

Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli İnverterlerin İncelenmesi

Analysis of Soft Switching Three Level Inverters

Hacı BODUR¹, Hasan OKUMUŞ¹, Erdem AKBOY¹

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yıldız Teknik Üniversitesi

bodur@yildiz.edu.tr, hasanokumus@windowslive.com, eakboy@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli (S3L) İnverterler incelenmiştir. Temel olarak inverterler iki seviyeli, üç seviyeli ve çok seviyeli olarak sınıflandırılmaktadır. Üç seviyeli inverterler, kontrol kolaylığı, eleman azlığı ve çıkış gerilimindeki düşük harmonik seviyesi sebepleriyle daha yaygın olarak kullanılmakta, I ve T türü olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmanın amacı mevcut üç seviyeli inverter topolojileri üzerinde, aktif ve pasif yumuşak anahtarlama tekniklerinin kullanılması durumunda elde edilebilecek avantaj ve dezavantajların belirlenmesidir.

Abstract

This study represents a review of soft-switching three level (S3L) inverters. Inverters are classified two levels, three levels and multilevel inverters basically. Three level inverters that implicated as I or T types are used more commonly than the others. The aim of our study is to determine the advantages and disadvantages of the active and passive soft switching techniques at three level inverters.

1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ve müşteri isteklerinin giderek artması sonucunda gerek endüstri gerekse son tüketici tarafında elektrik enerjisine olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Üretici firmaların, artan talebi karşılamaya çalışırken doğaya verilen zararı da en aza indirme gayreti, yenilenebilir (alternatif) enerji kaynaklarına yönelimi artırmaktadır. Bu sebeple son yıllarda yenilenebilir enerji sistemleri yatırımları desteklenmekte ve yenilenebilir enerji teknolojilerinin geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar gerçekleştirilmektedir.

Uygulamaların AC yanlarında düşük toplam harmonik bozunumu (THB) ve yüksek güç faktörü (GF), DC yanlarında düşük dalgalanma faktörü (DF), sistem bütününde ise düşük hacim ve maliyet, yüksek verim ve güç yoğunluğu ile düşük elektro manyetik girişim (EMI) istenmektedir. Böylece bir taraftan rüzgar ve güneş gibi temiz enerji kaynaklarına yönelim artırılarak çevreye verilen zarar azaltılırken, diğer

taraftan da enerjinin verimli, kontrol edilebilir ve kaliteli bir şekilde şebeke ile entegrasyonu konusunda beklentiler karşılanmaya çalışılmaktadır.

Kontrol kolaylığı, hızlı dinamik cevap verme ve yüksek güç yoğunluğu sebebiyle Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) yöntemi endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda düşük hacim ve maliyet, yüksek verim ve güç yoğunluğu ile düşük EMI, ancak sert anahtarlama (HS) yerine yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ile sağlanabilmektedir. Böylece son yıllarda eleman sayısı fazla olan inverterlerde DGM kontrol tekniği ile SS teknikleri oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

İki seviyeli inverterler, kontrol kolaylığı, eleman azlığı ve kolay uygulanabilir olması özellikleri sebebiyle yıllardır endüstride çokça tercih edilmektedir. Ancak iki seviyeli inverterlerde çıkış geriliminin harmonik içeriğinin fazla olması ve (dv/dt) oranının yüksek olması çok seviyeli inverterlere yönelimi artırmaktadır. Çok seviyeli inverterlerde seviye sayısının artmasına bağlı olarak çıkış geriliminin harmonik içeriği oldukça düşmektedir. Bu durum (dv/dt) ve dolayısı ile EMI oranının düşmesi gibi avantajlar sağlarken, eleman sayısının fazla olması, kontrol ile uygulanabilme zorluğunu beraberinde getirmektedir. Bu durum, iki seviyeli inverterlere göre daha düşük çıkış gerilimi harmonik seviyesine sahip, çok seviyelilere göre daha az sayıda elemana sahip üç seviyeli inverterlerin cazibesini artırmaktadır [1].

Üç seviyeli inverter tanımı ilk olarak Nabae tarafından tanıtılmıştır [2]. Üç seviyeli inverterler genellikle DC giriş geriliminin inverter maliyet ve kayıplarını önemli derecede arttırdığı durumlarda tercih edilmektedir. Üç seviyeli inverterlerde anahtarlama elemanları DC giriş geriliminin daha altında bir gerilime maruz kalmaktadır. Bu da daha düşük maliyetli elemanlarla daha yüksek DC giriş gerilimlerine çıkılabileceği anlamına gelmektedir [3].

