

ÇOK SEVİYELİ KASKAD İNVERTERLERDE SPWM TEKNİĞİNİN KULLANIMI

Servet TUNCER, Yetkin TATAR

Özet-Çok seviyeli kaskad inverterler yüksek güçlü uygulamalar için yeni bir güç dönüşüm seçeneği olarak ortaya çıkmıştır. Bu inverterler, farklı seviyelerdeki dc giriş gerilimlerinden sinüzoidal bir çıkış gerilimini sentezlemektedir. Çok seviyeli kaskad inverterlerin en önemli avantajı, anahtarlama frekansını artırmadan veya inverterin güç çıkışını azaltmadan çıkış dalga şekillerindeki harmoniklerin azaltılmasıdır.

Bu makalede; çok seviyeli kaskad inverterler için Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyonu (Sinusoidal Pulse Width Modulation = SHEPWM) tekniğinin kullanımı açıklanmıştır. Bu teknik, çok seviyeli SPWM tekniği olarak adlandırılır. Çok seviyeli SPWM tekniği basit, etkili ve geniş modülasyon indeksi aralığında iyi sonuçlar vermektedir.

Anahtar Kelimeler - Çok Seviyeli Kaskad İnverter, Çok Seviyeli SPWM Tekniği.

Abstract- The multilevel cascade inverters are emerging as a new breed of power converter option for high power applications. These inverters are to synthesize a sinusoidal output voltage from several levels of dc input voltages. One of the significant advantages of multilevel cascade inverters is the harmonics reduction in the output waveform without increasing switching frequency or decreasing the inverter power output.

This paper concerns using of sinusoidal pulse width modulation technique (SPWM) for multilevel cascade inverters. This technique is called multilevel SPWM technique. The multilevel SPWM technique is a simple and effective, and gives good results in a wide range of modulation index.

Key Words – Multilevel Cascade Inverter, Multilevel SPWM Technique.

I. GİRİŞ

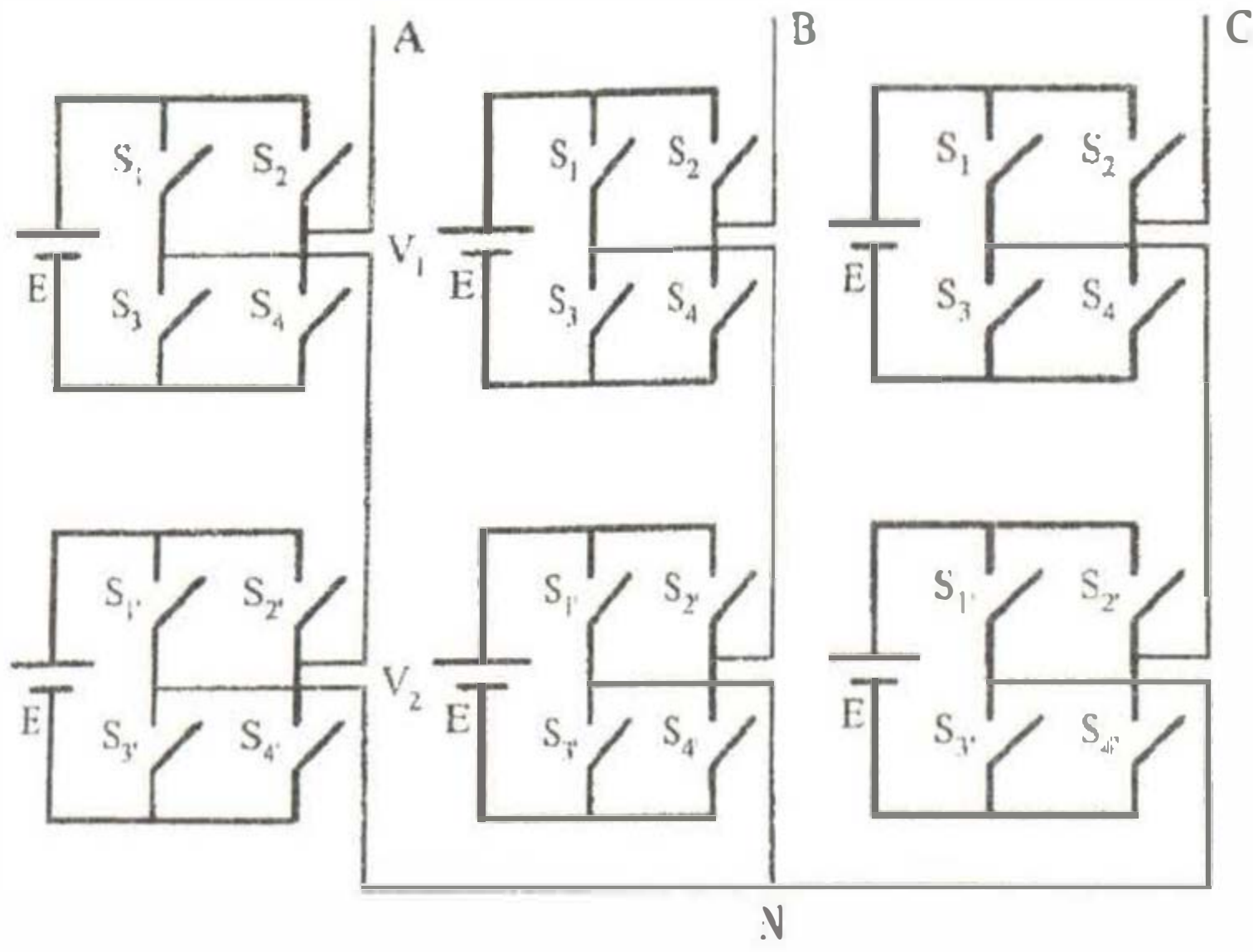
Çok seviyeli inverterler (ÇSİ) son yıllarda, özellikle yüksek güçlü uygulamalar için oldukça ilgi çekmektedir. Bu inverterler; kesintisiz güç kaynakları, statik VAR kompanzatorlar ve sürücü sistemler gibi endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar [1-12]. Yüksek güçlü uygulamalarda klasik inverterler; düşük verim, büyük transformatorlerin kullanılması nedeni ile yüksek fiyat, dv/dt ve di/dt 'nin bir sonucu olarak güç devreleri üzerinde büyük akım-gerilim darbeleri gibi dezavantajlara sahiptirler. Devre topolojileri nedeniyle ÇSİ'ler ise yüksek güçlü uygulamalar için yeni bir güç dönüşüm sistemidir. ÇSİ'ler klasik inverterlere göre; çıkış geriliminin harmonik spektrumu, verim, akım-gerilim darbeleri ve güç faktörü açısından daha iyi bir performansa sahiptir [2].

