

Yarı İletken Denetimli Tesla Transformatörü

***Sırrı Sunay GÜRLEYÜK¹, Halit TAŞKIN², Zehra SARAÇ³**

¹Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 67100 Zonguldak-TÜRKİYE

²Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü,
67100 Zonguldak-TÜRKİYE

³Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Bölümü, 67100 Zonguldak-TÜRKİYE

Makale Kodu (Article Code): 10-09A

Özet: Bu çalışmada bir Tesla bobininin eşdeğer devre parametreleri belirlenerek eşdeğer devresi çıkarıldı. Hava nüveli transformatörün çıkışında yüksek test gerilimi üretebilecek rezonans frekansı belirlendi.

Deneysel Tesla transformatör düzeneği; Tesla bobini, basit bir fonksiyon üretici ve yüksek frekansta anahtarlama yapabilen bir yarıiletken eleman kullanılarak oluşturuldu. Hızlı bir kıyıcı kullanarak primer ve sekonder arasında indükleme sağlayacak yüksek frekans üretildi. Çıkış gerilim seviyesi 200.000-250.000 Volt olan bir güç kaynağı gerçekleştirildi. Böylece elektronik kontrollü, yüksek frekanslı yüksek gerilimler elde edildi.

Anahtar Sözcükler: Tesla Transformatörü, MOSFET, Yüksek Gerilim, Rezonans Frekansı, Yalıtkanlık Testi

Tesla Transformer Controlled by Semiconductor

Abstract: In this paper, equivalent circuit of a Tesla Coil is analyzed and its parameters are determined. The resonance frequency is defined to generate a high test voltage in the output of the air cored transformer.

An experimental Tesla transformer system is designed by using a few simple tools as a Tesla Coil, function generator and ultra-fast semiconductor switch. A high frequency is generated to induce voltage between primary and secondary by using high frequency DC chopper. Finally a power supply which generates 200.000-250.000 Volts is implemented. Thus completely semiconductor controlled high voltage is produced.

Keywords: Tesla Transformer, MOSFET, High Voltage, Resonance Frequency, Isolation Test

***E-mail:** gurleyuk@iname.com

Giriş

Tesla bobini primeri az (5-10 siper) ve sekonderi çok (1000-2000 siper) sarımlı ve hava nüveli bir transformatördür. Primer ile sekonder arasındaki hava aralığı en az birkaç cm dir. Bu yüzden sekonderde gerilim indükleyebilmek amacıyla primere uygulanan gerilimin genliğinin veya frekansının ya da her ikisinin birden yeterince yüksek olması gerekmektedir.

Nicola Tesla (1856-1943) elektriğin en önemli bilim adamıdır (Cheney 1981). Tesla bobini onun birçok buluşundan biridir (Nikola Tesla Museum, 2008). 1891 yılında icat ettiği bu transformatör hava nüveli bir rezonans düzeneğidir. Klasik Tesla transformatör sisteminde kullanılan Tesla bobini haricindeki başlıca elemanlar ark elektrotları (eklatör), yüksek gerilim kondansatörleri, yüksek gerilim transformatörleri (Örneğin Neon Transformatörü) ve yüksek gerilim kıyıcısıdır (Boonseng ve Apiratikul 2001). Yüksek gerilim kıyıcısının ark elektrotları ya sabit ya da döner tiptedir. Eğer sabit tipte ise devrenin çalışması rezonans olayına dayanır. Rezonans frekansı kondansatörün kapasitesine, primer sargının endüktansına, elektrotların şekline/aralığına ve gerilim seviyesine bağlıdır (Kolchanova 2003).

Döner atlama elektrotlu tipte ise disk ve çark kullanılarak primer gerilimi yüksek frekansta kıyılır. Böylece 5-15 KV civarındaki şebeke frekanslı Neon transformatörünün çıkışı en fazla birkaç kHz den başlayıp 200 kHz' e kadar kıyılabilir. Kıyma frekansının değerini disk çapı, elektrot sayısı ve motor hızı belirler. Bu tipteki atlama elektrotları daha yüksek güçte Tesla transformatörlerinde kullanılır (Paraliev vd 2005). Girişte kullanılan demir nüveli orta gerilim transformatörü, girişindeki sinüs değişimini aynı frekansta çıkışına aktarmasına rağmen kıyma işlemi sonucu oluşan dalganın şekli kare

biçimindedir. 500 kV ve daha yüksek olabilen ve kare dalga ile sürülen Tesla transformatörü analiz edildiğinde parazitik kapasite, bu kapasiteden etkilenen rezonans, öz ve ortak endüktansların sistemin çalışmasını etkilediği görülmüştür (Kim vd 2008).

