

# BİR FAZ BEŞ SEVİYELİ İNVERTER TASARIMI VE UYGULAMASI

Sabri ÇAMUR<sup>1</sup> Birol ARİFOĞLU<sup>2</sup> Ersoy BEŞER<sup>3</sup> Esra KANDEMİR BEŞER<sup>4</sup>

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi  
Kocaeli Üniversitesi, 41100, İzmit, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta:scamur@kou.edu.tr  
<sup>3</sup>e-posta: ebeser@kou.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: barif@kou.edu.tr  
<sup>4</sup>e-posta: esrakandemir@kou.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Tek Fazlı İnverterler, Harmonik, Çok Seviyeli İnverterler, H Köprü*

## ABSTRACT

*In this paper, a novel topology for single-phase five-level inverter is introduced for reducing harmonic components of output voltage and load current. Operational principles of the proposed inverter are explained and operational topologies are respectively given. A method and a formula are improved for calculating switching angles. The validity of the proposed inverter is verified through simulations. For reducing harmonic components, a LC filter is designed and proposed inverter is simulated in the state of using LC filter. Simulation results are given and compared with conventional H-Bridge Inverter. A prototype of the proposed inverter is manufactured and experimental studies are made. Test results are compared with simulation results. Switch number comparison between cascaded and proposed inverter is also made and advantages of the proposed inverter are determined.*

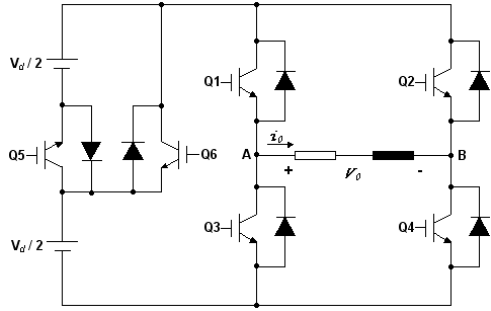
## 1. GİRİŞ

İnverterler günümüzde bir çok endüstriyel uygulama için vazgeçilemez bir unsur haline gelmiştir. Çeşitli motor tiplerinin denetiminde ve güç sistemlerinde inverterler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı inverterler üzerinde yapılan çalışmalar giderek artmakta ve buna bağlı olarak inverter teknolojisi hızlı bir şekilde gelişmektedir. Tüm yapılan çalışmalarda asıl hedeflenen çıkış gücünün ve yük akımının daha kaliteli olarak elde edilmesidir [1]. Bu yüzden çalışmaların sonucu olarak bir çok yeni yapı elde edilmiş ve bu yapılar üzerinde yeni anahtarlama teknikleri geliştirilmiştir.

Daha önceleri yapısının ve denetiminin basit olmasından dolayı bir çok endüstriyel uygulamada bildiğimiz geleneksel H köprü inverterler

kullanılmaktaydı [2]. Fakat bu inverter ile elde edilen çıkış yük gerilimi ve akımı büyüklüklerindeki harmoniklerin fazla olması sonucu hassas uygulamalarda bu inverterin kullanılmasının uygun olamayacağı düşünülerek H köprü inverterlerden bir çok uygulama için vazgeçilmiştir. Bunların yerine çok katlı inverter teknikleri geliştirilmiş ve tek ve üç fazlı çok katlı inverterler bir çok uygulama için popüler hale gelmeye başlamıştır. Yapılan çalışmalarda çıkış gerilimdeki seviye sayısının artmasına bağlı olarak yük akımı harmoniklerinin azaldığı ve bunun da inverter performansını oldukça artırdığı izlenmiştir. Çıkış gerilimindeki seviye sayısını arttırmak için bir çok yeni yöntem geliştirilmiştir [3]. Geliştirilen bu yeni anahtarlama teknikleri ile aynı anahtarlama frekansında H köprü inverterlere göre daha az harmonikli çıkış gerilimi ve akımı elde edilmiştir.

