

## BEŞ SEVİYELİ İZOLE DC KAYNAKLI KASKAT İNVERTERİN SPWM TEKNIĞI İLE KONTROLÜ

Erkan DENİZ, Hüseyin ALTUN

Fırat Üniv., Tek. Eğt. Fak., Elektrik Eğitimi Bölümü, Elazığ. Tel: 424 2370000 (4351)

[edeniz@firat.edu.tr](mailto:edeniz@firat.edu.tr),

### ÖZET

Bu makalede genel olarak çok seviyeli inverterler, çok seviyeli inverterlerde kullanılan taşıyıcı temelli Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (SPWM) ve çok seviyeli kaskat inverter hakkında bilgi verilmektedir. Bununla birlikte Matlab\SimPower Systems’de kaskat inverterin 3-fazlı, IGBT yarıiletken anahtarlı beş seviyeli devresinin 3-fazlı bir RL yükünü beslemesi durumunda SPWM tekniği kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon sonuçları yük indüktansının ve anahtarlama frekansının farklı değerleri için alınmıştır.

**Anahtar kelimeler** - Çok seviyeli inverter, Kaskat inverter, Çok seviyeli SPWM

## CONTROL OF FIVE LEVEL AND ISOLATED DC SOURCE CASCADE INVERTER WITH SPWM TECHNIQUE

### ABSTRACT

Generally in this paper, summarized knowledge on multilevel inverters, carrier based sinusoidal pulse width modulation (SPWM) used in multilevel inverters and multilevel cascade inverter is given. Moreover, the circuit with IGBT semiconductor switches and supplying a three-phase RL load of a three-phase five level cascade inverter was simulated using SPWM technique in Matlab/SimPower Systems. Simulation results were obtained for different values of switching frequencies and load inductances.

**Keywords** - Multilevel inverter, Cascade inverter, Multilevel sinusoidal pulse width modulation technique.

### I. GİRİŞ

Çıkış gerilimi değişken frekans ve genlikli bir gerilim kaynaklı inverterin (VSI) kontrolünde, çıkış geriliminin harmoniklerinin azalması çok önemlidir. Bu nedenle iki seviyeli inverterler olarak bilinen geleneksel inverterlerde çeşitli PWM anahtarlama stratejileri ile birlikte, yüksek anahtarlama frekansı tercih edilir. Ancak iki seviyeli inverterlerin orta veya yüksek güç/gerilim uygulamaları durumunda, başlıca anahtarlama kayıpları ve anahtarların anma değerlerindeki kısıtlamadan dolayı yüksek frekansta çalışma için birkaç sınırlamaları vardır. Ayrıca orta ve yüksek güçlü uygulamalarda geleneksel inverterler düşük verim ve büyük transformatörler kullanılması nedeni ile yüksek fiyat gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu sebeple

inverter ailesinin yeni bir üyesi olan çok seviyeli inverter son yıllarda orta veya yüksek güç/gerilimli uygulamalar için bir çözüm olarak ortaya çıkarılmıştır [1].

Çok seviyeli güç dönüşümü ilk kez 30 yıl önce tanıtıldı. Genel kavram, küçük gerilim basamaklarında güç dönüşümü yapmak için çok sayıda anahtar kullanımını içerir. Geleneksel güç dönüşümü ile karşılaştırılırsa bu yaklaşımın birkaç avantajı vardır. Daha küçük gerilim basamakları, daha yüksek kaliteli dalga şeklinin üretilmesine ayrıca yükteki  $dv/dt$  stresinin ve elektromanyetik uyumsuzluğun azalmasına yol açar. Çok

seviyeli inverterlerin diğer bir önemli özelliği, yarıiletken anahtarların daha yüksek gerilimde çalışmasına izin veren seri şekilde bağlanmalarıdır. Genellikle seri bağlantı, aşırı gerilim riskini yok eden kenetleme diyotları ile yapılır. Ayrıca anahtarlar tam olarak seri bağlanmadığı için, anahtarlama sendelenebilir. Bu durum anahtarlama frekansını ve dolayısıyla anahtarlama kayıplarını azaltır [2].

Çok seviyeli güç dönüşümünün açık bir dezavantajı, kullanılan anahtarların çok sayıda olmasıdır. Ancak çok seviyeli inverterlerde, daha düşük gerilim oranlı anahtarlar kullanılmaktadır. Bu yüzden iki seviyeli inverterlerle karşılaştırıldığı zaman kullanılan anahtarların maliyeti kayda değer bir şekilde artmaz. Bununla birlikte, seviye sayısını artırmak için eklenen her bir anahtarın gate sürme devresi inverterin mekanik yerleşimini daha fazla karmaşık yapar. Çok seviyeli inverterlerin diğer bir dezavantajı, küçük gerilim basamaklarını üreten izoleli gerilim kaynakları ve seri kondansatörlerdir. İzoleli gerilim kaynakları her zaman kolaylıkla bulunamayabilir ve seri kondansatörler gerilim dengesi gerektirir. Gerilimi dengeleme sınırlı olarak, çok sayıda anahtar kullanılması dolayısıyla oluşan birden fazla anahtarlama imkânı kullanılarak yapılabilir. Bununla birlikte gerilim denge probleminin tam çözümü için ilave devreler gerekir [3].

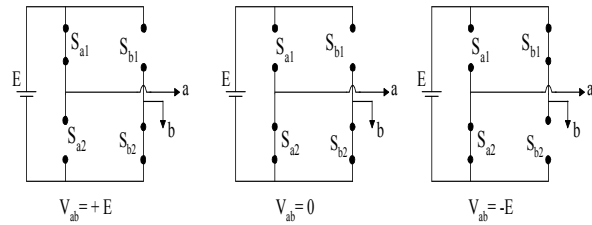
1975'te R.H. Baker ve L. H.m Bannister, çok seviyeli bir çıkış gerilimi elde etmek için ayrı dc kaynaklı tam köprü hücrelerin seri bağlandığı bir format ile çok seviyeli kaskat inverteri tanıttılar. Bugüne kadar çok seviyeli inverter türleri üzerine yapılan araştırmaların çoğu üç tane inverter üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar; diyot-kenetlemeli inverter, kondansatör kenetlemeli inverter ve kaskat inverterdir.

