

# TEK ANAHTARLI İNVERTERDE BAZI KONTROL PALSİLERİNİN SİLİNMEŞİYLE GÜÇ KONTROLÜ

**Selim ÖNCÜ ve B. Sami SAZAK**

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli,  
[soncu@pamukkale.edu.tr](mailto:soncu@pamukkale.edu.tr), [szak@pamukkale.edu.tr](mailto:szak@pamukkale.edu.tr)

(Geliş/Received: 12.11.2004; Kabul/Accepted: 09.02.2006)

## ÖZET

Basit, ucuz ve yüksek verimli olması sebebiyle tek anahtarlı yarı iletken güç dönüştürücüler birçok güç elektroniği uygulamasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada mutfak tipi bir indüksiyon ısıtıcı, gerilim beslemeli sıfır gerilim anahtarlamalı tek anahtarlı seri rezonans inverter (SRI) devre kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Isıtıcıda yarı iletken anahtarın iletimde kalma süresinin değiştirilmesiyle çıkış gücünün kontrolüne alternatif olarak, sürme sinyalindeki kontrol palslerinden bazılarının silinmesi yöntemiyle çıkış gücü kontrolü sağlanmıştır. Böylece daha geniş aralıkta güç kontrolü gerçekleştirilmiştir. Sistemin 62.5kHz anahtarlama frekansında farklı kontrol sinyalleri için deneysel çalışma sonuçları alınarak elektronik simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tek anahtarlı inverter, kontrol palslerinin silinmesi, indüksiyon ısıtma.

## POWER CONTROL OF SINGLE SWITCH INVERTER WITH DELETING SOME CONTROL PULSES

### ABSTRACT

Single switch power converters are used in many power electronics applications because of their simplicity, cheapness and high efficiency. In this study an induction heater for home cooking applications is carried out with voltage fed single switch series resonant inverter (SRI). Power control of heater is provided with deleting some on pulses of semiconductor switch instead of turn on time control. In this way power control is achieved in a more extensive range. Experimental results of the heating system for different pulse sequences at 62.5kHz switching frequency are compared with computer simulation results.

**Keywords:** Single switch inverter, deleting control pulses, induction heating.

### 1. GİRİŞ

Elektromanyetik indüksiyon yoluyla ısıtma hızlı, güvenli, verimli olması gibi üstünlükleri nedeniyle endüstriyel ısıtma uygulamaları için vazgeçilmez bir tekniktir. Bir fazlı d.a.-a.a. güç dönüştürücüler kullanılarak indüksiyon ısıtma tekniği ile ev tipi ısıtma uygulamaları gerçekleştirilmektedir. Köprü tipi inverterler [1,2] ile akım beslemeli [3] veya gerilim beslemeli [4] inverterler mutfak tipi indüksiyon ısıtma uygulamaları için uygun anahtarlamalı tip güç kaynaklarındandır.

Gerilim beslemeli tek anahtarlı inverter kullanılarak mutfak tipi indüksiyon ısıtma için gerekli olan orta frekanslı alternatif akım indüksiyon bobininden

geçirilebilir [5]. Isıtma kabı ve indüksiyon bobininin manyetik etkileşimi neticesinde oluşan eşdeğer endüktans ile kondansatör, rezonans şartlarını oluşturarak devrede iki yönlü enerji akışını gerçekleştirir. İndüksiyon ısıtıcıda güç kontrolü yarı iletken anahtarın iletimde kalma süresinin değiştirilmesiyle kolayca sağlanabilir [6]. İletim süresinin azaltılmasıyla çıkış gücü azaltılır. Ancak yüksek verimli güç dönüşümünün gerçekleştirilebilmesi için iletim süresinin azaltılabileceği bir alt sınır değeri mevcuttur [6,7]. Bu değer altındaki güçlerde her anahtarlama periyodunda sıfır gerilim koşulları bozulmakta, anahtarlama kayıpları artmaktadır.