İlk ÇSİ devresi 1981 yılında Nabae tarafından geliştirilmiştir [4]. ÇSİ'ler farklı dc gerilim seviyelerini sentezleyerek sinüzoidal forma yakın bir çıkış gerilimi oluştururlar. Bu inverterlerin en önemli avantajı, anahtarlama frekansını artırmadan veya inverterin güç çıkışını azaltmadan çıkış dalga şekillerindeki harmoniklerin azaltılmasıdır [2,3].

En çok kullanılan ÇSİ tipleri [3];

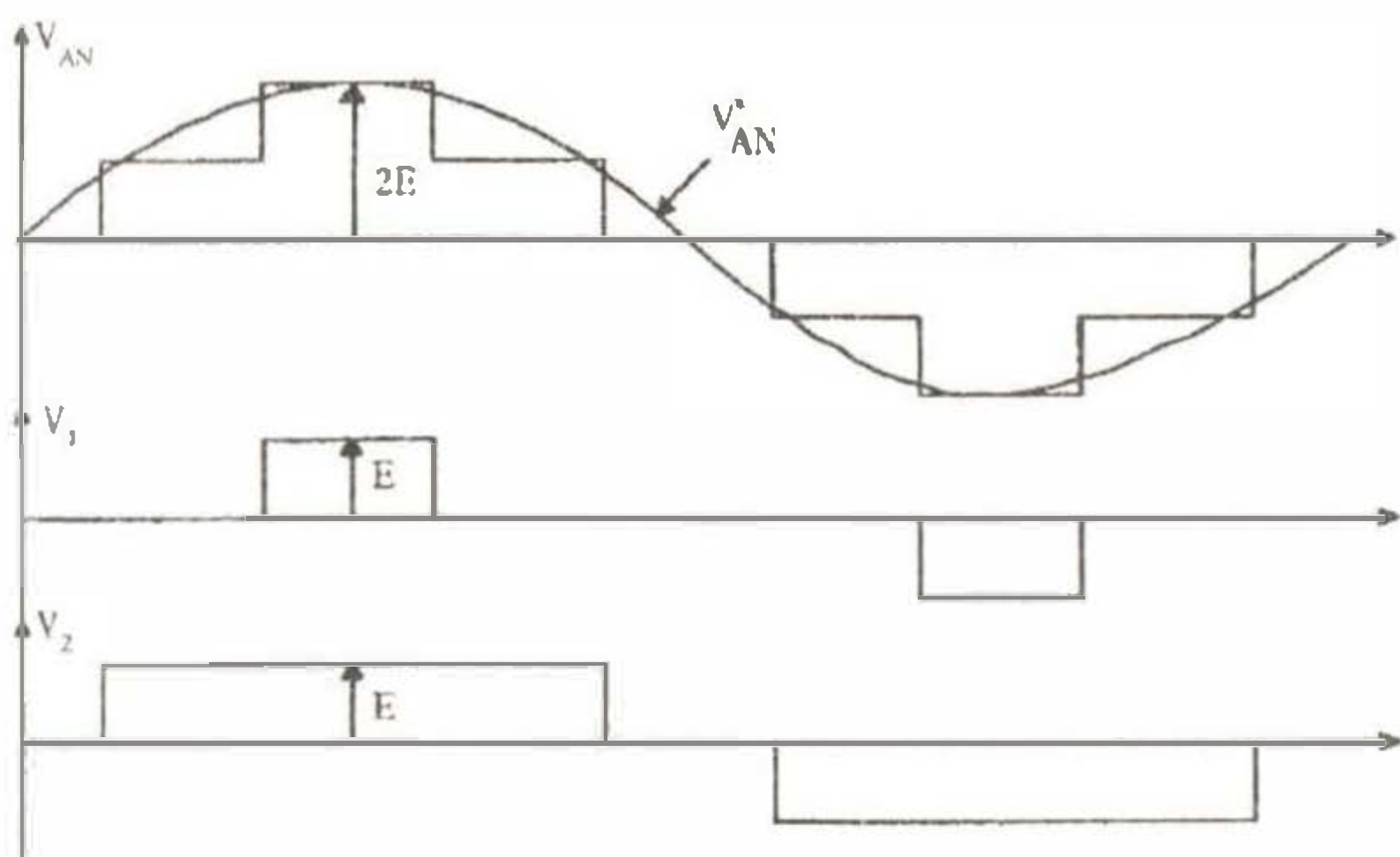
- Diyot-kenetlemeli ÇSİ,
- Kapasite-kenetlemeli ÇSİ,
- Kaskad ÇSİ.

Kaskad ÇSİ'ler yukarıda belirtilen inverter tipleri arasında en az sayıda devre elemanı gerektirirler. Bu inverterlerde çıkış geriliminin seviyesi tam köprü hücrelerin eklenmesi veya çıkarılması ile kolaylıkla ayarlanabilir. Bununla birlikte, dc kaynakların çoklu yapısı ile de maliyet artar. Bu inverterde her bir seviye aynı yapıda olduğu için paket devre haline getirmek mümkündür. Bu konfigürasyon son zamanlarında AC güç kaynakları ve ayarlanabilir hız sürücü uygulamalarında oldukça popüler olmaktadır [5]. Şekil 1'de üç-fazlı 5-seviyeli kaskad inverterin devresi verilmiştir. Şekil 1'den görüleceği üzere, her bir tan-köprü hücrenin çıkış gerilimleri seri olarak bağlanarak faz gerilimleri elde edilir. Böylece, faz gerilimi iki inverter köprüsünün çıkış gerilimlerinin toplamı olacaktır ($V_{AN} = V_1 + V_2$).



Şekil 1. Üç-faz 5-seviyeli kaskad inverterin güç devresi

Kaskad inverterlerde her bir hücre farklı bir de kaynaktan beslenir ve hücrelerin çıkış gerilimleri sentezlenerek şekil 2'de gösterildiği gibi faz gerilimleri elde edilir. Burada, V_{AN} olarak belirtilen A fazının referans değeridir. Anahtarların farklı kombinasyonları ile her bir inverter köprüsünde seviyesi $+E$, $-E$, ve 0 olmak üzere 3 farklı çıkış gerilimi oluşur. Kaskad inverterde tam köprü hücrelerin çıkış gerilimlerini sentezlemek için tüm anahtarlama durumları Tablo I'de verilmiştir. Burada 1 durumu ilgili anahtarın kapalı olduğunu ve 0 durumu anahtarın açık olduğunu belirtmektedir. Tablodan görüleceği üzere, V_1 ve V_5 çıkış seviyesi için sadece bir anahtarlama durumu olmasına karşın, orta seviyelerde birden daha fazla anahtarlama durumu mevcuttur. İnverterin çıkış faz geriliminin seviye sayısı ise, $m=2s+1$ bağıntısı ile hesaplanır. Burada s ; dc kaynakların sayısıdır. Örneğin; 5-seviyeli kaskad inverterlerde her fazda 2 adet tam-köprü hücre ve 2 adet izolasyonlu dc kaynak bulunmaktadır.