Kaskat inverter, geliştirilen ilk çok seviyeli inverter türü olduğu halde 1990'ların ortasına kadar uygulamaları yaygın değildi. 1997 de P.W. Hammond ve F. Z. Peng -J. S. Lai tarafından kaskat inverter motor sürücü devrelerinde kullanıldı. Kaskat inverterler ilk kullanıldıklarından bu zamana kadar özellikle de orta gerilim sürücülerinde büyük ilgi çekti. Çünkü bu topoloji, çok seviyeli diğer iki topolojiden yapı olarak daha basit ve paket devre haline getirilmesi daha kolay olmaktadır. Ayrıca tam köprü hücrelerin eklenmesi veya çıkarılması ile inverterin çıkış gerilim seviyesi artırılıp azaltılabilir. Bununla birlikte kenetleme diyotları ve kondansatörleri gerektirmediğinden, aynı seviyeli devre yapıları için diğer iki topolojiye göre daha az eleman kullanılmaktadır. Bu yapının en önemli dezavantajı, çok sayıda izolasyonlu dc

kaynak beraberinde güç transformatörü gerektirmesinden kaynaklanan yüksek maliyettir [4].

## II. ÇOK SEVİYELİ KASKAT İNVERTER

Farklı dc kaynaklı ve çok seviyeli kaskat inverter için farklı dc kaynak gerilimi oluşturmada akümülatör, yakıt hücreleri veya güneş pillerinden elde edilen dc gerilimden yararlanılır. Son zamanlarda bu yapı ac güç kaynaklarında ve sürücü sistemlerinde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu inverter topolojisi diğerlerine göre daha avantajlıdır. Çünkü kenetleme diyot veya kondansatörleri gerektirmemektedir. Ayrıca en az dc kaynak gerilimine eşit değerde ac gerilim elde edilebilmektedir [5].

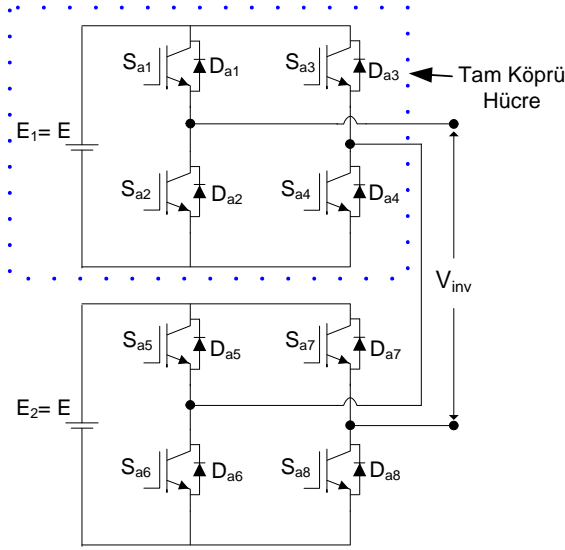


Şekil 1. Bir tam köprü invertere ait anahtarlama durumları ve buna karşılık gelen gerilim seviyeleri.

Çok seviyeli inverterler için m seviye sayısı en az üç tür. Kaskat inverterde -E, 0, +E seviyelerinden oluşan 3-seviyeli bir faz gerilimi elde etmek için bir tam köprü hücre kullanılır. Tam köprü inverterin devresi Şekil 1.'den de görüldüğü gibi dört anahtar ve dört adet boşluk diyotundan meydana gelmektedir. Eğer S<sub>a1</sub> ve S<sub>b2</sub> anahtarları iletimde ise çıkış gerilimi V<sub>ab</sub> = E, S<sub>a2</sub> ve S<sub>b1</sub> iletimde ise V<sub>ab</sub> = -E ve S<sub>a1</sub>-S<sub>b1</sub> veya S<sub>a2</sub>-S<sub>b2</sub> iletimde ise V<sub>ab</sub> = 0 olmaktadır.

Kaskat inverterde çok seviyeli çıkış faz gerilimi elde etmek için aynı seviyeli H- köprü hücrelerin ac çıkışları seri bağlanır. Bu nedenle meydana gelen gerilim dalga şekli H-köprü hücrelerin çıkışlarının toplamı olur. 's' dc kaynak sayısı olmak üzere bir kaskat inverterde çıkış faz gerilimlerinin seviyesinin sayısı  $m = 2s + 1$  ve hat geriliminin seviye sayısı  $k = 2m - 1$  formülleri ile hesaplanır. Kaskat inverterin bir faz bacağından 5-seviyeli bir çıkış gerilimi elde etmek için Şekil 1.'deki köprü inverter devrelerinden iki tanesi Şekil 2.'deki gibi seri bağlanır [6].

Şekil 2.'deki devreye ait anahtarlama durumları ve bunlara karşılık gelen çıkış gerilim seviyeleri ise Tablo 1.'de gösterilmiştir. Tablo 1.'deki 16 tane anahtarlama durumundan sadece 4 tanesi iki yönlü akım akışına ve sabit bir çıkış gerilimine izin verir. Tablodaki 15. ve 16. anahtarlama durumlarında tam köprünün birden poziti-



Şekil 2. Beş-seviyeli kaskat inverterin bir faz bacağı

Tablo 1. Beş-seviyeli kaskat inverterin bir faz bacağına ait anahtarlama durumları

