

Transistör Tetiklemeli Tesla Bobini Tasarımı ve Yapımı

Emre Uncuoğlu¹, Özcan Kalenderli², Hakan Kuntman³

^{1,3}Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

²Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

¹e-posta: emre_uncuoglu@yahoo.com.tr

²e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

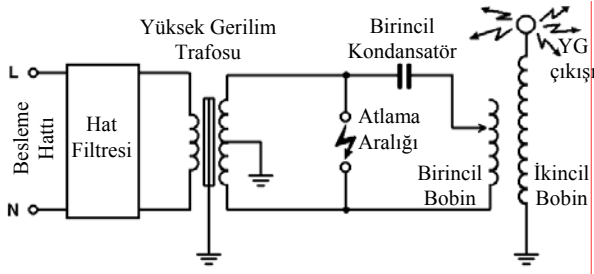
³e-posta: kuntman@itu.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, 100 V ile sürülen, 18,5 kV'a kadar 170 kHz frekanslı gerilim üretebilen, transistör tetiklemeli Tesla bobini tasarlanmış ve yapımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için klasik Tesla üreteçlerinden farklı olarak yüksek gerilim bobinini rezonans frekansında sürecekle ve anahtarlaması (tetikleme) yarı iletken elemanlarla (transistörlerle) yapılan bir yapı tasarlanmış, frekans ayar devresi oluşturulmuştur. Üreteçte rezonans, transistörlerin tetikleme frekanslarının yüksek gerilim bobini ve kapasitesinden oluşan ikincil paralel rezonans devresinin öz frekansına eşitlenmesi ile sağlanmıştır. Sonuçta, üreteçte yüksek gerilim trafosu ve birincil kondansatör kullanılmadığı için benzerlerinden daha hafif ve taşınabilir, atlama aralığı kullanılmadığı için ise daha verimli bir üreteç elde edilmiştir.

1. Giriş

Adını elektrik alanında pek çok keşfi olan mucit Nikola Tesla'dan alan Tesla bobinleri veya üreteçleri, yüksek frekanslı yüksek gerilim üreten hava çekirdekli rezonans trafolarıdır. Profesyonel ve amatör pek çok kişinin ilgisini çeken bu üretecin, Nikola Tesla tarafından yapılan ve önerilen orijinal devre şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



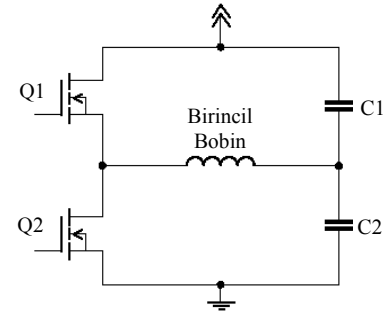
Şekil 1: Klasik Tesla bobini yapısı.

Devrenin çalışma ilkesi şu şekildedir. Yüksek gerilim trafosu birincil kondansatörü doldurur. Birincil kondansatörün gerilimi atlama aralığının atlama gerilimi değerini ulaştığında bu aralıkta atlama yani kısa devre olur. Bu durumda birincil kondansatör ve birincil bobin paralel duruma gelir. Bu şekilde oluşan birincil paralel rezonans devresiyle, ikincil bobin ve yüksek gerilim çıkışının toroid ya da küre şeklindeki elektrodunun toprağa göre kapasitesinden oluşan ikincil rezonans devresi rezonansa girer. Bu sayede üretecin çıkışında frekans rezonans frekansına eşit, yüksek frekanslı yüksek gerilimler elde edilir. Devre rezonansa girerek çalışma durumuna geçmesi için birincil ve ikincil rezonans devrelerinin öz frekansları birbirine eşit olmalıdır [1-5].