Üç seviyeli inverterlerin sert anahtarlama ile çalışması durumunda, anahtarlama frekansı belli bir değerde sınırlanmakta, anahtarlama kayıplarının artmasına bağlı olarak devrenin toplam verimi düşmektedir [4]. Anahtarlama elemanı

gerilim seviyesinin düşmesi, her bir anahtar üzerinde oluşan anahtarlama kaybını azaltmaktadır. Ancak iki seviyeli invertre kıyasla artan eleman sayısı da dikkate alındığında, anahtarlama kayıpları toplam devre kaybını önemli derecede etki etmektedir.

Yumuşak anahtarlama için kullanılan ve devrenin temel bir parçası olmayan ilave devreler bastırma hücreleri olarak ifade edilmektedir [5]. Bastırma hücreleri pasif ve aktif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif bastırma hücreleri ilave aktif eleman barındırmayan, aktif bastırma hücreleri ise en az bir yardımcı aktif eleman içeren hücrelerdir. Temel olarak bastırma hücrelerinde anahtarlama enerjisi klasik yöntemlerde dirençlerde harcanırken, modern yöntemlerde ise girişe veya yüke aktarılmaktadır [4]. Bu anahtarlama kayıplarının geri kazanılması özellikle MOSFET kullanılarak kurulan devrelerde devre verimliliği açısından çok önemlidir.

2. Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli İnverterler

Sunulan bu çalışmada, yumuşak anahtarlama üç seviyeli inverterler, literatürde yer alan örnek temel devreler üzerinden incelenmiştir. Bu devreler yumuşak anahtarlama prensiplerine uygun olarak,

- Aktif bastırma hücreli üç seviyeli inverterler
- Pasif bastırma hücreli üç seviyeli inverterler

ve kullanılan yumuşak anahtarlama tekniğine bağlı olarak

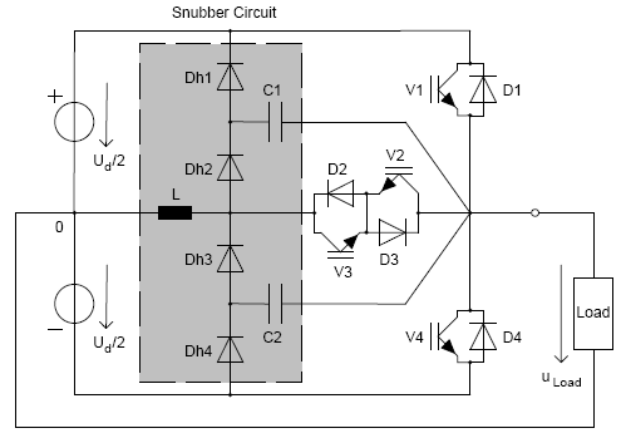
- ZVS-DGM üç seviyeli inverterler
- ZVZCS-DGM üç seviyeli inverterler
- ZCS-DGM üç seviyeli inverterler

olarak gruplandırılabilir. Ayrıca bastırma hücrelerinin uygulandığı temel devre topolojisine göre bir gruplandırma da yapılabilir.

2.1. Pasif Bastırma Hücreli Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli İnverter [4]

Şekil 1’de, yeni bir pasif bastırma hücreli yumuşak anahtarlama üç seviyeli T türü inverter devresi verilmiştir. Burada bastırma hücresi dört diyot, iki kondansatör ve bir endüktanstan oluşmaktadır. Böylece eklenmiş olan bastırma hücresi çok basit bir yapıda olup sadece birkaç pasif devre elemanından oluşmaktadır. İlave edilen bastırma hücresi sayesinde teorik olarak anahtarlama kayıplarının tamamen önüne geçilmekte, ayrıca etkili bir akım yükselme hızı (di/dt) ve gerilim yükselme hızı (dv/dt) sınırlaması sağlanarak EMI seviyesi düşürülmektedir. Devrenin teorik olarak kayıpsız oluşu sebebiyle ekonomik ve standart IGBT’ler kullanılması durumunda bile 40 kHz seviyelerinde çalışma frekansına ve %98 verimliliğe çıkarılabileceği kabul edilmektedir.