Klasik Tesla sisteminin bazı olumsuzlukları vardır:

1- Yüksek gerilim kondansatörünün temininde güçlük (genellikle el yapımı kullanılır).

2- Kıyma işleminin binlerce voltluk gerilim seviyesinde yapılmasının zorluğu

3- Atlama elektrotlarında yüksek ses ve parlak ışık oluşturan plazma ortamının meydana gelmesi. Arkın parlaklığı kaynak makinelerindeki ışık kadar rahatsız edicidir. Yayıdığı ses ise yakınlarında oldukça şiddetlidir. Bu sebeplerden ötürü ark elektrotu olarak ta isimlendirilir. Döner atlama elektrotlu tiplerde ise ayrıca motor kullanmak gerekmektedir.

4- Tesla bobinin çıkışından alınan yüksek gerilim yüz binlerce Volt seviyesindedir. Fakat genliği ve frekansı genellikle ölçülemez ve kontrol edilemez.

Bu çalışmada bütün bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak amacıyla yarıiletken sürücü düzeneği kullanılmıştır. Devrenin sade oluşu, gerekli malzemenin kolay ve ucuz olarak temin edilebilmesi önerilen sistemin diğer önemli üstünlükleridir.

Klasik Tesla Transformatörü ışık oyunları yapan bir düzenek olup sadece eğitim amaçlıdır ve görsellik sunar.

Çıkışta elde edilen yüksek gerilimin genliğini ve rezonans frekansını ayarlamak oldukça zordur. Tesla transformatörü hava nüveli bir transformatör olup ancak ve ancak primer ile sekonder rezonansa getirildiğinde yüksek gerilim indükleyebilen bir sistemdir (Costa 2009).

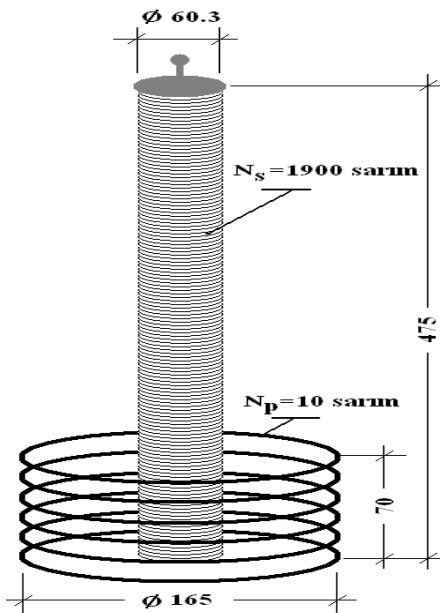
Elektronik sürücülü Tesla transformatörü rezonans frekansı gibi yüksek sayılabilecek bir frekansta kolaylıkla çalıştırılabilen çıkış gerilimi ölçülebilir ve ayarlanabilir bir yüksek test gerilimi üretici olarak kullanılabilir.

İleriki bölümlerde örnek bir Tesla bobininin eşdeğer devre parametrelerinin belirlenmesi, rezonans frekansının hesaplanması ve MOSFET kullanılan yarıiletken sürücü devresi anlatılacaktır. Girişe uygulanan işaret, primer ve sekonder sargılarda indüklenen gerilimlerin ölçüm yöntemi ele alınacak ve dalga biçimleri verilecektir.

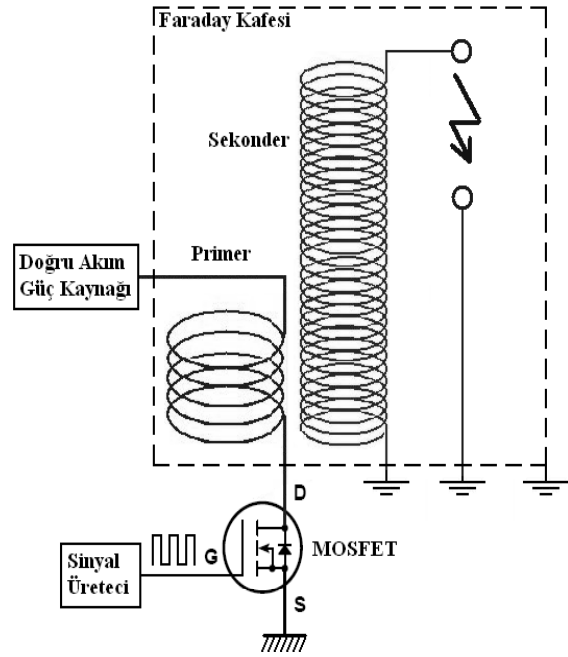
Son bölümde ise elde edilen veriler yorumlanıp sistemin etkinliği, kullanım alanları ve özellikleri tartışılacaktır.

