

文章编号:2095-0411(2016)06-0113-06

高频效应对无线电能传输系统的影响研究

强 浩¹,陈 琛²,刘柏良²,施泽群¹,马 旭¹,司 政¹

(1. 常州大学 城市轨道交通学院,江苏 常州 213164;2. 国网江苏省电力公司 经济技术研究院,江苏 南京 210008)

摘要:基于电磁场的基本理论,结合有限元软件,研究了高频效应对无线电能传输系统性能的影响,理论分析和仿真结果表明在高频环境下,集肤效应、邻近效应、涡流等因素都会使系统损耗增加,从而降低系统的传输效率,影响系统工作性能。最后分别采用铜管和利兹线绕制线圈进行无线电能传输的实验,与铜管线圈相比,在相同的工作频率和传输距离下,采用利兹线绕制的线圈能显著提高系统的传输效率,有效减小高频效应对系统的影响。

关键词:无线电能传输;高频效应;谐振器;集肤效应;邻近效应

中图分类号:TM 724

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2016.06.021

Impact of High-Frequency Effect on Wireless Power Transmission System

QIANG Hao¹, CHEN Chen², LIU Bailiang², SHI Zequn¹, MA Xu¹, SI Zheng¹

(1. School of Urban Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. State Grid Jiangsu Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: According to the basic theory of electromagnetic field and with the help of finite element software, this paper has investigated and analyzed the issue on the impact of high-frequency effect on wireless power transmission (WPT) system. The theoretical analysis and simulation results show that at high frequencies, skin effect, proximity effect and eddy current would increase the system loss and reduce the transmission efficiency of the system. Finally, by adopting the copper pipe and Litz wire to wind coils, compared experiments are carried out. With the same working frequency and transmission distance, Litz wire can be effectively used to improve the transmission efficiency and reduce the influence of high frequency effect on WPT system.

Key words: WPT; high-frequency effect; resonator; skin effect; proximity effect

19 世纪初,著名的电气工程师尼古拉·特斯拉便提出了无线电能传输技术的概念雏形,但是由于种种条件的限制,该技术一直没有得到发展^[1-2]。2007 年,MIT 的 Marin Soljacic 和其研究团队利用磁谐振耦合的方式,在 2m 外点亮一个 60W 的灯泡^[3-4],开创了无线电能传输的新思路,将无线电能

传输技术推向一个崭新的研究高度,使其成为各大研究机构的研究热点。

常规的大功率电力装置由于工作频率较小,且与外界环境的耦合程度较低,由高频效应产生的损耗通常可以忽略不计。而对于无线电能传输系统来讲,高频环境下的电磁现象都会引起谐振器参数与

收稿日期:2016-05-27。

基金项目:江苏省产学研联合创新基金项目(前瞻性联合研究项目)(BY2014037-29);2016 年江苏省大学生创新创业训练计划(201610292016Z)。

作者简介:强浩(1976—),男,江苏无锡人,博士,讲师,主要从事无线电能传输、电动汽车与电网互动技术研究。

性能的变化,从而导致系统损耗过大、偏离正常工作状态,影响设备的使用效果^[5-10]。

本文主要基于电磁场的基本理论,对高频环境下的集肤效应、邻近效应、涡流等现象进行理论和仿真分析,研究了无线电能传输系统的高频效应,最后通过实验验证了采用利兹线绕制线圈能有效提高系统的传输效率。