Şekil 2. 5-seviyeli kaskad inverterde V_{AN} faz gerilimi ve tam köprü hücrelerin çıkış gerilimleri.

Bir inverterin performansı çıkış geriliminin harmonik bileşenleri ile ilişkilidir. Güç elektroniği araştırmacıları böyle dalga şekillerindeki harmonikleri azaltmak için bir çok kontrol teknikleri üzerine çalışmaktadırlar. Bugüne kadar inverter topolojilerine uygulanan bir çok kontrol

teknik vardır. ÇSİ topolojilerinde en çok kullanılan kontrol teknikleri şunlardır [3];

- Sinüzoidal Darbe Genişlik Modülasyon (SPWM) tekniği
- Seçilen harmonikleri yok eden SHEPWM tekniği
- Uzak Vektör Darbe Genişlik Modülasyon (SVPWM) tekniği.

SPWM tekniği aşırı modülasyon bölgesini de ($1 < M_a$) içeren tüm çalışma koşullarında iyi sonuçlar vermektedir. Bu teknik basit yapısı nedeniyle tercih edilir.

Tablo I. 5-seviyeli kaskad inverterin A-faz geriliminin seviyeleri ve anahtarlama durumları.

V_{AN} Faz gerilimi	Anahtarlama durumları							
	S_1	S_2	S_3	S_4	$S_{1'}$	$S_{2'}$	$S_{3'}$	$S_{4'}$
$V_5 = 2E$	1	0	0	1	1	0	0	1
$V_4 = E$	0	0	1	1	1	0	0	1
	1	1	0	0	1	0	0	1
	1	0	0	1	1	1	0	0
	1	0	0	1	0	0	1	1
$V_3 = 0$	0	0	1	1	1	1	0	0
	0	1	1	0	1	0	0	1
	1	1	0	0	0	0	1	1
	1	0	0	1	0	1	1	0
	0	0	1	1	0	0	1	1
$V_2 = -E$	1	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	1	1	0
	0	1	1	0	0	0	1	1
	1	1	0	0	0	1	1	0
$V_1 = -2E$	0	1	1	0	0	1	1	0

Bu makalede; çok seviyeli SPWM tekniği ile 5-seviyeli kaskad inverterin çıkış geriliminin genlik ve frekansının kontrolü yapılmaktadır. Bunun için; ilk olarak en çok kullanılan çok seviyeli SPWM tekniklerine yer verilmiştir. Bahsedilen her çok seviyeli SPWM tekniği için taşıyıcı sinyallerin dağılımları, elde edilen çıkış gerilimi ve harmonik analizleri için sonuçlar verilmiştir. İkinci olarak, çok seviyeli SPWM tekniği kullanılarak, belirli bir modülasyon indeksi için inverter çıkışında üç fazlı gerilimler elde edilmiş olup bir yıldız-bağlı R-L yük sistemi beslenmiştir.

II. ÇOK SEVİYELİ SPWM TEKNİKLERİ

SPWM tekniği kare dalga içerisindeki harmonikleri elemine eden en eski tekniklerden birisidir [2]. Bu teknikte, taşıyıcı sinyal ile referans sinyaller karşılaştırılarak inverter devresindeki anahtarlar için gerekli tetikleme sinyalleri elde edilir. Taşıyıcı sinyal olarak çoğunlukla üçgen dalga şekli kullanılır [1,6]. ÇSİ'ler için kullanılan SPWM teknikleri, iki seviyeli inverterlerde kullanılan SPWM tekniklerinin

geniştirilmiş halidir [1]. Çok seviyeli SPWM tekniğinde referans sinyalleri aynı kalmak şartıyla taşıyıcı sinyallerin sayısı inverterin seviyesine bağlı olarak artırılır. İnverterin seviye sayısı m olarak alınırsa genliği ve frekansı birbirine eşit m-1 tane taşıyıcı sinyal gerekir. Böylece bu taşıyıcı sinyaller her faz için referans olan sinüs dalgalar ile karşılaştırılır.

ÇSİ'lerde modülasyon indeksi ve frekans indeksi sırasıyla şu şekilde belirtilir [1].

$$M_a = \frac{A_m}{(m-1)A_c} \quad (1)$$

$$M_f = \frac{f_c}{f_m} \quad (2)$$

Burada;

A_m :Referans sinyalin genliği,

A_c :Taşıyıcı sinyalin genliği,

f_m :Referans sinyalin frekansı,

f_c :Taşıyıcı sinyalin frekansı.

Çok seviyeli SPWM teknikleri taşıyıcı sinyallerin polarite ve faz değişimine göre iki grupta incelenir [5,8].