Tesla Bobininin Çalışması ve Eşdeğer Devresi

Bu çalışmada kullanılan Tesla bobininin geometrik ölçüleri Şekil 1 de ve tasarlanan deney düzeneği Şekil 2 de yer almaktadır.



Şekil 1. Tesla Bobini (ölçüler mm cinsindedir)



Şekil 2. Yarıiletken denetimli yüksek gerilim üretici

Devrede yarıiletken eleman olarak MOSFET tercih edilmiştir. MOSFET'in diğer yarıiletken anahtarlar elemanlarına göre avantajı daha yüksek frekanslarda anahtarlama işlevi görebilmesidir.

Deney düzeneği ile yapılan çalışmalarda yüksek frekansta çekilen akım 1A ve uygulanan doğru gerilimin 60V civarındadır. Fakat anahtarlama esnasında MOSFET'in uçlarındaki gerilim seviyesi primerdeki indükleme nedeniyle 500-800V tepe değerine ulaşmaktadır. Bu yüzden anma değeri en az 2A ve 500V olan bir MOSFET gereklidir. MOSFET seçimindeki diğer önemli husus da anahtarlama hızını belirleyen zaman parametreleridir.

Bunlar:

- İletim gecikme zamanı $t_{D(ON)}$
- Yükselme zamanı t_r
- Kesim gecikme zamanı $t_{D(OFF)}$
- Düşüş zamanı t_f
- Geri toparlanma süresi t_{rr}

Sistem yüksek frekansta anahtarlama yaptığı için bu parametreleri olabildiğince küçük değere sahip bir MOSFET tercih edilmelidir.

Kullanılan Tesla Bobinin Teknik Özellikleri

Kullanılan Tesla transformatörüne ait teknik özellikler Tablo 1' de verilmiştir. Bu transformatörün dönüştürme oranı

$$\ddot{u} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{1900}{10} = 190 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Tablo 1: Kullanılan Tesla bobinin teknik özellikleri

Kısım	N Sarım Sayısı	D Bobin çapı (mm)	d Tel çapı (mm)	h Bobin yüksekliği (mm)	R Sargı direnci (Ω)	L* Sargı endüktansı
Primer	10	165	3.264 (8 AWG)	70	0.015	20.29 μ H
Sekonder	1900	60.3	0.203 (32 AWG)	475	193.8	25.45mH

* TOPWARD 5010 LCR metre ile 1kHz de ölçülen değerlerdir

Ölçüm sonuçlar olarak Tablo 1 de verilmiştir.

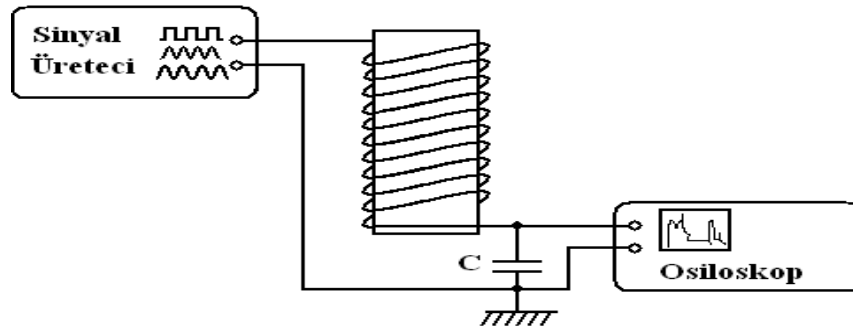
Primer ve sekonderin sargı endüktansları daha hassas olarak Şekil 3' deki ölçme düzeneği ile belirlenir. Bu düzenekte endüktansı ölçülecek bobine seri bir kondansatör bağlanır ve seri devreye frekansı ayarlanabilir bir işaret uygulanır. Kondansatörün uçlarındaki işaret osiloskop ile gözlenir. İşaret genliğinin maksimum olduğu frekans bu kapasite değerinde LC

devresinin self rezonans frekansıdır. Kondansatör değeri bilindiğinden

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

formülünden

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Şekil 3. Öz endüktans ölçüm düzeneği

