

KABLOSUZ ENERJİ TRANSFERİNDE BAZI KISITLAR VE ÇÖZÜMLER

On Limits and Solutions of Wireless Energy Transfer Systems

Bekir Fincan^{1,2}, Özgür Üstün^{1,2}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Ayazağa Kampüsü Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Müh. Bölümü, Maslak 34469, İstanbul
fincan@itu.edu.tr, oustun@itu.edu.tr

²Mekatro Ar-Ge Ltd. Şti., İTÜ Arı Teknokent Arı-2 B-Blok, Maslak 34469, İstanbul
bfincan@mekatro.com, oustun@mekatro.com

Özet

Bu çalışmada, kablosuz enerji transferini etkileyen temel faktörler ve kısıtlar incelenmiştir. İncelemeler, kuramsal tabana dayanmakla birlikte deneysel olarak da incelenmiştir. Özellikle kablosuz enerji sistemlerinde büyük öneme sahip kalite faktörünün optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Uygulamada karşılaşılan zorluklar deneysel verilerle belirtilmiş ve çözüm önerileri yine deneysel olarak ortaya konmuştur. Ayrıca bobinler arası uzaklık ve birincil bobin çapı arasındaki ilişkiye dayanarak, gerilim değişimi incelenmiştir. Bobin boyutlarının farklı olması durumu göz önüne alınarak devreye olan etkisi anlatılmıştır.

Abstract

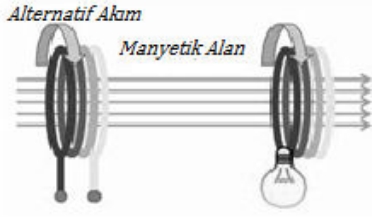
In this study, some important parameters and constraints which affect the wireless energy system performance are investigated. The experimental data are also presented along with theoretical aspects. The quality factor which is one of the most concerned parameter of those systems is also studied thoroughly. The application problems are explained by using test data while the solutions are proposed in a practical approach. The voltage variation is examined by means of the relation between distance between the primary and secondary coils and their diameters. The behaviour of the circuit is studied for the coils which have different dimensions.

1. Giriş

Kablosuz enerji iletimi son yıllarda çok önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Genel olarak mühendislik kültüründe Nikola Tesla'nın yaptığı çalışmalarla ilgili biraz şehir efsanesi olarak da değerlendirilebilecek bilgiler olmasına karşın, günümüz teknolojik gelişmeleri kablosuz enerji iletimine yönelmeyi zorunlu kılmıştır. Medikal uygulamalar, kablo ile beslenmesi olanaklı olmayan ya da güvenlik sorunları oluşturan yükler, elektrikli araçlar gibi teknoloji başlıkları kablosuz enerji iletimi için temel uygulama alanları olarak öne çıkmaktadırlar. İleri teknolojilerin yanı sıra kablosuz enerji transferi günlük yaşamda da uygulama alanı bulmaktadır: örneğin ıslak ortamda kullanılan elektrikli tıraş makinesi, elektrikli diş fırçası gibi aygıtların bataryalarının doldurulması [1]. Bunların yanı sıra artık piyasada cep telefonlarını, diz üstü

bilgisayarların pillerini dolduran kablosuz enerji iletimi aygıtlarına rastlanmaktadır [2-4]. Bu teknolojinin günümüzde kullanımı bulmasının temel nedenleri ise, kablosuz enerji transferini sağlayacak güç elektroniği teknolojisinin yeterli olgunluğa ulaşmış olması, günlük yaşamda ve sanayide gittikçe artan sayıda çeşitli boyutlarda çeşitli güçlerde bataryalı elektrikli aygıtların çok büyük bir hızla artmasıdır. Günlük yaşamda kullandığı bataryalı elektrikli aygıtların şarj edilmesi ile ilgili sıkıntı yaşamayan bir kişi bile olmadığı rahatlıkla söylenebilir. Artan sayıda şarj aleti ve bağlantı standartları gittikçe karışıklığa yol açmaktadır. Artan sayıda batarya şarj bağlantı sorunları ile uğraşan elektrikli taşıt araştırmacıları ve beden içine yerleştirilmiş elektrikli medikal aygıtların beslenmesi üzerine araştırmalar yapan biyomedikal araştırmacılar için kablosuz enerji transferi sayısız uygun çözümler sunan bir teknoloji alanı haline gelmiştir.

