

无线输电系统中耦合线圈对传输效率的影响

孙子涵¹, 陈世玉²

(1. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网黑龙江省电力科学研究院, 哈尔滨 150030)

摘要:为了研究低频激励源无线输电系统中耦合线圈对传输效率的影响,采用双软件联合仿真方法,给出了电磁耦合线圈不同放置模式情况下的磁场分布以及系统效率、激励源波形与电磁耦合线圈之间的距离关系图。结果显示,无论线圈相对位置如何分布,正弦波和三角波激励源的系统传输效率与线圈位置布置关系较小,且两者传输效率相近,方波激励源下系统传输效率最低。最后,给出采用锂电池 PNGV 模型作为系统负载时,系统效率随时间变化波形图,使系统充电过程更接近实际充电情况。

关键词:无线输电;磁耦合;低频激励源;电磁分析;效率

DOI:10.15938/j.jhust.2022.01.017

中图分类号: TM724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2022)01-0128-07

The Influence of Coupling Coil on the Transmission Efficiency in Wireless Transmission System

SUN Zi-han¹, CHEN Shi-yu²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to study the influence of the coupling coils on the transmission efficiency in wireless power transmission system with low-frequency excitation source, the dual software co-simulation method is used to analyze the magnetic field distribution under different placement modes of the electromagnetic coupling coil, and the relationship between the system efficiency and the excitation source waveform and the position of electromagnetic coupling coil is also given. The results show that no matter how the relative positions of the coils are distributed, the system transmission efficiency of the sine wave and triangle wave excitation sources has a small relationship with the coil position arrangement, the transmission efficiency of the two is similar, and the system transmission efficiency under the square wave excitation source is the lowest. Finally, using the lithium battery PNGV model as the system load, the system efficiency and time-varying waveforms are presented, so that the system charging process is closer to the actual charging situation.

Keywords: wireless power transmission; magnetic coupling; low-frequency excitation source; electromagnetic analysis; efficiency

收稿日期: 2021-01-31

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5200-201940251A-0-0-00); 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB723308)。

作者简介: 孙子涵(2001—), 女, 本科生。

通信作者: 陈世玉(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: uniquecharm@live.cn.

0 引言

近年来,随着电力电子技术的快速发展,无线输电技术(wireless power transfer, WPT)得到了越来越广泛的应用。因其具有可实现远距离电能传输、效率高、灵活性高、智能化等优点,已逐渐成为国内外研究者主要研究课题之一^[1-5]。

目前,无线输电技术主要有以下 3 种形式:电磁感应技术、电磁共振技术、电磁辐射技术^[6-7]。这 3 种技术采用的原理不同,传输距离也有很大差异,分别对应着近、中、远距离无线电能传输^[8]。

2006 年,美国麻省理工大学提出磁共振式无线能量传输技术,又称磁耦合式无线能量传输技术,并从理论到实验都进行了验证,已应用至电脑、手机、电动汽车、医疗等生活场合^[9-11]。2009 年,中国科学技术协会将无线电能传输技术认定为“引领未来的 10 项技术之一”。

对于磁耦合谐振式无线电能传输系统,谐振耦合线圈为系统的核心部分^[12]。目前主要研究的集中点在于谐振耦合线圈自身参数的计算方法;系统传输效率、传输功率与线圈谐振频率、互感、线圈内阻等参数之间的关系;分布式参数线圈对无线电能传输性能的影响;耦合线圈形状设计与参数优化等^[13-18]。然而对于以上的研究,大多系统模型采用高频正弦波做为系统激励源,激励源频率范围从几十千赫兹到几百兆赫兹^[19-20]。高频电磁波对人身健康存在潜在的安全隐患,也会对周围的电子设备造成电磁干扰^[21-22]。针对该问题,本文提出一种利用低频激励源的无线电力传输充电系统,并对磁耦合线圈的不同放置模式进行了磁场与传输效率分析。为更贴近实际应用,文章最后选用锂电池模型作为负载,对其系统效率进行研究,并对锂电池充电过程进行分析。结果表明,本文提出的 WPT 系统在低频激励源情况下,在 3.8 kW 系统功率下可实现较高的系统效率。

