

# KENDİNDEN TETİKLEMELİ İNDÜKSİYON ISITICI TASARIMI VE DENEYSEL UYGULAMASI

**Güngör BAL, Selim ÖNCÜ\* ve Selim BÖREKÇİ\*\***

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Beşevler, Ankara

\* Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, 78050 Karabük

\*\* Elektrik Elektronik Mühendisliği, Mühendislik Fakültesi, Akdeniz Üniversitesi, 07058 Antalya

[gunbal@gazi.edu.tr](mailto:gunbal@gazi.edu.tr), [soncu@karabuk.edu.tr](mailto:soncu@karabuk.edu.tr), [sborekci@akdeniz.edu.tr](mailto:sborekci@akdeniz.edu.tr)

(Geliş/Received: 19.01.2010; Kabul/Accepted: 11.08.2011)

## ÖZET

Kendinden tetiklemeli devreler, fazla kontrol elemanı gerektirmediklerinden, basit kontrol devresi ve düşük maliyetle güç denetimi yapabilmektedirler. Bu üstünlükleri nedeniyle evirici ve elektronik balast gibi bazı güç elektroniği uygulamalarında kendinden tetikleme topolojisi kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kendinden tetiklemeli denetim yönteminin bir uygulaması D-sınıfı eviricili bir indüksiyon ısıtıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Güç anahtarları olarak kullanılan transistörlerin sırayla tetiklenmesi işlemi yük akımının değişimi izlenerek gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kendinden tetiklemeli denetim sisteminin simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Kendinden tetikleme, indüksiyon ısıtma, akım transformatörü, rezonans evirici, D-sınıfı evirici.

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A SELF OSCILLATING INDUCTION HEATER

### ABSTRACT

Self oscillating circuits do not require more complicated control circuit. So they can provide low cost power control with very simple control circuit. Because of these advantages the self oscillating circuit topology is widely used in some power electronics applications such as inverters and electronic ballasts. In this study, an application of self oscillating control technique was achieved on an induction heater driven by D-class inverter. Transistors used as power switches are triggered in order by the feedback signal which follows load current. For the developed self oscillating induction heating system, results obtained from simulations and experiments are compared and then presented.

**Key Words:** Self oscillating, induction heating, current transformer, resonant inverter, D-class inverter.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İndüksiyon ısıtma, manyetik alan etkisinde kalan nüvede oluşan eddy kayıplarının ısıtma amacına yönelik olarak kullanıldığı bir tekniktir. Alternatif akımda çalışan elektrik makinalarında zamanla değişen manyetik alan içerisinde kalan nüvede bir enerji kaybının meydana geldiği ve nüvenin ısındığı bilinmektedir. İndüksiyon ısıtma, kısaca değişken elektromanyetik alan içerisinde bulunan iletken malzemenin dahili enerji kayıpları nedeniyle ısınması olarak tanımlanabilir [1].

Bir metal parçanın indüksiyon ile herhangi bir ısıtma işlemi tabii tutulabilmesi için ısıtılacak malzemenin şekline uygun sarılmış bir bobin ve bu bobinden ihtiyaç duyulan genlik ve frekansta akım geçirebilecek bir güç kaynağı gereklidir. Diğer bir ifadeyle, indüksiyon ısıtma sistemini oluşturan üç temel unsur olarak indüksiyon bobini, ısıtılacak malzeme (yük parçası) ve alternatif akım güç kaynağı sayılabilir. İndüksiyon bobini için gerekli alternatif akım genellikle DA-AA rezonans eviriciler ile gerçekleştirilmektedir.