Kablosuz enerji transferinin (KET) ana düşüncesi, bir endüktansta enerji biriktirmek, biriken enerjiyi manyetik olarak Şekil 1'de gösterildiği gibi bir başka endüktansa aktarmaktır. Gerçekte bu, transformatörün çalışma ilkesiyle aynı ilkelere dayanmakla birlikte kablosuz enerji transferinde ana amaç enerjiyi havadan göndermektir. Bu nedenle kablosuz enerji iletim sistemlerinde kullanılan birincil ve ikincil bobinler hava çekirdekli bir transformatör olarak düşünülebilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi endüktansların karşılıklı yerleştirildiği kablosuz enerji transferi yapabilen bu yöntemin adı literatürde manyetik kuplaj olarak geçmektedir. Birincil bobinden ikincil bobine etkin bir şekilde enerji iletimi sağlayabilmek için iki önemli koşul sağlanmalıdır. Bunlardan birincisi bobin boyutlarının küçük olmasını ve enerjinin daha iyi iletilmesini sağlayacak olan yüksek frekans kullanımıdır. Diğeri ise bobinlerin birbirleriyle uygun bir manyetik bağlantıda olmalarıdır. Dolayısıyla birinci konu güç elektroniği devre tasarımına, ikinci konu ise bobinlerin yapısal tasarımına bağlıdır.



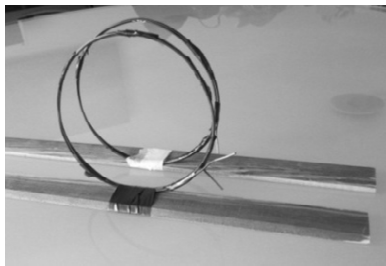
Şekil 1: Sistemin Çalışma Prensibi

2. KET İçin Güç Elektronik Devresi Tasarımı

Birincil bobinin yüksek frekansla beslenmesi, yüksek performanslı bir güç elektroniği devresi ile sağlanır. Yüksek frekansta anahtarlama kayıplarının artması kaçınılmaz olduğundan, KET teknolojisinin kaçınılmaz çözümü rezonans çeviricilerin kullanımı olmaktadır. Bilindiği gibi rezonans çeviriciler sıfır akım ve sıfır gerilim yakınlığında anahtarlama yaptıklarından anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltmasını sağlarlar.

Tek yönlü ya da iki yönlü enerji iletebilen rezonans çevirici devreleri vardır [5, 6]. Ayrıca enerji ile birlikte tek ya da iki yönlü bilgi iletimi de sağlanabilir [7]. KET devrelerinde başka bir elektriksel bağlantı olmadığı için enerji iletimini sağlayan manyetik bağlantı aynı zamanda karşılıklı veri iletimi için de kullanılmalıdır. Bilindiği gibi, rezonans devrelerinde endüktansın yanı sıra kapasiteler bulunur. Literatürde, ayırık kapasite eklenerek ya da bobin sarımlarından ortaya çıkan eş değer kapasitelerle rezonans çalışma sağlanan ve 10 MHz'e çıkan frekans değerlerine ilişkin çalışmalar bulunmaktadır [5]. Joannopoulos ve Karalis'in 2007 yılında önemli sonuçlar ortaya koyan çalışmasıyla KET sistemlerinin yaygınlığı daha da artmıştır. Bu çalışmada 30 cm çaplı bir verici bobinin 30 cm çaplı bir başka bobine 2 metrenin üzerinde bir mesafeden %40 civarında verimle enerji iletilebildiğini gösterilmiştir [8, 9]. Günümüzde sürmekte olan endüstriyel küçük güçlü çalışmaların neredeyse hepsi baskılı devre üzerine tasarlanmış yüzey endüktanslara yoğunlaşmıştır. Şu anki çalışmaların birçoğu küçük boyut sağlayan elektronik kart endüktanslardır. Hatta bu elektronik kartlar üç katlı yapılarak, çok daha verim alındığı birçok yerde önerilmiştir [10]. Yüzey endüktansların değeri, baskılı devre kartlarının çok katlı yapılmasıyla artırılabilir [11].

Bobin geometrisinin bağlantı faktörüne önemli bir etkisi olmamasına karşın kalite faktörüne etkisi vardır [10]. Yüzük şeklindeki bobin şekillerinin disk şeklindeki bobinlere göre daha verimli olduğu sonucuna ulaşılmıştır [12]. Kalite faktörü ve bağlantı faktörü KET sistemleri için en önemli parametrelerdir.