Tek anahtarlı yarı iletken güç dönüştürücülerin, konvertörler [8], indüksiyon ısıtma [5], elektronik

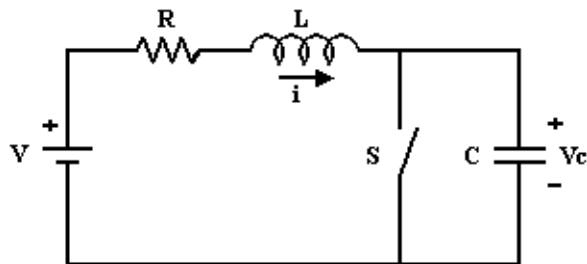
balast [9], radyo vericileri [10] gibi kullanım alanları mevcuttur. Devrede anahtar uçlarındaki gerilimin ve eğiminin anahtar iletime geçtiği anda sıfır olması gerçekleştirilebildiğinden yüksek verimli güç dönüşümü elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada tek anahtarlı SRİ'in anahtarlama kayıplarını önemli oranda arttırmadan çıkış gücünün geniş aralıkta kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla iletim ve yalıtımda kalma süreleri eşit olan sürme sinyalinin bazı iletim palslerinin silinmesiyle çıkış gücü azaltılmıştır. Aynı yöntem ile daha önce akım beslemeli sıfır gerilim anahtarlama E sınıfı inverterde çıkış gücü kontrolü gerçekleştirilmiştir [10]. DE sınıfı inverter [11] ve E sınıfı doğrultucu güç dönüştürücülere de benzer çalışmalar uygulanmıştır [12]. Bu uygulamalarda çıkış gücü yüksek frekanslarda yüksek verim ile kademe kademe değiştirilmektedir. Geçmiş yıllarda daha çok yüksek frekanslı güç dönüştürücülerde kullanılmış olan kontrol yöntemi, bu çalışmada sıfır gerilim anahtarlama şartlarında çalışan orta frekanslı gerilim beslemeli tek anahtarlı SRİ devreye uygulanmıştır. Uygulamaya geçirilen yöntem, devrede sabit çalışma frekansı ve sabit iletim süresinde geniş aralıkta güç kontrolünü mümkün kılmaktadır. Aynı yöntem iletim ve yalıtım süreleri eşit olmayan sürme sinyalleri ile de uygulanabilir.

## 2. TEK ANAHTARLI İNVERTER İLE İNDÜKSİYON ISITMA SİSTEMİ

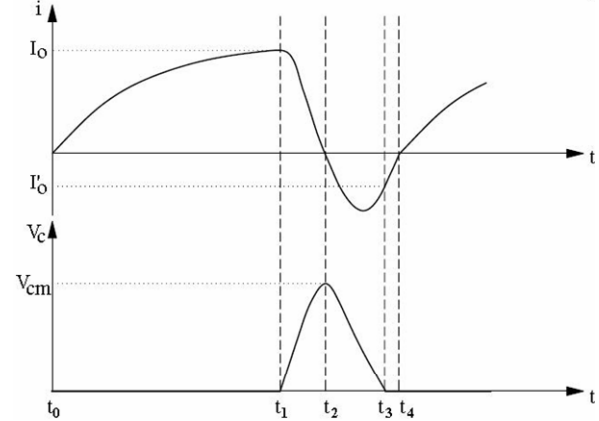
Şekil 1, yüklü indüksiyon bobini eşdeğer direnci, eşdeğer endüktansı ve rezonans kondansatöründen oluşmuş inverter devreyi göstermektedir. Devrede bir adet güç anahtarı bulunmaktadır. Devrede kullanılan eleman sayısı az olduğundan karmaşık olmayan, düşük maliyetli ve küçük hacimli bir güç dönüştürücüdür. Kullanılan yarı iletken anahtar toprak bağlantılı olduğu için özel sürücü devrelere ihtiyaç duyulmadan da çalıştırılabilir [9].

Anahtar iletimde iken bobin doğru gerilim kaynağından enerji depo eder. Kondansatör gerilimi sıfırdır. Anahtarın yalıtımı durumunda seri RLC devresi oluşur. Devredeki eşdeğer direnç nedeniyle enerji ısıya dönüşür. Anahtar açık devre olduğunda kondansatör gerilimi sıfırdan tepe değerine, tepe değerinden tekrar sıfıra ulaşır. Negatif değerde osilasyonuna devam edeceği sırada dahili diyot



Şekil 1. Tek anahtarlı seri rezonans inverter

iletime geçerek kondansatör geriliminin sıfır değerinde kalmasını sağlar. Bobin akımı ve kondansatör gerilimine ait dalga şekilleri Şekil 2'de görüldüğü gibi olur. Anahtarın durum değiştirdiği anlarda uçlarındaki gerilimin sıfır olması sağlanarak sıfır gerilim anahtarlama gerçekleştirilmiş olur [13].