Sunulan devre için pozitif yük akımında altı çalışma aralığı oluşmaktadır. V_1 ’in kesime, V_3 ve D_3 ’ün iletme girdiği komütasyon, V_1 ’in iletim sinyalinin kesilmesiyle başlar ve C_2 , D_2 , V_2 , L , $U_d/2$ ve Dh_4 elemanları üzerinden kısmi bir rezonans başlar. Burada C_2 kondansatörünün rezonansla deşarj oluşu V_1 anahtarı üzerine düşen gerilimin yavaş yükselmesini



Şekil 1: Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli T Türü İnverter Devre Şeması [4]

ve anahtarın ZVS ile kesime girmesini sağlar. Böylece kesim anında anahtar üzerindeki akım ve gerilim kesişimi minimuma indirilir ve anahtarlama işlemi kayıpsız gerçekleştirilir.

Çizelge 1’de anahtarlama durumlarına bağlı çıkış gerilimleri ve kondansatörlerin şarj gerilimleri verilmiştir. Rezonansın sona ermesiyle C_2 deşarj olup D_4 iletme başlar. L endüktansına sabit bir gerilim uygulanmasıyla bu kez sabit akım altında bir çalışma aralığı başlar. Çalışma aralığı sonunda L ve V_3 akımları sırasıyla aşağıdaki gibidir.

$$i_{V3} = i_L = I_{Load} \quad (1)$$

Çizelge 1: Sunulan üç seviyeli inverterin anahtarlama durumlarına göre çıkış gerilimleri

U_{Load}	İletimde olanlar	V_1	V_2	V_3	V_4	U_C 1	U_C 2
$U_d/2$	V_1 veya D_1	1	0	1	0	0	$-U_d$
0	V_2 ve D_2 V_3 ve D_3	0	1	0	0	0	0
$-U_d/2$	V_4 veya D_4	0	1	0	1	$-U_d$	0

V_2 , D_2 , V_3 ve D_3 elemanlarına ait akımlar sınırlı bir (di/dt) ile yükseldiği için enerji kaybı oldukça düşük seviyede kalmaktadır. Ayrıca D_4 diyoduna ait akım da lineer olarak düştüğü için ters toparlanmasının çok daha düşük seviyelerde olması beklenmektedir. İlk çalışma aralığında C_2 ’yi deşarj eden rezonans, yüksek bir yük akımı olması durumunda V_2 anahtarının iletme geçirilmemesi ile iptal edilebilir. Ancak bu durumda bastırma hücresinin çalışması yük akımına büyük ölçüde bağımlı olur ve düşük yük akımlarında tamamlanması çok uzun sürer [6].

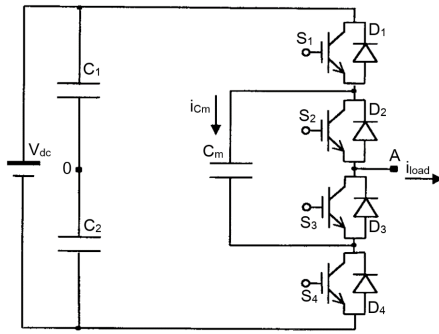
Tüm komütasyonlar için benzer inceleme yapılabilir. İnceleme sonucunda iletme girme işlemlerinde etkili bir (di/dt) ve kesime girmede ZVS sağlandığı görülmektedir. Akım sınırlamasını sağlayan L bastırma endüktansı giriş geriliminin orta uç seviyesine bağlandığı için, yüksek ve düşük gerilim seviyelerine bağlı güç anahtarlarında (V_2 , V_3) ilave bir gerilim stresi görülmemektedir. Ancak nötr noktası hattına bağlı güç anahtarlarında (V_1 , V_4), L endüktansı

sebebiyle ilave bir gerilim stresi görülmektedir. Anahtarların seçiminde bu ilave gerilim stresi dikkate alınmalıdır.

Sonuç olarak ana devreye ilave edilen basit bir bastırma hücresi sayesinde etkin bir (di/dt) ve (dv/dt) sınırlaması, ayrıca yüksek güç ve frekanslarda uygulama imkanı sağlanmıştır. Alt ve üst kol anahtarlarının tam giriş gerilimi U_d 'ye göre seçilmeleri, ayrıca hafif yük koşullarında bastırma hücresinin devre verimini olumsuz etkilemesi, devrenin temel dezavantajlarıdır. Devre, hafif yük altında sert anahtarlama inverterden daha düşük bir verimde çalışmaktadır. [6].