Şekil 2: Manyetik kuplaj

3. Verime Etki Eden Faktörler

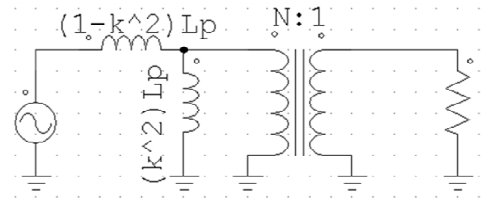
KET sistemlerinin verimine etki eden çok sayıda faktör bulunmasına karşın, kalite faktörü ve bağlantı faktörünün ağırlıklı etkileri diğerlerine göre çok büyüktür.

3.1. Bağlantı Faktörü

Bağlantı faktörü 0 ile 1 arasında olur, 'k' ile gösterilir. Sistem Şekil 3'deki gibi modellenebilir. Bağlantı faktörünün ifadesi

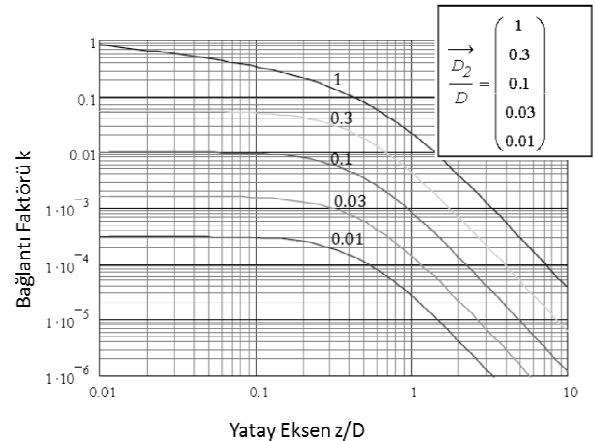
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1)$$

şeklinde olur. M ortak endüktans, L_1 ve L_2 birincil ve ikincil bobin endüktans değerleridir.



Şekil 3: Bağlantı faktörünün kaçak ve mıknatıslanma endüktansına etkisi

Önceden de belirtildiği gibi KET sistemleri transformator ilkesiyle çalışır. Ferit çekirdekli transformatorde k 1'e çok yakın olduğu için (0,99 kabul edilir) magnetizasyon endüktansı kaçak endüktansa göre çok büyük olacaktır. Transformatorün T modeli göz önünde bulundurulursa, büyük akım büyük reaktansa girecek ve toprağa gidecektir. Enerji kaybı söz konusu olmadığından, bu istenilen bir durumdur. Enerji transformator için gerekli manyetik alan oluşturmak için manyetik çekirdekte depolanmıştır. KET sistemlerinde manyetik akı yolları havadan uzun bir yol kat ettiği için, bağlantı faktörü çok düşüktür. Bu durum kaçak endüktansı, dolayısıyla toplam empedans değerini yükseltecek ve akımı azaltacaktır.



Şekil 4: Bağlantı faktörünün mesafe ile birinci bobin çapının oranına göre değişimi [10]

Şekil 4'te bağlantı faktörünün birincil ve ikincil bobin çapları oranının çeşitli değerleri için iki bobin arasındaki uzaklığa göre değişimi verilmiştir. D birincil bobinin çapı, D_2 ikincil bobinin çapı ve z bu iki bobinin arasındaki uzaklıktır. Waffenschmidt bobinler arası uzaklığın çapları oranını göz

önünde bulundurarak, bağlantı faktörünün mesafeye göre değişimini vermiştir. Bu bilgiler ikincil gerilim ayarı yapılırken, çok önemli kısıtlar oluşturmaktadır.

3.2. Kalite Faktörü

Son yıllarda, KET sistemlerinde verimin artırılmasına yönelik çalışmalar kalite faktörü üzerine yoğunlaşmaktadır. Kalite faktörü 'Q' ile gösterilir. Bobinin endüktif reaktansı ile direncinin oranıdır. 'ω' açısal frekanstır. 'f' frekanstır.

$$Q = \frac{\omega \cdot L}{R} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{R} \quad (2)$$

Birincil taraftaki kalite faktörü ile ikincil taraftaki iyilik faktörü birbirinden farklıdır. Bunun nedeni ikincil bobine yükün bağlı olmasıdır. Q₁ birinci bobinin iyilik faktörü, Q₂ ikinci bobinin iyilik faktörüdür.