Şekil 2. Bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri

Anahtarın iletimi durumunda bobin akımı zaman sabitesine ( $\tau$ ) ve başlangıç akımına ( $i(t_0)$ ) bağlı olarak Eşitlik 2'den bulunur; kondansatör gerilimi sıfırdır.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{V}{R} + \left[ i(t_0) - \frac{V}{R} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

$$v_c(t) = 0 \quad (3)$$

Anahtar ve diyot yalıtımda iken bobin akımı ve kondansatör gerilimi denklemleri Eşitlik 4 ve 5'deki gibi olur.  $I_0$  bobin akımının başlangıç değeri, B sabiti ise kararlı durum değeridir.

$$i(t) = e^{-\alpha t} (A_1 \sin \omega_d t + A_2 \cos \omega_d t) + B \quad (4)$$

$$v_c(t) = V - Ri(t) - L \frac{di(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (7)$$

$$\omega_d = \sqrt{\omega_r^2 - \alpha^2} \quad (8)$$

$$A_1 = \frac{V - RI_0}{L\omega_d} + \frac{\alpha I_0}{\omega_d} \quad (9)$$

$$A_2 = I_0 \quad (10)$$

Diyot iletme geçtiğinde kondansatör gerilimi sıfırdır, bobin akımı Eşitlik 11'den hesaplanabilir.

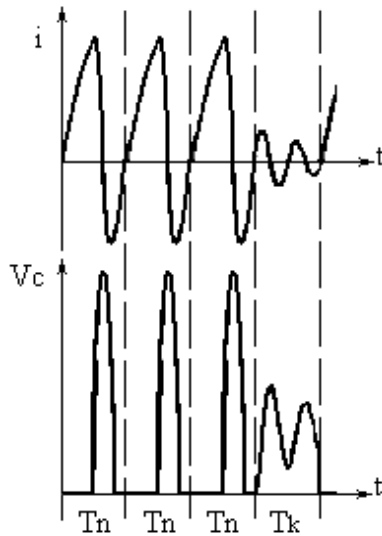
$$i(t) = \frac{V}{R} + \left[ i(t_3) - \frac{V}{R} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

$$v_c(t) = 0 \quad (12)$$

### 3. KONTROL PALSLERİNİN SİLİNMEYİLE GÜÇ KONTROLÜ

Önerilen yöntem ile anahtarlama frekansında ve anahtarın iletim süresinde değişiklik yapılmadan, sürme sinyalindeki iletim palslerinden bazılarının silinmesiyle güç kontrolü gerçekleştirilmiştir. Anahtarlamanın yapıldığı periyotlar normal periyot (N), anahtarlamanın yapılmadığı periyotlar kontrol periyodu (K) olarak adlandırılabilir. Anahtarlama kontrol periyodu sayısı arttıkça çıkış gücü azalmaktadır. Şekil 3, üç normal ve bir kontrol periyodu içeren sürme sinyali için bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekillerini vermektedir.

Normal periyotta sıfır gerilim anahtarlama şartları sağlandığından anahtarlama kayıpları düşük düzeydedir. Kontrol periyodu sonunda sıfır gerilim şartları bozulduğu için anahtarı koruyucu tedbir alınmalıdır. Bunun için iletim durumu söndürücü devre kullanılabilir. Söndürme devresi anahtarın yüksek di/dt oranı nedeniyle zarar görmesini engellemektedir. Silinen sürme palsleri bittiğinde



Şekil 3. Üç normal bir kontrol periyodu ile bobin akımı ve kondansatör gerilimi

devre sıfır gerilim anahtarlama ile çalışmaya devam edecektir. Düşük güç uygulamalarında söndürücü devre kullanılmadan da inverter çalıştırılabilir.

Anahtar ve diyot açık devre iken bobin akımı ve kondansatör gerilimi sönümlü osilasyon dalga şekline sahip olur. Eşitlik 13, sistemin sıfır gerilim şartlarında çalışabilmesi için gerekli alt sınır değeridir [5]. Bu değer rezonans elemanlarına, başlangıç akımına ve çalışma gerilimine bağlı olarak değişim gösterir. Sınır değerinin altında kondansatör gerilimi sıfıra ulaşmaz ve diyot iletme geçemez. Bu sebepten sıfır gerilim anahtarlama için rezonans elemanlarına uygun çalışma gerilimi seçilmelidir.

$$\left[ \sqrt{I_0^2 (L/C) + V^2} \right] e^{-\frac{2\pi - \theta}{2Q}} = V \quad (13)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{I_0 \sqrt{L/C}}{V} \right) \quad (14)$$

$$Q = \frac{\omega_r L}{R} \quad (15)$$

Bununla birlikte sıfır gerilim anahtarlama koşullarının sağlanabilmesi için anahtarın yarım rezonans periyodundan kısa bir gecikme süresi (Td) kadar sonra iletme geçirilmesi gerekmektedir [14].