1 系统模型与理论分析

WPT 系统模型如图 1 所示。其中, U_1 为激励源。 L_1 为初级线圈, L_2 为次级线圈。 r_1 为初级线圈

内阻, r_2 为次级线圈内阻。 R_L 为负载。 M 是互感电磁耦合线圈。 I_1 和 I_2 分别为初级线圈和次级线圈的电流。

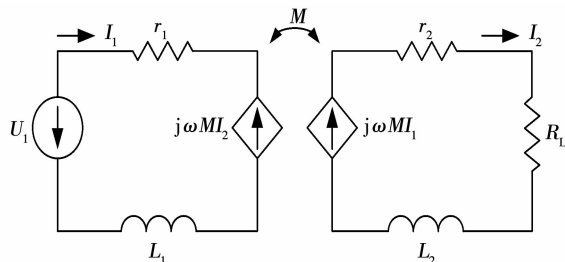


图 1 WPT 系统模型

Fig. 1 Circuit model of WPT system

根据电路模型,建立 KVL 方程如下:

$$\begin{cases} U_1 = I_1(j\omega L_1 + r_1) - j\omega M I_2 \\ j\omega M I_1 = I_2(j\omega L_2 + r_2 + R_L) \end{cases} \quad (1)$$

令

$$\begin{cases} Z_1 = j\omega L_1 + r_1 \\ Z_2 = j\omega L_2 + r_2 + R_L \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中,经过变换可得

$$\begin{cases} I_1 = \frac{U_1 Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \\ I_2 = \frac{j\omega M U_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{in} = U_1 I_1 = \frac{U_1^2 Z_1}{Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2} \\ P_{out} = I_2^2 R_L = \frac{(j\omega M)^2 U_1^2 R_L}{(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2)^2} \end{cases} \quad (4)$$

最终可得

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{(j\omega M)^2 R_L}{(Z_1 Z_2 + \omega^2 M^2) Z_1} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,在确定系统负载、励磁源和线圈参数的情况下,系统效率仅与电磁耦合线圈的互感有关。

2 阻性负载情况分析

2.1 WPT 系统电路拓扑

在 Simulink 中完成了无线输电系统的电路构建, WPT 系统电路拓扑如图 2 所示,激励源分别为 100Hz 正弦波电源,三角波电源和方波脉冲电源。 T_1 、 T_2 为初级线圈输入端, T_3 、 T_4 为次级线圈输出

端,耦合线圈输出电压经整流桥与滤波电容 C_L 整流滤波后输出给负载 R_L ,其中 R_L 为 $1\ \Omega$ 电阻。

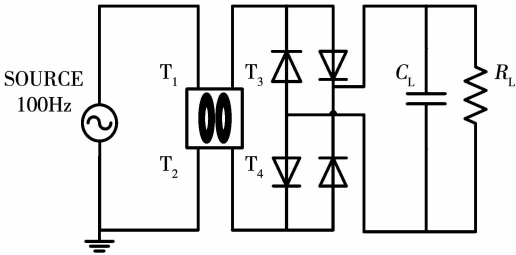


图 2 WPT 系统电路拓扑
Fig. 2 WPT system circuit topology

2.2 耦合线圈模型

利用 Maxwell 建立了线圈的 3D 模型,电磁耦合线圈的模型如图 3 所示,各线圈参数如下:匝数 $N_1 = N_2 = 25$,自感 $L_1 = L_2 = 580\ \mu\text{H}$,线圈的内半径 $R_1 = R_3 = 50\ \text{cm}$,线圈的外半径 $R_2 = R_4 = 94.4\ \text{cm}$,两线圈的高度 $h = 0.6\ \text{cm}$ 。 d 为耦合线圈之间的垂直距离。导线直径为 $0.6\ \text{cm}$,同一线圈中相邻导线之间的距离为 $0.3\ \text{cm}$ 。