|    | Tam Köprü 1 |                   | Tam Köprü 2 |                   | $V_{Inv}$    |
|----|-------------|-------------------|-------------|-------------------|--------------|
| 1  | $E_1$       | $S_{a1} - S_{a4}$ | $0_{22}$    | $S_{a6} - S_{a8}$ | $E_1$        |
| 2  | $E_1$       | $S_{a1} - S_{a4}$ | $0_{21}$    | $S_{a5} - S_{a7}$ | $E_1$        |
| 3  | $0_{12}$    | $S_{a2} - S_{a4}$ | $E_2$       | $S_{a5} - S_{a8}$ | $E_2$        |
| 4  | $0_{11}$    | $S_{a1} - S_{a3}$ | $E_2$       | $S_{a5} - S_{a8}$ | $E_2$        |
| 5  | $E_1$       | $S_{a1} - S_{a4}$ | $E_2$       | $S_{a5} - S_{a8}$ | $E_1 + E_2$  |
| 6  | $-E_1$      | $S_{a2} - S_{a3}$ | $0_{22}$    | $S_{a6} - S_{a8}$ | $-E_1$       |
| 7  | $-E_1$      | $S_{a2} - S_{a3}$ | $0_{21}$    | $S_{a5} - S_{a7}$ | $-E_1$       |
| 8  | $0_{12}$    | $S_{a2} - S_{a4}$ | $-E_2$      | $S_{a6} - S_{a7}$ | $-E_2$       |
| 9  | $0_{11}$    | $S_{a1} - S_{a3}$ | $-E_2$      | $S_{a6} - S_{a7}$ | $-E_2$       |
| 10 | $-E_1$      | $S_{a2} - S_{a3}$ | $-E_2$      | $S_{a6} - S_{a7}$ | $-E_1 - E_2$ |
| 11 | $0_{12}$    | $S_{a2} - S_{a4}$ | $0_{22}$    | $S_{a6} - S_{a8}$ | $0$          |
| 12 | $0_{12}$    | $S_{a2} - S_{a4}$ | $0_{21}$    | $S_{a5} - S_{a7}$ | $0$          |
| 13 | $0_{11}$    | $S_{a1} - S_{a3}$ | $0_{22}$    | $S_{a6} - S_{a8}$ | $0$          |
| 14 | $0_{11}$    | $S_{a1} - S_{a3}$ | $0_{21}$    | $S_{a5} - S_{a7}$ | $0$          |
| 15 | $-E_1$      | $S_{a2} - S_{a3}$ | $E_2$       | $S_{a5} - S_{a8}$ | $0$          |
| 16 | $E_1$       | $S_{a1} - S_{a4}$ | $-E_2$      | $S_{a6} - S_{a7}$ | $0$          |

tif, diğer köprüden aynı değerde negatif gerilim elde edilerek sıfır seviye gerilimi elde edilir. Ayrıca  $-2E$  ve  $2E$  üretimi için hariç tabloda gösterildiği gibi inverter çıkışında  $0$ ,  $E$ ,  $-E$  'nin nasıl üretileceği ile ilgili serbestlik dereceleri vardır.  $E$  ve  $-E$  'nin her biri dört yoldan, sıfır; altı yoldan üretilebilir. 3-fazlı sistem için ise tek fazlı inverterin aynı yapıdaki üç çıkışı ya yıldız ya da üçgen bağlanabilir

### III. ÇOK SEVİYELİ SPWM TEKNİĞİ

Darbe Genişlik Modülasyon (PWM) tekniği, geleneksel iki seviyeli inverterlerde çıkış gerilimi genlik ve frekansının kontrolü için geliştirilmiş birkaç teknikten

birdir. PWM tekniğinde amaç kare dalga şeklinde darbeler oluşturmak ve bu darbelerin genişliğini değiştirmek suretiyle çıkıştaki dalganın ana harmoniğini değiştirmektir. Darbelerin yarı periyottaki sayılarının artırılması ile anahtarlama harmoniklerinin frekansı yükseltilir. Böylece yük indüktansının harmonik akımlarını sınırlaması sağlanır. Genel olarak PWM sinyalleri yüksek frekanslı bir üçgen taşıyıcı dalga ile düşük frekanslı modülasyon (referans) dalgasının bir komparatörde karşılaştırılmasından elde edilir. Referans dalga olarak; kare dalga veya sinüs dalgası seçilebilir. PWM tekniğinin en yaygın olarak kullanılanları Kare Dalga PWM, Sinüzoidal PWM, Harmonik İlaveli PWM ve Uzak Vektör PWM dir.

PWM tekniğini uygulamanın en kolay ve en iyi yolu bir üçgen dalga ile sinüs dalgasını bir komparatörde karşılaştırmaktır. Bu yöntemde referans işaret olarak bir sinüs dalgası kullanıldığı için Sinüzoidal PWM (SPWM) olarak anılmaktadır. SPWM'de; sinüsün tepe değerinin ( $V_R$ ) üçgen taşıyıcı dalganın tepe değerine ( $V_C$ ) oranına

Modülasyon İndeksi denir ve  $M_a = \frac{V_R}{V_C}$  ile gösterilir.

Modülasyon indeksinin değiştirilmesi çıkış gerilimi ana harmonik genliğini ayarlar.  $M_a$  'nın ( $0 < 1$ ) değer aldığı aralığa lineer bölge denir. Bu bölgede çıkış gerilimi ana harmoniğinin genliği  $M_a$  ile doğrusal değişir. PWM harmonikleri ise anahtarlama frekansında ve onun katları olan frekanslarda ortaya çıkar. Ancak bu bölgede çıkış gerilimi ana harmoniğinin genliği yeterince büyük değildir. Bu olumsuzluğu gidermek için  $M_a > 1$  yapılır. Bu durum aşırı modülasyon olarak adlandırılır. Aşırı modülasyon yapmanın en büyük dezavantajı inverter çıkış geriliminde daha önceden olmayan harmoniklerin ortaya çıkmasıdır. Bununla birlikte SPWM'de üçgen taşıyıcı dalga frekansının ( $f_s$ ) referans dalga frekansına ( $f_m$ )

oranına frekans modülasyon oranı denir ve  $m_f = \frac{f_s}{f_m}$  ile

gösterilir.  $m_f$  ne kadar büyük olursa harmonik bileşenler ana harmonikten o derece uzaklaşır. Dolayısı ile inverterin çıkış kalitesi artar.

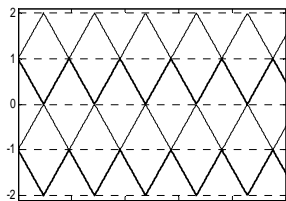
Çok seviyeli inverterlerde ise seviye sayısı arttıkça çıkış geriliminin sinüzoidal biçime daha çok yaklaşacağı dolayısıyla " Toplam Harmonik Bozulma (THD)'nın " azalacağı ve inverter çıkış kalitesinin artacağı açıktır. Çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak ve inverter çıkışını kontrol etmek için seviye sayısının artırılmasının yanı sıra farklı darbe genişlik modülasyon (PWM) teknikleri kullanılmakta olup, bu konudaki araştırma ve uygulama çalışmaları devam etmektedir [7]. Çok seviyeli inverterlerde kullanılan modülasyon teknikleri, iki

seviyeli PWM tekniklerinin genişletilmiş olup, en yaygın olarak kullanılanları; Uzak Vektör PWM ve Taşıyıcı Temelli PWM'dir. Çok seviyeli taşıyıcı temelli PWM teknikleri genellikle üçgen dalga olan birkaç taşıyıcı sinyal ile, genellikle sinüzoidal olan referans veya bir modülasyon dalgasının bir komparatörde karşılaştırılmasını gerektirir. En çok kullanılanları Sinüzoidal PWM (SPWM) ve Harmonik İlaveli PWM'dir.