Klasik yapıdaki Tesla bobinleri hala en güçlü tasarım olarak kabul edilmesine rağmen birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olan birçok farklı Tesla bobini yapısı gerçekleştirilmiştir. Bu yapıların en belirgin farkı, atlama aralığı yerine kullanılan yapılarıdır. Bu devrelerin bazılarında tekli atlama aralığı, bazılarında çoklu atlama aralığı, bazılarında vakum tüplü atlama aralıkları kullanılmış ve bu aralıkta bir atlama şeklinde elektriksel boşalma ile devre çalışması sağlanmıştır. Son zamanlarda ise yarı-iletken anahtarlamalı veya tetiklemeli olarak söylenen Tesla üreteçlerine ilgi artmıştır. Klasik yapıda daha önce söz edildiği gibi tetikleme, atlama aralığı arasında atlamayı sağlayan gerilim düzeyine göre yapılır. Eğer atlama aralığı bir motora bağlanırsa bu tetikleme, hem gerilime hem de frekansa göre olur. Bu tür yapılara, döner atlama aralıklı Tesla bobinleri denir. Tesla bobinlerinin bunun gibi birçok farklı türü vardır.

Transistör tetiklemeli Tesla bobinleri en genel şekliyle tetikleme işleminin yarı-iletken elemanlarla yapıldığı Tesla bobinleridir. Bunların da kendi içlerinde birçok türü vardır. Örneğin ark aralığı yerine iki yönde iletim yapan bir yarı-iletken konursa ve bu yarı-iletken belirli frekansa ve/veya gerilim seviyesine göre tetiklenirse bu yapıya çevrimdışı Tesla bobini denir.

Bu çalışmada transistör tetiklemeli Tesla bobinlerinin en temel yapılarından biri olan Şekil 2'deki yapı kullanılmıştır.



Şekil 2: Yarı-iletken tetiklemeli Tesla bobini yapısı.

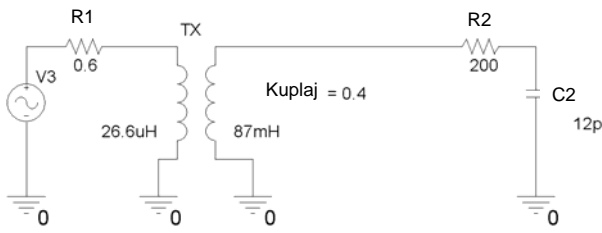
Bu yapıda yüksek gerilim trafosu, atlama aralığı ve birincil kondansatör kullanılmaz. Bunların yerine birincil bobin yarı köprü sürme tekniği ile iki adet transistör (Q1, Q2) kullanılarak sürülür. C1 ve C2 kondansatörleri gerilim bölücü olarak davranırlar. Devrenin giriş gerilimi, yarı-iletken elemanların gerilim limitleri doğrultusunda bir kaç yüz voltun üstüne çıkamaz. Bundan dolayı birincil bobinin sarım sayısı, klasik Tesla bobini tiplerine göre daha azdır hatta bazı tasarımlarda 1 ya da 2 sarıma kadar düşebilir. Tesla bobini bir tür rezonans trafosu olduğundan bu tasarımda da önemli olan

nokta bobinin rezonansa sokulmasıdır. Bu yapıda rezonans, transistörlerin tetikleme frekanslarının ikincil devrenin öz frekansına eşitlenmesi ile sağlanır. Bu devrede yüksek gerilim trafosu ve birincil kondansatör kullanılmadığı için tasarım daha hafif ve taşınabilir, atlama aralığı kullanılmadığı için ise daha verimli bir tasarımdır [6-7].

Bu çalışmada sunulan transistör tetiklemeli Tesla bobini yapılmadan önce, daha önce yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve küçük, görece daha az tehlikeli bir model üzerinde düşük gerilim ve güçte bir Tesla üretici üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmadan elde deneyim ve sonuçlar tatmin edici olduktan sonra burada sunulan modele geçilmiştir.

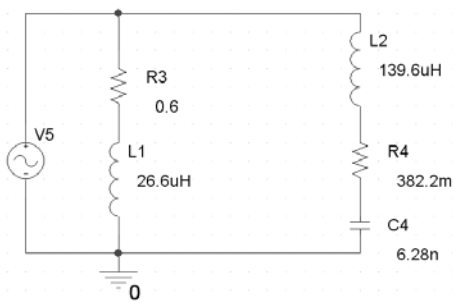
2. Devrenin Tasarımı

Bu çalışma çerçevesinde yapılması düşünülen Tesla bobininin öncelikle devre analizi yapılmıştır. Analiz için oluşturulan devre modeli Şekil 3'teki gibidir.