İnverter teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, bu makalede yeni bir tek fazlı beş seviyeli inverter yapısı ve bu yapıda kullanılacak anahtarlama yöntemi geliştirilmiştir (Şekil-1). Çıkış gerilimi  $+V_d/2$ ,  $+V_d$ , sıfır,  $-V_d/2$  ve  $-V_d$  olmak üzere beş seviyeli olarak elde edilmiştir. Geliştirilen yöntem en az anahtarlama kullanan yöntemlerden biridir ve H köprü inverterler ile aynı sınıftaki bir çok invertere göre harmonik bileşenlerini oldukça azaltabilmektedir. Bu yöntemde anahtarlama açılarına göre anahtarlama fonksiyonları elde edilmiştir. Geliştirilen inverterin çalışma prensibi anlatılmış ve farklı yük durumları için akım ve gerilim harmonik bileşenleri simülasyon yolu ile belirlenmiştir. Simülasyon sonuçları, geleneksel H köprü inverter yapısı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar geliştirilen inverter yapısının ve anahtarlama yönteminin kalitesini ortaya koymaktadır. Geliştirilen inverter yapısı deneysel olarak test edilmiş ve simülasyon sonuçları deneysel sonuçlar ile desteklenmiştir.



Şekil-1. Tasarlanan tek faz beş seviyeli inverterin yapısı

## 2. TASARLANAN İNVERTERİN TEMEL YAPISI VE BU YAPININ GELİŞTİRİLEREK SEVİYE SAYISININ ARTTIRILMASI

Şekil-1’de tasarlanan tek fazlı beş seviyeli inverterin şekli görülmektedir. Şekil-1’de görüldüğü gibi klasik H köprü yapısındaki invertere iki adet anahtarlama elemanı eklenmiş ve bu elemanlar doğru akım kaynaklarına seri bağlanarak bu inverter yapısı oluşturulmuştur. Doğru akım kaynaklarına seri bağlı olan Q5 yardımcı anahtarı çıkış geriliminde en yüksek seviyenin yani doğru akım kaynaklarının toplam değerinin oluşmasını sağlar. Q6 yardımcı anahtarı ise rejeneratif durum için kullanılır. Doğru akım kaynaklarının toplam değeri  $V_d$  olarak kabul edilirse, bu inverter yapısında beş farklı seviye sıfır,  $\pm V_d/2$  ve  $\pm V_d$  olarak elde edilir.

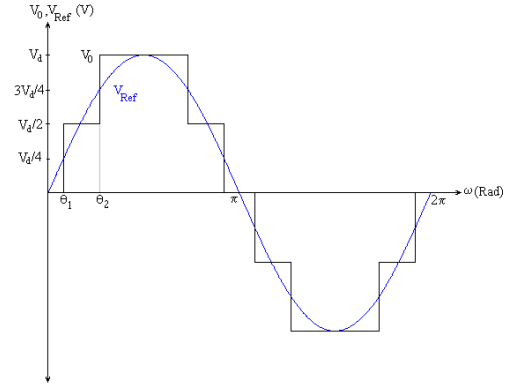
Bu çalışmada geliştirilen anahtarlama tekniğinde, tetikleme sinyalleri anahtarlama açıları hesaplanarak oluşturulmaktadır. Belirli bir frekans değerinde hesaplanan anahtarlama açılarına göre gerekli yarıiletken anahtarlama elemanları anahtarlansak çıkış gerilimi beş seviyeli olarak elde edilmektedir. Bahsedilen inverter topolojisinde anahtarlama açılarının hesaplanabilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemle ait formül aşağıda verilmiştir.

$$\sin \theta_i = \frac{2i-1}{n-1} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, \left(\frac{n-1}{2}\right) \quad (2)$$

