

Elektrikli Araçlar için 2.2 kW Gücünde Bir Kablosuz Güç Aktarım Sisteminin Tasarımı

Emrullah AYDIN¹, Ali PASHAEİ², Emin YILDIRIZ³, M. Timur AYDEMİR⁴

^{1,2,4} Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl.
emrullahaydin@gazi.edu.tr, ali.pashaei@gazi.edu.tr, aydemirmt@gazi.edu.tr

³Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Böl.
eminyildiriz@duzce.edu.tr

(Geliş/Received: 23.03.2018; Kabul/Accepted: 03.09.2018)

Özet

Elektrikli araçlara olan ilginin son yıllarda artması, elektrikli araçları daha pratik ve güvenilir şekilde kullanabilmek için yeni yöntem arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Birçok uygulama alanında kullanımı gittikçe yaygınlaşan Kablosuz Güç Aktarım (KGA) Sistemleri, elektrikli araçların batarya dolum uygulamaları için yakın geleceğin seçeneği olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, 2.2 kW gücünde bir KGA sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiş ve Maxwell Ansys – Simplorer ortamında yapılan birleşik benzetim çalışmaları ile 10 cm mesafeden güç aktarım verimi % 84 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz güç aktarımı; Elektrikli araçlar; Endüktif güç aktarım; Temassız güç aktarım; Batarya şarjı.

Design of a 2.2 kW Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles

Abstract

Increased attention to electrical vehicles has also led the way to search for more practical and reliable methods to use them. Wireless power transfer (WPT) is also receiving attention for several applications and it is viewed as the choice of battery charging systems for near future. A 2.2 kW WPT system to charge has been designed and its co-simulation has been carried out by using Maxwell Ansys and Simplorer. Simulation results show an efficiency over 84%.

Keywords: Wireless power transfer; Electrical vehicles; Inductive power transfer; Contactless power transfer; Battery charging.

1. Giriş

Geleneksel kablolu enerji iletiminin yerine Nikola Tesla tarafından 1891 yılında ilk kez enerjinin kablosuz olarak aktarımı fikri ortaya atılmıştır. Enerjinin kablosuz olarak iletildiği sistemlerde kaynak ile yük arasında fiziksel bir bağlantı yoktur. Bu durum daha kullanışlı, temiz ve güvenli bir enerji iletimi gibi avantajlara sahiptir. 2007 yılında MIT’de bir grup araştırmacı, iki büyük bakır sargı ve yaklaşık olarak aynı rezonans frekansında çalışan bir sistem tarafından 60W gücünde bir ampulü yaklaşık 2.4 m mesafeden yakmayı başarmıştır. Böylece dünya genelinde bilim adamlarının bu konuya olan ilgisi artmış ve bu konudaki çalışmalar hız kazanmıştır. Kablosuz Güç aktarımı (KGA) sistemlerinin kullanımı elektrikli araçların ve cep telefonlarının batarya

dolumlarında, biyomedikal ve savunma sanayi uygulamalarında hızla yaygınlaşmaktadır. Fosil yakıtların yol açtığı hava kirliliği ve bu yakıtların tükenme endişeleri elektrikli araçlar konusuna olan ilginin artmasına neden olmuştur. Elektrikli araçların batarya dolum sistemlerinin daha pratik ve güvenilir bir yöntem olan KGA ile yapılması amacıyla literatürde birçok çalışma sunulmuştur [1,2,3]. Farklı kompanzasyon yöntemleri kullanılarak %90’nın üzerinde verimler elde edilen çalışmaların gerçekleştirilmesi, kablosuz güç aktarımının en büyük sorunlarından biri olan verim sorununun çözümü noktasında önemli bir yol kat edilmesine katkı sağlamıştır.