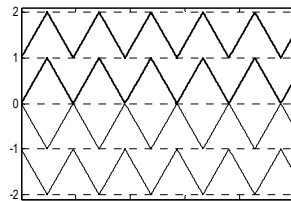
Çok seviyeli SPWM tekniğinde modülasyon sinyalleri aynı kalmak şartı ile taşıyıcı sinyallerin sayısı inverterin seviyesine bağlı olarak değişir. m seviyeli bir inverter için tepeden tepeye aynı  $V_c$  genlikte ve aynı  $f_s$  frekansta (m-1) tane taşıyıcıya gerek duyulur. Örneğin 5-seviyeli bir inverter için taşıyıcı sinyallerin sayısı dört olacaktır [8]. Bu PWM tekniğinde kullanılan taşıyıcıların temel olarak APO (Alternative Phase Opposition), PO (Phase Opposition) ve PH (Phase) olarak adlandırılan üç farklı yerleştirilme durumu ve bu taşıyıcı durumlarının kombinasyonu ile ortaya çıkarılmış Hibrit (Hybrid=H) ve Faz-Kaydırma (Phase-Shifted=PS) şeklinde iki tane daha yerleştirme durumu vardır [9]. Bütün dağılımlarda taşıyıcılar birbirine bitişik durumdadır. Sıfır referans taşıyıcı grubunun ortasına merkezleştirilmiştir. Ayrıca üç tane taşıyıcı durumu APO, PO, PH benzer faz ve hat gerilim dalga şekilleri üretirler.

APO dağılımda; her bir taşıyıcı bant bitişik banttan  $180^\circ$  faz kaydırılır. Yani bütün taşıyıcılar alternatif olarak zıt yapıdadır. Literatürde, bu dağılım kullanılarak yapılan çalışmalarda faz ve hat gerilimi için en önemli harmonikler taşıyıcı frekansı  $f_s$ 'nin yan bantlarında ortaya çıkmıştır.  $f_s$  de harmonik oluşmamıştır.

PO dağılımda; sıfır referansının üstündeki taşıyıcılar aynı fazda ve altındakiler aynı fazdadır. Ancak sıfır referansının üstündeki taşıyıcı grubu ile altındaki taşıyıcı grubu arasında  $180^\circ$  faz farkı vardır. Literatürde, bu dağılım kullanılarak yapılan çalışmalarda faz ve hat gerilimi için önemli harmonikler taşıyıcı frekansı  $f_s$  civarında ortaya çıkmıştır.



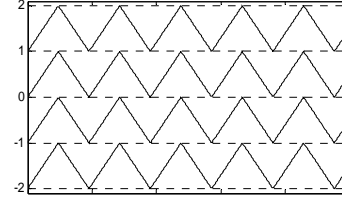
Şekil 3. APO dağılım



Şekil 4. PO dağılım

PH dağılımda; sıfır referansının üstündeki ve altındaki taşıyıcılar aynı fazdadır. Literatürde, bu dağılım

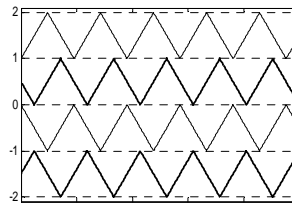
kullanılarak yapılan çalışmalarda faz gerilimi için önemli harmonikler taşıyıcı frekansı  $f_s$  civarında ortaya çıkmıştır. Fakat onun harmonik içeriği aynı fazda olduğu için hat geriliminde gözükmemektedir [5].



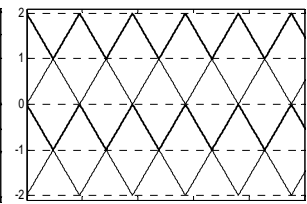
Şekil 5. PH dağılım

Faz-kaydırmalı (PS) dağılımda; bütün taşıyıcılar birbirinden  $\theta_c = \frac{360}{m-1}$  kadar faz kaydırılır [4]. Literatürde bu dağılım kullanılarak yapılan çalışmalarda faz ve hat gerilimi için en önemli harmonikler (m-1). $f_s$ 'nin yan bantlarında ortaya çıkmıştır ve inverterin seviye değerinin daha yüksek olduğu ayrıca ana harmonik ve en yakın önemli harmonik arasındaki aralığın diğer taşıyıcı durumlarına göre daha fazla olduğu gözlenmiştir

Hibrit (H) taşıyıcı dağılımı ise daha öncekilerin bir kombinasyonudur. Bu dağılımda taşıyıcılardan yarısı sıfır referansının üstünde yarısı altındadır. Sıfır referansının üstündeki taşıyıcılar tepeden-tepeye aynı genlikte ve aynı frekanslıdır. Fakat taşıyıcılar arasında  $\theta_c = \frac{360}{(m-1)/2}$  derece faz farkı vardır. Sıfır referansının altındaki taşıyıcılar içinde aynı durum söz konusudur. Literatürde, bu dağılım kullanılarak yapılan çalışmalarda faz ve hat gerilimi için en önemli harmonikler  $f_s$ 'nin  $[(m-1)/2]$  katlarında yoğunlaşmıştır [10].