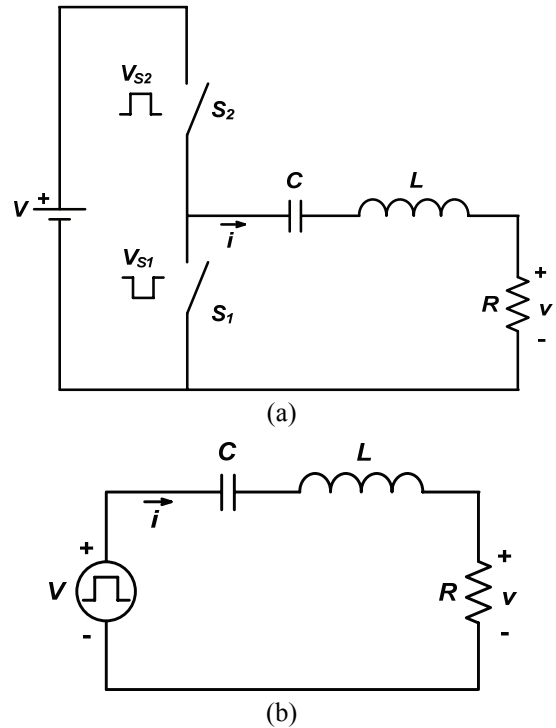
İndüksiyon ısıtıcıda güç katının denetimi programlanabilir veya paket (PWM, PLL) entegreler ile gerçekleştirilebileceği gibi kendinden tetiklemeli sürücü devreler ile de yapılabilir. Kendinden tetiklemeli eviriciler özellikle elektronik balast devrelerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip bir denetim yöntemi düşük maliyetli olmasının yanı sıra, sağlam, güvenilir ve basit yapılıdır [2]. Kendinden tetiklemeli denetim yöntemi elektronik balastın dışında DA-DA güç dönüştürücülerinde [3,4] ve evirici uygulamalarında da kullanılabilir [5]. Doyumlu tetikleme nüvesi kullanılarak kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı tasarımı da gerçekleştirilmiştir [6,7]. Bu sistem PWM yarım köprü devre topolojisi çalışmasına dayandırılmıştır. Rezonans anahtarlama yerine PWM anahtarlama yapılmış ve yumuşak anahtarlama işlemi MOSFET'in dahili kapasitansı ve ısıtma bobini endüktansı ile sağlanmıştır. Devrede rezonans kondansatörü kullanılmadığı için rezonans güç dönüşümü gerçekleştirilmemektedir. Kendinden tetikleme topolojisinin kullanıldığı bir başka çalışmada ise tam köprü evirici ile rezonans güç dönüşümünün gerçekleştirildiği bir indüksiyon ısıtıcı devresi sunulmuştur [8]. Güç anahtarı olarak BJT kullanılan devrede her bir anahtar için ayrı olmak üzere toplamda dört tetikleme transformatörü kullanılmıştır.

Bu çalışmada, kendinden tetiklemeli denetim yönteminin bir uygulaması D-sınıfı eviricili bir indüksiyon ısıtıcı üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tam köprü tipi kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı uygulamasından farklı olarak iki adet yarı iletken güç anahtarı kullanılmıştır. Devrede seri rezonans kolu üzerine yerleştirilen bir adet akım transformatörüne ait ters polariteli iki farklı sekonder sargı ile MOSFET güç anahtarları denetlenmiştir. PWM anahtarlama kendinden tetiklemeli ısıtıcıda gerilim bilgisi kullanılarak tetikleme gerilimi üretilmektedir. Bu çalışmada PWM anahtarlama yerine rezonans anahtarlama gerçekleştirilmiştir. Anahtarların tetikleme geriliminin elde edilebilmesi için akım transformatörü ile rezonans akımından geri besleme alınmıştır. Böylelikle sayısal denetim devresi kullanılmadan anahtarların yaklaşık %50 görev zamanı ile birbirinin değili olarak sürülmesi sağlanmış, aynı zamanda anahtarlar arasında ölü zaman oluşturulmuştur. Diğer kendinden tetiklemeli güç dönüştürücü uygulamalarında olduğu gibi yapılan bu çalışmada da güç anahtarlarını denetlemek için gerekli güç, rezonans devresinden sağlanmakta ve harici güç kaynağına ihtiyaç duyulmamaktadır. Güç kaynağının artı ucuna bağlı yarı iletken anahtarın kapı devresinin yalıtımı, akım transformatörü ile sağlanmaktadır. Dolayısı ile anahtarların denetimi için optik veya entegreli sürücüye gerek yoktur. Bu sayede sistem karmaşıklığı, maliyeti ve hacmi azaltılmaktadır. Bununla birlikte indüksiyon ısıtıcıdaki yük değişimi akım transformatörü tarafından algılanarak çalışma frekansı

değiştirilmektedir. Tasarlanan kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı sisteminin hesaplama ve simülasyon sonuçlarının doğrulanması, deneysel çalışma sonuçları ile sağlanmıştır.