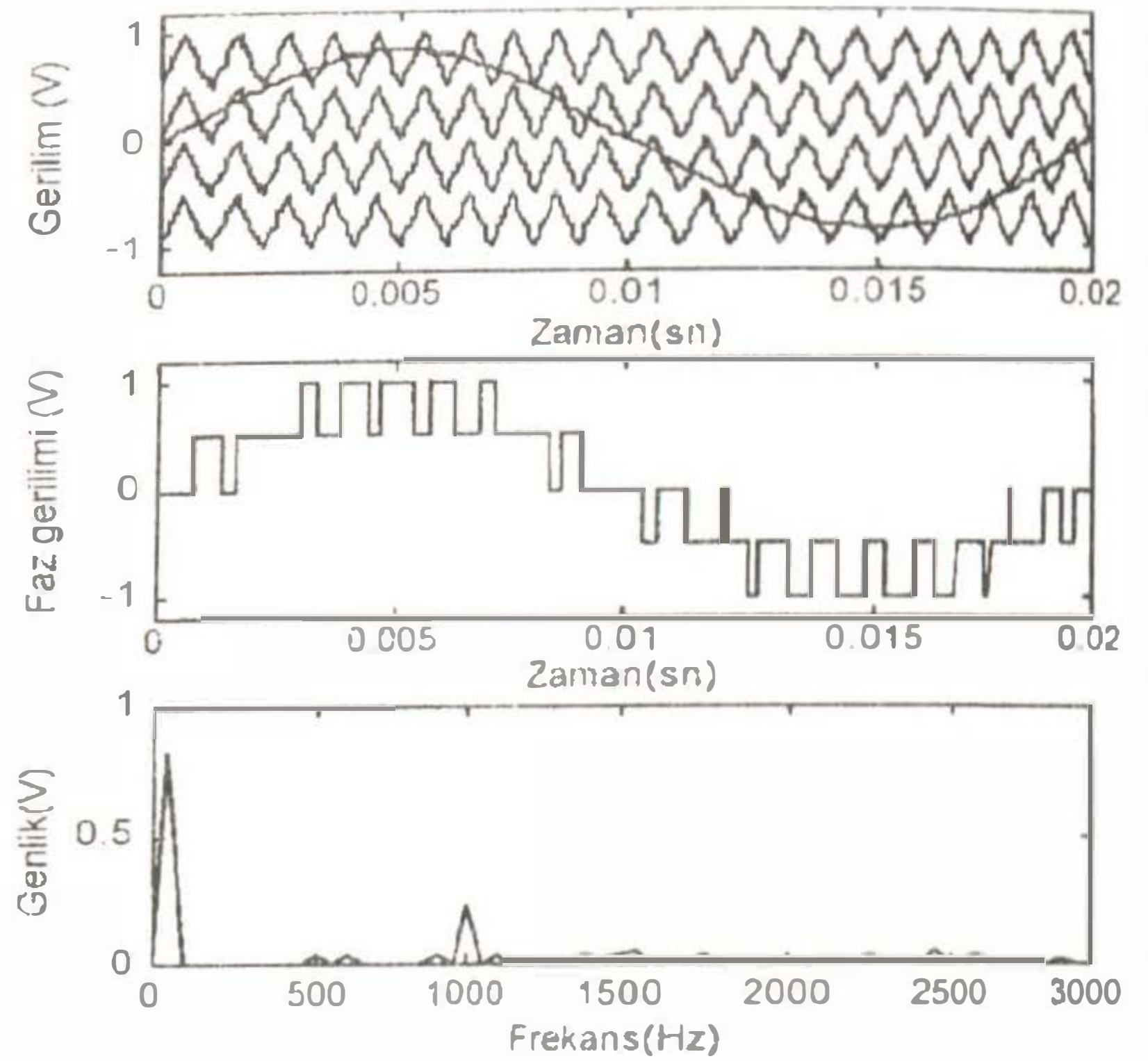
II.1 Taşıyıcı Sinyallerin Polarite Değişimi

Bu teknik, taşıyıcı sinyallerin muhtemel dağılımları için karşılaştırmalı bir değerlendirmeye dayanır. 5-seviyeli bir inverterde taşıyıcı sinyallerin dağılımı için 3 farklı yol mevcuttur [5].

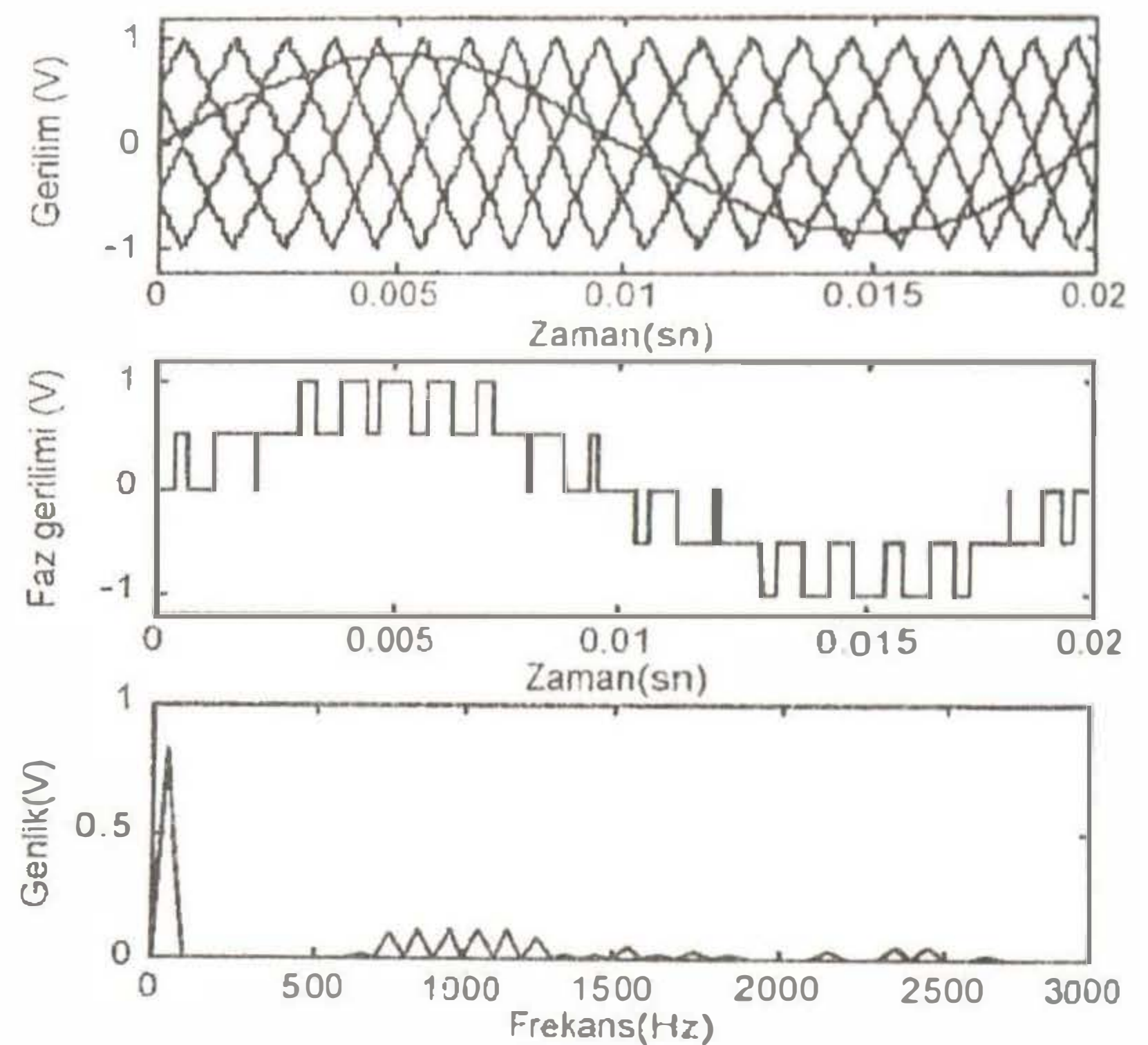
1. A-Tipi: Tüm taşıyıcı sinyaller aynı fazdadır.
2. B-Tipi: Tüm taşıyıcı sinyaller birbirine zıttır
3. C-Tipi: Sıfır referans değerinin üstündeki tüm taşıyıcı sinyaller aynı fazda ve bu referans değerinin altındaki taşıyıcı sinyaller ters fazdadır.