$$Q = \sqrt{Q_1 \cdot Q_2} \quad (3)$$

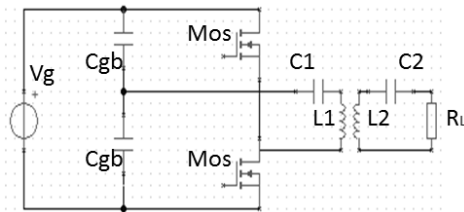
Birincil bobinin kalite faktörü ikincil tarafa göre daha önemlidir. Joannopoulos ve Karalis iyilik faktörünü 1000 civarına çıkararak orta mesafede yüksek verimlere ulaşabilmişlerdir [8]. Kalite faktörü verimi arttırmasına karşın rezonans devresinin çalışmasına bazı olumsuzluklar getirmektedir. En önemli olumsuzluk, rezonans devresindeki kapasitenin uçlarındaki gerilimin kalite faktörüne doğru orantılı olarak arttırmasıdır.

Şekil 5'de yarı köprü seri rezonans evirici görülmektedir. Seri rezonans evirici; rezonans frekansında rezonans akımı salınıma uğrar [13]. Bu salınım periyod boyunca manyetik alan ve elektrik alanının yer değiştirmesinden kaynaklanır.

Şekil 5'de, V_g giriş gerilimi, C_{gb} gerilim bölücü kapasitelerdir. Bu gerilim bölücü kapasitelere sayesinde çift dc kaynak yerine, tek dc kaynak yeterli olur. L₁ enerjiyi biriktiren bobin ve C₁ enerji ileten bobinle rezonansa giren kapasitedir. Rezonans frekansı

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4)$$

şeklinde olur.



Şekil 5: Yarı köprü seri rezonans evirici ve ikincil taraf

Rezonans frekansında çalışırken endüktansın üzerindeki geçen akım ifadesi ve kapasite üzerindeki gerilimin tepe değeri

$$I = \frac{1}{R} \cdot \frac{4V_g}{\pi} \sin(\omega_0 t) \quad (5)$$

$$V_{Ctepe} = Q \cdot \frac{2 \cdot V_g}{\pi} \quad (6)$$

şeklinde olacaktır.

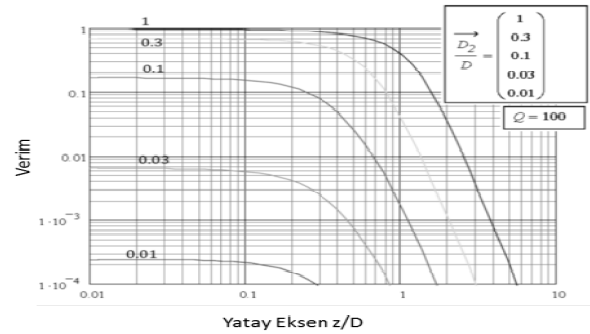
V_{Ctepe} değeri, iyilik faktörü büyük seçildiğinde çok büyük değerlere ulaşabilir. Bu rezonans kapasitesinin çok küçük bir zamanda çok büyük alternatif gerilime çıkması gerektiği anlamına gelir. Bu durum devrenin tasarımı anlamında çok

büyük sorunlar yaratır. 1 MHz frekans, 24V bara geriliminde, kalite faktörü 500 olarak seçildiğinde, kapasitenin üzerindeki alternatif gerilimin tepe değeri 4000 V civarında olacaktır. Böyle bir kapasitenin boyutlandırılması önemli bir sorundur. Bu nedenle kalite faktörünün kısıtlar göz önüne alınarak olabilecek en uygun değerde alınması büyük önem taşımaktadır.

KET sistemlerindeki verim ifadesi

$$\frac{1}{1 + \frac{R_L}{\omega_0^2 M^2 (1 + \omega_0^2 C_2^2 R_2^2)} R_1 + \frac{R_L}{\omega_0^2 L_2^2} R_2} \quad (7)$$

şeklinde [12]. İyilik faktörü 100 olduğunda, hem çaplar arasındaki orana hem de mesafe ile birincil bobin arasındaki orana göre verim grafiği Şekil 6'daki gibidir.



Şekil 6: Verimin hem çaplar arasındaki orana hem de mesafe ile birincil bobin çapı arasındaki orana göre değişimi [10].