## 2. GERİLİM BESLEMELİ D-SINIFI SERİ REZONANS EVİRİCİ (VOLTAGE FED CLASS-D SERIES RESONANT INVERTER)

Gerilim beslemeli D-sınıfı eviricinin temel devresi Şekil 1'de gösterilmiştir. Devrede anahtarların idealde %50 iletim oranı ile tetiklenmesi sonucunda, rezonans kolu üzerine genliği kaynak gerilimine ( $V$ ) eşit olan ve frekansı anahtarlama frekansı ( $f$ ) olan kare dalga gerilim uygulanır. Rezonans elemanlarının uygun seçilmesiyle yük akımı sinüsoidale yakın olur.



Şekil 1. D-sınıfı seri rezonans evirici ve eşdeğer devresi (Class-D series resonant inverter and equivalent circuit)

Kare dalga gerilimin temel bileşeni Fourier açılımına göre Eşitlik 1 ile tanımlanır [9].

$$v_l = V_m \sin \omega t \quad (1)$$

Burada;

$$V_m = \frac{2V}{\pi} \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

Rezonans devresi akımı Eşitlik 4 ile verilir.

$$i = I_m \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

$$I_m = \frac{V_m}{Z} \quad (5)$$

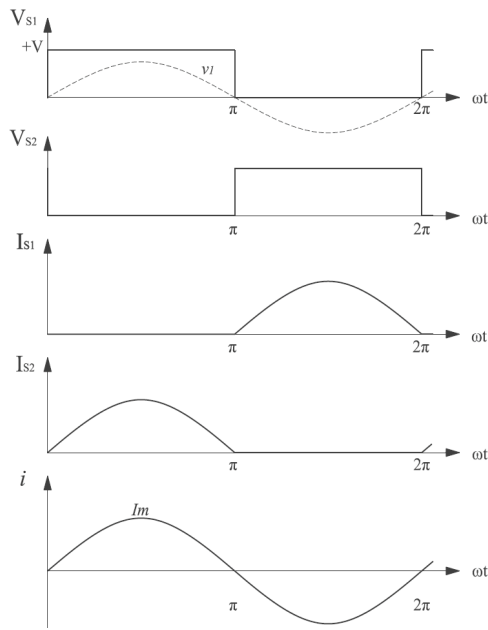
Eşitlik 6'da verilen seri rezonans devresi empedansının devre akımını etkilediği Eşitlik 5'den görülmektedir.

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (6)$$

$$X_L = \omega L \quad (7)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (8)$$

Anahtarlama frekansının rezonans frekansına ( $f_r$ ) eşit olması durumunda, toplam reaktans  $X=0$  olacağından giriş empedansı alabileceği en küçük değeri alır. Bu durumda devre akımı en yüksek değerine ulaşır ve akım ile gerilim arasında faz farkı oluşmaz (Şekil 2).



**Şekil 2.** D-sınıfı evirici teorik dalga şekilleri ( $f = f_r$ )  
(Theoretical waveforms of Class-D inverter ( $f = f_r$ ))

Şekil 2'de,  $V_{s1}$  ve  $V_{s2}$  anahtar gerilimlerini  $I_{s1}$  ve  $I_{s2}$  anahtar akımlarını,  $i$  yük akımını temsil etmektedir. Anahtarlama frekansı rezonans frekansından büyük olduğu durumda devre endüktif, tersi durumda devre kapasitif özellik gösterir. Bu farklı iki durumda devre akımı, gerilimin temel bileşeninden kalite faktörü ( $Q_L$ ) ve açısal hızı bağlı olarak  $\varphi$  açısı kadar geri veya ileri fazlı olur.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[ Q_L \left( \frac{\omega}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega} \right) \right] \quad (9)$$

Burada;

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

$$Q_L = \frac{\omega_r L}{R} \quad (11)$$

Rezonans frekansında direnç üzerinde harcanan güç, Eşitlik 12 ile bulunur [10].