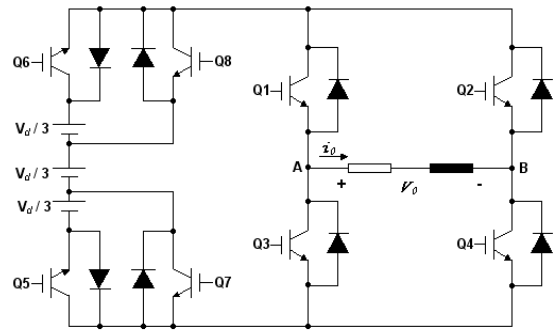
$n =$  Çıkış gerilimi seviye sayısı

Bu çalışmada öncelikle tek fazlı beş seviyeli inverter topolojisinde kullanılacak olan  $\theta_1$  ve  $\theta_2$  anahtarlama açıları hesaplanmıştır. Bu topoloji için çıkış gerilimi, referans gerilim ve anahtarlama açıları Şekil-2’de görülmektedir.

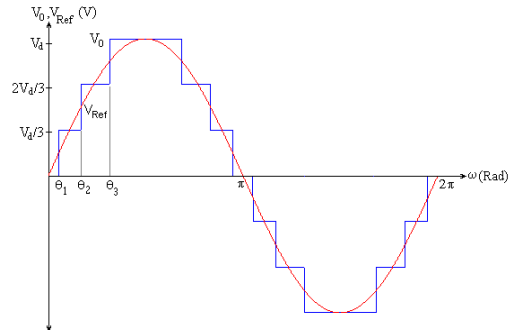


Şekil-2. Çıkış gerilimi ( $V_0$ ), referans gerilimi ( $V_{Ref}$ ) ve anahtarlama açıları ( $\theta_1, \theta_2$ )

Bu çalışmada anlatılan topoloji geliştirilerek tek fazlı çok katlı inverter yapıları elde edilebilir. Örneğin  $n=7$  seçilerek  $\theta_1, \theta_2$  ve  $\theta_3$  açıları hesaplanır. Beş seviye topolojisine iki yardımcı anahtar ve bir doğru akım kaynağı ilave edilerek 7 seviye topolojisi elde edilmiş olur. Doğru akım kaynaklarına seri bağlı anahtarlar gerilim seviyelerini oluştururken diğer anahtarlar rejeneratif çalışma durumu için kullanılır. Şekil-3’te 7 seviyeli inverter yapısı görülmektedir. Çıkış gerilimi, referans gerilim ve anahtarlama açıları ise Şekil-4’te verilmiştir. Daha fazla yardımcı eleman eklenerek seviye sayısı daha da artırılabilir ve bu çalışmadaki inverter yapısı geliştirilebilir.



Şekil-3. Tasarlanan inverterin geliştirilerek elde edilen tek faz yedi seviyeli inverterin yapısı



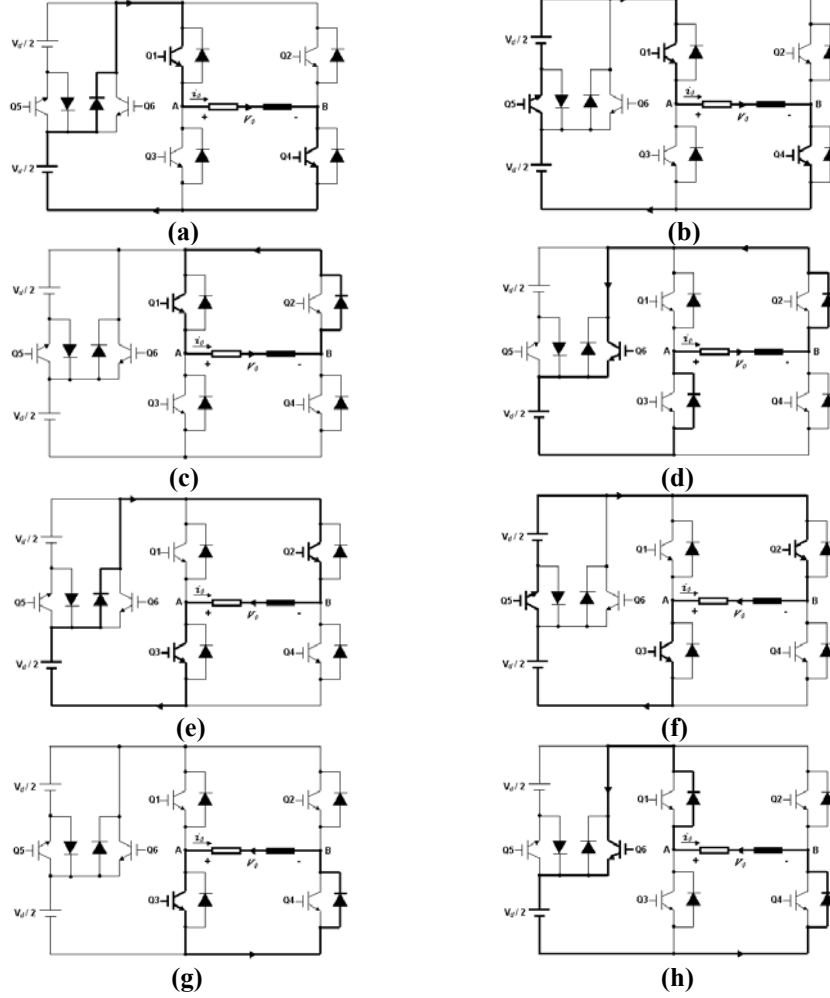
Şekil-4. Çıkış gerilimi ( $V_0$ ), referans gerilim ( $V_{Ref}$ ) ve anahtarlama açıları ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )

### 3. GELİŞTİRİLEN İNVERTERİN ÇALIŞMA TOPOLOJİLERİ

Geliştirilen inverterin çalışması Şekil-5'te görülen 8 anahtarlama durumuna bölünerek açıklanabilir. Şekil-5 (a), (e) ve Şekil-5 (b), (f) de geliştirilen inverterin çıkış geriliminde yarım ve tam seviyenin oluşması sırasıyla görülmektedir. Şekil-5 (c), (g)'de serbest geçiş durumları, Şekil-5 (d), (h)'de ise rejeneratif durum görülmektedir. Yapılan anahtarlamalara göre çıkış geriliminde oluşan seviyeler Tablo-1'de verilmiştir.

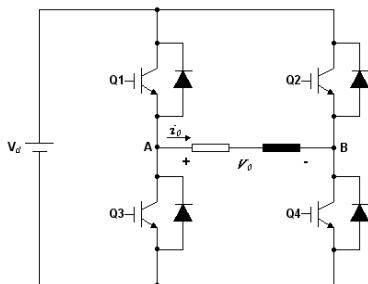
Tablo-1. Anahtarlama durumları ve çıkış gerilimi seviyeleri

| İletim Durumu   | A Noktası Gerilimi ( $V_A$ ) | B Noktası Gerilimi ( $V_B$ ) | Çıkış Gerilimi ( $V_{AB}$ ) |
|-----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| $Q_3, Q_4$      | 0                            | 0                            | 0                           |
| $Q_6$           | $V_d/2$                      | 0                            | $V_d/2$                     |
| $Q_1, Q_4$      | $V_d/2$                      | 0                            | $V_d/2$                     |
| $Q_1, Q_4, Q_5$ | $V_d$                        | 0                            | $V_d$                       |
| $Q_1, Q_4$      | $V_d/2$                      | 0                            | $V_d/2$                     |
| $Q_1, Q_2$      | $V_d/2$                      | $V_d/2$                      | 0                           |
| $Q_6$           | 0                            | $V_d/2$                      | $-V_d/2$                    |
| $Q_2, Q_3$      | 0                            | $V_d/2$                      | $-V_d/2$                    |
| $Q_2, Q_3, Q_5$ | 0                            | $V_d$                        | $-V_d$                      |
| $Q_2, Q_3$      | 0                            | $V_d/2$                      | $-V_d/2$                    |