Rezonans frekansı denklemi kullanılarak

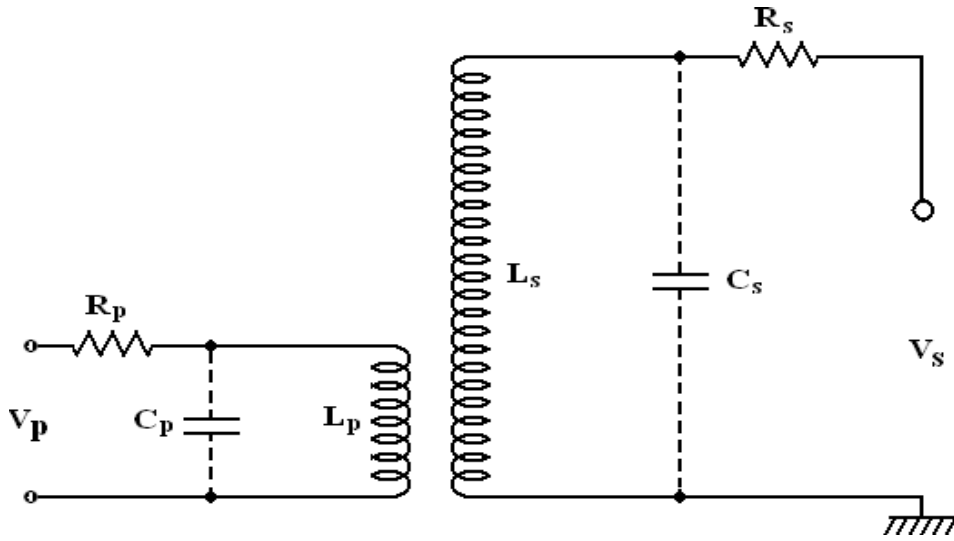
bobin endüktansı $L = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}$ ile hassas

olarak belirlenir. Primer devre için $C=1nF$ kullanıldığında rezonans frekansı 970 kHz ve

$$L_1 = \frac{1}{(2 \times 3.14 \times 970 \times 10^3 \text{ Hz})^2 (1 \times 10^{-9} \text{ F})} = 26.9 \mu H$$

olarak belirlenir. Benzer şekilde sekonder sargı için deney yapıldığında $C = 0.1 \mu F$ lık seri kondansatör için rezonans frekansı $f_{r2}=3.38 \text{ kHz}$ ve $L_2=22.1 \text{ mH}$ olarak hesaplanmıştır. Bunlar ölçülen (Tablo1' de verilen) değerlere yakın olup daha hassas ölçüm sonuçlarıdır.

Şekil 2 deki deney düzeneğinin devre diyagramı ve parametreleri Şekil 4' de verilmiştir.



Şekil 4. Tesla Transformatorü devre şeması

Bu şekilde “p” indisleri Primer ve “s” indisleri sekondere ait devre parametreleridir. C_p ve C_s kondansatörleri gerçekte bobine paralel bağlı olmayan kaçak kapasiteleri göstermek amacıyla kesikli olarak çizilmiştir.

Primer ve sekonderin self rezonans frekansları birbirinden farklı olmakla beraber primerin sekonderde gerilim indükleyebilmesi için ortak bir rezonans frekansı değeri söz konusudur. Bu değer 385 kHz olarak ölçülmüştür. Bu ortak rezonans frekansında

$$f_{r1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} \quad f_{r2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}}$$

$$f_{r1} = f_{r2} = f_r$$

olabilmesi için $L_p C_p = L_s C_s$ olmalıdır (Pungsi ve Chotigo, 2008). Rezonans frekansının değerini kullanarak

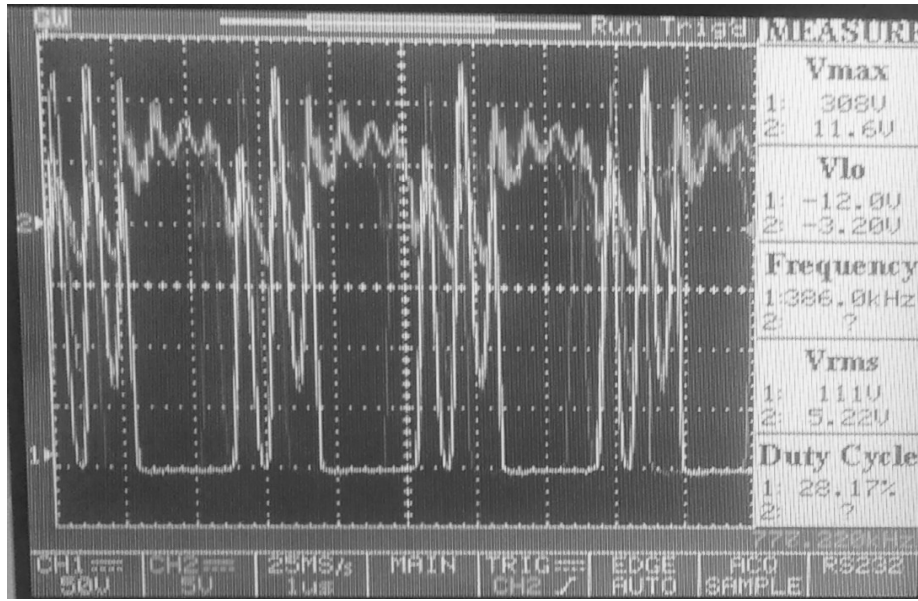
$$C_p = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L_p} = \frac{1}{(6.28 \times 385 \times 10^3)^2 26.9 \times 10^{-6}} = 6.35 nF$$

