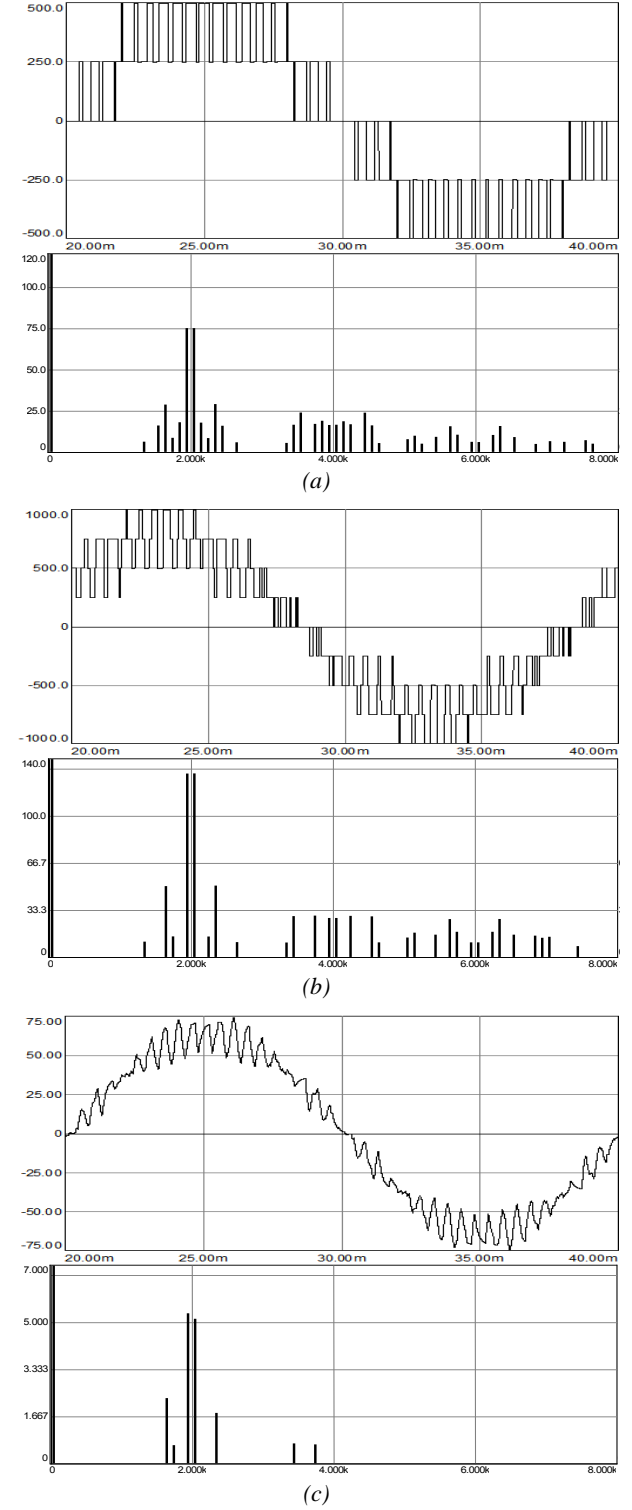
PD yönteminde faz gerilimi ve faz-arası gerilimi her zaman $V_{dc}/4$ 'lük (250 V) basamaklarla değişmektedir. Faz akımı düşük kırırtılıdır. Faz gerilimi taşıyıcı frekansında (2 kHz) görece yüksek düzeyde harmonik bileşen içermektedir. Taşıyıcı yan-bantlardaki ve daha yüksek frekanslardaki harmonikler düşüktür. Taşıyıcı (f_c) harmonik ortak mod bileşeni olduğundan faz-arası geriliminde görülmemektedir. Bu nedenle PD yönteminin faz-arası harmonik başarımları yüksektir. Faz-arası geriliminin baskın harmonikleri 4 kHz ($2f_c$) civarındadır. Çıkış indüktansının zayıflatma etkisi sayesinde faz akımında harmonikler daha da düşmektedir.