$$T_d = \frac{\pi}{2\omega_r} \quad (16)$$

### 4. SİMÜLASYON VE UYGULAMA

60V kaynak geriliminde 62.5kHz anahtarlama frekansında tek anahtarlı SRİ'li mutfak tipi induksiyon ısıtıcıdaki güç MOSFET'ine dört farklı sürme sinyali uygulanarak bobin akımı ve kondansatör gerilimi dalga şekilleri alınmıştır (R=2.9Ω, L=28.5μH, C=82nF, S=IRFP460). Üretilen sinyallerde normal ve kontrol periyotlarının sıralanış şekli Tablo 1'de görülmektedir. Her dört anahtarlama periyodundaki silinen periyot sayısına göre 4N/0K, 3N/1K, 2N/2K, 1N/3K olarak isimlendirilen kontrol sinyalleri kare dalga üretici, sayısal mantık kapıları (74LS04, 74LS08, 74LS32) ve JK Flip-flop entegreleri (74LS112) kullanılarak oluşturulmuştur.

Tablo 1. Anahtarlama sinyalinin sıralanışı

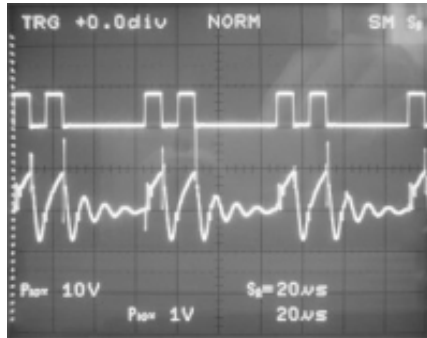
Sürme Sinyali	Anahtarlama Periyodu			
4N/0K	N	N	N	N
3N/1K	N	N	N	K
2N/2K	N	N	K	K
1N/3K	N	K	K	K

MOSFET'e uygulanan dört farklı sürme sinyali için ölçülen ve hesaplanan giriş gücü, simülasyon sonuçlarından elde edilmiş anahtar kayıpları ve inverter devrenin verim değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Kontrol periyotlarının ardından gelen normal periyot başlangıcındaki kondansatör akımının anahtara zarar verebilecek değerlerin altına indirilebilmesi için bobin, direnç ve diyottan oluşmuş iletim durumu söndürücü devre kullanılmıştır. Güç yaklaşık olarak %70 oranında azaltılabilmektedir. Devrenin PSpice elektronik simülasyonunda giriş gücü 127.45W ile 42.95W arasında değişim göstermektedir. Aynı çalışma frekansı ve rezonans elemanları için anahtarın iletim süresinin kontrolü ile güç kontrolü sıfır gerilim şartları bozulmadan gerçekleştirilememektedir.

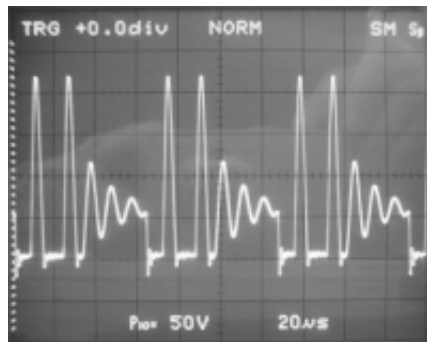
**Tablo 2.** Farklı kontrol sinyalleri için giriş gücü ve verim sonuçları

Sürme Sinyali	Ölçülen	Hesaplanan	Simülasyon	
	Giriş Gücü (W)	Giriş Gücü (W)	Anahtar Kayıpları (W)	Verim (%)
4N/0K	143.4	132.04	5.89	94.4
3N/1K	119.4	102.39	8.53	90.6
2N/2K	82.2	71.08	5.12	90.6
1N/3K	43.8	40.88	3.65	88.2

Şekil 4, iki normal iki kontrol periyodu içeren sürme sinyalini, bobin akımını ve kondansatör gerilimini göstermektedir. Normal çalışma periyotlarında anahtar uçlarındaki gerilim, anahtar durum değiştirirken sıfırdır. Kontrol periyotları yük akımının



(a)



(b)

**Şekil 4.** a) 2N/2K sürme sinyali (10V/div) ve bobin akımı (10A/div), b) kondansatör gerilimi (50V/div)

etkin değerini azaltmaktadır. Sürme sinyallerinin silinmesiyle çıkış gücü kademeli olarak ayarlanabilmektedir.