ve

$$C_s = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 L_s} = \frac{1}{(6.28 \times 385.10^3 \text{ Hz})^2 22.1 \times 10^{-3} \text{ H}} = 7.7 pF$$

olarak belirlenir.

Deneyler Şekil 2 deki düzenek kullanılarak yapılmıştır. Burada girişteki doğru gerilim 40 Volt olarak ayarlanmıştır. Rezonans frekansı kullanıldığında primerde indüklenen gerilim ve uygulanan işaretin dalga biçimleri Şekil 5' de görülmektedir

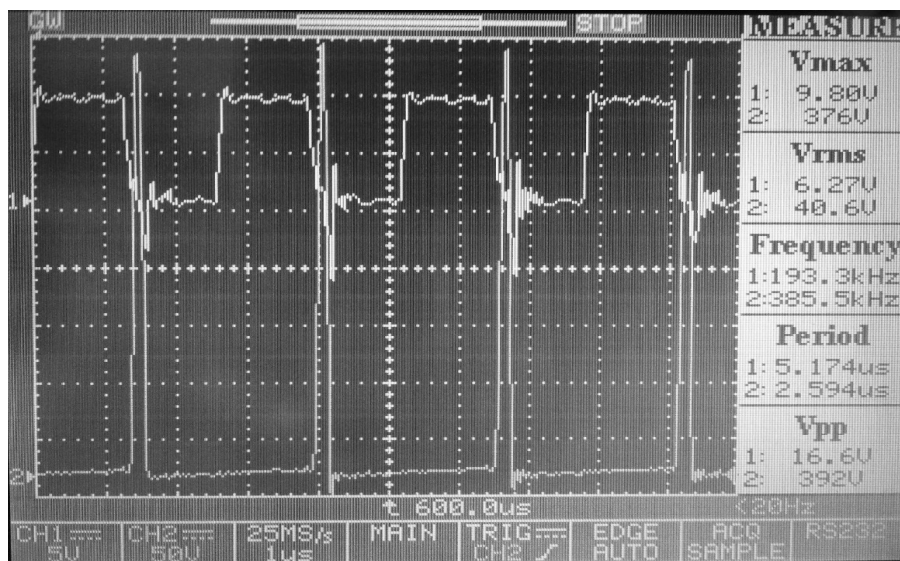


Şekil 5. Rezonans frekansında primer gerilimi

Giriş işareti normal olarak kare dalgadır. Fakat bu işaret sistemde etkileşim nedeniyle kısmen bozulmaya uğramaktadır.

Çıkış dalgası da bu yüksek frekansın kendi bobininde indüklediği gerilimi de içerecek şekilde kanal 1 olarak Şekil 5' de verilmiştir. Bu iki dalga biçiminden giriş ve kare dalga işaretinin inen ve çıkan kenarında bobinde gerilim indüklendiği

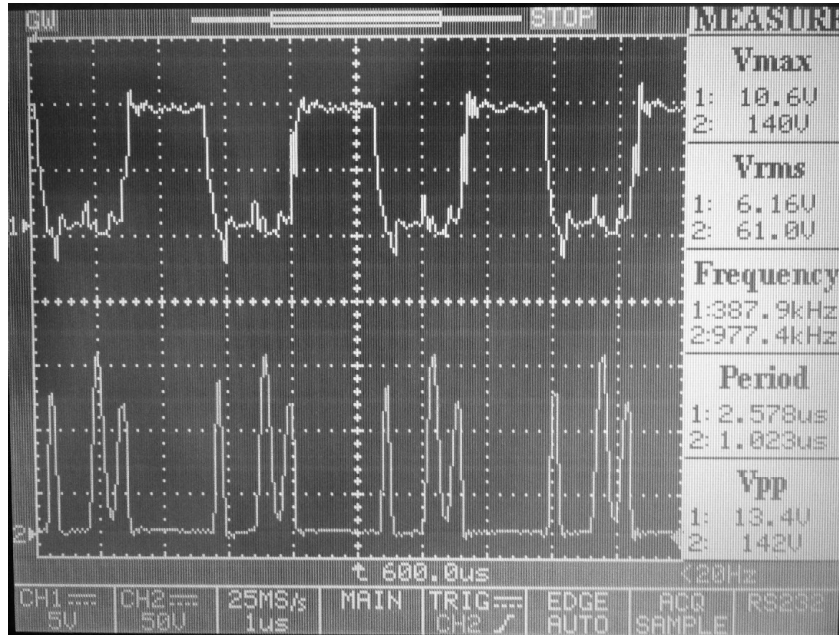
görülmektedir. Girişte uygulanan doğru gerilim 40V civarında olmasına rağmen, rezonans frekansında indüklenen bu gerilimin tepe değeri 308V olup girişteki doğru gerilim yaklaşık 10 katı civarındadır. Sekonderde yüksek gerilimi oluşturan da bu rezonans frekanslı primerde indüklenen gerilimdir.