1 无线电能传输基本原理

典型的无线电能传输系统主要由高频电源、能量发射装置、能量接收装置及负载构成^[11],如图 1 所示。

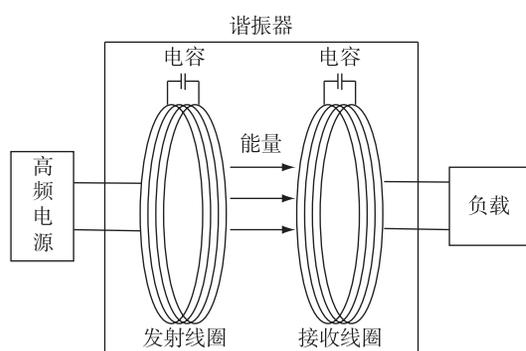


图 1 无线电能传输系统的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of WPT system

为了使系统谐振,确保其传输性能最优化,可以在能量发射回路和接收回路进行串联或并联谐振补偿^[11-12]。就最简单的 SS 谐振补偿拓扑而言,当电磁耦合机构的发射线圈接入角频率为 ω 的正弦交流电压 U_m 时,其等效电路如图 2 所示。

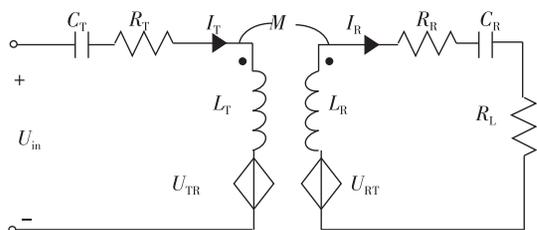


图 2 SS 拓扑结构等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of SS topology

图 2 中 L_T 和 L_R 分别是两线圈的自感; R_T 和 R_R 分别为两线圈的等效电阻; C_T 和 C_R 分别是两线圈在高频下的分布式电容; I_T 和 I_R 为两线圈中的电流; R_L 和 M 为负载和两线圈间的互感。 U_{RT} 表示发射线圈产生的交变磁场在接收线圈中产生的感应电动势,其值为 $j\omega MI_T$,因此 U_{RT} 可看作是受发射线圈电流控制的受控电压源; U_{TR} 表示接收线圈产生的

交变磁场在发射线圈中产生的感应电动势,其值为 $j\omega MI_R$,同理 U_{TR} 也可以看作是受接收线圈电流控制的受控电压源。

利用 KVL 定律,容易得到

$$\begin{bmatrix} Z_T & -j\omega M \\ -j\omega M & Z_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $Z_T=R_T+j\omega L_T-j/(\omega C_T)$, $Z_R=R_R+R_L+j\omega L_R-j/(\omega C_R)$ 。

当系统谐振时,其负载输出功率及传输效率为

$$P_L = \frac{U_{in}^2 (\omega M)^2 R_L}{[R_T(R_R + R_L) + (\omega M)^2]^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{(\omega M)^2 R_L}{(R_R + R_L) [R_T(R_R + R_L) + (\omega M)^2]} \quad (3)$$

2 高频效应分析

为了减少系统由于高频效应带来的损耗,需要就高频环境对无线电能传输系统的作用机理进行分析。下面将从电磁场基本理论出发,分析高频效应对无线电能传输系统的参数与性能的影响。

2.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组是电磁场理论中最基本、最重要的理论基础^[13],也是分析和解决无线电能传输问题的主要理论依据,其形式为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (7)$$

当研究频率在 1MHz 以下的情况时,可忽略式(7)中的位移电流项,即

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (8)$$

此时的电磁场称为磁准静态场(MQS),可忽略电磁场的波动性。由此,进一步得到了麦克斯韦方程组的全部积分和微分形式,并满足以下的结构方程

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (11)$$

2.2 集肤效应

当谐振器线圈中通过高频电流时会产生集肤效应^[14-15],此时电流密度集中于线圈外侧,导线的等

效截面积变小,线圈的等效内阻增大,从而导致损耗增加,增加的损耗即为集肤效应损耗。若对式(8)两边取旋度,可得

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (12)$$

同理可得

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (13)$$

式(13)是在 MQS 近似下,导体内部任意一点电场 E , 磁场 H 满足的微分方程,在其两端同乘以电导率 ϵ , 并代入式(11), 可得

$$\nabla^2 \mathbf{J} = \mu\epsilon \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} \quad (14)$$