Şekil 3: Tesla bobininin devre modeli.

Burada C2 kondansatörü, Tesla üreticinin yüksek gerilim çıkış elektrodu olarak kullanılan toroid ya da küre şeklindeki elektrodun toprağa göre kapasitesini veya diğer deyişle ikincil devrenin kapasitesini temsil etmektedir. R2 direnci ikincil sargının iç direncidir. TX trafosunun birincil ve ikincil tarafındaki endüktans değerleri hesaplanmış birincil ve ikincil sargı endüktanslarını göstermektedir. R1 direnci birincil sargının iç direncidir. Devrede kullanılan eleman değerleri Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. Bu devre yapısı devrenin daha kolay analiz edilebilmesi için, içinde trafo bulundurmayan Şekil 4'teki eşdeğer bir devre yapısıyla değiştirilmiştir.



Şekil 4: Tesla bobininin eşdeğer devre modeli.

Bu Şekil 3 ve 4'te verilen iki devre modeli arasındaki geçiş aşağıdaki denklemlerle yapılmıştır.

$$L2 = (L_p / k^2) - L_p \quad (1)$$

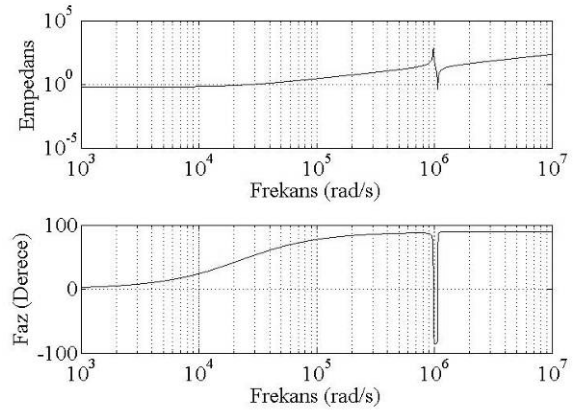
$$R4 = R1 L_p / (k^2 L_s) \quad (2)$$

$$C4 = k^2 L_s C1 / L_p \quad (3)$$

Denklemlerde L_p ve L_s sırasıyla bobinin birincil (primer) ve ikincil (sekonder) sargı endüktanslarıdır. k , manyetik kuplaj katsayısıdır. $L1$, L_p 'ye, $R3$ ise $R1$ 'e eşittir. Yukarıdaki gibi tanımlı elemanlarla devrenin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

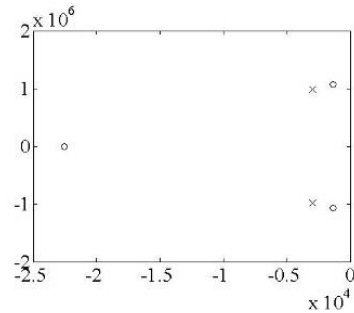
$$\frac{L1 L2 (s + \frac{R3}{L1}) (s^2 + s \frac{R4}{L2} + \frac{1}{L2 C4})}{(L1 + L2) [s^2 + s \frac{R3 + R4}{L1 + L2} + \frac{1}{C4(L1 + L2)}]} \quad (4)$$

Ardından bu transfer fonksiyonu üzerinden Şekil 5'te verilen faz ve empedans grafikleri çıkartılmıştır.



Şekil 5: Transfer fonksiyonuna ait faz ve empedans grafikleri.

Faz ve empedans grafiklerine göre birincil bobin, ikincil devreye ait öz frekansta sürüldüğünde giriş empedansı en küçük değerini alır yani sisteme maksimum güç aktarılmış olur. Rezonans frekansında sistemin faz farkı -90 derece olur. Burada bu karakteristiği oluşturan etmenler sistemin sıfırları ve kutuplarıdır. Sistemin sıfır kutup grafiği Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6: Transfer fonksiyonunun sıfır-kutup grafiği.