2.2. Sıfır Gerilim Anahtarlama Üç Seviyeli Kondansatör Kenetlemeli İnverter [7]

Burada sunulan çalışmada, üç seviyeli kondansatör kenetlemeli dönüştürücüye aktif anahtarlama elemanlı bir yardımcı devre eklenerek ZVS sağlanmıştır. Sunulan invertere ait devre şeması Şekil 2'de verilmiştir.



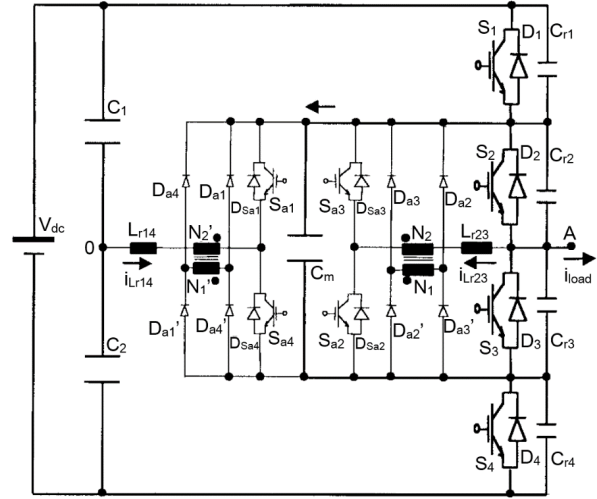
Şekil 2: Sunulan invertere ait temel devre şeması [7]

Birinci yardımcı kol (S_2, S_3) birinci anahtarlama hücresine (S_2, S_3) yardımcı olarak birinci kutbu oluştururken, ikinci yardımcı kol (S_1, S_4) ikinci anahtarlama hücresine (S_1, S_4) yardımcı olarak ikinci kutbu oluşturur. Kenetleme kondansatörü gerilimi $V_{dc}/2$ olarak sağlanması koşuluyla bu iki kutbun birbirinden bağımsız çalıştığı kabul edilmektedir.

Ana devre birbirine zıt çalışan iki ayrı iki seviyeli anahtarlama hücresi gibi düşünülebilir. İlk anahtarlama hücresi birbirine zıt olarak çalışan S_2 ve S_3 anahtarlarından oluşurken, ikinci anahtarlama hücresi de yine birbirine zıt olarak çalışan S_1 ve S_4 anahtarlarından oluşmaktadır. Anahtarlama hücreleri için kullanılan üçgen taşıyıcı sinyaller π kadar faz farkına sahiptir ve sinüzoidal modülasyon sinyali ile karşılaştırılmaktadır. Sunulan invertere ait devre şeması Şekil 3'te verilmiştir.

Yumuşak anahtarlama anahtarların akım ve gerilim zorlanmalarına ilave bir yük getirilmeden sağlanmaktadır. Ayrıca yardımcı devre, kontrol düzeneğine ilave bir karmaşa getirmemektedir. Tüm aktif ve pasif elemanlar için yumuşak anahtarlama koşulları sağlanmaktadır. Sadece ana devrede bulunan serbest dolaşım diyotları, iletme sert olarak girmektedir. Ancak bu sorun, iyi ileri toparlanma özelliğine sahip diyotlar seçilerek çözülebilmektedir. Her komütasyon sonrasında transformator mıknatıslanması sıfırlandığı için, trafo mıknatıslanmasının sıfırlanması dolayısıyla oluşabilecek ilave bir gerilim stresi görülmemektedir.

Sonuç olarak aktif bir bastırma hücresi eklemesiyle, ana



Şekil 3: Sunulan invertere ait devre şeması [7]

devrede ilave bir gerilim veya akım zorlaması getirilmeden, kontrol düzeninde ilave bir zorluk oluşturmadan ana devrede (ZVS) ve yardımcı devrede (ZCS) yumuşak anahtarlama şartları sağlanmıştır. Bu özellikleriyle de sunulmuş olan devre yüksek güçlü sürücü ve aktif filtre gibi uygulamalar için oldukça uygun olmaktadır [7].