Şekil-5. Anahtarlama durumlarına göre oluşan çalışma topolojileri. a)  $V_0 = V_d/2, i_0 = +$  b)  $V_0 = V_d, i_0 = +$  c)  $V_0 = 0, i_0 = +$  d)  $V_0 = -V_d/2, i_0 = +$  e)  $V_0 = -V_d/2, i_0 = -$  f)  $V_0 = -V_d, i_0 = -$  g)  $V_0 = 0, i_0 = -$  h)  $V_0 = V_d/2, i_0 = -$

### 4. BİLİNER H-KÖPRÜ İNVERTERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ



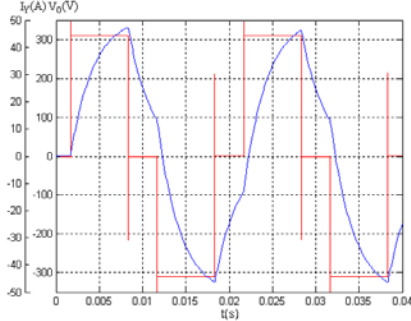
Şekil-6. Geleneksel H Köprü İnverterin yapısı

Şekil-6'da geleneksel H köprü yapısında bir inverter şekli görülmektedir. Bu yapı ile 3 seviyeli bir çıkış gerilim dalga şekli elde edilmektedir. İndüktif bir yükte,  $120^\circ$  iletim durumu ve PWM çalışma durumuna ait simülasyon sonuçları, geliştirilen tek faz Şekil-7, Şekil-8, Şekil-10 ve Şekil-11'de verilmiştir.

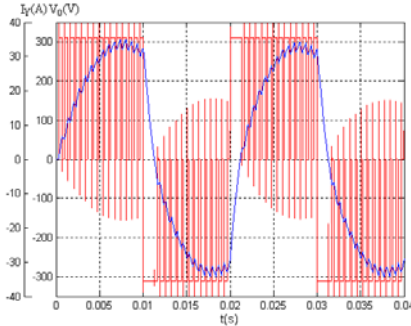
## 5. GELİŞTİRİLEN İNVERTERİN PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Yük akımındaki harmonik bileşenler inverter performansını doğrudan etkilemektedir. Bu yüzden yük akımındaki harmonik bileşenleri azaltmak ve yük akımını sinüsoidal dalga şekline yaklaştırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaca yönelik olarak geliştirilen tek faz beş seviyeli inverterin performansı önce simülasyon yolu ile incelenmiş ve simülasyon sonuçları geleneksel H köprü invertere ait sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

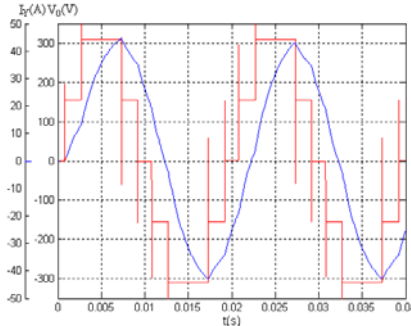
Sırasıyla Şekil-7 ve Şekil-8’de H köprü inverterin  $120^\circ$  iletim durumu ve PWM çalışma durumuna ait çıkış gerilimi ve yük akımının değişimi görülmektedir. Şekil-9’da ise geliştirilen inverterin gerilim ve yük akımı dalga şekilleri görülmektedir. Çıkış gerilimi ve yük akımı harmonik bileşenleri dağılımı Şekil-10 ve Şekil-11’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir



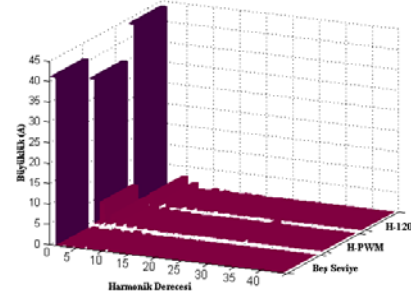
Şekil-7. H Köprü İnverterde  $120^\circ$  iletim durumu için simülasyon sonucu elde edilen çıkış gerilimi ( $V_0$ ) ve yük akımı ( $I_Y$ ) dalga şekilleri