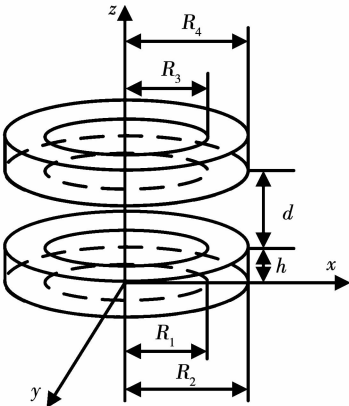


图 3 耦合线圈模型
Fig. 3 The model of coupled coils

2.3 同轴电磁耦合线圈

电磁耦合线圈同轴放置。图 4 给出了同轴电磁耦合线圈的磁场分布。图 5 显示了系统效率与 2 个线圈距离之间的关系。

由图 4 可以看出,当耦合线圈在同轴平行放置时,磁场以轴线为中心呈对称分部,可以推断出,随着 d 的增大通过次级线圈的磁通量逐渐减少。

由图 5 可以看出,随着 2 个线圈之间的距离增加 3 个激励源的系统效率均降低,且随着距离的增加系统效率下降趋势变大。同时,采用正弦波激励

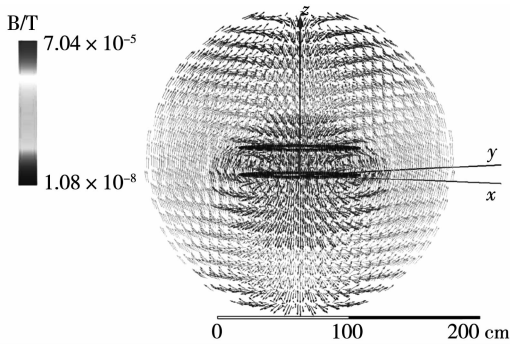


图 4 同轴电磁耦合线圈的磁场分布
Fig. 4 Magnetic field distribution of coaxial electromagnetic coupling coils

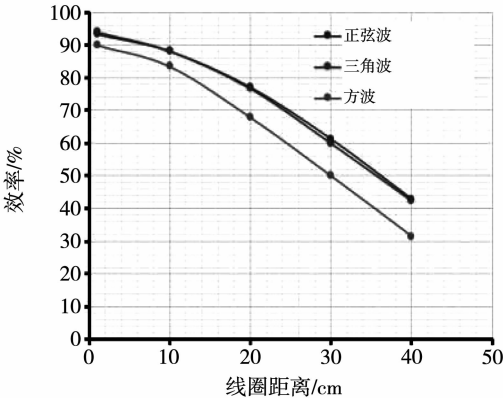


图 5 同轴电磁耦合线圈的传输效率
Fig. 5 The curve of efficiency vs coils distance

源和三角波激励源的无线输电系统的效率几乎相同,大于采用方波激励源的系统的系统效率。当耦合线圈距离在 $10\ \text{cm}$ 以下时,正弦波激励源和三角波激励源系统效率高出方波激励源系统效率约 5% 左右,当距离大于 $10\ \text{cm}$ 时,正弦波激励源和三角波激励源传输效率高出方波激励源传输效率约 10% 左右。

2.4 电磁耦合线圈的水平未对准分布

电磁耦合线圈在水平方向上未对准放置, d 取 $10\ \text{cm}$ 。图 6 为当两线圈 z 轴水平距离 d_z 为 $10\ \text{cm}$ 时电磁耦合线圈的磁场分布。图 7 显示了系统效率与两个线圈之间的 z 轴水平距离之间的关系。

由图 6 可以看出,当耦合线圈处于水平未对准布置时,磁场分布开始倾斜,且倾斜方向偏向于次级线圈偏移的方向,对比图 4 与图 6 可以看出,此时通过次级线圈的磁通量小于耦合线圈同轴布置时通过次级线圈的磁通量。图 7 结果可以看出,3 个励磁

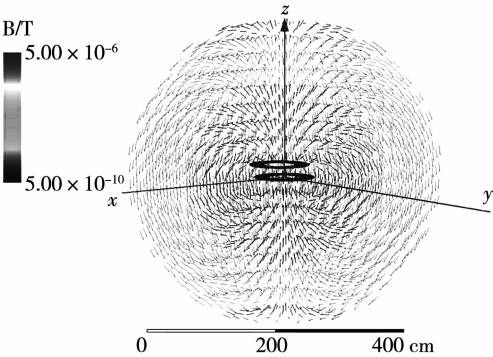


图 6 平移电磁耦合线圈的磁场分布

Fig. 6 Magnetic field distribution of horizontal misalign electromagnetic coupling coils

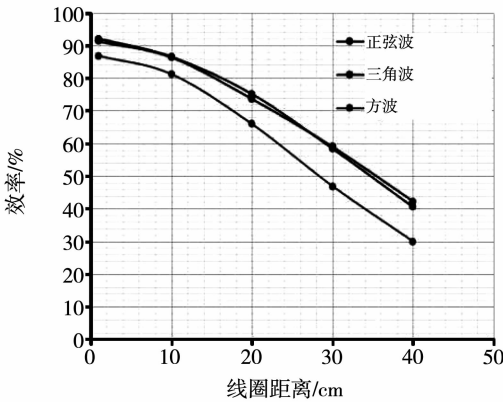


图 7 平移电磁耦合线圈的传输效率

Fig. 7 The curve of efficiency vs coils distance

源的系统效率随着 2 个电磁耦合线圈之间距离的增加而降低,且系统效率下降幅度随着距离的增加而逐渐增大。当 $d_z < 30$ cm 时,正弦波激励源的系统效率略大于三角波激励源。当 $d_z > 30$ cm 时,三角波激励源的系统效率略大于正弦波激励源。正弦波和三角波激励源的系统效率大于方波激励源。当耦合线圈距离小于 10 cm 时,正弦波激励源和三角波激励源传输效率高出方波激励源传输效率约 5% 左右,当距离大于 10 cm 时,正弦波激励源和三角波激励源传输效率高出方波激励源传输效率约 10% 左右。