2.3. Üç Seviyeli Aktif Nötr Noktası Kenetlemeli Sıfır Akım Geçişli İnverter [8]

Bugün endüstride yaygın olarak kullanılan iki farklı tip nötr noktası kenetlemeli inverter bulunmaktadır. Bunlar diyotlu nötr noktası kenetlemeli inverter (DNPC) ve aktif nötr noktası kenetlemeli inverterdir (ANPC). Hem diyotlu hem aktif nötr noktası kenetlemeli üç seviyeli inverterler genellikle IGBT ile gerçekleştirilmektedir.

Burada aktif nötr noktası kenetlemeli, sıfır akım geçişli üç seviyeli bir inverter sunulmuştur. Sunulan topolojide anahtarlama kayıpları neredeyse tamamen önlenerek devrenin frekans ve verimi önemli derecede yükseltilmiştir. Böylece sunulan topoloji, yüksek güçlü uygulamalar için ideal olmaktadır. Ana devreye sonradan eklenmiş olan yardımcı devre, bir LC rezonans tankı ve iki yardımcı anahtardan oluşan oldukça basit bir yapıdan ibarettir.

Komütasyonun sıfır akımda yapılmasının bir sonucu olarak, devre ve anahtar kayıplarının azaltılmasının yanı sıra sıfır gerilimde anahtarlama kısıyası daha sorunsuz bir komütasyon da elde edilmektedir. Özellikle IGBT'ler için önemli bir durum olan ters toparlanma sorunu (kuyruk akımı), sıfır akımda anahtarlama yapılması sayesinde önemli derecede azaltılmaktadır.

Şekil 4'te temel devre şeması verilmiş olan dönüştürücüde, yardımcı devre sayesinde ana ve yardımcı güç anahtarlarının tamamı, tamamen sıfır kayıpla kesime girme ve azaltılmış kayıpla iletme girme işlemleri sağlanmaktadır.

Sunulmuş olan üç seviyeli ANPC ZCT inverterde, pozitif çıkış gerilimi için sadece $V_{dc}/2$ ile 0 arasında seviye geçişi olurken, negatif çıkış gerilimi içinse $-V_{dc}/2$ ile 0 arasında seviye geçişi olmaktadır. Dönüştürücüye ait örnek bir akım

Figure 1 consists of two schematic diagrams, (a) and (b), of a three-phase inverter. Both diagrams show a central inverter bridge with four legs. The top leg has a PMOS transistor T1 and an NMOS transistor T2. The bottom leg has an NMOS transistor T3 and a PMOS transistor T4. Each transistor is connected to a diode (D1, D2, D3, D4) in anti-parallel. The bridge is connected to a load current I_{Load} . The input is a split DC source with two $V_{dc}/2$ sources and two capacitors C_1 and C_2 . The output is taken from the midpoint O. In diagram (a), T1, T2, and T3 are shown with red arrows indicating they are in the 'on' state. In diagram (b), T1, T2, and T4 are shown with red arrows indicating they are in the 'on' state.