Yapılan çalışmalarda birincil kalite faktörünün ikincil kalite faktörüne göre sistem verimine etkisi daha çok olduğu belirlenmiştir [10]. Ayrıca bağlantı faktörünün kalite faktörüne oranla verimi daha çok etkilediği belirlenmiştir [10].

Bu incelemeler sonucunda, her sistem için optimum bir yük olduğu sonucuna varılmaktadır. Optimum yük ifadesi

$$R_L|_{\max} = \sqrt{\frac{L_2^2 R_1 - 2 M^2 R_2 + L_2 \sqrt{L_2^2 R_1^2 - 8 M^2 R_1 R_2}}{2 \omega_0^2 R_2 C_2^2 M^2}} \quad (8)$$

şeklinde [12]. R₁ ve R₂ birincil ve ikincil bobinin dirençleridir.

4. Bobinler Arası Gerilim Ayarı

KET sistemlerinde bobinlerin sarım sayıları ayarlanarak gerilim kazancı değiştirilmektedir. Ancak bu gerilim kazancı ideal transformatöre göre oldukça farklıdır. Birincil ve ikincil gerilimler arasındaki ifade

$$V_2 = V_1 \cdot k \cdot \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (9)$$

şeklinde [12]. L₁ ve L₂ birincil ve ikincil taraf bobinlerinin endüktans değeridir.

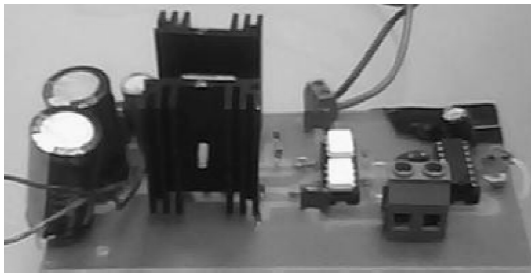
Yukarıdaki formülünden görüleceği gibi gerilim kazancı endüktans değerlerine bağlıdır. Endüktans formülü

$$L = N^2 \frac{D}{2} \mu_0 [\ln(4000D/r) - 1.7] \quad (10)$$

şeklinde olur. N sarım sayısı, D bobin çapı, μ_0 boşluk manyetik geçirgenliği, r iletken yarıçapıdır. Denklem (9) ve (10)'dan aynı çaplı, aynı malzemeli (cinsi ve çapı) iki bobinin geleneksel transformatörden tek farkı bağlantı faktörü olduğu görülür.

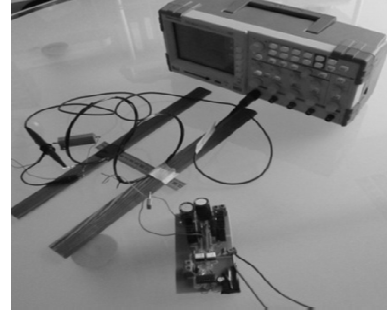
İletken alternatif akım aktığı ve yüksek frekansta çalışıldığı için deri etkisi hesaba katılmalıdır. Deri etkisi, iletkenin çapında alttan bir sınır getirir. İletkenin akım taşıma kapasitesinin hesaba katılması ile üstten de bir sınırlama gelir. Doğal hava soğutmalı bir iletken 4 ile 7 A/mm² arasında akım taşıma kapasitesine sahiptir, iletkenler özel yöntemlerle soğutulduğunda ise iletkenin geçen akım yoğunluğu 10 A/mm² gibi değerlere hatta daha yüksek değerlere de çıkabilir. Yüksek güçlü enerji iletiminde bu sınırlama önemli değerde kayıplara neden olabilir. Bu yüzden litz teli (çok sayıda ince telin paralel şekilde sarılmasıyla meydana gelir) ya da elektronik kart bobinler (baskılı devre endüktanslar) kullanılmak zorunda kalınabilir.