假设在 XOY 坐标系中,以 $x > 0$ 的半无限大空间为导体,正弦电流沿 y 方向流过,此时半无限大导体中的电磁场为

$$\mathbf{J}_y = J_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (15)$$

式中 $\alpha + j\beta = k = \sqrt{\frac{\omega\mu\epsilon}{2}}(1 + j)$ 。

电场强度及磁场强度的解可分别为

$$\mathbf{E}_y = E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (16)$$

$$\mathbf{H}_z = -\frac{jk}{\omega\mu} E_0 e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} \quad (17)$$

显然,电流密度、电场强度、磁场强度的振幅沿导体纵向深度以指数规律衰减,且相位随纵深也会改变。其集肤程度可通过集肤深度 d 来表示

$$d = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\epsilon}} \quad (18)$$

由此可见,频率越高、导电性能越好的导体,集肤效应越明显。图 3 显示了在不同频率下导线中通入 1A/m^2 的电流,其电流密度的分布情况。

由图 3 可知集肤效应与频率密切相关,频率越大,集肤效应越明显,集肤深度越小,导体的等效电阻越大,从而导致系统的集肤效应损耗越严重。

2.3 邻近效应

目前在分析无线电能传输系统传输机理时主要采用单匝线圈进行分析,但实际应用中能量发射和接收线圈多为螺旋线圈或盘式线圈。邻近效应是在双线传输的两导体中,交流电流相互向相邻导体接近的现象^[16-17]。频率和磁导率愈高,电阻系数愈小,这种现象愈显著。邻近效应会使导体截面内电流密度的不均匀性更加明显。