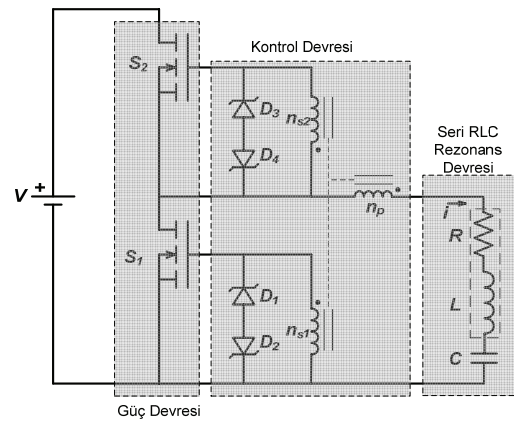
$$P_o = \left( \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R \quad (12)$$

Eşitlik 13 kullanılarak kaynaktan çekilen güç hesaplanabilir. Çıkış gücünün giriş gücüne oranından devrenin verimi bulunur.

$$P_i = \frac{V}{\pi} I_m \quad (13)$$

### 3. KENDİNDEN TETİKLEMELİ İNDÜKSİYON ISITICI (SELF OSCILLATING INDUCTION HEATER)

İndüksiyon ısıtma sistemindeki ısıtma bobini ile yük parçası yaklaşık eşdeğer seri RL devre ile temsil edilir ve indüksiyon bobinine uygun bir kondansatör seri bağlanırsa, evirici devre için seri bir RLC rezonans kolu elde edilmiş olur. Rezonans akımı dalga şekline göre güç anahtarları akım transformatörü ile tetiklenir. Şekil 3, kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı devre şemasını göstermektedir. Tetikleme transformatörünün primer sargısı ( $n_p$ ) rezonans kolu üzerine, ters polariteli sekonder sargıları ( $n_{s1}$  ve  $n_{s2}$ ) ise MOSFET anahtarlarının G-S uçlarına bağlanmıştır.



**Şekil 3.** D-sınıfı eviricili kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı (Self oscillating induction heater with class-D inverter)

Devrede yüklü bobinin kalite faktörü yeterince büyük olursa, rezonans akımı sinüsoidal yaklaşır ve neticede akım transformatörünün sekonder akımı da sinüsoidal olur. Sekonder devreye bağlı zener diyotlar ( $D_1, D_2, D_3, D_4$ ), MOSFET tetikleme gerilimini  $+V_z$  ile  $-V_z$  arasında sınırlandırır. Kendinden tetiklemeli devrelerin çalışmasını etkileyen iki önemli parametre akım transformatörü mıknatıslama endüktansı ( $L_m$ ) ile zener diyot gerilimidir [2].

### 3.1 Akım Transformatörü Parametreleri: (Parameters of current transformer)

Akım transformatörünün primer ve sekonder endüktans değerlerinin hesaplanmasında sarım sayısı ve kullanılan nüvenin endüktans katsayısı ( $A_L$ ) kullanılır. Endüktanslar, Eşitlik 14 ve 15 kullanılarak bulunur. Dönüştürme oranı ( $a$ ) primer ve sekonder sargılarının sarım sayılarına bağlıdır.

$$L_p = n_p^2 A_L \quad (14)$$

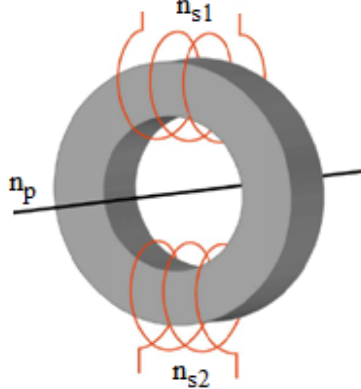
$$L_s = n_s^2 A_L \quad (15)$$

$$a = \frac{n_p}{n_s} \quad (16)$$

Burada  $n_p$  ve  $n_s$  sırasıyla primer ve sekonder sarım sayıları iken  $L_p$  ve  $L_s$  primer ve sekonder sargıların endüktanslarıdır. Mıknatıslama endüktansı  $L_m$ , etkileşim katsayısı ( $k$ ) ile sargı endüktanslarına bağlıdır ve Eşitlik 17 kullanılarak hesaplanır.

$$L_m = k \sqrt{L_p L_s} \quad (17)$$

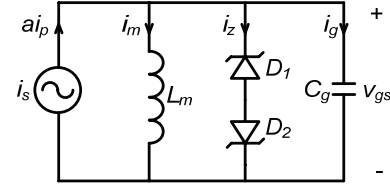
Tetikleme devresinde hava boşluğu bulunmayan yüksek manyetik geçirgenlikli halka nüveli transformatörün tercih edilmesi, sargılar arası manyetik bağı artırır ve kaçak akı reaktansını azaltır. Şekil 4, tetikleme devresinde kullanılan akım transformatörünün yapısını göstermektedir.