Şekil 6. Faz-kaydırmalı dağılım



Şekil 7. Hibrit dağılım

Çok seviyeli inverterlerde,

- $M_a$ : Modülasyon indeksi,
- $V_R$ : Referans sinüsün genliği,
- $V_C$ : Üçgen taşıyıcı dalgasının genliği,
- $f_m$ : Referans sinüsün frekansı,
- $f_s$ : Üçgen taşıyıcı dalgasının frekansı,
- $m_f$ : Frekans modülasyon indeksi,

olmak üzere frekans modülasyon indeksi  $m_f = \frac{f_s}{f_m}$

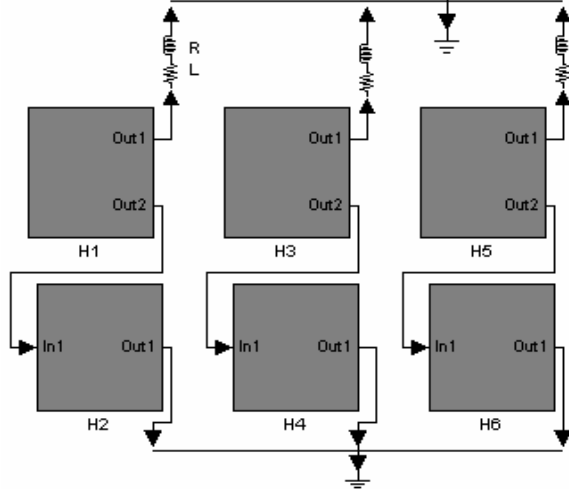
formülü ile hesaplanır. Yukarıda bahsedilen taşıyıcı dağılımları için modülasyon indeksi ise Tablo 2.'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır [5].

**Tablo 2.** Taşıyıcı dağılımları için modülasyon indekslerinin hesaplanması

|       | APO   | PO  | PH  | H               | PS                |
|-------|---|---|---|-----------------|-------------------|
| $M_a$ | $\frac{V_R}{\left(\frac{m-1}{2}\right) \times V_C}$ | $\frac{V_R}{\left(\frac{m-1}{2}\right) \times V_C}$ | $\frac{V_R}{\left(\frac{m-1}{2}\right) \times V_C}$ | $\frac{V_R}{2}$ | $\frac{V_R}{V_C}$ |

#### IV. BEŞ SEVİYELİ KASKAT İNVERTER İLE BİR RL YÜKÜNÜN BESLENMESİ

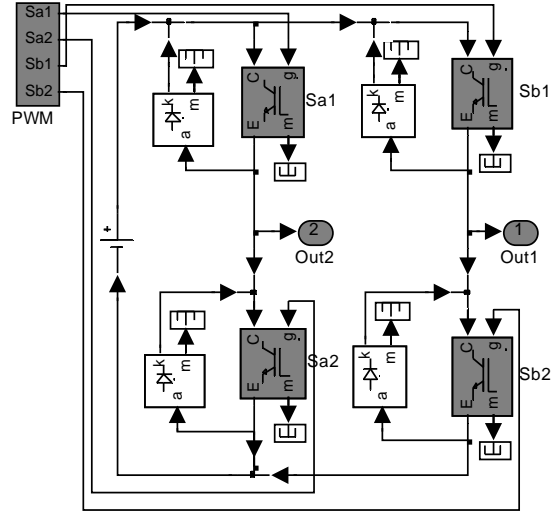
Yukarıda bahsedilen çok seviyeli SPWM tekniği kullanılarak düşük anahtarlama frekanslarında elde edilen tetikleme sinyalleri ile, 3-fazlı beş-seviyeli kaskat inverterin anahtarları anahtarlanarak inverterin çıkışında; harmonik içeriği gayet düşük değişken gerilim ve frekansta 5-seviyeli sinüzoidal çıkış almak mümkündür. Bunu göstermek amacıyla Matlab\ SimPower Systems'de kaskat inverterin 3-fazlı, IGBT yarıiletken anahtarlı beş seviyeli devresinin 3-fazlı bir RL yükünü beslemesi durumunda çok seviyeli SPWM tekniği kullanılarak simülasyonu yapılmıştır. Anahtarların PWM sinyallerinin elde edilmesinde APO taşıyıcı dağılımı kullanılmıştır.



**Şekil 8.** Üç fazlı, 5-seviyeli kaskat inverter devre modeli

Değişken gerilim ve frekansta 5-seviyeli sinüzoidal çıkış verebilen kaskat inverterin Power Systems ortamındaki modeli Şekil.8'de görülmektedir. Görüldüğü gibi bu modelde her faz için 2 adet H-hücre devresi ve 3-faz için toplam olarak 6 adet H-hücre devresi bulunmaktadır.

Burada kullanılan H-hücre devresinin yapısı ise yine Power Systems'de Şekil 9'da görülmektedir.

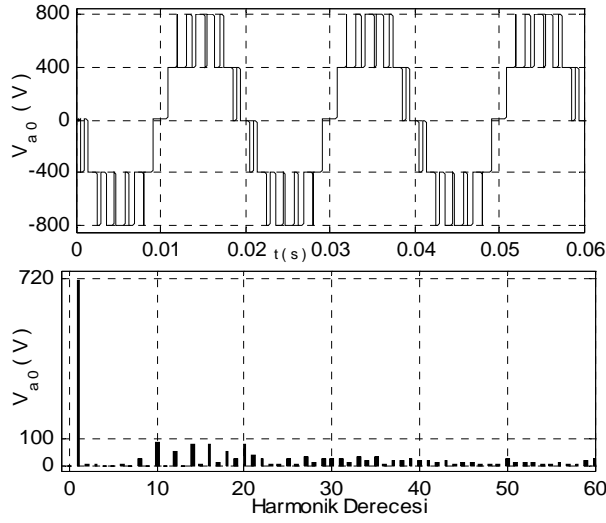


**Şekil 9.** Tam köprü inverter devre modeli

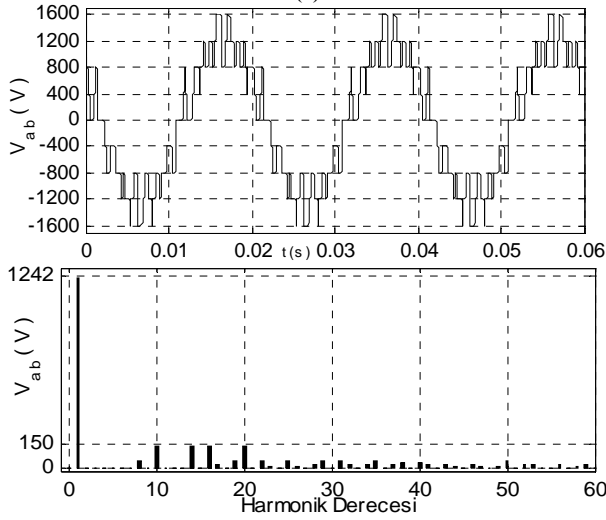
Beş seviyeli inverter ve beslediği yük için simülasyonda kullanılan parametreler ise aşağıdaki gibidir.