图 4 为两根平行直导线中产生邻近效应时导体截面内部电流密度的分布情况。

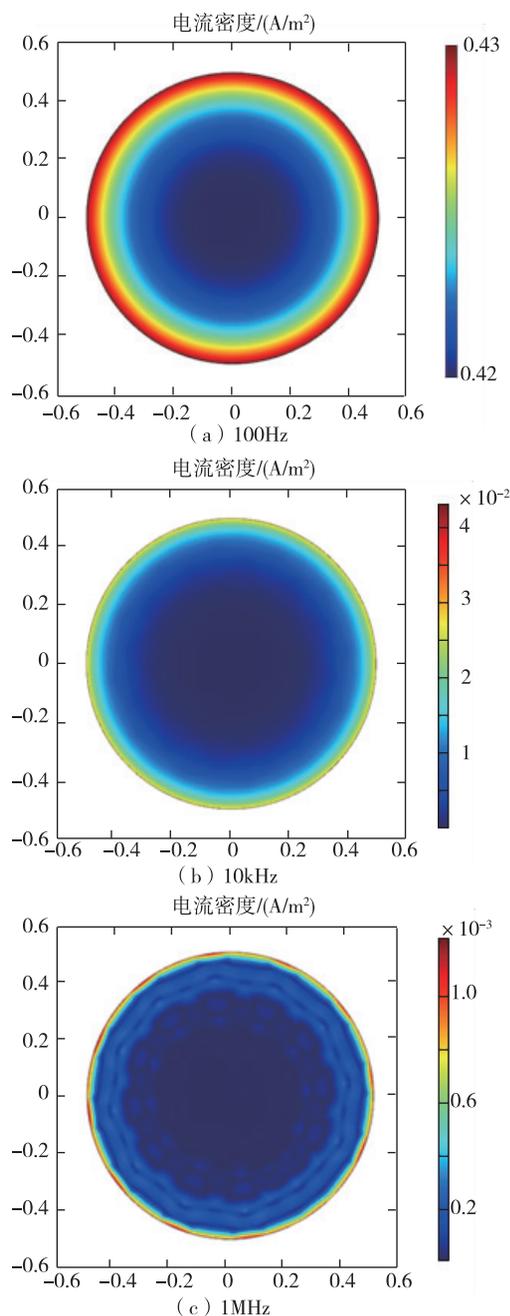


图 3 不同频率下导线中的电流密度分布

Fig.3 Current density distribution under various frequencies

由图 4 可以看出,邻近效应使线圈中的电流密度失去了对称性。比较图 4(b)和(c)两图可知,当两电流同向时,电流会集中于导体外侧流动,而当两电流反向时,电流会集中于导体内侧。图 5 为频率 $f = 10\text{kHz}$ 且电流方向相反(可等效为一个环形线圈的截面)时两导线中的电流密度分布,此时可以更加清晰地看出导体内电流密度的不均匀性。当电流流过相邻的导线时,会产生可变磁场,从而形成邻近效应。邻近效应比集肤效应更严重,因为集肤效应只是将导线的导电面积限制在表面的一小部分,增