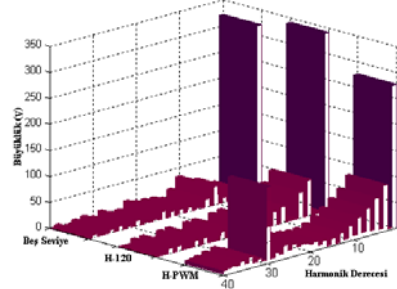
Şekil-8. H Köprü İnverterde PWM çalışma durumu için simülasyon sonucu elde edilen çıkış gerilimi ( $V_0$ ) ve yük akımı ( $I_Y$ ) dalga şekilleri



Şekil-9. Geliştirilen inverterin simülasyon sonucu elde edilen çıkış gerilimi ( $V_0$ ) ve yük akımı ( $I_Y$ ) dalga şekilleri



Şekil-10. Yük akımı harmonik bileşenlerinin karşılaştırmalı olarak dağılımı



Şekil-11. Çıkış gerilimi harmonik bileşenlerinin karşılaştırmalı olarak dağılımı

Harmonik bileşenleri önlemek amacıyla geliştirilen inverterde kullanılmak üzere bir LC filtre tasarımı da yapılmıştır. Tablo-2’de ohmik ve indüktif yüklerde LC filtrenin olması ve olmaması durumlarında toplam harmonik bozunumları verilmiştir.

Tablo-2. Geliştirilen inverterin çeşitli yük durumları için hesaplanan toplam harmonik bozunumları

|                 |              | Toplam Harmonik Bozunum (%) |         |         |               |
|-----------------|--------------|-----------------------------|---------|---------|---------------|
|                 |              | Beş Seviye                  | H-PWM   | H-120   |               |
| İndüktif<br>Yük | Yük Akımı    | 2,5475                      | 18,3856 | 7,0741  | Filtre<br>Yok |
|                 | Yük Gerilimi | 16,1456                     | 76,9266 | 29,6779 |               |
| İndüktif<br>Yük | Yük Akımı    | 1,9312                      | 23,4046 | 14,1541 | Filtre<br>Var |
|                 | Yük Gerilimi | 3,6727                      | 77,1971 | 59,0040 |               |
| Omik<br>Yük     | Yük Akımı    | 1,6537                      | 16,38   | 26,6239 |               |
|                 | Yük Gerilimi |                             |         |         |               |

Tablo-3’te geliştirilen inverter ve çok seviyeli gerilim değişimi elde edebilmek üzere klasik olarak kullanılan kaskad inverter arasında anahtar sayısı bakımından karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo-3. Geliştirilen inverter ve kaskad inverterde bulunan anahtar sayısının gerilim seviye sayısına bağlı olarak sayısal değişimi

|                | Kaskad İnverter | Geliştirilen İnverter |
|----------------|-----------------|-----------------------|
| Anahtar Sayısı | $(n-1)*2$       | $n+1$                 |

$n$ =Çıkış gerilimi seviye sayısı

Açıkça görülmektedir ki seviye sayısı arttıkça, geliştirilen inverter ve kaskad invertere ait anahtarlama elemanı sayısı farkı gittikçe açılmaktadır. Aynı kalitede bir yük akımı elde edebilmek için kaskad inverterde daha fazla sayıda anahtarlama

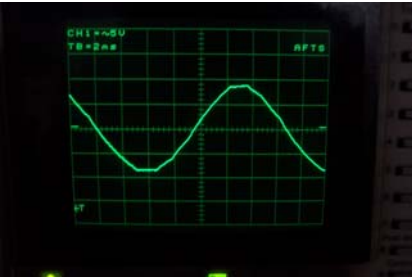
elemanı kullanmak gerekmektedir. Bu da anahtarlama kayıplarının artmasına neden olur. Ayrıca gerilim harmonik bileşenleri de geliştirilen invertere göre daha fazla olmaktadır.