KGA sistemlerinde verici sargının boyutları ile ilgili önemli bir kısıtlama bulunmazken, özellikle elektrikli araçların şase altına yerleştirilen alıcı sargıların boyutları üretici firmaların tasarımları ile uyumlu ve minimum

olmalıdır. Özellikle kompanzasyon devrelerinin kullanımı ile sistem boyutu büyümektedir. Boyutun küçültülmesi ve daha kompakt bir yapı oluşturulması için, kompanzasyon endüktansı ana sargıların merkezine yerleştirilerek iki kutuplu kuplajlı yeni bir yapı önerilmiştir [4]. Önerilen yapıda sistem boyutu küçülürken, ana sargılar ile çaprazlarında bulunan kompanzasyon sargıları arasında bir bağlaşım oluşması sistemin güç faktörünün azalmasına, dolayısıyla sistem veriminin düşmesine sebep olur. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için gerilim fazörlerinin ağırlık oranları olarak tanımlanan m parametresi tanımlanmış, bu parametrenin minimize edilmesi ile deneysel çalışmalarda %95'in üzerinde verim elde edilmiştir. Diğer önemli bir problem, verici sargının araç şasesi üzerinde olması nedeniyle alıcı ve verici sargılar arasında ortaya çıkan hizalanma problemidir. Alıcı ve verici sargılar arasındaki mesafenin değişimi ve merkez noktalarında oluşacak kayma, bağlaşım katsayısını olumsuz olarak etkiler [5,6]. Hizalanma problemi ve aradaki mesafenin bağlaşım üzerine etkisinin azaltılması için farklı sargı tasarımları önerilmiştir. Bu problemin çözümü için çubuk ferit nüveler ile akının alıcı ve verici sargılar arasında kalması sağlanmış, DD sargı yapısı ve buna ek bir sargı (Q) ile yatay hizalanma problemi (sıfır bölgesi) için performans iyileştirmesi hedeflenmiştir[7]. Bir diğer çalışmada farklı güçlerdeki SUV ve sedan tipi elektrikli araçların tamamında kullanılabilir geniş hava aralıklarında KGA sağlanması için 300 mm'den 1000 mm'ye kadar genişlikte DD sargı yapısının boyutlandırılması incelenmiştir [8]. DD yapısının kullanıldığı uygulamalarda kaçak akıların önlenmesi için uç köşe noktalara çubuk ferit nüveler yerleştirilerek kaçak akılar %46 oranında azaltılmıştır [9].

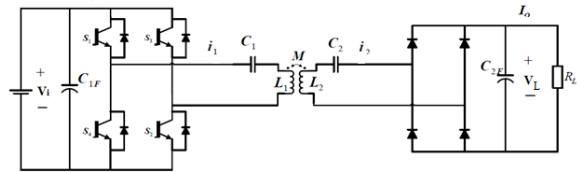
KGA sistemlerinde kullanılan kompanzasyon yapıları, verimin yükseltilmesindeki en önemli etkenlerden biridir. KGA sistemleri endüktif bir yapı olduğundan ve kaynak tarafındaki güç katsayısının düşük olması nedeni ile verim kaybını engellemek için sargılara seri veya paralel kompanzasyon devreleri kullanılmaktadır [10]. Genellikle kompanzasyon devreleri seri-seri (S-S), seri-paralel (S-P), paralel-seri (P-S) ve paralel-paralel (P-P) yapılarından oluşmaktadır. Farklı kompanzasyon topolojilerinin karşılaştırıldığı bir

çalışmada S-S topolojisinin elektrikli araçlarda kullanımının daha uygun olduğu gösterilmiştir [11].

Bu çalışmada, 2.2 kW gücünde bir KGA sistemi için en uygun alıcı ve verici sargı sarım sayıları ve boyutlandırmaları, analitik eşitlikler yardımıyla elde edilmiştir. Belirlenen boyut ve sarım sayılarındaki sargıların üç boyutlu manyetik modellemesi, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanan ANSYS Maxwell programı ile yapılmıştır. Geliştirilen S-S kompanzasyon yapıları KGA sisteminin başarımı, ANSYS Maxwell programı ile ortaklaşa oluşturulan Simplorer paket programı kullanılarak gözlenmiştir.

2. Sistem Tanımı

KGA sistemlerinde kullanılan genel yapı Şekil 1'de görülmektedir. Bu sistemlerde verici tarafındaki dönüştürücülerin görevi, şebekeden beslenen sistemin verici sargısında yüksek frekanslı akım üretmesidir. Alıcı tarafındaki dönüştürücü ise doğrultma amacı ile kullanılmaktadır. Evirici, kompanzasyon devresine kare dalga bir gerilim uygulamaktadır. Bu yapılarda anahtarlama kayıplarını azaltmak için yumuşak anahtarlama teknikleri kullanılabilir [12].



