

protection; signal injection method

谐振式 WPT 耦合线圈形状设计与参数优化

诸嘉慧¹, 高 强², 刘 齐², 范 维², 潘加玉³

- (1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110006;
3. 辽宁东科电力有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘要:耦合线圈是无线电能传输系统的核心部分,它直接影响着电能传输的性能,线圈的最佳形状与参数亟需深入研究。本文针对无线电能传输系统构建了高频电路模型,推导出耦合电能传输系统的功率与效率表达式,随后借助 COMSOL Multiphysics 对平面圆形、平面方形与螺旋筒形三种常见形状进行了仿真分析,得出不同距离下功率与效率的曲线图。确定了耦合线圈的最佳形状,并在最佳形状下进行不同线圈参数仿真,得出最佳谐振线圈参数变化规律,即线圈直径和线径越大,而且匝间距越小,线圈的品质因数越高。本文为无线电能传输系统的优化与设计提供了依据与参考。

关键词:无线电能传输;磁耦合谐振;线圈形状;线圈参数

DOI: 10. 12067/ATEEE1806074 **文章编号:** 1003-3076(2019)07-0067-06 **中图分类号:** TM72;TM15

1 引言

早在 19 世纪,科学家尼古拉·特斯拉就开始对无线电能传输技术(Wireless Power Transfer, WPT)展开研究^[1],2007 年,美国 MIT 利用磁耦合谐振的原理实现了无线电能的米级传输,谐振式无线电能传输技术成为人们研究的焦点^[2]。

无线电能传输技术通过空间无形介质将电能传递给用电设备端,由于取消了传统电能传输中存在的导线,避免了裸露导体和接触火花,可以保证用电设备的安全与方便^[3],因此在无线传感器^[4]、电动汽车^[5]、消费类电子设备甚至医疗领域均可进行移植应用^[6],拥有着广阔的前景与应用价值^[7,8]。

随着电磁理论与实用技术的发展,依靠无形电磁介质实现无线电能传输成为可能,其中,谐振耦合线圈为系统的核心部分。文献[9]提出了平面螺旋形线圈的设计与优化,首先总结了线圈自身参数(互感、电感、电阻、电容)的计算方法,以传输效率为标尺得出参数最优值。文献[10]以电路理论为基础,推导出无线电能传输模型的表达式,从电路角

度进行 ADS 仿真分析,找出参数的最优值。文献[11,12]进一步分析了系统传输效率、传输功率与线圈谐振频率、互感系数、线圈内阻等参数之间的关系。文献[13]运用耦合模理论,分析了谐振线圈非同轴放置时效率过低的问题,并以此为基础分析出其变化规律。文献[14,15]基于一种场路耦合算法模型,计算了不同半径的单匝线圈空间磁场及电路参数的整体变化趋势,得出单/多初级绕组串联等线圈设计相关的指导原则。文献[16]根据耦合线圈频域阻抗分裂特点,提出耦合系数的计算方法,分析了分布式参数线圈对无线电能传输性能的影响。现有研究往往仅针对一种特定形状线圈进行分析,缺乏对比研究,所以难以得出耦合线圈电能传输最佳的形状。

本文首先对无线电能传输的模型进行了分析,得出系统接收功率与传输效率的表达式,针对功率与效率的传输情况,基于 COMSOL Multiphysics 进行仿真分析,比较了平面圆形、平面方形与螺旋筒形三种形状,得出无线电能传输耦合线圈的最佳形状并对最佳形状的参数进行了优化。本文为无线电能传输系统的优化与设计提供了依据与参考。

收稿日期: 2018-06-28

基金项目: 国家电网公司科技项目“设备监测传感器取能技术研究及应用”(GY71-17-007)

作者简介: 诸嘉慧(1977-),女,江苏籍,教授级高级工程师,博士,研究方向为无线电能传输、超导电力技术;
高 强(1975-),男,辽宁籍,高级工程师,硕士,研究方向为测量传感器技术。