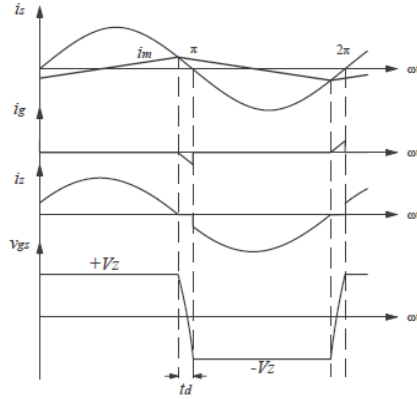
Şekil 4. Akım transformatörü ( $n_{s1} = n_{s2} = n_s$ ) (Current transformer ( $n_{s1} = n_{s2} = n_s$ ))

### 3.2 Kendinden Tetikleme Devresi Tasarımı: (Design of self oscillating circuit)

Eviricide kullanılan kendinden tetikleme devresi, akım kaynağı tarafından beslenen MOSFET kapı devresi olarak modellenilebilir. Şekil 5, tetikleme transformatörünün bir akım kaynağı ve mıknatıslama endüktansı ile temsil edildiği tetikleme devresi modelini ve yaklaşık dalga şekillerini göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 5. a) Tetikleme eşdeğer devresi b) Dalga şekilleri (a) Equivalent circuit of triggering circuit b) Waveforms)

MOSFET kapı devresi akımı ile zener diyot ve mıknatıslama akımlarının toplamı akım kaynağının akımına eşittir. Devrede akım transformatörü sekonder sarım sayısı yeterince büyük seçildiğinde, mıknatıslama reaktansı büyür, mıknatıslama akımı azalır. Mıknatıslama reaktansı azalır, mıknatıslama akımının sıfırdan büyük değeri artar. Zener akımının sıfırdan büyük değerlerinde tetikleme gerilimi  $+V_z$  değerini, tersi durumda ise tetikleme gerilimi  $-V_z$  değerini alır. Anahtarlama arasındaki gecikme süresini ( $t_d$ ) MOSFET kapı devresi kapasitesi ( $C_g$ ) etkiler.

Gecikme süresi aynı zamanda anahtarlar arasındaki ölü zamanı belirler. Bu sayede iki anahtarın aynı anda iletme geçmesi engellenmektedir. Eşitlik 5 ile yük devresinden geçen akımın tepe değeri hesaplanabilir. Tepe akım değerine göre zener diyot gücünü aşmayacak şekilde sekonder akımı tespit edilir. Primer ve sekonder akım değerlerine göre transformatörün dönüştürme oranı hesaplanır.

## 4. SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALAR (SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES)

Devrenin simülasyonu, PSpice elektronik simülasyon programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon bobini ve yük, yaklaşık bir seri RL eşdeğer devre ile temsil edilmiştir. Eşdeğer devre değerleri sayısal analiz yöntemleri ile bulunabileceği gibi deneysel ölçümler ile de bulunabilmektedir [11].

Kendinden tetiklemeli D-sınıfı eviricili indüksiyon ısıtıcı uygulaması; çapı 0,35mm yalıtımlı bakır iletkenlerden imal edilmiş olan litz telinden sarılmış

bir indüksiyon bobini, 115x35x0,7mm paslanmaz çelik plaka yük ve IRFP450 MOSFET anahtarları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler yapılarak bobin ve yükün yaklaşık eşdeğer değerleri  $R = 2,8\Omega$  ve  $L = 35\mu H$  olarak tespit edilmiştir (yüksüz bobin direnci  $R_b = 0,25\Omega$ ). Rezonans kondansatörü 0,66 $\mu F$  seçildiğinde devre rezonans frekansı 33,11kHz ve yüklü kalite faktörü 2,327 olmaktadır. 30V DA çalışma geriliminde MOSFET iletim direnci de dikkate alındığında [12], yük akımının tepe değeri 6,1A olmaktadır. Akımın tepe değeri ve kaynak gerilimi kullanılarak devre giriş gücü 58,27W, çıkış gücü 47,47W ve sistem verimi %81,5 olarak hesaplanır.