Şekil 1. Kablosuz güç aktarım sistemlerinin genel yapısı

Bu çalışmada; yüke sabit bir gerilim sağlayabilmek ve aynı zamanda, verici sargı gerilimini düşürmek için S-S kompanzasyon yapısı seçilmiştir [13, 14]. Şekil 2'de S-S topoloji yapısı gösterilmektedir.

Kompanzasyon devreleri için uygun kapasitör değerini bulmak oldukça önemlidir. Sistem rezonans frekansında çalıştırılırsa en yüksek verim elde edilir. Bu nedenle ilk olarak alıcı tarafa ait kapasitör değeri bulunur.

$$C_2 = \frac{1}{\omega_0 L_2} \quad (1)$$

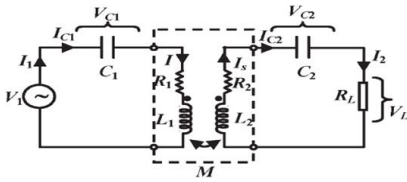
Bu eşitlikte ω_0 sistemin çalışma (rezonans) frekansdır. Verici tarafındaki kapasitör değeri, güç katsayısı değeri 1'e yakın olacak şekilde (2) ile verilen formülle hesaplanır. Ayrıca verici ve alıcı sargıların kalite katsayılarının formülleri eşitlik (3) ve (4)'te verilmiştir.

$$C_1 = \frac{L_2 C_2}{L_1} \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{R_L L_1}{\omega_0 M^2} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{R_L} \quad (4)$$

Verici sargısı, giriş güç katsayısını iyileştirmek için, alıcı sargısı ise aktarılan gücü yükseltmek için kompanze edilir. Eğer verici tarafa yansıyan empedans, verici sargının öz endüktansının yanında ihmal edilebilir düzeyde ise yalnızca verici sargıyı kompanze etmek yeterli olabilir [12].

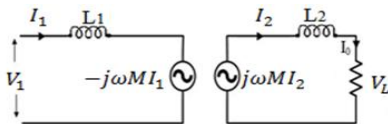


Şekil 2. Verici ve alıcı kompanzasyon devresi [12]

Kaynaktan çekilen akımı bulmak için sistemin toplam empedansının hesaplanması gerekir. S-S kompanzasyon yapısı için toplam empedans hesabı eşitlik (5)-(6)'te verilmiştir.

$$I_1 = \frac{V_1}{Z_T} \quad (5)$$

$$Z_T = \left(R_1 + j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_2 + R_L + j \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right) \right)} \quad (6)$$



Şekil 3. Sargı eşdeğer devresi

KGA sistemlerinde sargı eşdeğer devresi Şekil 3'te gösterilmiştir. L_1 ve L_2 verici ve alıcı sargıların öz endüktans değerlerini ve M iki

sargı arasındaki ortak endüktans değerini göstermektedir. Bu devrede en önemli noktalardan biri, verici sargı akımı nedeni ile alıcı sargıda indüklenen ω frekanslı açık devre gerilimi ve bu gerilimin yarattığı kısa devre akımıdır. Bu iki parametre sayesinde aktarılan güç değeri bulunmaktadır [15].

$$V_{OC} = j\omega M I_1 \quad (7)$$

$$I_{SC} = \frac{j\omega M I_1}{j\omega L_2} \quad (8)$$

$$S = \frac{j\omega M^2 I_1^2}{L_2} \quad (9)$$

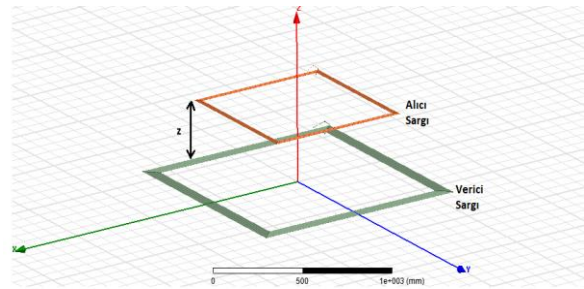
Açık devre gerilimi ve kısa devre akımının değerleri yerine konulursa, S-S kompanzasyonlu KGA'da aktarılan en yüksek güç ifadesi şu biçimde elde edilir:

$$P_{MAX} = \frac{\omega M^2 Q_2 I_1^2}{L_2} \quad (10)$$

Hareketsiz bir sistemde M ve L_2 değişmeyeceğinden, aktarılan gücü en büyük yapabilmek için ω ve I_1 değerinin maksimize edilmesi gereklidir. Verici sargıyı anma akımında çalıştırmak, sargının en yüksek düzeyde kullanımı anlamına geldiğinden hacim ve maliyeti de düşürecektir.