2 传输模型

磁耦合谐振式无线电能传输模型如图 1 所示,它由射频电源、电磁发射系统、电磁接收系统与负载四个部分构成。其等效电路模型如图 2 所示。

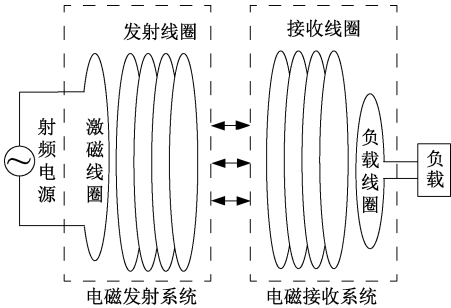


图 1 谐振式无线电能传输模型

Fig. 1 Coupled magnetic resonance model of WPT

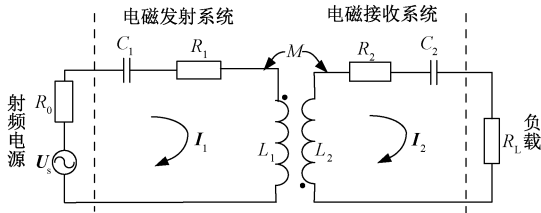


图 2 谐振式无线电能传输模型等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of WPT

图 2 中, U_s 为电源电压, R_0 为电源内阻等效参数, C_1 、 C_2 分别为电磁发射系统与接收系统的等效电容, L_1 、 L_2 分别为电磁发射系统与接收系统的等效电感, R_1 、 R_2 分别为电磁发射系统与接收系统的等效电阻值, R_L 为负载, M 为两线圈之间的互感。

根据基尔霍夫定律,在图 2 中设一次侧与二次侧电流分别为 I_1 、 I_2 ,根据基尔霍夫定律由图 2 电路可得到如下方程组:

$$\begin{cases} U_s = Z_1 I_1 - j\omega M I_2 \\ 0 = Z_2 I_2 - j\omega M I_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, Z_1 、 Z_2 分别为电磁发射端和电磁接收端阻抗,其表达式为:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$$
$$Z_2 = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}$$

进一步推导得到非对称耦合线圈谐振式无线电能传输系统发射功率(总功率) P_{total} 和接收功率(负载功率) P_{load} 分别为:

$$\begin{cases} P_{\text{total}} = \text{Re}(U_s \cdot I_1) = \frac{U_s^2 Z_2}{Z_1 Z_2 + (\omega M)^2} \\ P_{\text{load}} = I_2^2 R_L = \frac{-\omega^2 M^2 U_s^2 R_L}{[Z_1 Z_2 + (\omega M)^2]^2} \end{cases} \quad (2)$$

得到系统的效率 η 表达式为:

$$\eta = \frac{P_{\text{load}}}{P_{\text{total}}} = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{Z_2 [Z_1 Z_2 + (\omega M)^2]} \quad (3)$$

3 耦合线圈的仿真分析与参数优化

3.1 不同形状耦合线圈的仿真分析

由第 2 节分析可知,接收功率与传输效率是衡量无线电能传输系统性能的关键因素。但是由于数学表达式的抽象性,式(2)和式(3)中均不能体现出耦合线圈形状这一因素。借助 COMSOL Multiphysics 进行了仿真分析,搭建模型如图 3 所示。