Devrede kullanılan MOSFET'lerin  $V_{gs}$  gerilimine göre zener diyot gerilimi 15V seçilmiştir. Tasarlanan transformatörün dönüştürme oranı 1:30:30 ( $n_p : n_{s1} : n_{s2}$ ) olup nüve olarak "PHILIPS TN23/14/7-3F3" halka nüvesi kullanılmıştır [13]. Akım transformatörüne ait hesaplanan ve ölçülen değerler Çizelge 1'de verilmiştir. Sekonder sarımlar arası etkileşim katsayısı LCR metre kullanılarak yapılan ölçümler ile 0,95 olarak bulunmuştur.

**Çizelge 1.** Akım transformatörü parametreleri  
(The parameters of the current transformer)

	Hesaplanan ( $\mu H$ )	Ölçülen ( $\mu H$ )
$L_p$	1,25	1,1
$L_{s1}$	1125	1140
$L_{s2}$	1125	1135

Devre akımının tepe değeri ve çalışma frekansına ait hesaplanan, simülasyondan alınan ve ölçülen değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

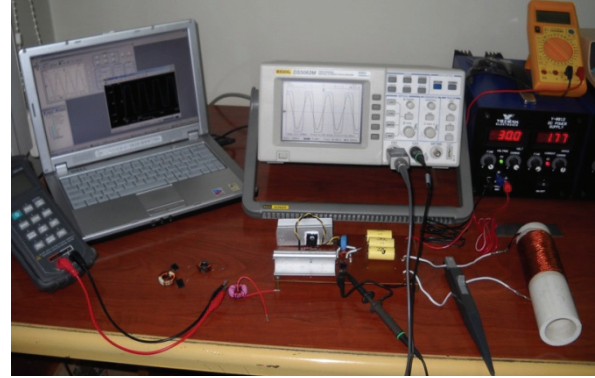
**Çizelge 2.** Hesaplanan, simülasyondan ve deneysel çalışmadan alınan sonuçlar  
(Calculated, simulated and experimental results)

	Hesaplanan	Simülasyon	Deneysel
$I_m$ (A)	6,1	5,79	5,92
$f$ (kHz)	33,11	31	30,4

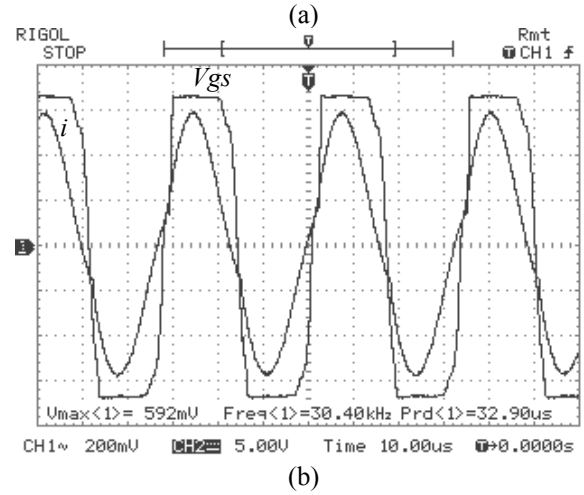
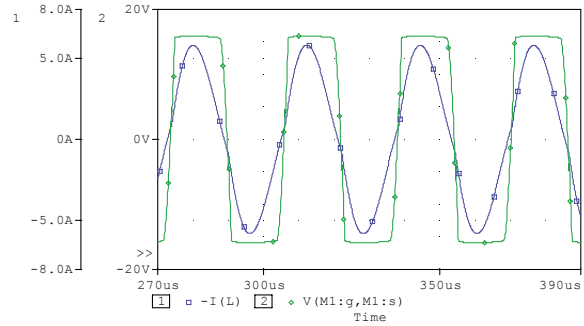
Kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı uygulaması Şekil 6'da gösterilen deneysel çalışma sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcıda devre akımı ve MOSFET kapı gerilimi simülasyon ve uygulama sonuçları Şekil 7'de verilmiştir.

Tetikleme gerilimi ve akım dalga şekillerine göre, evirici akımı ve tetikleme gerilimi yaklaşık olarak aynı fazlıdır. Anahtarlama frekansı rezonans frekansını izlemektedir. Bu sebeple yüksek güç katsayısı elde edilmektedir. Hesaplanan ve alınan sonuçlar arasındaki farklılıklar çalışma frekansının rezonans frekansına tam eşit olmamasından

kaynaklanmaktadır. Bunun sebebi MOSFET kapı devresi kapasitesinin gecikme etkisidir. Anahtarlama anında yüksek anahtar akımı ve gerilimi aynı anda bulunmamakta, oluşan yumuşak anahtarlama koşulları sebebiyle koruma (snubber) devresine gerek kalmamaktadır.