Şekil 6. Sekondersiz primer gerilimi (20V D.A. besleme durumunda)

Primerde indüklenen gerilim sekonder sargısı yerinden çıkarılmış iken Şekil 6' da ve sekonder sargısı takılı iken ise Şekil 7' deki gibi girişteki kare dalga işareti ile birlikte görülmektedir. Bu iki şeklin karşılaştırılmasından anlaşılacağı üzere rezonans frekansında primer tarafı sekonderde indüklenen gerilimden

etkilenmektedir. Sekonder çıkartılmış ve rezonans frekansı olan 385,5 kHz gibi yüksek değerde iken özendüklem gerilimi çok hızlı artmaktadır. Bu nedenle primere uygulanan doğru gerilim 14V değerinde tutularak Şekil 6 ve 7 deki değişimler gözlenmiştir.



Şekil 7. Sekonderli primer gerilimi (20V D.A. besleme durumunda)

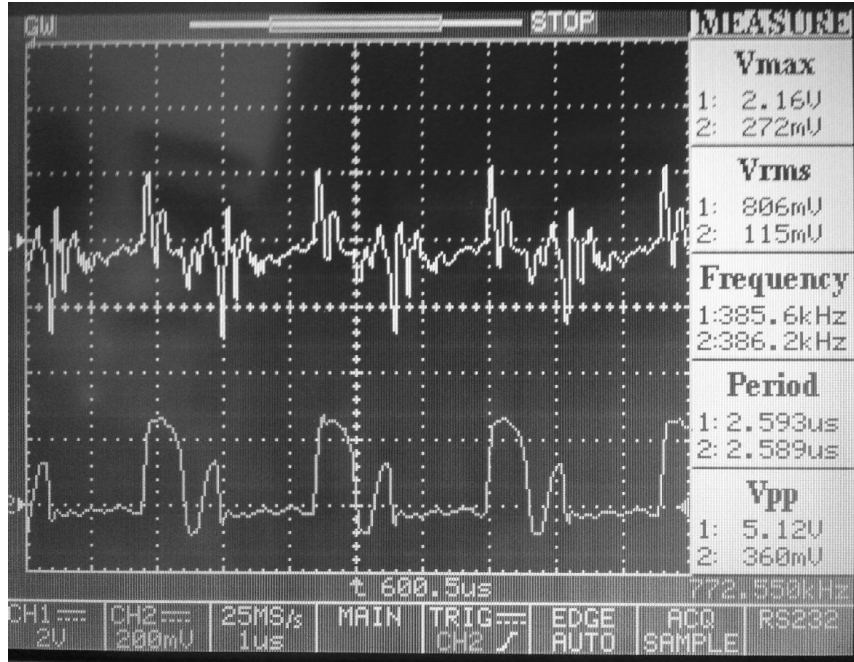
Şekil 6 ve 7 karşılaştırıldığında bazı ilgi çekici sonuçlara rastlanmaktadır. Şekil 6'da sekonder sargı yerinde değilken primere uygulanan kare dalganın düşen kenarında yüksek gerilim indüklenmektedir. Sekonder sargı yerinde iken düşen kenardaki bu gerilimin zayıfladığı fakat yükselen kenarda ve arada başka indükleme gerilimleri oluşmaktadır. Bunun nedeni rezonans frekansında sekonder sargının primer ile etkileşimi ve parazitik kapasite etkisidir. Şekildeki üç pik gerilimin toplamının sekondersiz durumdaki gerilime eşit olması da diğer bir ilginç durumdur.