3. Tesla Üreticinin Yapımı

Üreticinin ikincil bobini, 0,5 mm çaplı emaye bobin teli, tek tabaka olarak, yalıtkan bir boru üzerine spiral şekilde sarılarak yapılmıştır. Bu bobinin üst ucunda yüksek gerilim çıkışı olarak 5 cm çaplı küresel elektrot kullanılmıştır. Bu şekliyle ikincil kapasite, ikincil bobinin sarımlar arası kapasitesiyle, çıkış elektrodunun toprağa göre kapasitesinin paralel

eşdeğerinden oluşmaktadır. Çalışma kapsamında yapılan Tesla bobininin, sarım sayısı ve boyutları kullanılarak hesaplanan kapasite, endüktans ve direnç değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

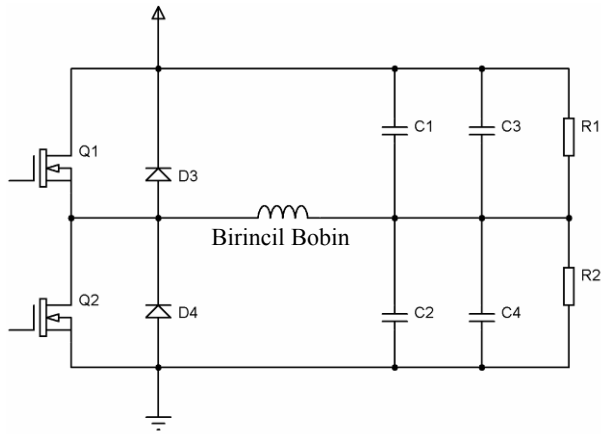
Tablo 1: Üretcin bobin parametreleri.

İkincil kapasite	15 pF
İkincil sargının sarım sayısı	2550
İkincil sargının endüktansı	87 mH
İkincil bobinin iç direnci	200 Ω
Birincil sargının sarım sayısı	20
Birincil sargının endüktansı	26,6 μ H
Birincil bobin iç direnci	0,6 Ω

Bu özelliklerdeki bir Tesla bobinin sürmek için gerekli devre katları ayrı ayrı tasarlanmış ve daha sonra birleştirilmiştir.

3.1. Güç Katı

Üretcin birincil bobinini sürmek için Şekil 7’deki güç katı devresi kullanılmıştır.



Şekil 7: Güç katı devresi.

Daha önce de söz edildiği gibi C1, C2, C3, C4 kondansatörleri gerilim bölücü olarak kullanılmışlardır. Değerleri ikincil devreyi rezonansa sokmayacak kadar büyük olmalıdır. R1 ve R2 dirençleri de kondansatörlerden yapılmış olan gerilim bölücü devrenin dengesini sağlamak için eklenmiştir.

D3 ve D4 diyotları birincil bobinin ters indüklendiği anahtarlama durumlarında güç mosfetlerinin üzerine düşebilecek gerilim seviyelerini azaltmak için kullanılmıştır. Q1 ve Q2 mosfetleri de birincil bobini süren mosfetlerdir [8].

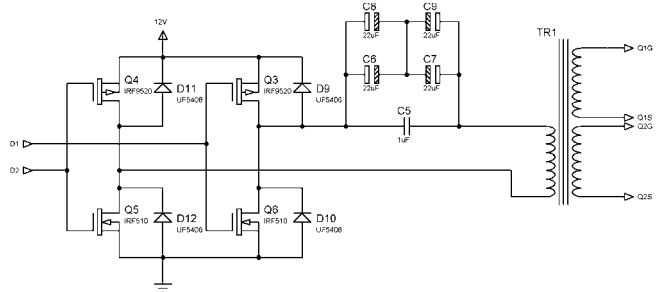
3.2. Sürme Katı

Q1 ve Q2 mosfetlerinden özellikle yukarı taraftaki mosfetlerin sürülmesi işlemi zordur ama bu zorluğu aşabilecek birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden biri de kapı sürme trafosu (Gate Drive Transformer – GDT) olarak adlandırılan yapıdır. Bu trafo bu frekansta bu mosfetleri sürmesi için tasarlanmış ve sarımlı özel bir trafodur. Toroid şeklinde ve ferit malzemeden üretilmiş olması tercih edilir. Trafonun minimum sarım sayısı akı yoğunluğu formülünden şu şekilde hesaplanır.