Verim en çok iyilik faktörüne ve bağlantı faktörüne bağlıdır. Bağlantı faktörü uygulamanın doğal ihtiyaçları sebebiyle değiştirilemeyebilir ama iyilik faktörünü iyileştirilebilir. Q artırıldığında ise; özellikle birinci rezonans kapasitesinin üzerinde büyük gerilimler meydana gelir. Bu sorunu çözmek için, birinci tarafın kaynak gerilimi azaltılır. Daha sonra ikincil bobin birincil bobinden büyük seçilerek gerilim istenen değere yükseltilir. Bu yolla iyilik faktörünün sınırlandırılmasına gerek kalmaz. Örnek vermek gerekirse, yarım köprü seri rezonans devresini 24V ile besleyip iyilik faktörü 500 olduğunda kapasite üzerindeki gerilim 4000V civarında oluyorsa; devreyi 6V ile beslersek kapasite üzerindeki gerilim 4 kat azalır. Daha sonra ise; L_2 L_1 den büyük seçilerek ihtiyaç olan gerilim seviyesine çıkartılabilir. L_2 'nin L_1 'den büyük olabilmesi için en optimum çözümler, ya sarım sayısının artmasıdır ya bobin çapının artmasıdır ya da biraz bobin çapının biraz sarım sayısı artırılmasıdır. İkinci taraftaki iyilik faktörü ise görece yüksek gerilim olmasına rağmen yük bağlandığı için sınırlanır, bu sebeple ikinci rezonans kapasitesi zorlanmaz.



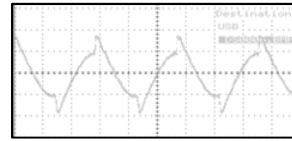
Şekil 7: Rezonans Eviricinin Fotoğrafi

Şekil 7'deki yarım köprü seri rezonans evirici devresi tasarlandıktan sonra, Şekil 8'de de görülen deney düzeneği kurulmuş ve bazı kontrollü deneyler yapılmıştır.



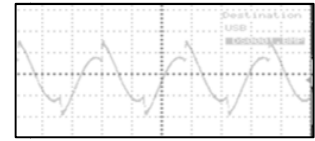
Şekil 8: Sistemin Fotoğrafi

Şekil 9'da 2.5 μ H'li bir bobin 0.5 cm uzaklıktan her biri 6.5 cm çapında 2.5 μ H, 12.25 μ H ve 77.1 μ H değerlikli üç ayrı bobin için deney yapıldı. Gerilimin (9)'da verilen ifadeye göre istenen oranda değiştirilebildiği veya arttırılabildiği kanıtlandı.



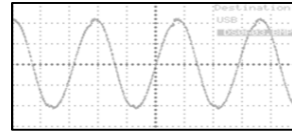
Dikey Kare 500mV, Yatay Kare 2.5μs

(a)



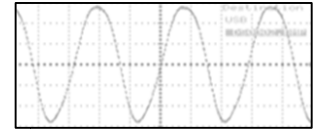
Dikey Kare 500mV, Yatay Kare 2.5μs

(b)



Dikey Kare 5V, Yatay Kare 2.5μs

(c)



Dikey Kare 1V, Yatay Kare 2.5μs

(d)

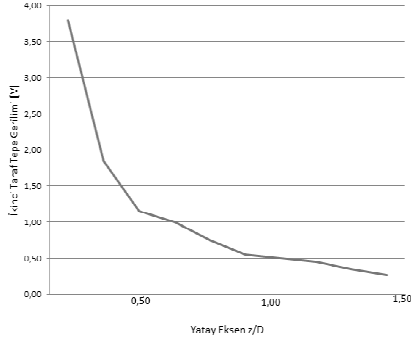
Şekil 9: (a) 2.5 μ H endüktans değerine sahip 6.5 cm çapında daire şeklindeki birincil bobinin kendi üzerindeki gerilim, (b) birincil bobinle aynı özelliklere sahip, ikinci tarafta bulunan bobinin üzerindeki gerilim, (c) aynı çap ve şekilde olan, 12.25 μ H'li bobinin üzerindeki gerilim, (d) aynı çap ve şekilde olan, 77.1 μ H'li bobinin üzerindeki gerilim

Deney sonuçlarından bağlantı faktörü Çizelge 1'deki Şekil 4'deki verilere göre, k 0.4 civarı çıkması bekleniyordu. Elde edilen sonuç 0.4'e yakındır.

Çizelge 1: Şekil 4'te verilen sonuçlardan yola çıkarak bağlantı faktörünün deneysel çıktısı

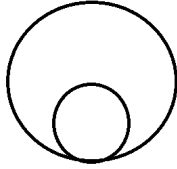
Yapılan Deney ($L_1 - L_2$)	Beklenen Bağlantı Faktörü	Sonuç Bağlantı Faktörü
2.5 μ H- 2.5 μ H	0.4	0.48
2.5 μ H- 12.25 μ H	0.4	0.55
2.5 μ H- 77.1 μ H	0.4	0.42

İkinci yapılan deneyde yine 6.5 cm çapındaki 2.5 μ H değerli iki bobin arasındaki mesafe artırılarak, ikinci tarafın gerilimi Şekil 10'da verildiği gibi ölçülmüştür.