$M_a = 0.85$, $f_m = 50\text{Hz}$ ve $f_c = 1\text{kHz}$ seçilerek, taşıyıcı sinyallerin polarite değişimi için benzetimler yapılmış ve sonuçları şekil 3-5'de verilmiştir. Şekillere dikkat edilirse; inverterin faz gerilimi 5-seviyeli olup, temel bileşeni 50 Hz'de mevcuttur.

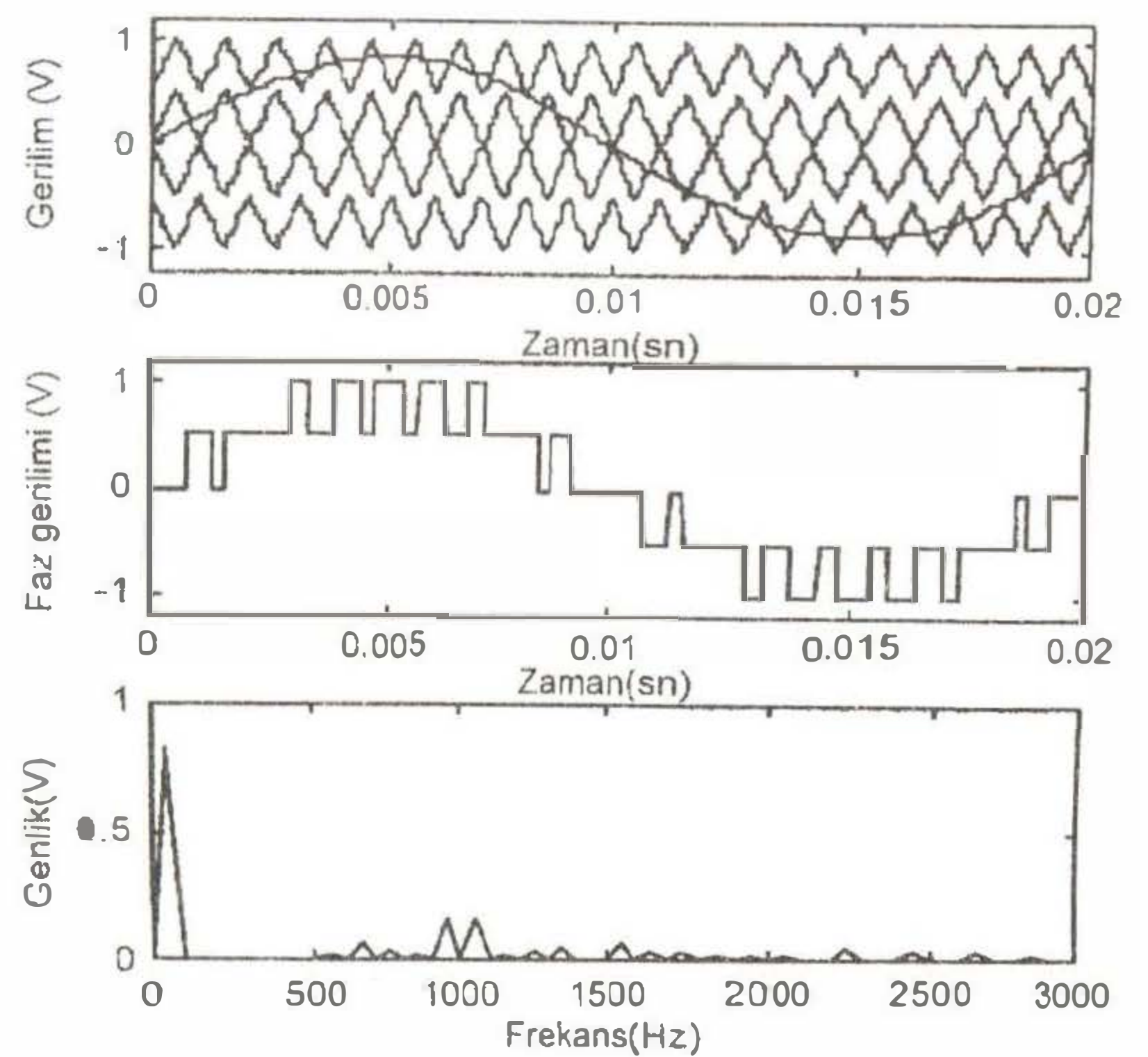
Taşıyıcı sinyallerin farklı şekillerde dağılımları ile her bir durumda çıkış geriliminin spektral yapısı da farklılıklara sahiptir (şekil 3-5). Bu teknikte; düşük dereceden harmonikler yok edilmekte fakat taşıyıcı sinyalin frekansında ve yan bant frekanslarda harmonikler oluşmaktadır. Taşıyıcı sinyalin frekansı temel frekanstan oldukça yüksek seçildiğinden bu harmonikler çıkış geriliminde büyüklük açısından önem arz etmezler. Ayrıca gerekli görüldüğü takdirde filtre devreleri ile de yüksek dereceden harmonikler yok edilebilmektedir [5].