加了铜损。而邻近效应中的涡流是由相邻绕组层电流的可变磁场引起的,而且涡流的大小随线圈层数的增加按指数规律递增,多层线圈及其邻近效应如图 6 所示。

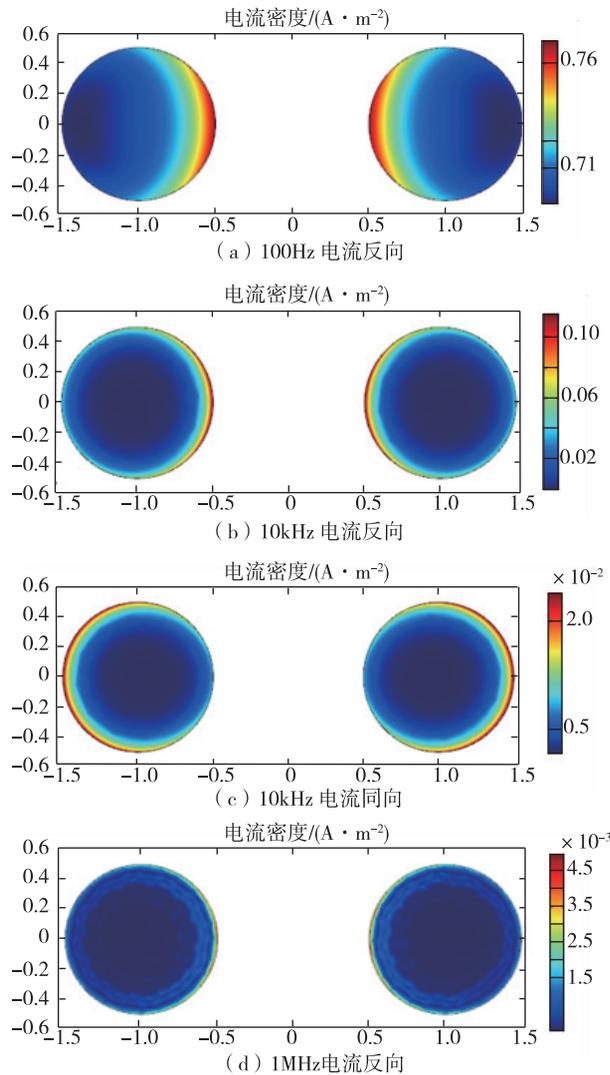


图 4 载流导体中的邻近效应

Fig.4 Proximity effect in current-carrying conductor

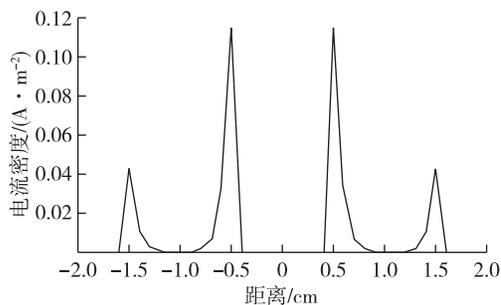
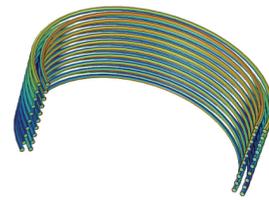
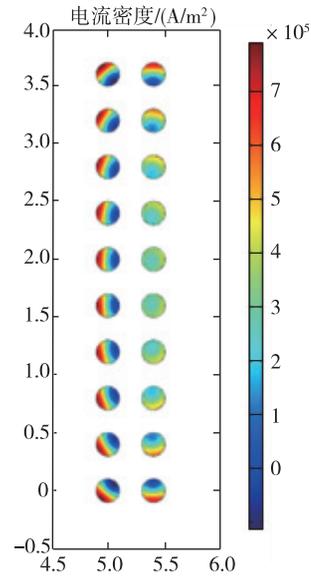


图 5 导线中的电流密度分布

Fig.5 Current density distribution in wire



(a) 多层线圈



(b) 多层线圈的邻近效应

图 6 多匝线圈中的邻近效应

Fig.6 Proximity effect in multilayer coil

2.4 涡流及损耗

当无线电能传输系统加装金属机壳时,机壳内部会感应出电流,并在导体内部形成闭合回路,呈漩涡状流动,造成一定的损耗和对系统的干扰,这称为涡流效应^[18-19]。线圈的半径越大,工作频率越高,涡流就越大。机壳内部的涡流也会产生热量,如果机壳的电阻率小,则涡流很强,产生的热量就很大。感应电动势由变化的磁通决定,可以表示为

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (19)$$

式中 φ 是导体板上由谐振线圈电流感应而产生的总磁通。涡流由感应电动势产生,其密度分布为

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = (-\nabla \varphi - j\omega A)(\sigma + j\omega \epsilon) \quad (20)$$

式中: μ 为导体板磁导率, σ 为电导率, ϵ 为介电常数。

因此,导体板中的总电流为

$$I = \int_V (-\nabla \varphi - j\omega A)(\sigma + j\omega \epsilon) dV \quad (21)$$