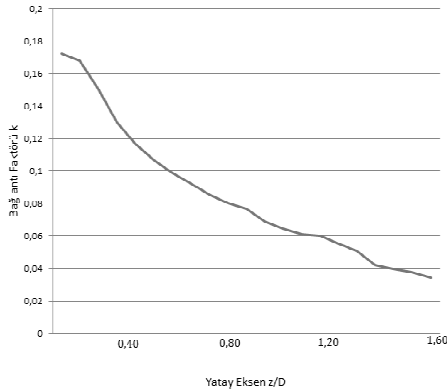


Şekil 10: İkinci taraf geriliminin tepe noktasının, bobinler arası mesafe ile birincil bobinin çapı arasındaki orana göre deneysel değişimi

6.5 cm çapında bir bobin ile 13 cm çaplı aynı değerlikli bir başka bobin aralarındaki uzaklıktan değiştirilerek denenmiştir. Yapılan gözlem sonucu, merkezlerini birlemek yerine, bobinler Şekil 11'deki gibi yerleştirilmesinin çok daha iyi olduğunu saptanmıştır. Bu deney sırasında bobinler arası uzaklığa göre ölçülen bağlantı faktörü Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 11: Büyük ikinci bobin ile küçük birincil bobinin en uygun yerleşimi.



Şekil 12: Bağlantı faktörünün mesafe ile bobin çapı oranına göre deneysel değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, kablosuz enerji transferi sistemlerinde manyetik kuplajın sistem çalışmasına etkisi incelenmiştir. Enerji transferi yapan bobinler arası uzaklığın optimum büyüklükte tutulması gerektiği açıktır. Yüksek iyilik faktörü sebebiyle büyüyen birinci taraf kapasite gerilimi sorunu, birinci taraf kaynak gerilimi düşürülerek iyilik faktörünü kısıtlamaya gerek kalmadan engellenebilir, uygulamaya göre, ikinci taraf gerilimini de yükseltilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca çalışmada, ikinci bobin çapının birinci bobin çapından daha büyük olduğu durum incelenmiştir, bağlantı faktörünün

grafiği çıkartılmıştır. Çapları birbirlerinden farklı bobinlerin merkezlerini birlemek yerine, küçük bobinle büyük bobinin kenarlarını birlemenin enerji transferinde daha verimli olduğu saptanmıştır.

6. Kaynaklar

- [1] Url-1<<http://news.techworld.com/>>
- [2] Url-2<<http://www.powermat.com/>>
- [3] Jang, Y., Jovanovic, M., "A Contactless Electric Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Charges" Journal of IEEE. Vol. 50, no. 3, pp. 520-527, 2003.
- [4] Bhutkar, R., Sapre, S., "Wireless energy transfer using magnetic resonance" *The 2nd International Conferences on Computer and Electrical Engineering*, 2009.
- [5] Jang, Y., Jovanovic, M., "A Contactless Electric Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Charges" Journal of IEEE. Vol. 50, no. 3, pp. 520-527, 2003.
- [6] Kassakian, J. G., Schlect M. F., Verghese G. C., "Principles of Power Electronics" Addison-Wesley, New York, 1992.
- [7] Karakaya, U., *Motor control via wireless energy and information transfer*, M.Sc. Thesis, ITU, 2007.
- [8] Karalis, A., Joannopoulos, J. D., Soljacic, M., "Wireless Non- Radiative Energy Transfer", 2006 AIP Industrial Physics Forum, 13 Nov 2006.
- [9] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P., Soljacic, M., "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, Vol. 317, no. 5834, pp. 83-86, 2007.
- [10] Waffenschmidt, E., Staring, T., "Limitation of inductive power transfer for consumer applications", Philips Research, 2010.
- [11] Fernandez, C., Zumel, P., Lazaro A., Barrado, A., "A simple approach to design a contact-less power supply for a moving load" IEEE, 2007.
- [12] Lee, S. H., Lorenz, R. D., "Development and validation of model for 95%-efficiency 220-W wireless power transfer over a 30-cm air gap," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 6, pp. 2495-2504, Nov.-Dec. 2011.
- [13] Kassakian, J. G., Schlect M. F., Verghese G. C., "Principles of Power Electronics" Addison-Wesley, New York, 1992.