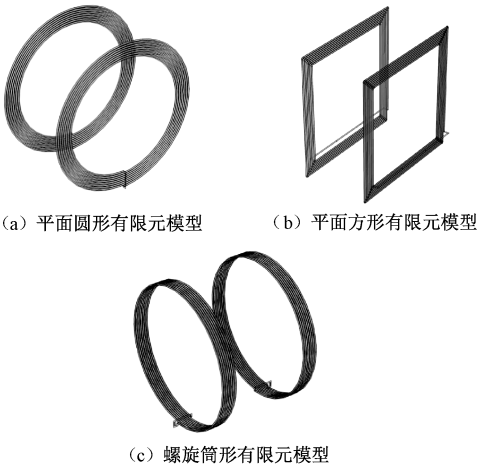


图 3 不同形状耦合线圈有限元模型

Fig. 3 Finite element model of coupling coils with different shapes

在仿真过程中,为了减少变量的影响,三种形状的线圈匝数、匝间距与线径均相同。平面圆形与螺旋筒形的直径与平面方形的边长相等。通过构建对比模型,可以清晰地对比出线圈形状对电能传输效果的影响。图 4 为不同的耦合线圈在相距 10cm 时的能量模切面。从图 4 中分析可知,箭头为空间磁场方向,三种模型的磁场从发射系统发出,经过空气介质与接收侧线圈发生耦合,完成电能传输。电场模切面的模值逐渐减小,发射侧的能量远大于接收侧的能量。

为更好探究形状对电能传输效果的影响规律,在仿真过程中,逐渐改变两线圈之间的距离,对仿真

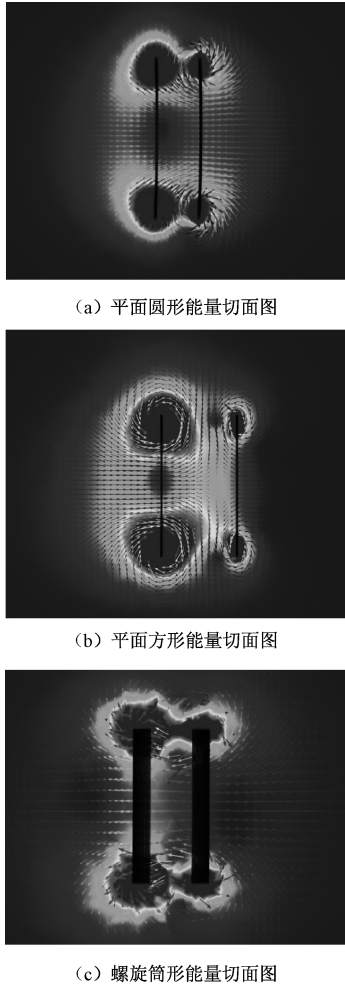


图 4 不同形状耦合线圈能量切面图

Fig. 4 Energy plane of coupling coils with different shapes

结果进行全局计算,得出发射端口与接收端口的功率值,同时计算出系统的电能传输效率,接收功率与传输效率随距离变化的曲线如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,三种形状的线圈接收功率随着距离的减小呈现先增大后减小的趋势,而系统的传输效率随着距离的减小而逐渐增加。其中,平面方形的耦合线圈有效传输距离较近,平面圆形与螺旋筒形的有效传输距离较远且电能传输效果相似。考虑到实际应用的封装问题与小型化,选用平面圆形的耦合线圈。

3.2 耦合线圈参数优化的仿真分析

针对不同内径、线径、匝间距参数的谐振线圈进行优化仿真分析。

依据通频带的原理,应用式(4)计算线圈的品质因数:

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (4)$$

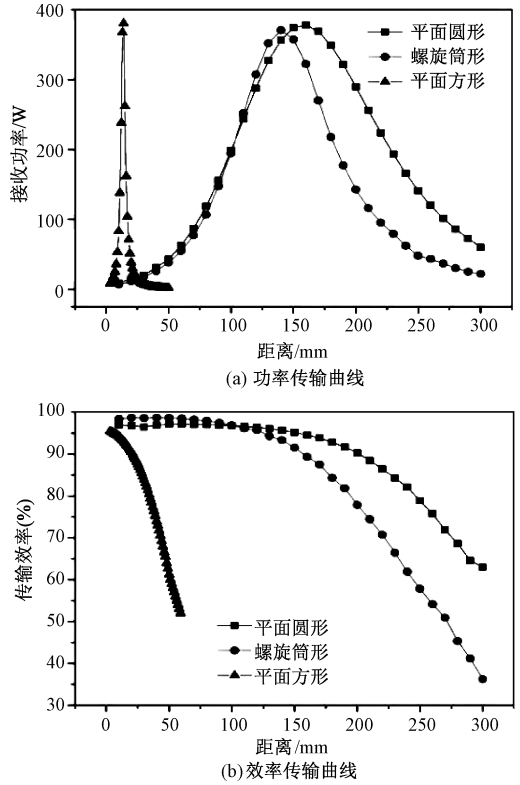


图 5 不同形状耦合线圈接收功率与传输效率仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of received power and transmission efficiency of coupling coils with different shapes

式中, f_0 为固有谐振频率, $f_0 = 6.78\text{MHz}$; f_1 、 f_2 为能量超过峰值能量一半以上所对应的频率值,针对不同的系统会有不同的数值。

应用 COMSOL 仿真软件,令线圈的匝间距、匝数、线径相同。直径 D 分别选取 100mm、200mm、250mm、300mm 四种情况,加入不同的集总单元完成调谐,随后改变电源的工作频率进行扫频,得到端口功率与频率的关系曲线如图 6 所示。

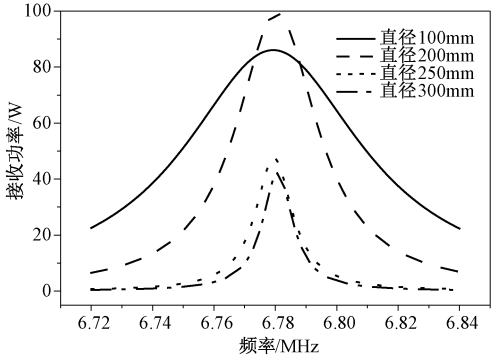


图 6 不同内径线圈的接收功率值

Fig. 6 Received power of coupling coils with different inner diameters

不同直径耦合线圈的品质因数依次对应为: 93. 214, 200. 850, 311. 630, 440. 790。由此可知随着线圈直径的增加, 系统的品质因数也逐渐增加。

令线圈的匝间距、内径、匝数相同。线径 a 分别选取 1mm、1. 5mm、2mm、2. 5mm 四种情况, 加入不同的集总单元完成调谐, 随后改变电源的工作频率进行扫频, 得出端口功率与频率的关系曲线如图 7 所示。

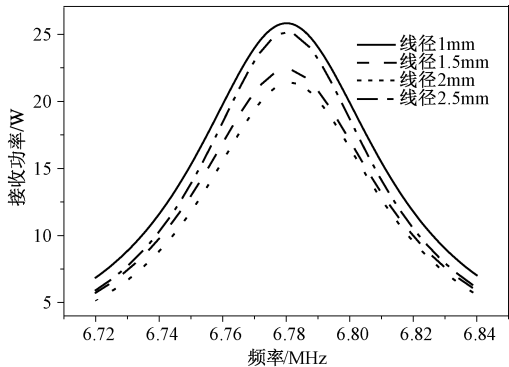


图 7 不同线径线圈的接收功率值
Fig. 7 Received power of coupling coils with different wire diameters

不同线径耦合线圈所对应的品质因数依次对应为: 135. 446, 138. 527, 144. 490, 145. 223。由此可知随着线径的增加, 品质因数逐渐增加, 但是品质因数的变化并不明显。

令线圈的内径、匝数、线径相同。匝间距之间距离分别选取 10mm、15mm、20mm、25mm 四种情况, 加入不同的集总单元完成调谐, 改变电源的工作频率进行扫频, 得出端口功率与频率的关系曲线如图 8 所示。