通过有限元仿真可以模拟出当线圈靠近机壳时

的涡流现象。本文分别对铁质机壳与铜质机壳进行仿真分析,铁和铜的电磁参数如表 1 所示。

表 1 不同材料的电磁参数

Table 1 The electromagnetic parameters of different materials

材料名称	相对磁导率	电导率/(s·m ⁻¹)
铝	1	3.774×10 ⁷
铁	4 000	1.12×10 ⁷

图 7 绘制了在不同频率以及线圈与金属板距离不同时金属板的表面阻抗损耗。可以明显的看出随着线圈与金属板之间距离的减小,涡流损耗会急剧增加。

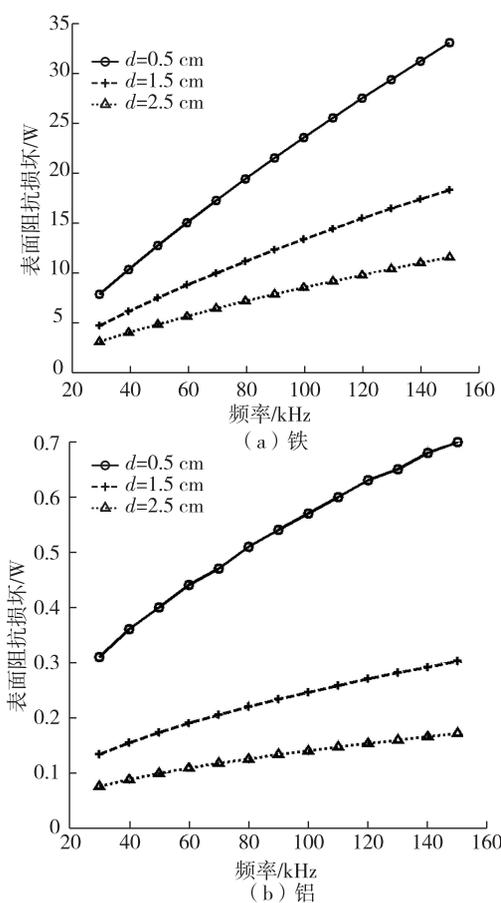


图 7 不同材料金属板中的表面阻抗损耗

Fig.7 The Surface impedance loss of different metal plates

3 实验验证

由上述分析可知,由于无线电能传输系统工作在高频环境下,集肤效应、邻近效应、涡流等因素都会使系统损耗增加,从而降低系统效率,影响系统工作性能。工程上通常采用利兹线代替普通的铜导线来减少由于高频效应带来的损耗^[20-21]。

为了验证利兹线能更好地提高传输效率,设输

入电压为 15V,线圈电感为 42.5μH,谐振电容为 100nF,负载电阻为 100Ω,利用有限元软件分析了当传输距离为 4cm,采用铜管和利兹线绕制线圈时系统的频率特性,结果如图 8 所示。

图 8 中,当系统工作频率约为 77kHz,无论采用铜管还是利兹线绕制线圈,系统的传输效率均达到最大化。同时还可以明显看到,采用利兹线绕制线圈时,系统传输效率最大值约为 70%,该值远远大于铜管下的最大传输效率 19%。因此,将系统工作频率设为 77Hz,进行实验研究。图 9 为采用铜管和利兹线绕制的盘式线圈及实验装置图。