3. Sargı Tasarımı ve Endüktans Hesabı

KGA sistemlerinin verimini etkileyen en önemli tasarım parametrelerinden biri sargı tasarımıdır. Literatürde yapılan çalışmalarda kare, dikdörtgen ve dairesel başta olmak üzere farklı sargı tasarımları kullanılmıştır. Bu çalışmamızda karesel sargı tipi tercih edilmiş ve Şekil 4'de gösterilmiştir. Sargılar arasındaki hava aralığı $z=10$ cm'dir.



Şekil 4. Sargı yapısı

Analitik hesaplamaların yapılabilmesi için öz endüktans ve ortak endüktans değerlerinin hesaplanabilmesi gerekir. Tasarım kısıtlarına göre belirlenen sarım ve iletken kesitleri ile öz ve ortak endüktanslar hesaplanabilir.

Öz endüktans hesabı (11)-(13) bağıntılarıyla yapılabilir [16].

$$L = \frac{1.27\mu_0 N^2 d_{ort}}{2} \left[\ln\left(\frac{2.07}{p}\right) + 0.18p + 0.13p^2 \right] \quad (11)$$

$$d_{ort} = \frac{d_i + d_d}{2} \quad (12)$$

$$p = \frac{d_d - d_i}{d_d + d_i} \quad (13)$$

Burada N , endüktansı hesaplanacak sargının sarım sayısını, d_{ort} ortalama sargı çapı, p dolum faktörü ve μ_0 havanın manyetik geçirgenliğini ifade etmektedir.

Ortak endüktansı hesaplamak için, bir sargıdan geçen akımın oluşturduğu ve diğer sargıyı halkalayan akı miktarı belirlenmelidir. Eşitlik (14)-(17) bağıntılarıyla akı miktarı ve ortak endüktans hesabı yapılabilir.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (14)$$

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (15)$$

$$\phi_{ij} = N \cdot M_{ij} \cdot I \quad (16)$$

$$M = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} M_{ij} \quad (17)$$

Verimin yüksek olabilmesi için bağlaşım katsayısı (k) maksimum yapılmalıdır. Bunun içinde uygun sargı şekli, sarım sayısı ve sargı boyutlarının seçilmesi oldukça önemlidir. Sistem tanımı bölümünde verilen (1)-(10) denklemleri ve endüktans hesabı denklemleri Matlab programında koşturularak, 2.2 kW gücünde bir sargı yapısı için en uygun sarım sayıları ve boyutları için program çıktıları elde edilmiştir. Elde edilen en uygun değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Sargı Özellikleri

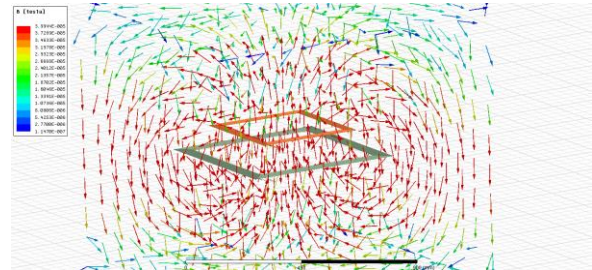
	Verici Sargı	Alıcı Sargı
Sarım Sayısı (N_1, N_2)	21	8

Sargı Kesitleri (mm^2)	2.5	10
Hesaplanan Öz Endüktans Değeri (μH)	597	64
Sargı Boyutları (mm)	600x600	400x400
Ortak Endüktans Değeri (μH)	41	
Bağlaşım Katsayısı (k)	0.21	

Bu hesaplamalar neticesinde belirlenen alıcı ve verici sargıların 3D modelleri, aynı boyut ve sarım sayısında, ANSYS Maxwell Sonlu Elemanlar Analiz programında oluşturulmuş ve manyetik analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları Bölüm 4'te ANSYS Simplorer yazılımı ile birleştirilerek koşturulmuştur.