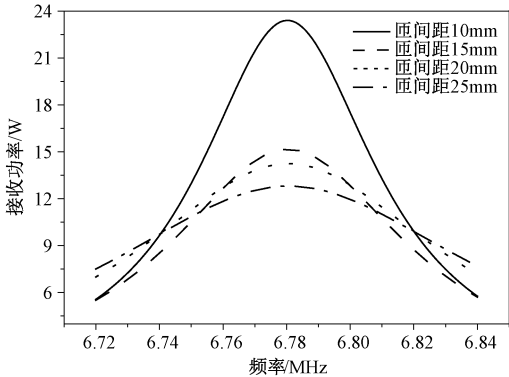


图 8 不同匝间距线圈的接收功率值
Fig. 8 Received power of coupling coils with different turn spacings

不同匝间距耦合线圈的品质因数依次对应为: 97. 474, 70. 155, 49. 120, 42. 049。由此可知随着线圈匝间距的增加, 系统的品质因数减小。

4 实验验证

为了对仿真分析及优化结果进行实验验证, 根据仿真分析的数据绕制相应的谐振线圈, 通过多次不同实验, 替换不同的谐振线圈进行实验分析。

将不同形状的耦合线圈同轴放置, 记录不同距离下系统的发射功率与接收功率, 并且计算出系统的传输效率, 得出不同形状下接收功率与传输效率的距离特性曲线, 如图 9 所示。

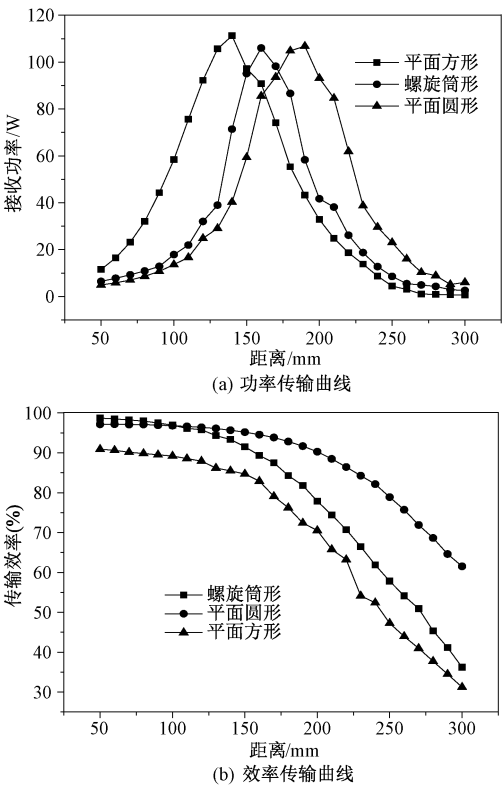
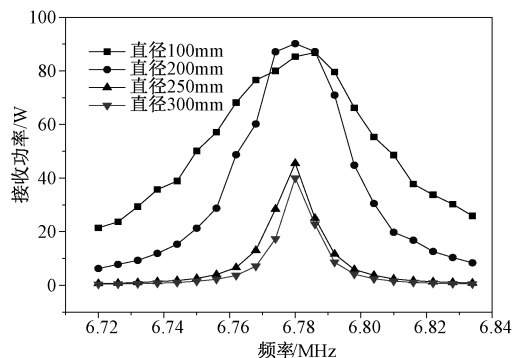
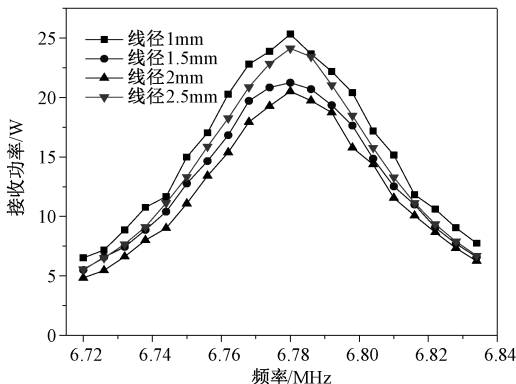