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| Dc kaynak gerilimi, E              | :400 V          |
| Modülasyon indeksi, $M_a$          | :0.9            |
| Referans dalgaının frekansı, $f_m$ | :50 Hz          |
| Taşıyıcı dalgaının frekansı, $f_s$ | :750 ve 1250 Hz |
| Snubber direnci, $R_s$             | :100 $\Omega$   |
| Snubber kapasitesi, $C_s$          | :220 nF         |
| Yük indüktansı, L                  | :30 mH ve 80mH  |
| Yük direnci, R                     | :15 $\Omega$    |

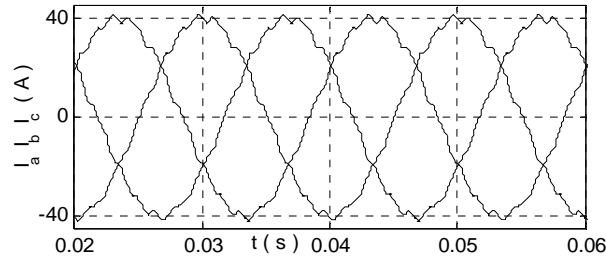
Yukarıda verilen simülasyon parametrelerinden yük indüktansının 30 mH ve 80 mH değerlerinin her ikisi için anahtarlama frekansının 750 ve 1250 Hz değerlerinde simülasyon yapıp sonuçlar verilmiştir. Şekil 10 ve 11'de yük indüktansının 30 mH değeri için anahtarlama frekansının sırasıyla 750 ve 1250 Hz değerleri için sonuçlar verilmiştir. Benzer şekilde Şekil 12 ve 13'te yük indüktansının 80 mH değeri için sonuçlar verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında; faz gerilimi, hat gerilimi ve 3-faz akımından görüldüğü gibi, çok seviyeli inverterler ile düşük anahtarlama frekanslarında bile geleneksel iki seviyeli inverterlere göre daha düzgün çıkış dalga şekilleri elde edilmektedir. Bununla birlikte inverterin seviye sayısı artırılırsa çıkış akım ve gerilim dalga şekilleri sinüzoidal forma daha yakın olacaktır. Dolayısı ile inverter çıkışındaki "Toplam Harmonik Bozulma (THD)" azalacaktır



(a)

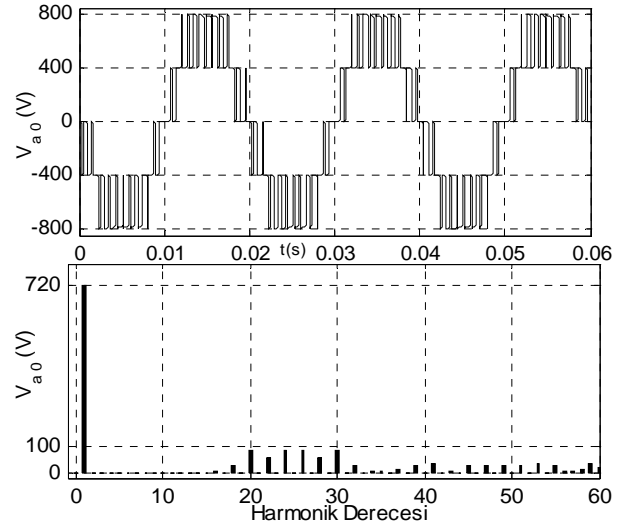


(b)

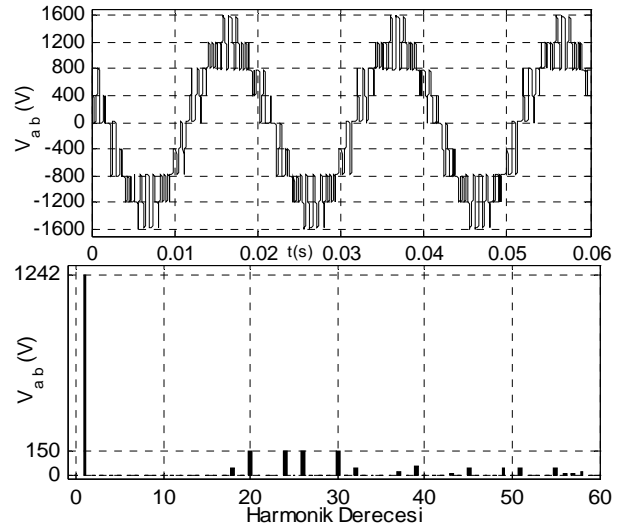


(c)

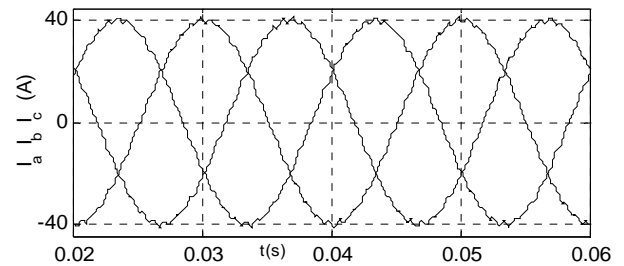
Şekil 10.  $L=30\text{mH}$  ve  $f_s=750\text{ Hz}$  için  
(a) Beş seviyeli faz gerilimi ve harmonik spektrumu  
(b) Dokuz seviyeli hat gerilimi ve harmonik spektrumu  
(c) Üç-faz akımları



(a)

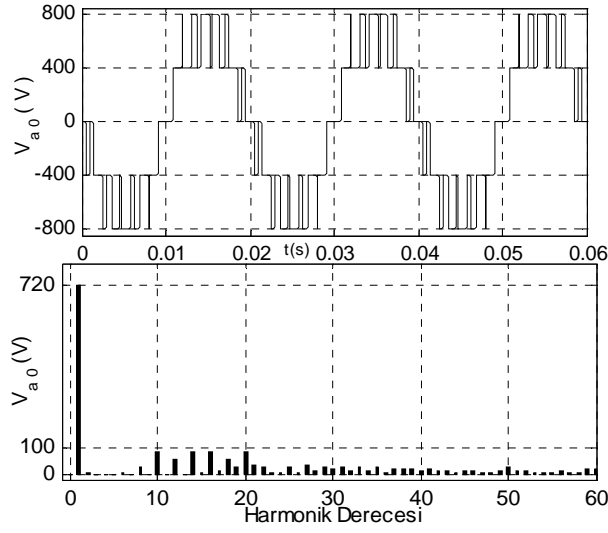


(b)