$$N = (V \times t) / (B \times A_c) \quad (5)$$

Bu formülde B-Tesla cinsinden manyetik akı, V-volt cinsinden sargılara uygulanan gerilim, t-saniye cinsinden uygulanan gerilimin süresi, A_c -m² cinsinden manyetik çekirdeğin kesit alanı ve N de minimum sarım sayısıdır.

Bu çalışmada kullanılan sinyalin değerleri yerine konulduğunda birincil bobinin minimum 6 sarım yapılması gerektiği hesaplanmıştır. Sürme devresinin geri kalanı Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8: Sürme katı devre tasarımı.

Şekil 8’de sağdaki trafo kapı sürme trafosudur. Kullanılan trafonun birincil sargısı 16 sarım, ikincil sargıları ise 24 sarımdır. Devre kullanılan kondansatörler sayesinde dalga tepesi üstü eğilmesi denilen bozulmanın önüne geçilmiş olur. Bu trafosu süren mosfetler H-köprüsü olarak dizilmiştir ve endüktif yük sürdükleri için bunların da önlerine ters diyot bağlanmıştır.

3.3. Sinyal Üreticisi

Sürme katının sürülmesi için de sinyal üretme katına gereksinim vardır. Burada üretilen sinyaller ile bobinin çalışma frekansı ve gücü değiştirilebilir ayrıca bobine ek modülasyonlar eklenebilir. Sinyal üretme katında Cypress firmasına ait PSOC mikrokontrolörleri kullanılmıştır. Bu mikrokontrolörün içine 16 bitlik, 24 MHz ile 732.42 Hz arasında sinyal üretebilen PWM modülü yerleştirilmiştir. Bu PWM modülünün bir diğer özelliği ise sürme devresi için gerekli olacak olan eşlenik sinyalleri aynı kaynaktan üretebilmesi ve bu sinyallerin yükselen kenarlarının arasına istenildiği kadar ölü zaman eklenebilmesidir.

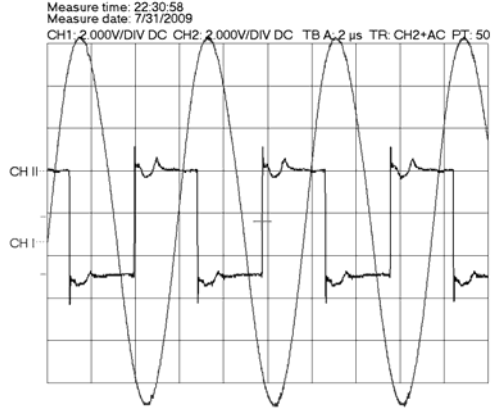
3.4. Geri Besleme

Rezonans frekansının ayarı için geri besleme olarak ikincil bobin ile toprak bağlantısı arasında bir akım trafosu yerleştirilmiştir. Bu akım trafosundan alınan genlik ve faz bilgisi sayesinde bobinin rezonans frekansına olan uzaklığı izlenebilmiştir.

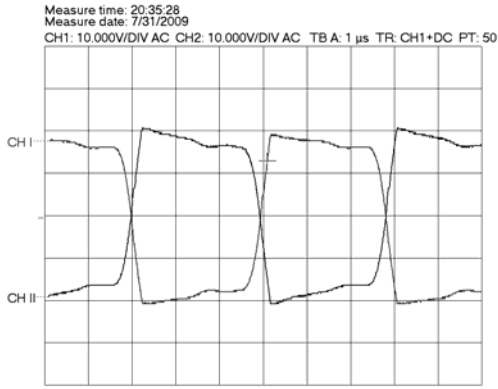
4. Uygulama Sonuçları

Tesla üretcinin çıkış gerilimi, 50 kV’luk bir yüksek gerilim voltmetresi ile ölçülmüştür. Güç katı giriş gerilimi 100 V civarında iken Tesla üretcinin rezonanstaki çıkış gerilimi 18,5 kV seviyelerine çıkabilmektedir. Şekil 9’da Tesla üretci rezonansta iken gözlemlenmiş sinyaller görülmektedir. Şekil 9’da kare dalga, sinyal üretme katının çıkışını; sinüs dalgası ise geri besleme frekansını göstermektedir.