图 9 不同形状耦合线圈接收功率与传输效率实验曲线
Fig. 9 Experimental curves of received power and transmission efficiency of coupling coils with different shapes

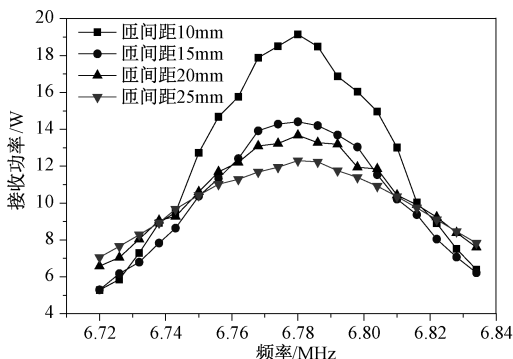
针对不同参数的耦合线圈绕制了相应的耦合线圈进行实验, 接收功率实验曲线如图 10 所示。可知, 不同内径线圈对应的品质因数分别为 125. 56, 188. 33, 282. 5, 282. 5; 不同线径线圈对应的品质因数分别为 140. 21, 140. 75, 141. 25, 141. 25; 不同匝间距线圈对应的品质因数分别为 141. 25, 125. 56, 125. 56, 113。综上所述, 由实验结果计算得到的不同线圈品质因数的变化趋势与仿真结果相同。



(a) 不同内径线圈接收功率实验结果



(b) 不同线径线圈接收功率实验结果



(c) 不同匝间距线圈接收功率实验结果

图 10 接收功率实验曲线

Fig. 10 Experimental curves of received power

5 结论

本文通过仿真分析与实验验证,得出谐振式 WPT 耦合线圈的最佳形状与相应的参数优化设计。在磁耦合谐振式无线电能传输系统中,不同耦合线圈有着不同的电能传输效果,在相同接收功率下,平面方形线圈的传能距离比平面圆形与螺旋筒形线圈的传能距离短。螺旋筒型线圈在距离 150mm 时电能传输效果较佳;平面圆型线圈在 200mm 以上的距离有着更好的电能传输效果。平面圆形线圈不仅有着较好的电能传输效果且易于封装,是系统构建过程中的首选形状。

在谐振线圈的内径、线径、匝间距参数中,系统的品质因数与线圈的内径成正比、与线径成正比、与匝间距成反比。因此在设计线圈时,可首要选择直径和线径较大、匝间距较小的平面圆形线圈设计。

参考文献 (References):

- [1] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠, 等 (Zhao Zhengming, Zhang Yiming, Chen Kainan, et al.). 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展 (New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (3): 1-9.
- [2] Kurs Andre, Karalis Aristeidis, Moffatt Robert, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances [J]. Science, 2007, 317 (5834): 83-86.
- [3] 陈文仙, 陈乾宏 (Chen Wenxian, Chen Qianhong). 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述 (Review and research progress of magnetic resonance wireless power transmission technology) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (9): 35-47.
- [4] Jiang Hao, Zhang Junmin, Lan Di, et al. A low-frequency versatile wireless power transfer technology for biomedical implants [J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, 2013, 7 (4): 526-535.
- [5] Mohamed Ahmed A S, Marim A A, Mohammed O A. Magnetic design considerations of bidirectional inductive wireless power transfer system for EV applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53 (6): 8700105.
- [6] Jabbar H, Song Y S, Jeong T T. RF energy harvesting system and circuits for charging of mobile devices [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2010, 56 (1): 247-253.
- [7] 李阳, 杨庆新, 闫卓, 等 (Li Yang, Yang Qingxin, Yan Zhuo, et al.). 磁耦合谐振式无线电能传输系统的频率特性 (Characteristic of frequency in wireless power transfer system via magnetic resonance coupling) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2012, 16 (7): 7-11.
- [8] Gunbok Lee, Benjamin H Waters, Chen Shi, et al. Design considerations for asymmetric magnetically coupled resonators used in wireless power transfer applications [A]. 2013 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks [C]. 2013. 124-126.
- [9] 谭林林, 黄学良, 赵俊锋, 等 (Tan Linlin, Huang Xueliang, Zhao Junfeng, et al.). 一种无线电能传输系