**Şekil 6.** Kendinden tetiklemeli indüksiyon ısıtıcı  
(Self oscillating induction heater)



**Şekil 7.** MOSFET kapı gerilimi ve yük akımı (a) Simülasyon (b) Deneysel (MOSFET gate voltage and load current (a) Simulation (b) Experimental)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, D-sınıfı eviricili bir indüksiyon ısıtıcının MOSFET güç anahtarları ve tetikleme transformatörü kullanılarak kendinden tetiklemeli denetimi gerçekleştirilmiştir. Rezonans akımı, bir akım transformatörü ile algılanarak anahtarların

denetimi için gerekli tetikleme gerilimi elde edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan devrede aktif denetim elemanı mevcut değildir. MOSFET'ler rezonans devresine bağlı akım transformatörü ve zener diyotlar ile denetlenmiştir. Uygulaması gerçekleştirilen sistem basit, küçük hacimli, düşük maliyetli olmasının yanı sıra, rezonans frekansını takip edebilmesi, yumuşak anahtarlama koşullarını sağlaması, anahtarlar için gerekli ölü zaman süresini oluşturması gibi üstünlüklere de sahiptir. Tetikleme devresi için güç kaynağına, yük değişiminin ve rezonansın takip edilebilmesi için elektronik devreye gerek olmaması indüksiyon ısıtıcı için önemli üstünlüklerdir. Tasarlanan prototip devre, uygulamada yaygın olmayan kendinden tetiklemeli farklı güç seviyelerine sahip indüksiyon ısıtma sistemleri için örnek teşkil etmesi bakımından önemlidir.

## 6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 07/2008-01 kodlu proje kapsamında desteklenmektedir.

## 7. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Tudbury, C.A., "Electromagnetics in induction heating", *IEEE Transaction on Magnetics* 10(3): 694-697, 1974.
2. Seidel, A.R., Bisogno, F.E., Pinheiro, H. And Prado,R.N. "Self-oscillating dimmable electronic ballast", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(6): 1267-1274, 2003.
3. Sakamoto, H., Harada, K., Kang, C.H., Matsuda, Y. And Kim, H.J., "A self oscillated half bridge converter using impulse resonant soft-switching", *24<sup>th</sup> Annual International Telecommunications Energy Conference*, 227-231, 2002.
4. Sakamoto, H., Harada, H. And Matsuda, Y., "Self oscillated PWM converter with impulse resonant soft-switching", *The 25<sup>th</sup> International Telecommunications Energy Conference*, 340-343, 2003.
5. Harada, K. And Sakamoto, H., "PWM inverter controlled by a small saturable core", *IEEE Transactions on Magnetics*, 23(5): 2776-2778, 1987.
6. Higashi, T. And Sakamoto, H., "Simplified induction-heating machine for electrical engineering class in teacher training faculty", *37<sup>th</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Leju, 1-5, 2006.
7. Higashi, T. And Sakamoto, H., "Power electronics course in electrical engineering class at teacher training faculty", *12<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference*, Portoroz, 1694-1698, 2006.
8. Francoeur, B., Viarouge, P., Le-Huy, H. And Davat, B., "Design of a 900KHz induction heating unit for fast thermal treatment of a small steel wire", *IEEE*, 686-689, 1990.
9. Kazimierczuk, M.K. And Czarkowski, D., "Resonant Power Converters", *John Wiley & Sons Inc.*, Canada, 1995.
10. Kwon, Y., Yoo, S. And Hyun, D., "Half bridge series resonant inverter for induction heating applications with load-adaptive PFM control strategy", *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Dallas, 575-581, 1999.
11. Koertzen, H.W., van Wyk, J.D., And Ferreira, J.A., "Design of the half-bridge, series resonant converter for induction cooking" *26<sup>th</sup> IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 729 – 735, 1995.
12. IRFP450 datasheet <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SGSThompsonMicroelectronics/mXrutyw.pdf>
13. PHILIPS TN23/14/7 datasheet <http://www.farnell.com/datasheets/17772.pdf>