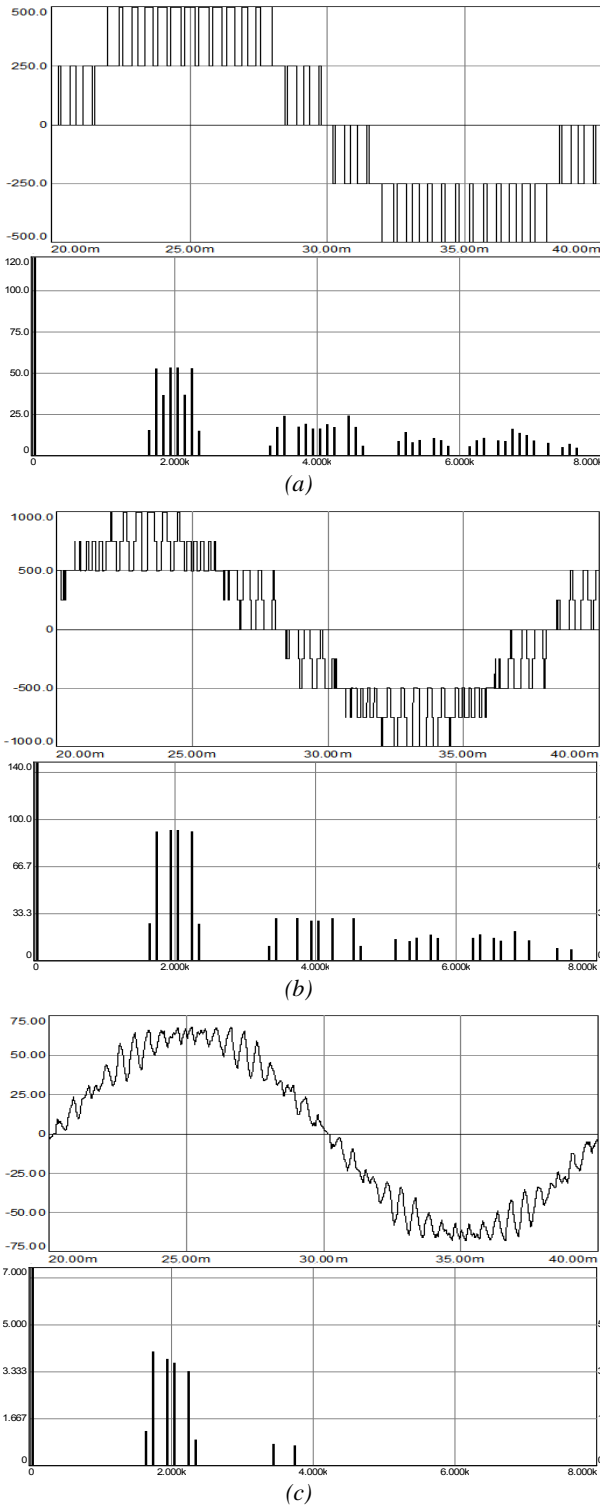
Şekil 4: PD benzetim sonuçları (a) faz gerilimi, (b) faz-arası gerilimi, (c) faz akımı.

POD ve APOD yöntemlerinde faz gerilimi PD yöntemindekine benzemektedir. Fakat faz-arası gerilim bazı bölgelerde $V_{dc}/2$ 'lik basamaklarla değişmektedir. Bu nedenle faz akım kısırtısı POD ve APOD yöntemlerinde PD'ye göre oldukça yüksektir. POD ve APOD yöntemlerinde faz geriliminde taşıyıcı frekansta harmonik üretilmemektedir. Fakat harmonikler taşıyıcı frekansının yanbantlarına

yayılmıştır. Üç fazlı sistemde sadece üçün katı yanbant harmonikleri yok olacağı için faz-arası gerilimlerinde taşıyıcı frekans etrafında PD yöntemine göre daha yüksek şiddette harmonikler oluşmaktadır. Bu nedenle POD ve APOD yöntemlerinde faz-arası gerilimi ve faz akımının harmonikleri PD'dekine göre daha yüksektir.



Şekil 5: POD benzetim sonuçları (a) faz gerilimi, (b) faz-arası gerilimi, (c) faz akımı.