Sekonder sargıda indüklenen gerilim etkisiyle kare dalganın sadece düşen

kenarında değil aynı zamanda çıkan kenarında ve bu ikisinin arasında da gerilim pikleri oluşmaktadır. Yani rezonans frekansında primer sekonder tarafında gerilim indüklenirken sekonderden yansıyan dalga da bir zıt emk ile primerdeki dalga şeklini değiştirmektedir. Sistemin hem primer ve hem de sekonderinde indüklenen gerilimin değerini etkileyen neden tam olarak bilinmemekle beraber parazitik kondansatörün bunda etkili olduğu düşünülmektedir. Parazitik kondansatör gerçekte dışarıdan bağlanan bir eleman değildir. Şekil 4'de kesikli çizgilerle gösterilen C_p ve C_s kapasiteleri sargılar arasındaki kaçak kapasitelerdir ve parazitik kondansatör olarak adlandırılır. Kare dalga

şeklinde kıyılmış dalganın yükselen ve düşen kenarında oluşan basamak gerilimlerin etkisiyle çıkış gerilimi yansıyan gerilimlerin toplamı şeklinde yüksek gerilim üretir. Bu gerilimin büyüklüğü transformatörün dönüştürme oranı ile açıklanamayacak kadar büyüktür (Kim vd 2008). Sekonderde de indüklenen yüksek gerilimi ölçmek amacıyla 1/10.000 dönüştürme oranına sahip gerilim bölücü direnç zinciri kullanılmıştır. Ölçülen gerilimim dalga biçimi Şekil.8 de verilmiştir. Alttaki grafikte primer dalga biçimi, üsttekinde ise sekonder dalga biçimi görülmektedir. Buradaki ile Şekil 5 ve 8 deki primer dalga biçimleri birbirine

benzememektedir. Şekil 8’de diğerlerinde var olan üçüncü pik kaybolmuştur. Şekil 5 ve Şekil 8 maksimum giriş gerilimi olan 60V doğru gerilimdeki değerlerdir. Gerilim bölücü direnç varken 308V’ luk indüklenen gerilim 272V seviyesine düşmektedir. Bunların nedeni Şekil 8’ deki grafiklerin 1/1000 oranlı gerilim bölücü direnç ile ölçülmesidir. Diğer şekillerde gerilim doğrudan ölçülmüştür. Yani direnç üzerinden ölçüm dalga şeklinin değişmesine ve genliğinin azalmasına sebep olur. Bu yüzden üstteki grafikte sekonder gerilimi 21,6kV görünmekle beraber gerçek değeri çok daha büyüktür.



Şekil 8. Primer ve Sekonder gerilimleri

Ölçme düzeneği bir gerilim bölücü direnç zinciri şeklindedir. Bu halde sekonder de indüklenen gerilimin en yüksek değeri 21.600 Volt olarak belirlenmiştir. Gerilim bölücü direnç zinciri sekondere

paralel olarak bağlandığından ölçülen gerilim gerçek çıkış gerilimi demek değildir. Sadece üretilen gerilimin dalga şeklini göstermek içindir. Paralel dirençler çıkarıldığında gerçek sekonder gerilimi

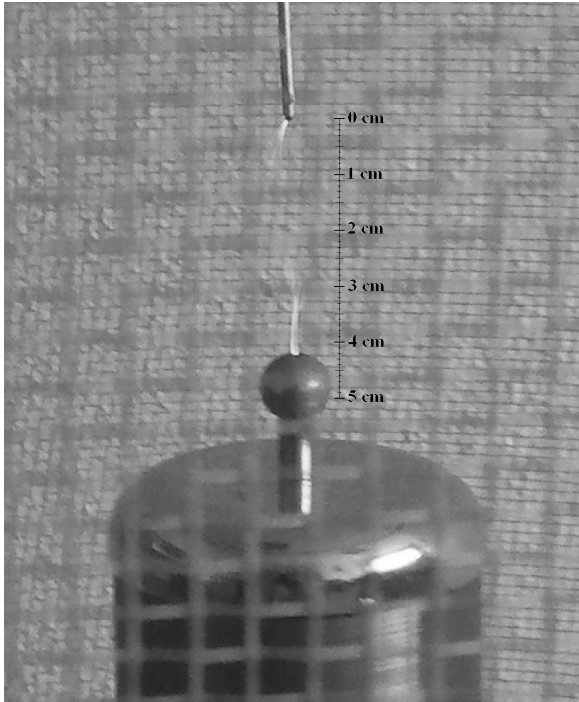
ölçülenden çok daha büyüktür. Fakat bu durumda ölçmek imkansızdır. Sadece yüksek gerilimin atlama mesafesine bakarak gerilimin mertebesi hakkında bir fikir edinilebilir.