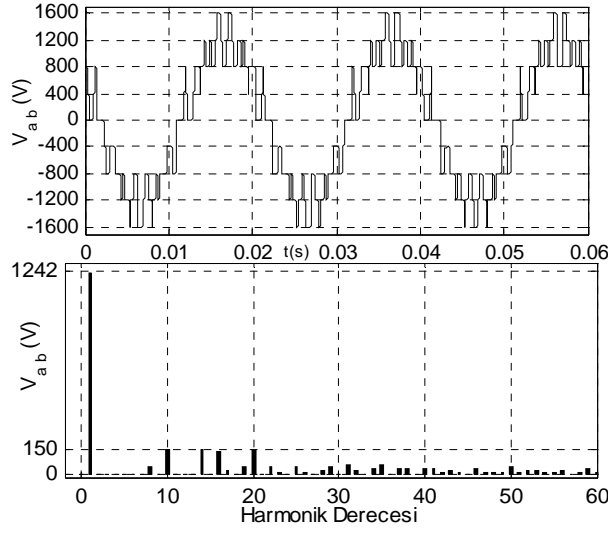


(c)

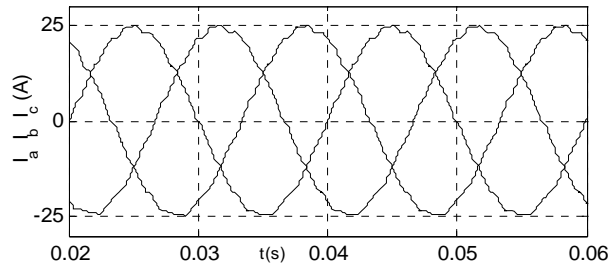
Şekil 11.  $L=30\text{mH}$  ve  $f_s=1250\text{ Hz}$  için  
(a) Beş seviyeli faz gerilimi ve harmonik spektrumu  
(b) Dokuz seviyeli hat gerilimi ve harmonik spektrumu  
(c) Üç-faz akımları



(a)

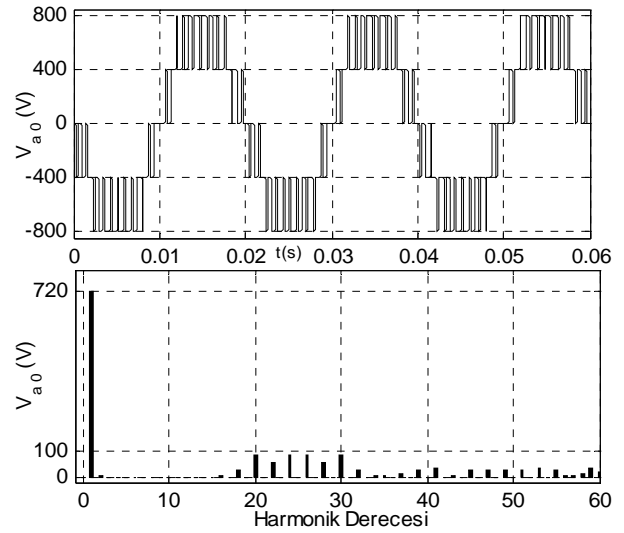


(b)

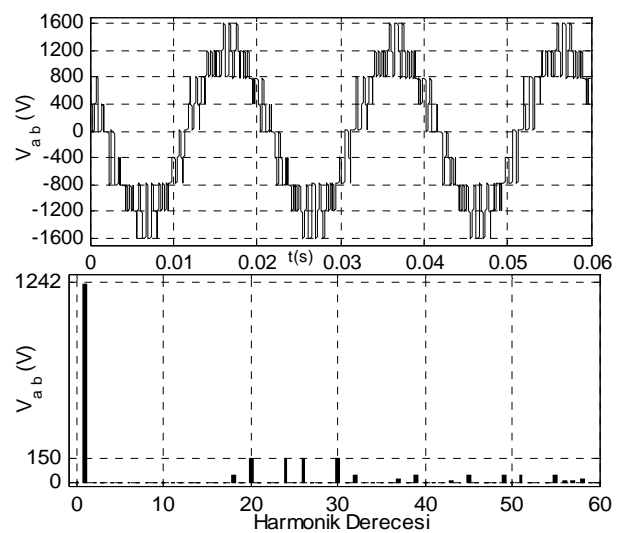


(c)

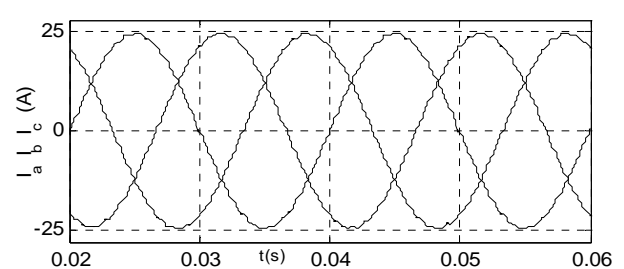
Şekil 12.  $L=80\text{mH}$  ve  $f_s=750$  Hz için  
(a) Beş seviyeli faz gerilimi ve harmonik spektrumu  
(b) Dokuz seviyeli hat gerilimi ve harmonik spektrumu  
(c) Üç-faz akımları



(a)



(b)



(c)

Şekil 13.  $L=80\text{mH}$  ve  $f_s=1250$  Hz için  
(a) Beş seviyeli faz gerilimi ve harmonik spektrumu  
(b) Dokuz seviyeli hat gerilimi ve harmonik spektrumu  
(c) Üç-faz akımları

## V. SONUÇLAR

Bu makalede; genel olarak, çok seviyeli inverterler, kaskat inverter ve çok seviyeli SPWM tekniği hakkında bilgi verildi. Ayrıca 5-seviyeli kaskat inverterin çalışması anlatılarak, Matlab\SimPower Systems'de kaskat inverterin 3-fazlı, IGBT yarıiletken anahtarlı beş seviyeli devresinin 3-fazlı bir RL yükünü beslemesi durumunda SPWM tekniği kullanılarak simülasyonu yapıldı. Makaleden, genel olarak ve simülasyon sonuçlarına bakılarak elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

1. Çok seviyeli kaskat inverter son yıllarda ac güç kaynaklarında ve sürücü sistemlerinde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu inverter topolojisi diğer çok seviyeli iki topolojiye göre daha avantajlıdır. Çünkü kenetleme diyot veya kondansatörleri gerektir-memektedir. Ayrıca en az dc kaynak gerilimine eşit değerde ac gerilim elde edilebilmektedir.