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMA

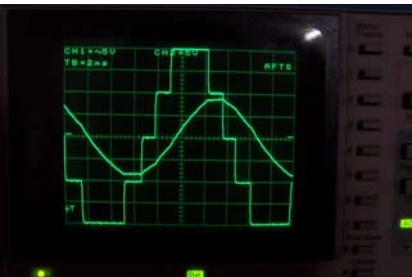
Geliştirilen inverterin performansının deneysel olarak gözlemlenmesi için bir prototip tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Çıkış gerilim ve yük akımını gözlemleyebilmek amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Çıkış geriliminin ve yük akımının osiloskop ekranında elde edilen görüntüsü Şekil-12 ve Şekil-13'te verilmiştir. Şekil-14'te ise indüktif yük durumu için çıkış gerilim ve yük akımının aynı osiloskop ekranındaki görüntüsüne yer verilmiştir.



Şekil-12. Çıkış geriliminin deneysel olarak elde edilen görüntüsü (Osiloskop CH2:5x10=50 volt/div)



Şekil-13. Yük akımının deneysel olarak elde edilen görüntüsü (Oscilloscope CH1:5volt/div, 1V=1A)



Şekil-14. Çıkış geriliminin ve yük akımının aynı osiloskop ekranında elde edilen görüntüsü (Osiloskop CH1:5volt/div, 1V=1A, CH2:5x10=50 volt/div)

## 7. SONUÇLAR

Bu makalede, tek faz beş seviyeli bir inverter topolojisi anlatılmıştır. Geliştirilen inverterin temel yapısı ve geliştirilmiş yapıları tanıtılmıştır. Anahtarlama açılarını hesaplayabilmek amacıyla bir yöntem geliştirilmiştir. İnverterin çalışma topolojileri detaylı olarak anlatılmıştır. Geliştirilen inverter simülasyon yolu ile incelendiğinde H köprü

inverterlere ve aynı sınıftaki bir çok inverter göre çıkış gerilimindeki ve yük akımındaki harmonik bileşenleri önemli ölçüde azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tasarlanan harmonik filtre ile harmonik bileşenler daha da azalmıştır. Tasarlanan inverterin deneysel olarak test edilebilmesi için bir prototip üretilmiş ve bu prototip üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçların simülasyon sonuçları ile örtüştüğü izlenmiştir. Geliştirilen inverter yapısı çok seviyeli diğer inverterler ile karşılaştırıldığına bu çalışmada tasarlanan inverter topolojisinin en az anahtar kullanan topolojilerden biri olduğu söylenebilir. Kullanılan anahtar sayısının az olması anahtarlama kayıplarının da en az düzeyde olmasını sağlamakta ve ayrıca toplam maliyeti de düşürmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Çamur S., Arifoğlu B., Beşer E., Kandemir Beşer E., (2006) Harmonic Analysis of an Improved Single-Phase Five-Level Inverter, WSEAS Transactions on Power System, Issue.2, Vol.1, pp.387-392, ISSN.1790-5060.
- [2] Çamur S., Arifoğlu B., Beşer E., Kandemir Beşer E., (2005) A Novel Topology for Single-Phase Five-Level Inverter, Proc. of the 5th WSEAS/IASME Int.Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, pp.314-319, Tenerife/Spain.
- [3] Park S.J., Kang F.S., Lee M.H., Kim C., (2003) A New Single-Phase Five-Level PWM Inverter Employing a Deadbeat Control Scheme, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.18, No.3.
- [4] Wu T.F., Nien H.S., Shen C.L., Chen T.M., (2005) A Single-Phase Inverter System PV Power Injection and Active Power Filtering with Nonlinear Inductor Consideration, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, No.4.
- [5] Shyu K.K., Yang M.J., Hong J.H., Lin B.H., (2004) Automatic Voltage Regulator Using a Novel Phase-Shifted PWM Single-Phase Inverter, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Korea.
- [6] Yousefzadeh V., Maksimovic D., Li Q., (2004) A Zero Voltage Switching Single-Phase Inverter Using Hybrid Pulse-Width Modulation Technique, 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Germany.
- [7] Lin B.R., Huang C.H., (2004) Single-Phase Capacitors Clamped Inverter With Simple Structure, ISCAS.