Şekil 9 da frekans 385.5 kHz, giriş gerilimi $V_{DC}=60V$ için oluşan arkın fotoğrafı görülmektedir. Bu şekle bakarak havanın delinme dayanımının 30 kV/cm olduğu da göz önüne alınarak üretilen çıkış geriliminin 200.000-250.000V arasında olduğu söylenebilir (Cheng 1989). Normal transformatör dönüştürme oranına göre çıkış geriliminin

$$V_s = üV_p = 190 \times 60 = 11400 \text{ Volt}$$

olması gerekirken parazitik kondansatör ve rezonans etkisi ile çıkışta bu değer onlarca katı büyüklüğünde bir gerilim meydana gelmektedir.

Bu çıkış geriliminin seviyesi giriş gerilimi değiştirilerek veya primer sarım sayısı değiştirilerek ayarlanabilir.



Şekil 9. Yüksek gerilimde oluşan ark

Tartışma

Bu çalışmada gerçekleştirilen yarıiletken kontrollü Tesla transformatör düzeneğinin klasik Tesla transformatörü sistemlerine göre bir çok üstünlüğü bulunmaktadır.

- Yüksek gerilim transformatörüne ihtiyaç olmaması
- Döner mekanik bir anahtarlama düzeneğinin (Kurs veya çark sistemi) gerekmemesi
- Atlama elektrotlarındaki ses ve ışık gürültüsünün olmaması
- Yüksek gerilim kondansatörü kullanılmaması
- Kolay ve ucuz temin edilebilir elemanlarla gerçekleştirilebilmesi

Bu avantajlardan bazılarıdır. Yarıiletken kontrollü Tesla transformatöründe basitçe alçak seviyeli bir doğru gerilim, MOSFET ile yüksek frekansta anahtarlansak yüzlerce kilovolt gerilimler üretilmiştir. Kullanılacak MOSFET n kanallı ve zaman parametreleri küçük değerli APT1201...,APT1001..., IRF710-740, IRFP460 elemanlarından birisi olabilir ve bunların teknik özellikleri detaylı olarak veri sayfalarında (datasheet) bulunabilir.

Bu elemanların zaman parametreleri iyi olmakla beraber geri toparlanma süreleri (t_{rr}) çok iyi değildir. Bu yüzden elemanın sahip olduğu dahili diyot bazen yetersiz kalabileceği için harici bir hızlı diyotun savak-kaynak arasına ters bağlamak yararlı olabilir.

Gerçekleştirilen sistemin bir diğer özelliği de çıkış geriliminin giriş gerilimi ve primer sarım sayısını değiştirilmesi suretiyle ayarlanabilir oluşudur. Böylece yüksek gerilim test ve izolasyon çalışmalarında kullanılabilecek seviyede bir gerilim elde edilebilir. Sistemin yapısı basit ve kullanımı kolaydır. Bu çalışmada Tesla

transformatörü, 0-5MHz kare dalga sinyal üretici ve yarıiletken bir eleman kullanılarak ayarlanabilir yüksek gerilimlerin üretilebileceği gösterilmiştir.

Deneyisel devre ve bu devrede üretilen ayarlı yüksek gerilim yalıtkanlık testlerinde kolaylıkla kullanılabilir.

Kaynaklar

Boonseng C, Apiratikul P 2001. A low cost approach to design the tesla transformer for testing of insulating materials. *Electrical Insulating Materials* (ISEIM 2001): 332-335.

Cheney M 1981. Tesla: Man Out of Time. Touchstone press.

Cheng D K 1989. Field and Wave Electromagnetics. Addison-Wesley; 2nd ed.

Costa EMM 2009. Resonance on transformers excited by square waves and explanation of the high voltage on Tesla Transformer. *Progress In Electromagnetics Research B*, 18: 205-224.

Kim Ji-Hong Kim, Soo-Nam Baek, Byung-San Kwon, Joong-Lok Park, Kewn-Soo and Park Sang-Bong 2008. Calculation of Transformer Resonance Frequency from Short-Circuit Admittance Functions. The International Conference on Electrical Engineering, July 6-10, OKINAWA, JAPAN: 1-4.

Kolchanova VA 2003. On calculation of the Tesla Coil with iron core. IEEE Modern Technique and Technologies, Section I: Power Engineering, Sayfa:40-41

Nikola Tesla Museum 2008. From Colorado Springs to Long Island.

Paraliev M, Gough C, Ivkovic S 2005. Tesla Coil Design for Electron Gun Application, Pulsed Power Conference, IEEE, Sayfa: 1085 – 1088.

Pungsiri B, Chotigo S 2008. The Compact Tesla Transformer for Testing Pin Insulator. Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008, Beijing, China, April 21-24, Sayfa:877-880.