Şekil 6: APOD benzetim sonuçları (a) faz gerilimi, (b) faz- arası gerilimi, (c) faz akımı.

Çizelge 2’de üç PWM yönteminin $M_i=0.7$ durumunda harmonik başarımları karşılaştırılmıştır. Faz gerilimleri karşılaştırıldığında PD yönteminde taşıyıcı harmonik çok yüksektir. POD ve APOD yöntemlerinde bu harmonik şiddeti taşıyıcı yanbantlarına yayılmıştır. Sonuç olarak faz gerilim THD (Total Harmonic Distortion) değerleri üç yöntemde de benzerdir. PD’de taşıyıcı harmonik faz-arasında görülmediği

için faz-arası gerilim THD değeri POD ve APOD yöntemlerinden çok daha düşüktür. Gerilim harmoniklerinin baskın olduğu frekans bölgesi çıkış akım harmoniği bastırımı açısından önemlidir. PD yönteminde faz-arası gerilim baskın harmoniği taşıyıcı frekansın iki katının (4 kHz , $2f_c$) yanbantlarıdır. POD ve APOD yöntemlerinde ise faz-arası gerilim baskın harmonikleri taşıyıcı frekans (2 kHz , f_c) yanbantlarıdır. Bunun sonucunda faz-arası gerilim harmoniği PD’de POD ve APOD’ye göre yaklaşık 1.5 kat azalırken, faz akım harmoniği 2 kattan daha fazla azalmaktadır.

Üç PWM yöntemi incelendiğinde PD yöntemi iyi çıkış harmonik bozulma özelliğine sahiptir. Diğer taraftan PWM yöntemleri değerlendirilirken ortak mod gürültüsü (kaçak akım) ve faz-arası gerilim sırası gibi başka özellikleri de göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Örneğin [6]’da POD yönteminin en düşük kaçak akıma neden olduğu gösterilmiştir.

Çizelge 2: PWM Yöntemlerinin Harmonik Başarımlarının Karşılaştırılması

PWM Yöntemi	$M_i=0.7$			Baskın Harmonik	
	THD (%)			V_{ph}	V_{ll}
	V_{ph}	V_{ll}	I_{faz}	V_{ph}	V_{ll}
SPWM	PD	33.9	17.4	5.0	f_{c-m} $2f_{c-y}$
	POD	33.8	30.4	13.0	f_{c-y} f_{c-y}
	APOD	34.0	29.0	12.3	f_{c-y} f_{c-y}

f_{c-m} : taşıyıcı frekans, f_{c-y} : taşıyıcı frekans yanbantları

5. Sonuçlar

Çok-seviyeli eviricilerin kullanımı giderek artmaktadır. Taşıyıcı seviye kaydırma yöntemi ile farklı karakteristiklere sahip birçok PWM yöntemi kolayca üretilebilmektedir. Bu sayede evirici başarımları iyileştirilebilmektedir. Üç farklı seviye kaydırma yönteminin çıkış harmonik başarımları incelenmiş ve PD yönteminin en düşük çıkış harmonik özelliğine sahip olduğu gösterilmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter,” IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.17, No.5, pp.518-523, 1981.
- [2] S. Kouro, et.al., “Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 8, pp. 2553–2580, Aug. 2010.
- [3] H. Akagi, “Classification, Terminology, and Application of the Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC),” IEEE Trans. Power Electron., cilt.26, no. 11, s. 3119-3130, Nov. 2011.
- [4] B. Üstüntepe, A.M. Hava, “Üç-Fazlı Üç-Düzeyleli Nötr Noktası Bağlantılı Evirici ve Uygulamaları,” ELECO 2006, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 6-10 Aralık 2006, Bursa, sayfa 126-130.
- [5] D.G. Holmes, T.A. Lipo, *Pulse Width Modulation for Power Converters*, Piscataway, NJ, IEEE Press, 2003.
- [6] M.M. Renge, H.M. Suryawanshi, “Multilevel Inverter to Reduce Common Mode Voltage in AC Motor Drives Using SPWM Technique,” Journal of Power Electronics, Vol. 11, No. 1, January 2011, pp. 21-27.