Şekil 3. A-Tipi için dalga şekilleri



Şekil 4. B-Tipi için dalga şekilleri



Şekil 5. C-Tipi için dalga şekilleri

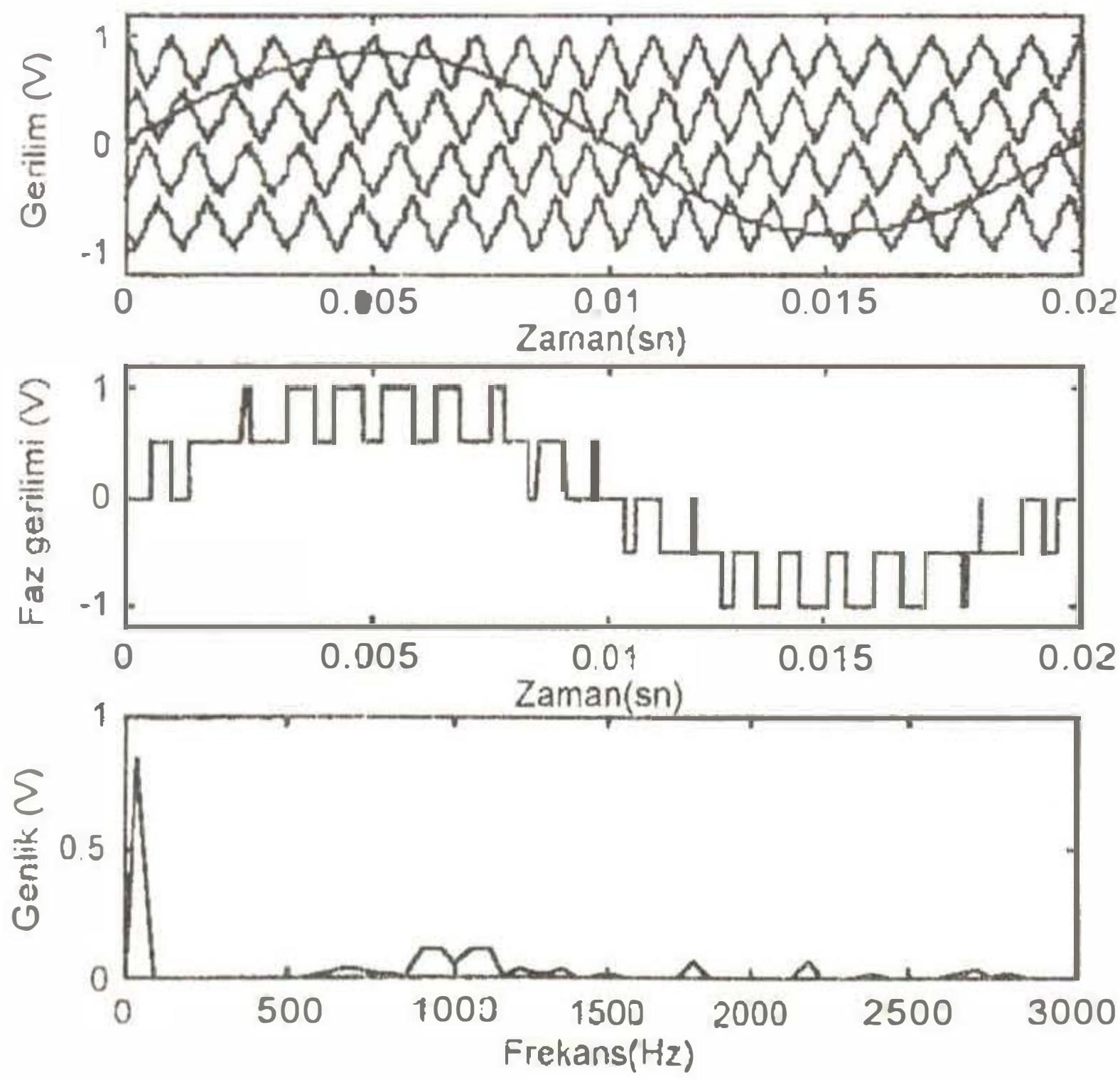
II.2 Taşıyıcı Sinyallerin Faz Değişimi

Bu teknikte; taşıyıcı sinyaller birbirleri ile fazları kaydırılmış durumdadırlar[1,2,10,13]. Örnek olarak; 5-seviyeli bir inverterde şekil 6'da gösterildiği gibi 90° 'lik faz farkı ile taşıyıcı sinyaller oluşturulmuştur. Taşıyıcı sinyallerin, seviye sayısına bağlı olarak ne kadar kaydırılacağı (3) denklemi yardımıyla hesaplanır.

$$\theta = \frac{360^\circ}{m-1} \quad (3)$$

Burada; θ faz kaydırma açısıdır.

Şekil 6'da $M_a = 0.85$, $f_m = 50\text{hz}$ ve $f_c = 1\text{khz}$ için taşıyıcı sinyallerin faz değişimine göre benzetim sonuçları verilmiştir. Faz geriliminin harmonik spektrumundan görüleceği üzere temel bileşenin genliği bölüm II.1'de verilen çok seviyeli SPWM teknikleri ile aynı değerde olmaktadır. Bununla birlikte, bu teknikle inverterin çıkış akımı ve gerilimindeki toplam harmonik bozulma (THD) daha düşüktür [1].



Şekil 6. Taşıyıcı sinyalin faz değişimine ilişkin dalga şekilleri

SPWM tekniğinin gerçek zamanlı uygulamalarında yüksek hızlı mikroişlemciler ihtiyacı vardır. Bu durum basit yapılarına karşın bu tekniğin dezavantajını oluşturur. Bununla birlikte, mikroişlemcilerdeki son yıllardaki gelişmelere paralel olarak artık SPWM tekniğinin bu dezavantajı da ortadan kalkmaktadır.

Üç-fazlı inverterlerde, her faz bacağındaki anahtarlar için gerekli tetikleme sinyalini üretmek için iki farklı yöntem kullanılır [9]. Birinci yöntemde; bir taşıyıcı sinyal kümesi 120° fazı kaydırılmış sinüzoidal referans dalgalarla karşılaştırılmaktadır (tek-faz modülasyonu). İkinci yöntemde ise 3 farklı taşıyıcı sinyal kümesi kendi aralarında 120° faz farkı ile yerleştirilir ve sadece bir

referans sinüzoidal dalga ile karşılaştırılır (üç-faz modülasyonu).