2. Çok seviyeli PWM teknikleri arasında SPWM tekniği, PWM sinyallerinin elde edilmesi ve pratik uygulamalar kullanılması açısından en kolay tekniktir. Çok seviyeli SPWM de seviye sayısına bağlı olarak kullanılan taşıyıcıların APO, PO, PH, ve Hibrit (H) olarak adlandırılan yerleştirilme durumlarından, inverter çıkışında yaklaşık olarak aynı faz ve hat gerilim dalga şekilleri elde edilmektedir. Faz-Kaydırma (PS) olarak adlandırılan taşıyıcı yerleştirilme durumunda ise literatürde diğerlerine göre biraz daha iyi sonuçlar alınmıştır.

3. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında; bütün sonuçlarda beş seviyeli invertere ait faz gerilimi  $-2E, -E, 0, E, 2E$  beş seviyeli olarak, hat gerilimi  $-4E, -3E, -2E, -E, 0, E, 2E, 3E, 4E$  dokuz seviyeli olarak elde edilmiştir ( $E = 400V$ ). Ayrıca bütün faz gerilimi spektrumlarında ana harmoniğin genliği  $(2E) * M_a = 800 * 0.9 = 720$  Volt ve hat gerilimi spektrum-larında ana harmoniğin genliği ise  $720\sqrt{3} \cong 1242$  Volt olarak elde edilmiştir.

Şekil 10.(a) ve Şekil 12.(a)'daki  $f_s=750$  Hz için elde edilen faz gerilimi harmonik spektrumlarına bakılırsa, harmonikler  $m_f = 15$  ve onun katları ve yan batlarında, Şekil 11.(a) ve Şekil 13.(a)'daki  $f_s=1250$  Hz için elde edilen faz gerilimi harmonik spektrumlarına bakılırsa, harmonikler  $m_f = 25$  ve onun katları ve yan batlarında ortaya çıkmıştır. Ayrıca bütün spektrumlarda dikkat edilecek diğer nokta, ana harmoniğe yakın harmonik genliklerinin, iki ve üç seviyeli inverterlere kıyasla daha küçük olduğudur. Bu ise beş-seviyeli inverterden daha iyi

çıkış alınmasını sağlamaktadır. Bununla birlikte, üç-fazlı sistemden dolayı bütün hat gerilimi spektrumlarında faz geriliminin spektrumlarından farklı olarak üç ve üçün katı harmonikler ortaya çıkmamıştır.

Sonuçlar anahtarlama frekansı bakımından değerlendirildiğinde; anahtarlama frekansı arttıkça geleneksel gerilim kaynaklı inverterlerde olduğu gibi daha iyi çıkış dalga şekilleri elde edilmektedir. Çünkü  $f_s$  arttıkça ana harmoniğe en yakın harmoniklerin ortaya çıktıkları frekans değerinde bir önekinde göre büyük olmaktadır. Bu durum yük indüktansının 30 mH değeri için elde edilen Şekil 10-11 kendi aralarında ve yük indüktansının 80 mH değeri için elde edilen Şekil 12-13 kendi aralarında karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Bununla birlikte bu düşük anahtarlama frekansında elde edilen sonuçlar iki seviyeli inverterlere kıyasla çok daha iyidir. Bunun sebebi; çok seviyeli inverterlerde ana harmoniğe en yakın harmoniklerin genliklerinin küçük olmasıdır.

Sonuçlar yük indüktansı bakımından değerlendirildiğinde ise; yük indüktansının artmasının inverterin çıkış gerilim dalga şekillerinde bir etkisi olmamaktadır. Çünkü gerilim kaynaklı inverterlerde çıkış gerilimi tamamen yükten bağımsızdır. Yük indüktansının artması sadece yük akımındaki dalgalanmayı azaltmaktadır. Dolayısı ile yük akımı daha düzgün olmaktadır. Bu durum anahtarlama frekansının 750 Hz değeri için elde edilen Şekil 10-12 kendi aralarında ve 1250 Hz değeri için elde edilen Şekil 11-13 kendi aralarında karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Choi N.S., J.G. Cho and G.H. Cho "A General Circuit Topology of Multilevel Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat. , vol. 2, No: 1, Mar. 1991.
- [2]. Timothy L. Skvarenina "The Power Electronics Hand-book", Purdue University West Lafayette, Indiana, 2002.
- [3]. Rodriguez, J. , J.S. Lai and F.Z. Peng "Multilevel Inverter: A survey of Topologies, Controls and Applications", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 49, No: 4, August 2002.
- [4]. Bhagwat P. M. and V. R. Stefanovic, "Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-19, No.6 Nov. /Dec., 1983, pp.1057-1069.



- [5]. Carrara, G., Simone Gardella, Mario Marchesoni, “A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis”, IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 7, no.3, January-1992.
- [6]. Calais, M.,V.G Agelidis, and M.S. Dymond, “When to Switch Which Switch in a Five Level Single Phase Cascaded Inverter ”In Conference Proceedings of the AUPEC/EECON'99, Darwin, Australia, September 1999
- [7]. Tuncer, S., Y. Tatar, “Çok Seviyeli Kaskat İnverterlerde SPWM Tekniğinin Kullanımı”, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7.Cilt, 2.Sayı, Temmuz-2003.
- [8]. Lai, J. S. , F. Z. Peng, “Multilevel Converters A New Breed of Power Converters,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, May 1996, pp. 509-517.
- [9]. Agelidis, V. G. , and M. Calais, “Application specific harmonic performance evaluation of multicarrier PWM techniques,” in Proc. IEEE PESC'98, Fukuoka, Japan, May 1998, pp. 172–178.
- [10]. Tolbert, L.M. and Thomas G. Habetler, “Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.35, No.5, Sept./Oct., 1999.