Kapı sürme trafosunun çıkışında mosfetleri sürmek üzere kullanılacak iki eşlenik çıkış bulunmaktadır. 170 kHz’de bu sinyaller Şekil 10’daki gibi görülmektedir.



Şekil 9: Rezonansta geri besleme ve sürme sinyalleri



Şekil 10: Kapı sürme trafosu çıkış sinyalleri.

Şekil 11'de bu çalışma sonunda gerçekleştirilen ve çalıştırılan transistor tetiklemeli Tesla üretici görülmektedir.



Şekil 11: Yapımı gerçekleştirilen transistor tetiklemeli Tesla üretici.

Şekil 12'de ise tasarımı ve yapımı gerçekleştirilen Tesla üreticinin yüksek gerilim çıkışında elde edilen yüksek frekanslı yüksek gerilimden dolayı görülen boşalmalardan bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 12: Üreticinin çıkış geriliminin yarattığı elektriksel boşalmalardan bir görünüm.

5. Sonuçlar

Yarı-iletken tetiklemeli Tesla bobinlerinin en büyük avantajı çalışma frekanslarının değiştirilebilmesidir. Tesla bobinlerinde ikincil kapasite çok fazla etmene bağlıdır ve farklı ortamlarda, farklı noktalarda ve farklı şekillere sokulduğunda rahatlıkla değiştirilebilirler. Klasik tipteki Tesla bobinlerinin aksine bu tip rezonans değişimi durumlarında, yapının önemli elemanlarının değerlerini değiştirmeye gerek kalmadan sadece sinyal üreticinin frekansını değiştirmek yeterlidir.

Bu tasarımda geri besleme sinyali kullanılarak eklenebilecek bir özellik kendine rezonansa girebilme özelliğidir. Geri besleme sinyalinin karakteristiğine bakılarak sürme sinyallerinin frekansı değiştirilip, bu amaca uygun bir devre tasarlanabilir.

Tesla bobinlerinin en büyük sorunlardan biri verimlerinin düşük olmasıdır. Elektronik elemanlar kullanılarak verimleri artırılmış olsa da hala diğer sebeplerden dolayı verimleri düşüktür. Yapılabilecek ayrıntılı çalışmalarla gücün büyük kısmının ikincil bobine aktarılması için gerekli olan manyetik kuplaj değerinin artırılması sağlanabilir.

6. Kaynakça

- [1] Özkaya, M., *Yüksek Gerilim Tekniği*, Cilt II, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2005.
- [2] Özkaya, M., *Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme*, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul, 1984.
- [3] Golka, R. K., "Long Arc Simulated Lightning Attachment Testing Using a 150 kV Tesla Coil", IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, San Diego, CA, Oct. 9-11, 1979.
- [4] Finkelstein, David, Phillip Goldberg, and Joshua Shuchatowitz, "High Voltage Impulse System", The Review of Scientific Instruments, Vol. 37, No. 2, Feb. 1966.
- [5] Hoffmann, C. R. J., "A Tesla Transformer High-Voltage Generator", The Review of Scientific Instruments, Vol. 46, No. 1, Jan. 1975.
- [6] Grotz, Toby, "Project Tesla - An Update", Tesla Coil Builders Association News, Vol. 9, No. 1, Jan., Feb., March 1990.
- [7] Peterson, Gary L., "Project Tesla Evaluated", Power and Resonance, The International Tesla Society's Journal, Vol. 6, No. 1, Jan., Feb., March 1990.
- [8] Johnson, G. L., "Solid State Tesla Coil by Dr. Gary L. Johnson", Manhattan, 2001.