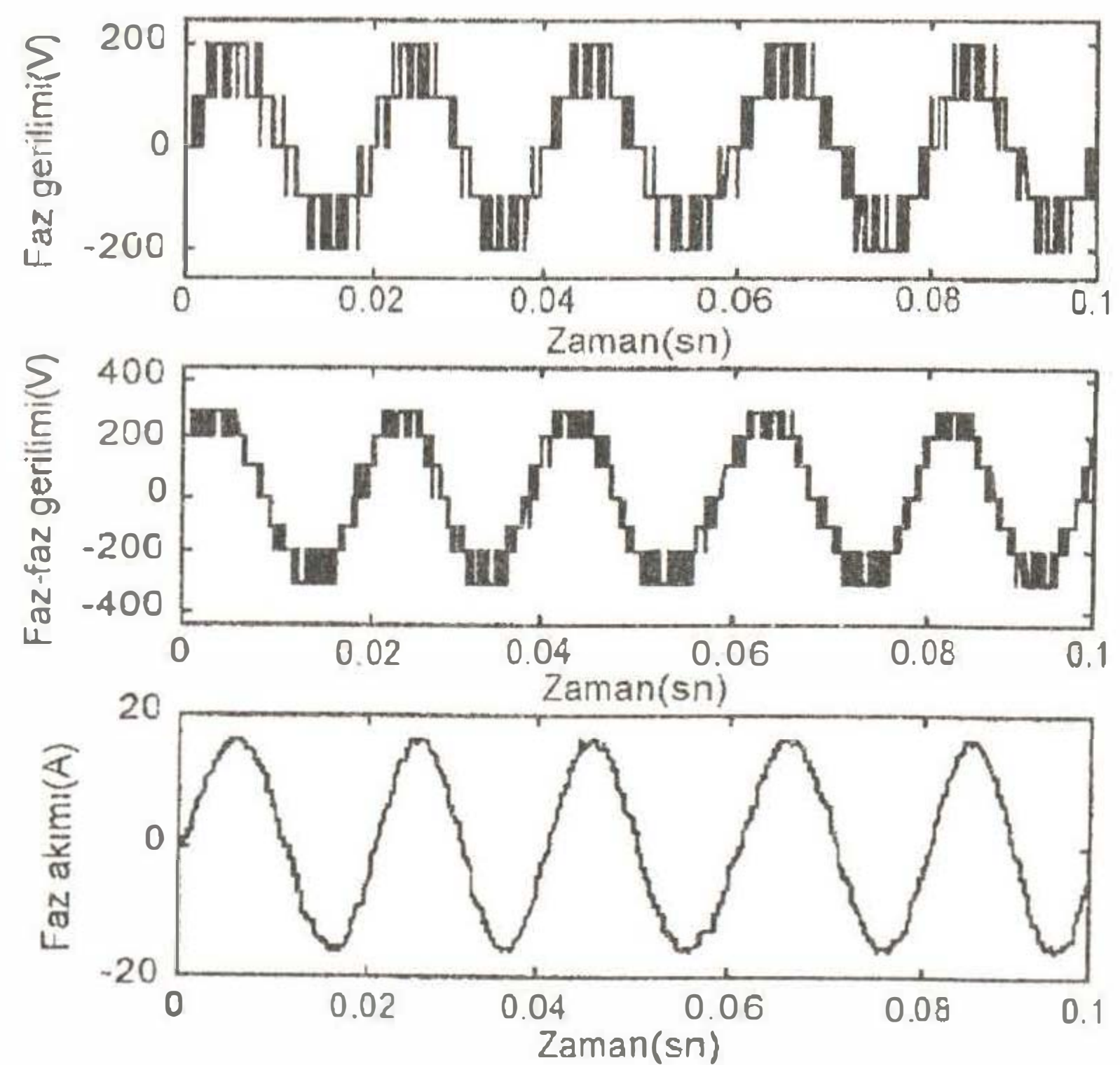
III. 5-SEVİYELİ KASKAD İNVERTER İLE BİR R-L YÜK SİSTEMİNİN BESLENMESİ

Çok seviyeli SPWM teknikleri kullanılarak istenen genlik ve frekansta üç-fazlı gerilimler elde edilebilmektedir. Bölüm II'de bahsedilen tek faz modülasyonu kontrol mantığına göre şekil 1'de verilen 5-seviyeli kaskad inverter çıkışında üç-fazlı gerilimler üretilerek bir yıldız bağlı R-L yük sistemi beslenmiştir. Taşıyıcı sinyallerin polarite değişimini kısmında açıklanan A-tipi için benzetimler yapılmış olup, sonuçları şekil 7-8'de verilmiştir. Tüm benzetim sonuçları MATLAB/SIMULINK kullanılarak elde edilmiştir. Benzetimlerde kullanılan devre parametreleri Tablo II'de görülmektedir.

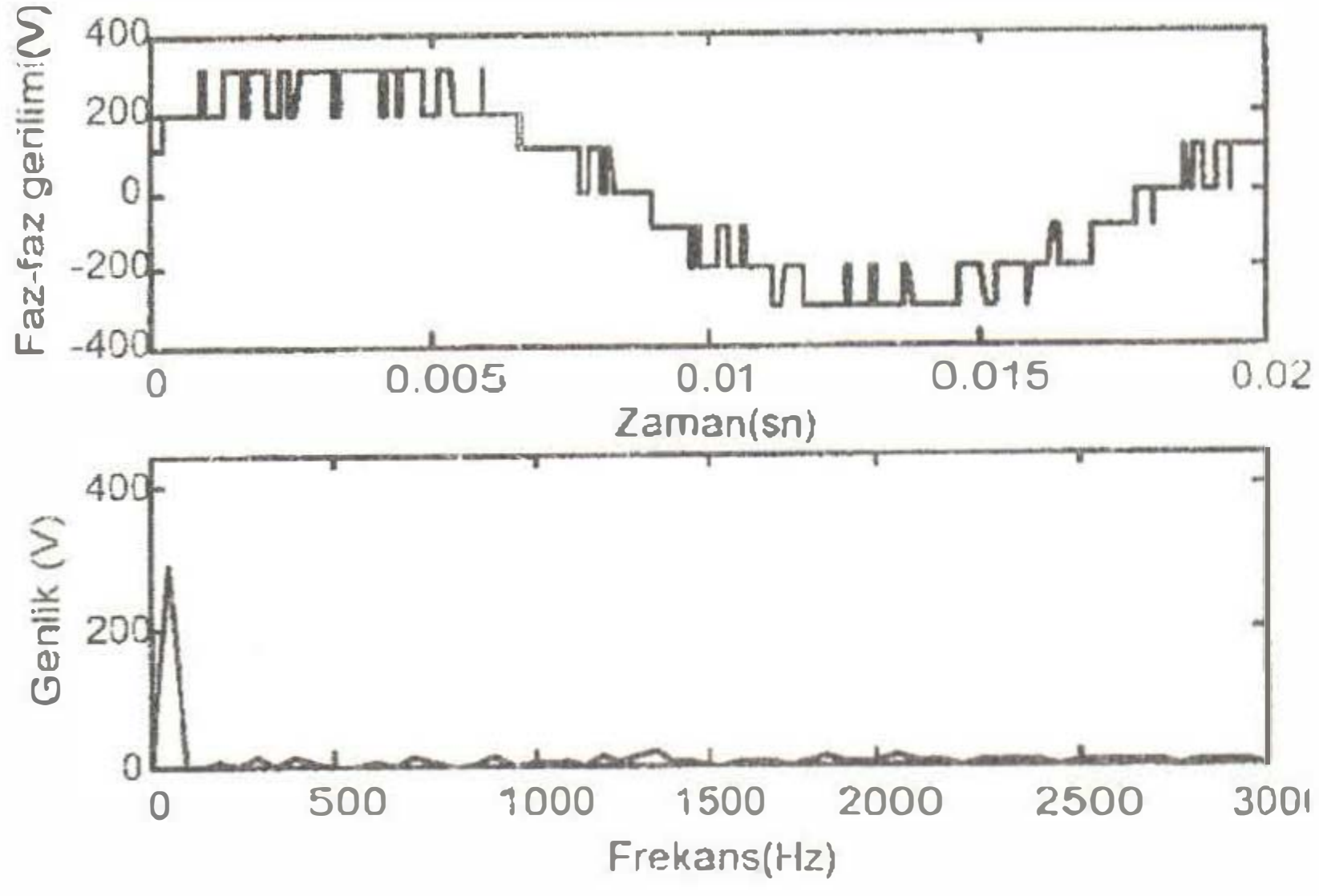
Şekil 7-8'deki faz gerilimi ve faz-faz gerilimlerinden görüleceği üzere; ÇSİ topolojileri ile klasik iki/üç seviyeli inverterlerden daha düzgün bir çıkış gerilimi elde edilmektedir. İnverterin seviyesi artırılırsa çıkış dalga şekli sinüzoidal forma daha yakın olacağından, doğal olarak "Toplam Harmonik Bozulma (THD)" azalacaktır.