371

Çizelge 2: İncelenen eviricilerin avantaj ve dezavantajlarının karşılaştırılması

Dönüştürücü Türü	Avantajlar	Dezavantajlar
<i>Pasif Bastırma Hücreli Yumuşak Anahtarlama Üç Seviyeli İnverter</i>	1. Azaltılmış seri anahtar sayısı, iletim kayıplarını azaltmaktadır. 2. Azalan iletim kayıplarıyla özellikle AG uygulamaları için idealdir. 3. Pasif elemanlardan oluşan basit bir yardımcı devre kullanılmıştır.	1. Pozitif ve negatif baraya bağlı anahtarlar, DC giriş gerilimine göre seçilmelidir. 2. Hafif yük koşullarında, yardımcı devre kayıpları toplam devrenin verimini düşürmektedir.
<i>Sıfır Gerilim Anahtarlama Üç Seviyeli Kondansatör Kenetlemeli İnverter</i>	1. Ana güç elemanlarında sıfır gerilimde anahtarlama sağlanır. 2. Yardımcı devrede sıfır akımda anahtarlama sağlanır. 3. Kontrol devresinde ilave bir karmaşa ve elemanlarda ilave bir pik durumu oluşmamaktadır.	1. Klasik bastırma hücrelerinin kullanıldığı duruma göre, doluluk oranı kaybı daha fazladır. 2. ZVZCS dönüştürücülere kıyasla daha dar bir çalışma aralığına sahiptir.
<i>Üç Seviyeli Aktif Nötr Noktası Kenetlemeli Sıfır Akım Geçişli İnverter</i>	1. Yardımcı devrede DNPC dönüştürücüye kıyasla yarı yarıya az eleman kullanılmaktadır. 2. Basit yapılı, bir aktif anahtar ve R-L devresinden oluşan bir yardımcı devre kullanılmaktadır. 3. ZCT sayesinde kesimdeki kuyruk akımı gibi sorunlar çözülmektedir.	1. Pratikte, kaçak endüktanslar sebebiyle akım yolu bölünebilmekte, bunun sonucu olarak rezonans akımı yeterli seviyeye çıkamamakta ve ZCT tam sağlanamamaktadır.
<i>Üç Seviyeli Tam Köprü Sıfır Akım ve Sıfır Gerilim Anahtarlama Dönüştürücü</i>	1. Tam köprü dönüştürücü tipi sayesinde, yarım köprü dönüştürücülerden daha yüksek çıkış gücü ve gerilimi elde edilmektedir. 2. ZVZCS tekniği sayesinde geniş bir yük aralığında YA sağlanmaktadır. 3. Yardımcı devre tamamen pasif elemanlardan oluşmaktadır.	1. Pasif elemanlardan oluşan bir yardımcı devre ile, klasik yumuşak anahtarlama teknikleri (ZVZCS) kullanılmaktadır. 2. Yüke bağlı bir yumuşak anahtarlama sağlanmaktadır. 3. İleri faz anahtarları ilave bir gerilim zorlamasına maruz kalmaktadır.

gerekse yüksek güçlü endüstriyel uygulamalarda, yüksek devre gücü ve düşük harmonik sağlayan yumuşak anahtarlama üç seviyeli inverterlerin tanıtılması ve yumuşak anahtarlama yöntemlerinin uygulanması amaçlanmıştır. Bu amaçla hem aktif bastırma hücrelerinin hem de pasif bastırma hücrelerinin kullanıldığı literatürde yer alan temel üç seviyeli inverter topolojileri incelenmiştir. Çizelge 2’de temel avantaj ve dezavantajları açısından bir kıyaslama sunulmuştur.

Sonuç olarak sunulan üç seviyeli SS’li inverter devreleri, sağladığı çoğu önemli avantajların yanı sıra, ana anahtar akım ve gerilim stresleri ile anahtarlama kayıplarını büyük ölçüde sınırlamış ve devrenin gücü ile frekansının yükseltilmesi konusuna önemli katkılar sağlamıştır.

4. Kaynaklar

- [1] Tuncer, S., (2004). “Çok Seviyeli İnverterler ve DGM Teknikleri”, Fırat Üniversitesi Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 2(3), 56–61, 2004.
- [2] J.Rodriguez, S. Lai, ve F.Z. Peng, , “Multilevel Inverters: A survey of topologies, control and applications”, IEEE Trans. on Power. El., Vol 49, No. 4, pp. 724-738, 2002.
- [3] Masisi, L.M., Williamson, S., Pillay, P., (2012). “A Comparison Between A 2-Level and 3-Level Inverter for

A Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Under Different Inverter Switching Frequencies”, IEEE, 2012.

- [4] Gekeler, M.W., (2011). “Soft switching three level inverter with passive snubber circuit (S3L inverter)”, Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on, pp. 1 – 10, 2011.
- [5] Bodur, H., Güç Elektroniği(2010). 1. Baskı, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [6] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi,(1981). “A new neutral-point clamped DGM inverter,” IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-17, pp. 518–523, Sept./Oct. 1981.
- [7] Yuan, X., Barbi, I., (1999). “Zero-Voltage Switching for Three-Level Capacitor Clamping Inverter”, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 14, No. 4, pp. 771-781, 1999.
- [8] Li, L., Liu, J., Boryevich, D., Mattavelli, P. and Xue, Y., (2011). “Three-level Active Neutral-Point-Clamped Zero-Current-Transition Converter for Sustainable Energy Systems”, Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:26, Issue: 12), p. 3680-3693.
- [9] Carr, J. A., Rowden, B., Balda, J. C., (2009). “A Three-Level Full-Bridge Zero-Voltage Zero-Current Switching Converter With a Simplified Switching Scheme”, Power Electronics, IEEE Transactions on (Volume:24 , Issue: 2), p. 329-338.