## 5. SONUÇ

Tek anahtarlı SRİ'ler ile yüksek frekanslarda yüksek verimli güç dönüşümü gerçekleştirilebilmektedir. Bu çalışmada gerilim beslemeli tek anahtarlı SRİ ile yapılmış mutfak tipi bir induksiyon ısıtıcının güç kontrolü, anahtar iletim süresinin değiştirilerek yapılması yerine bazı iletim palslerinin silinmesi yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Uygulamaya geçirilen yöntem sabit anahtarlama frekansında ve sabit iletim süresinde çalışılmasına olanak tanımaktadır. İhtiyaç duyulan kontrol palsleri basit bir dijital devre aracılığıyla elde edilebileceği gibi, programlanabilir bir entegre ile de oluşturulabilir. Kullanılan yöntem ile farklı uygulamalar için daha geniş aralıkta güç kontrolü sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

- Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J. M. ve Acero, J., "A Comparative Study Of Resonant Inverter Topologies Used In Induction Cookers", **17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference And Expositions**, Dallas, 1168-1174, 10-14 Mart 2002.
- Koertzen, W. H., Van Wyk, J. D. ve Ferreira, J. A., "Design Of The Half Bridge, Series Resonant Converter For Induction Cooking", **26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Atlanta, 729-735, 12-15 Haziran 1995.
- Leisten, J. M. ve Hobson, L., "Parallel Resonant Power Supply For Induction Cooking Using A GTO", **4th International Conference On Power Electronics And Variable-Speed Drives**, London, 224-230, 17-19 Temmuz 1990.
- Hirota, I., Omori, H. ve Nakaoka, M., "Practical Evaluations Of A ZVS-PFM Quasi Load-Resonant High-Frequency Inverter Using A New Generation IGBT For An Induction-Heated Cooking Appliance", **Int. J. Electronics**, Cilt 80, No 2, 329-340, 1996.
- Po, W. ve Komatsu, W., "A Simple And Reliable Class E Inverter For Induction Heating Applications", **Int. J. Electronics**, Cilt 84, No 2, 157-165, 1998.
- Chatterjee, K. ve Ramanarayanan, V., "Optimum Design Of Single Switch Resonant Induction Heater", **IEEE International Symposium On Industrial Electronics**, 858-859, 25-29 Mayıs 1992.
- Chatterjee, K. ve Ramanarayanan, V., "A Comparative Study Of Inverter Circuits For Induction Heating", **International Power Engineering Conference**, Singapore, 537-542, 18-19 Mart 1993.

8. Song, J., Greenwood, A. ve Batarseh, I., “Analysis And Design Of Zero Voltage Switching Class E Converter”, **Proceedings Of The 1996 IEEE SOUTHEASTCON Conference**, Tampa, 545-550, 11-14 Nisan 1996.
9. Ponce, M., Arau, J., Alonso, M. ve Rico-Secades, M., “Analysis Of The Class E Amplifier Used As Electronic Ballast With Dimming Capability For Photovoltaic Applications”, **Int. J. Electronics**, Cilt 88, No 7, 831-846, 2001.
10. Bin Yusoff, M., Sekiya, H., Lu, J. ve Yahagi, T., “Class E Inverter Using Thinned Out Method”, **The 25th International Telecommunication Energy Conference**, Yokohama, 713-720, 19-23 Ekim 2003.
11. Sekiya, H., Matsuo, M., Koizumi, H., Suetsugu, T., Mori, S. ve Sasae, I., “New Control Method Of Class DE Inverter-Class DE Thinning-Out Inverter”, **The 20th International Telecommunications Energy Conference**, San Francisco, 237-242, 4-8 Ekim 1998.
12. Koizumi, H., Sekiya, H., Matsuo, M. ve Mori, S., “Resonant DC/DC Converter With Class DE Inverter And Class E Rectifier Using Thinned-Out Method”, **IEEE Transaction On Circuits And Systems**, Cilt 48, No 1, 123-126, 2001.
13. Öncü, S. ve Sazak, B. S., “E Sınıfı İnverterli Mutfak Tipi Bir İndüksiyon Isıtma Uygulaması”, **Sigma Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi**, No 2, 68-73, 2004.
14. Omori, H. ve Nakaoka, M., “New Single Ended Resonant Inverter Circuit And System For Induction Heating Cooking Apparatus”, **Int. J. Electronics**, Cilt 67, No 2, 277-296, 1989.