Tablo II. Devre parametreleri

Modülasyon indeksi, M_a	: 0.85
Referans sinyalin frekansı, f_m	: 50hz
Taşıyıcı sinyalin frekansı, f_c	: 1khz
DC hat gerilimi	: 100V
Yük direnci, R	: 10Ω
Yük indüktansı, L	: 10 mH



Şekil 7. Faz gerilimi, faz-faz gerilimi ve faz akımı dalga şekilleri



Şekil 8. Faz-faz geriliminin frekans analizi için dalga şekilleri ($f = 50\text{Hz}$).

III. SONUÇ

Bu makalede; ilk olarak 5-seviyeli kaskad ÇSİ devresinin analizi yapıldı ve daha sonra tüm modülasyon indekslerinde iyi sonuç veren çok seviyeli SPWM teknikleri açıklandı. Daha sonra bu inverter çıkışında elde edilen üç-fazlı gerilimler ile bir R-L yük sisteminin beslenilmesine yönelik benzetimler yapıldı. Makaleden elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir;

- Çok seviyeli kaskad inverterler, yüksek güçlü uygulamalar için çok elverişlidir. Basit ve modüler yapıları nedeniyle bu inverterlerde seviye sayısı, anahtarlama elemanının akım-gerilim değerlerinin müsaade ettiği sınırlara kadar artırılabilir. Bu inverterler, fuel ve güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile AC cihazlar arasında ideal bir ara yüz oluşturacaklardır.
- Çok seviyeli inverterler için kullanılan SPWM tekniklerinde, taşıyıcı sinyallerin farklı şekillerde dağılımları ile çıkış faz geriliminin spektral yapısında da farklılıklar oluşmaktadır. Bununla birlikte, temel frekanslardaki genlikler birbirine çok yakın değerdendirler.
- İverterin faz gerilimindeki harmonikler sadece taşıyıcı sinyalin frekansının yan bantlarında oluşmaktadır. Taşıyıcı sinyalin frekansı temel frekandan büyük seçildiğinde, başka bir deyişle frekans indeksi büyük seçildiği takdirde, bu yan bantlarda oluşan gerilim harmonikleri büyüklük açısından önem arz etmezler.

KAYNAKLAR

- 1 Lund R., Manjrekar M.D., Steimer P. and Lipo T.A., *Control Strategies for a Hybrid Seven-Level Inverter*, European Power Electronics Conference, Sept. 1999, Lausanne Switzerland.
- 2 Sirisukprasert S., Lai J.S., Liu T.H., *Optimum Harmonic Reduction with a Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converters*.

- Annual Power Electronics Seminar, September 19-21, 1999, Virginia Tech., Blackburg, VA.
- 3 Lai J.S., Peng F.Z., *Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters*, IEEE Trans. Industry App., pp.509-517, May/June 1996.
- 4 Nabae A., Takahashi I., Akagi H., *A new Neutral-Point-Clamped PWM Inverter*, IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 19 No 6, Nov/Dec. 1983, pp. 1057-1069.
- 5 Carrara G., Gardella S., Marchesoni M., Salutari R., Sciutto G., *A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis*. IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 7, No.3, July 1992.
- 6 Rendusara D.A., Cengelci E., Enjeti P.N., Stefanovic V.R., Gray J.W., *Analysis of Common Mode Voltage- "Neutral Shift" in Medium Voltage PWM Adjustable Speed Drive (MV-ASD) Systems*, IEEE Trans. Power Electronics. Vol. 15 No. 6 Nowembwer 2000.
- 7 Manjrekar M.D., Steimer P., Lipo T.A., *Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications*. IEEE-IAS Conf. Rec. Phoenix, AZ. Vol. 3. pp. 1520-1527. October 1999.
- 8 Mwimiyiwa B., Wolanski Z., Yang C., Ooi B.T., *Multimodulator Multilevel Converters with Input/Output Linearity*, IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 33 No.5, Semtember/October 1997.
- 9 Walker G., Ledwich G., *Bandwidth Considerations for Multilevel Converters*, IEEE Trans. Power Electronics, Vol.14, No.1, January 1999.
- 10 Matsui K., Kawata Y., Ueda F., *Application of parallel Connected NPC-PWM Inverters with Multilevel Modulation for AC Motor Drive*, IEEE Tran. Power Electronics, Vol.15, No.5, Semtember 2000.
- 11 Jiang Q., Lipo T.A., *Switching Angles and DC Link Voltages Optimization for Multilevel Cascade Inverters*, Electric Machines and Power Systems Conf. 1999.
- 12 Kieferndorf R., Venkataramanan G., Manjrekar M.D., *A Power Electronic Transformer (PET) fed Nine-level H-Bridge Inverter for Large Induction Motor Drives*, IEEE Ind. App. Society Annual Meeting, Rome, Italy, October 8-12, 2000.