4. Benzetim Sonuçları

Analitik hesaplama ile istenen güç ve tasarım kriterlerini sağlayan sargı özellikleri belirlenmiştir. Belirlenen kesit ve sarımda oluşturulan 3D modelin ANSYS Maxwell programında yapılan statik analizinde, endüktans değerleri elde edilmiştir. Şekil 5'te sargılara ait manyetik analiz sonucu elde edilen manyetik akı vektör dağılımı verilmiştir. Ayrıca tüm KGA sistem başarımları gözlemek için Maxwell programı ile birleşik olarak Simplorer programı da koşturulmuştur. Elektromanyetik analiz sonuçlarını kullanan Simplorer programında, Şekil 1'deki gibi S-S kompanzasyonlu bir KGA tasarlanmıştır. Birleşik benzetim ve analitik hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.



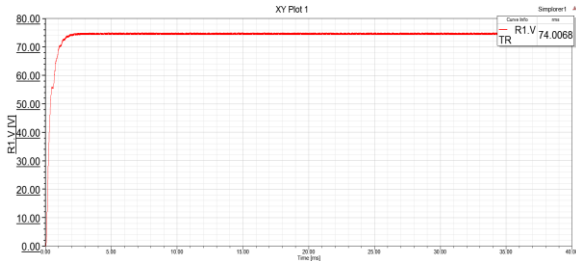
Şekil 5. Manyetik akı vektör dağılımı

Şekil 6'da yük gerilimi, Şekil 7-9'da ise sırasıyla kapasitör gerilimi, alıcı sargının akımı ve verici sargının gerilimi gösterilmektedir.

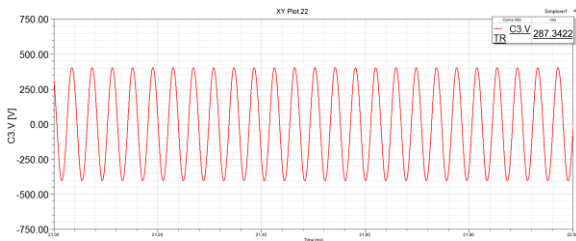
Tasarlanan 2.2 kW gücündeki KGA sisteminin DA besleme gerilimi 220 V olarak belirlenmiştir. Verici sargı, rezonans frekansında kare dalga üreten köprü tipi bir evirici ile sürülmüştür. Alıcı sargı çıkışına da yine yüksek frekansta anahtarlanabilen tam dalga doğrultucu bağlanmıştır. Doğrultucu çıkışına 74V girişli akü şarj devresini sembolize eden 2.5Ω değerinde bir eşdeğer yük bağlanmıştır. Tasarımı yapılan 2.2 kW gücündeki sistemin verimi %84 olarak hesaplanmıştır. Benzetim sonuçları ve teorik hesaplamalar bu sonucu doğrulamaktadır.

Tablo 2: Sistemin parametre değerleri

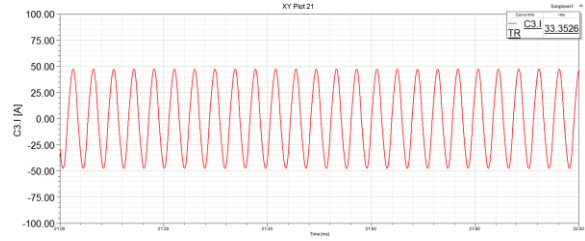
Elemanlar	SEA Sonuçları	Matlab Sonuçları
L_1 (μH)	585	597
L_2 (μH)	60	64
M (μH)	40	41
f_0 (kHz)	24	26
P_L (kW)	2.2	2.4
V_L (V)	74	79
V_{C1} (V)	1000	1080
V_{C2} (V)	287	326
C_1 (μF)	0.075	0.06
C_2 (μH)	0.72	0.55
I_{C1} (A)	12	11.7
I_{C2} (A)	33	31.7