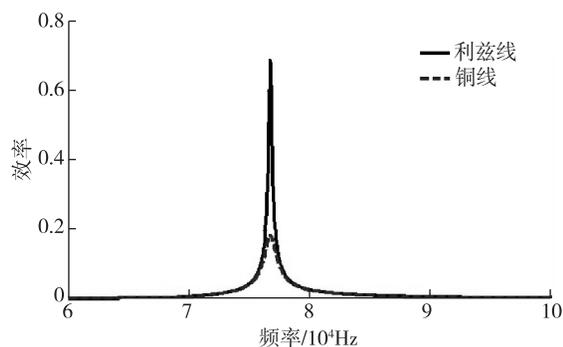


图 8 铜管和利兹线线圈下的系统频率特性

Fig.8 System frequency characteristic with copper pipe and Litz wire

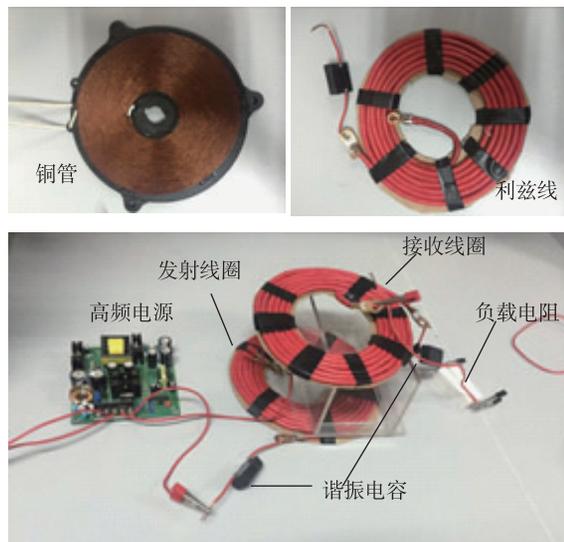


图 9 实验结构图

Fig.9 The experimental structure diagram

当系统具有不同的传输距离时,系统的传输特性如图 10 所示。

图 10 中,随着传输距离的不断增大,系统的传输效率呈下降趋势。与铜管线圈相比,在相同的条

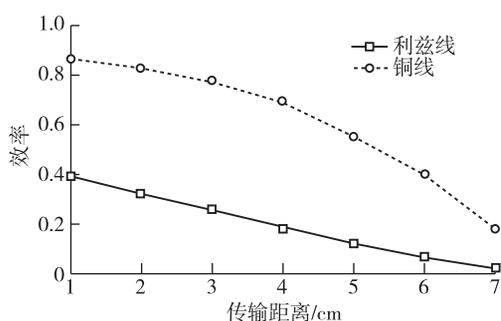


图 10 随传输距离变化的传输效率曲线

Fig.10 Curves of transmission efficiency varied with distance

件(传输距离和工作频率)下,采用利兹线绕制的线圈能显著提高系统的传输效率。

4 结 论

高频情况下导流线圈中会出现集肤效应、邻近效应及涡流现象,进而影响无线电能传输系统传输效率。通过仿真和实验验证了采用利兹线绕制的线圈比铜管线圈能更有效地传输能量。这一结论为无线电能传输系统在工程应用中的设计提供了良好的理论依据和技术支持。

参考文献:

[1] TESLA N. Apparatus for Transmitting Electrical Energy: US 1119732[P]. 1914-12-01.
 [2] TESLA N. The true wireless [J]. Electrical Experimenter, 1919: 28-30.
 [3] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317 (5834): 83-86.
 [4] KARALIS K A, JOANNOPOULOS J D, SOJLJACIC M. Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer [J]. Annals of Physics, 2008, 323(1): 34-48.
 [5] KIM H, SONG C, KIM D H, et al. Design of conductive shield for wireless power transfer system for electric vehicle considering automotive body [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Silicon Valley:IEEE,2015: 1369-1374.
 [6] MOON H, KIM S, PARK H H, et al. Design of a resonant reactive shield with double coils and a phase shifter for wireless charging of electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3):1-4.

[7] KIM S, PARK H H, KIM J, et al. Design and analysis of a resonant reactive shield for a wireless power electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2014, 62(4): 1057-1066.
 [8] UMENEI A E, DE S V, CHAVANNES N, et al. Human exposure to close-range wireless power transfer systems as a function of design parameters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,99:1-10.
 [9] CHRIST Andreas, DOUGLAS M G, ROMAN J M, et al. Evaluation of wireless resonant power transfer systems with human electromagnetic exposure limits [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013,55(2): 265-274.
 [10] 景无为, 黄学良, 陈琛, 等. 多组无线电能传输系统间效率影响因素分析 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 457-462.
 [11] 强浩, 黄学良, 谭林林, 等. 基于动态调谐实现感应耦合无线电能传输系统的最大功率传输 [J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(7): 830-837.
 [12] 傅文珍, 张波, 秋东元, 等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18):21-26.
 [13] 冯慈璋. 工程电磁场导论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
 [14] 余明扬, 童磊. 集肤效应对铜排导电性能的影响分析 [J]. 电气技术, 2007(4): 56-57.
 [15] 邓显波, 欧阳本红, 孔祥海, 等. 大截面高压电缆导体交流电阻的优化 [J]. 高电压技术, 2016(2): 522-527.
 [16] 旷建军, 阮新波, 任小永. 集肤和邻近效应对平面磁性元件绕组损耗影响的分析 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 170-175.
 [17] 刘书铭, 施红, 冯蕾. 考虑集肤效应与邻近效应的变压器谐波损耗模型 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 133-139.
 [18] 屠张杰, 卜雄洙, 徐森森. 电磁耦合式无线供电在金属轴环境中的涡流损耗分析 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 38-41.
 [19] 张克涵, 阎龙斌, 闫争超, 等. 基于磁共振的水下非接触式电能传输系统建模与损耗分析 [J]. 物理学报, 2016(4): (048401-1)-(048401-8).
 [20] 黄士君. 输电铁塔受腐蚀节点蚀余力学性能的有限元分析 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2015, 27(3): 35-38.
 [21] 薛蕙. 将高频电感器的绕组损耗减到最小的方法 [J]. 磁性元件与电源, 2011(12): 143-146.

(责任编辑:李艳)