- 统的盘式谐振器优化设计 (Optimization design for disc resonators of a wireless power transmission system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (8): 1-6, 33.
- [10] 范松海, 李均龙, 李晓宁, 等 (Fan Songhai, Li Junlong, Li Xiaoning, et al.). 磁耦合谐振无线电能传输线圈仿真设计 (Simulation design of the wireless power transfer coil based on magnetic coupling resonance) [J]. 控制工程 (Control Engineering of China), 2015, 22 (S1): 94-99.
- [11] 翟渊, 孙跃, 戴欣, 等 (Zhai Yuan, Sun Yue, Dai Xin, et al.). 磁共振模式无线电能传输系统建模与分析 (Modeling and analysis of magnetic resonance wireless power transmission systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (12): 155-160.
- [12] 赵靖英, 周思诺, 崔玉龙, 等. (Zhao Jingying, Zhou Sinuo, Cui Yulong, et al.). 磁耦合谐振串并式无线电能传输功率稳定性研究 (Research on power stability of magnetic resonance wireless power transmission with series-parallel structure) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 17-26.
- [13] 李中启, 黄守道, 袁小芳 (Li Zhongqi, Huang Shoudao, Yuan Xiaofang). 线圈非同轴时磁耦合谐振式无线电能传输系统的效率优化 (Optimum efficiency analysis of wireless power transfer system via coupled magnetic resonances with lateral and angular misalignments) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (8): 151-159.
- [14] 张献, 杨庆新, 崔玉龙, 等 (Zhang Xian, Yang Qingxin, Cui Yulong, et al.). 大功率无线电能传输系统能量发射线圈设计、优化与验证 (Design optimization and verification on the power transmitting coil in the high-power wireless power transmission system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (10): 12-18.
- [15] 赵靖英, 赵纪新, 邢英翔, 等 (Zhao Jingying, Zhao Jixin, Xing Yingxiang, et al.). 多初级绕组串联的动态无线电能传输系统设计与特性分析 (Design and characteristics analysis on dynamic wireless power transfer system with multi-serial primary coils) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 67-74.
- [16] 毛世通, 朱春波, 宋凯, 等 (Mao Shitong, Zhu Chunbo, Song Kai, et al.). 基于端口阻抗的磁耦合谐振式无线电能传输特征参数仿真方法研究 (Characteristic parameter simulation method for magnetic coupling resonance wireless power transfer based on port impedance) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (19): 95-102.

Design and parameter optimization on coupling coil in wireless power transfer system via magnetic resonance

ZHU Jia-hui¹, GAO Qiang², LIU Qi², FAN Wei², PAN Jia-yu³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;

3. Liaoning Dongke Power Co., Ltd., Shenyang 110179, China)

Abstract: Coupling coil is the key of a wireless power transfer (WPT) system, which affects the capability of wireless power transfer system. So the shape and structure optimization of the coupling coil is important. In this paper, a high-frequency circuit model is constructed for wireless power transfer system, and the power and efficiency expression of the coupled energy transfer system is deduced. The COMSOL Multiphysics is used for the simulation of three common shapes including plane circle, plane square and spiral barrel. The variations of power and efficiency at different distances are compared. The optimal shape of the coupling coil is given. And the simulation applying different structure parameters is achieved with the optimal shape to obtain the optimum resonance coil parameters. We find that the larger the coil diameter or wire diameter and the smaller the pitch, the higher the quality factor of the coil. This paper provides the basis and references for the optimization of wireless power transfer system.

Key words: wireless power transfer (WPT); coupled magnetic resonance; coil shape; coil parameter