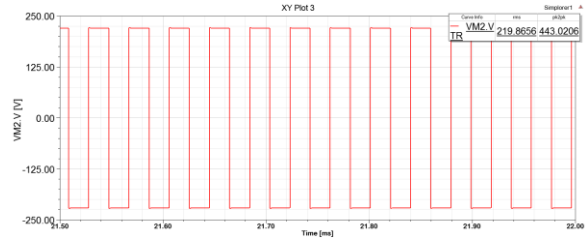
Şekil 6. Yük gerilimi



Şekil 7. Alıcı taraftaki kapasitör gerilimi



Şekil 8. Alıcı sargı akımı



Şekil 9. Verici sargı besleme gerilimi

5. Sonuçlar

Kablosuz enerji transfer sistemleri elektrikli araçların batarya dolumu için ciddi bir seçenek olarak görülmektedir. Bu çalışmada, bu amaçla 2.2 kW gücünde S-S kompanzasyon topolojisine sahip basit bir sistem tasarlanmış ve sistemin başarımı Maxwell Ansys – Simplorer yazılımları kullanılarak benzetim yoluyla değerlendirilmiştir. Elde edilen verim %84 olup, tasarımın iyileştirilmesi ile verimin yükseltilebileceği değerlendirilmektedir.

6. Kaynakça

1. M. Budhia, G. A. Covic and J. T. Boys, "Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3096-3108, Nov. 2011.
2. Rui Chen; Cong Zheng; Zahid, Z.U.; Faraci, E.; Wengsong Yu; Jih-Sheng Lai; Senesky, M.; Anderson, D.; Lisi, G., "Analysis and parameters optimization of a contactless IPT system for EV charger," in Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE , vol., no., pp.1654-1661, 16-20 March 2014.
3. A. Tejada, C. Carretero, J. T. Boys and G. A. Covic, "Ferrite-Less Circular Pad With Controlled Flux Cancellation for EV Wireless Charging," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 11, pp. 8349-8359, Nov. 2017.

4. Junjun Deng; Weihan Li; Nguyen, T.D.; Siqi Li; Mi, C.C. "Compact and Efficient Bipolar Coupler for Wireless Power Chargers: Design and Analysis", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, On page(s): 6130 - 6140 Volume: **30**, Issue: 11, Nov. 2015.
5. Z. Dang and J. A. A. Qahouq, "Modeling and investigation of magnetic resonance coupled wireless power transfer system with lateral misalignment," 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, 2014, pp. 1317-1322.
6. C. Zheng, H. Ma, J. S. Lai and L. Zhang, "Design Considerations to Reduce Gap Variation and Misalignment Effects for the Inductive Power Transfer System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. **30**, no. 11, pp. 6108-6119, Nov. 2015.
7. Budhia, M.; Boys, J.T.; Covic, G.A.; Chang-Yu Huang, "Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. **60**, no.1, pp.318,328, Jan. 2013.
8. G. R. Nagendra, G. A. Covic and J. T. Boys, "Determining the Physical Size of Inductive Couplers for IPT EV Systems," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. **2**, no. 3, pp. 571-583, Sept. 2014.
9. F. Y. Lin, A. Zaheer, M. Budhia and G. A. Covic, "Reducing leakage flux in IPT systems by modifying pad ferrite structures," 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 2014, pp. 1770-1777.
10. Chopra S., Bauer P., "Analysis and design considerations for a contactless power transfer system," in *proc. IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference*, Oct. 2011, pp.1-6.
11. K. Aditya and S. S. Williamson, "Comparative study of Series-Series and Series-Parallel compensation topologies for electric vehicle charging," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, 2014, pp. 426-430.
12. Sallan J., Villa J. L., Llombart A., ve Sanz J. F., "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge," in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. **56**, no. 6, pp. 2140-2149, June 2009.
13. Wang C.S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "General stability criterions for zero phase angle controlled loosely coupled inductive power transfer systems," in *Proc. IEEE Annual Conf. of the Industrial Electronics Society*, Denver, CO, vol. **2**, Nov. 2001, pp. 1049-1054.
14. Wang C. S., Covic G. A., ve Stielau O. H., "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. **51**, no. 1, pp. 148–157, Feb. 2004.
15. Kafeel Ahmed Kalwar, "Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47 (2015) 462–475.
16. S. S. Mohan, M. del Mar Hershenson, S. P. Boyd and T. H. Lee, "Simple accurate expressions for planar spiral inductances," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. **34**, no. 10, pp. 1419-1424, Oct 1999.