2.5 电磁耦合线圈的非平行分布

电磁耦合线圈不平行放置如图 8 所示。电磁耦合线圈的初始位置为同轴, d 为 30 cm,2 个电磁耦合线圈的中心点的位置和距离保持不变。初级线圈不移动,次级线圈的旋转将 2 个线圈的平面之间的角度从 0° 增加到 30° 。图 8 显示出当平面之间的角

度为 30° 时同轴电磁耦合线圈的磁场分布。图 9 为系统效率与电磁耦合线圈的角度之间的关系。

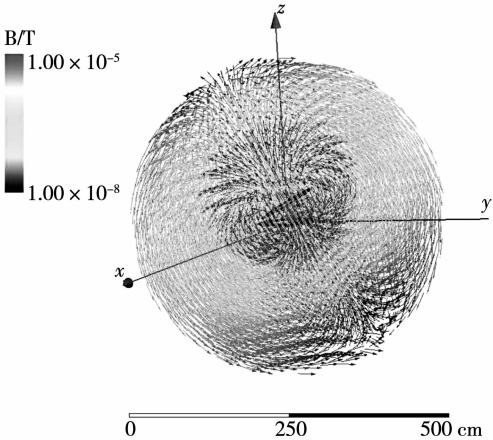


图 8 非平行电磁耦合线圈的磁场分布

Fig. 8 Magnetic field distribution of non-parallel electromagnetic coupling coils

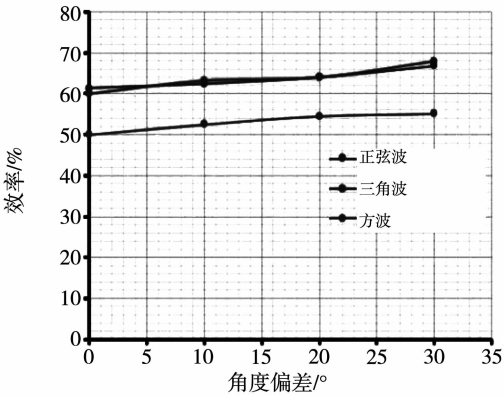


图 9 非平行电磁耦合线圈的传输效率

Fig. 9 The curve of efficiency vs the angle of the electromagnetic coupling coils

由图 8 可以看出,此时磁场分布明显偏移向次级线圈中轴线方向。由图 9 可以看出,3 个励磁源下系统传输效率分别随 2 个线圈间夹角的增加而增加。当线圈夹角由 0° 增加至 30° 时,三角波激励源系统效率与正弦波激励源系统效率由 60% 逐渐增加至 68%,方波激励源系统效率由 50% 逐渐增加至 56%,且系统效率增加趋近于线性增长。当 2 个线圈之间的角度小于 10° 时,三角波激励源的效率略高于正弦波激励源。当 2 个线圈之间的角度为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时,正弦波和三角波激励源的系统效率几乎相等。当电磁耦合线圈的角度大于 20° 时,使用正弦波激励源的系统效率会稍大于三角波激励源。

分析造成该结果的原因是,次级线圈的一侧远离初级线圈,而另一侧更靠近初级线圈,因此通过次级线圈的磁通量增加,从而系统传输效率随之增加。

综上所述,对于一定的系统负载效率 3.8 kW,当激励源为 100 Hz 正弦波,三角波和方波脉冲电源时,从系统效率的角度来看,无论本文上面的分布是什么,线圈放置时,正弦波和三角波激励源的系统效率相近,均大于方波激励源。

3 WPT 锂电池充电系统 PNGV 模型

为更贴近 WPT 系统实际工作情况,选用锂电池作为 WPT 系统负载,锂电池 PNGV 模型如图 10 所示。同时,为了防止过大的充电电流对电池和充电电路的影响,在输出端使用了限流电感器来调节充电过渡阶段。

图 10 中, U_{oc} 为开路电压, R_o 为内部电阻, R_p 为极化内阻, C_p 为极化电容, I_L 为负载电流, U_L 为端子电压,在电池充电和放电期间,电容器 C_b 会放电和充电,从而引起负载电流的变化以及电池的充电状态(SOC)。本文采用的锂电池 PNGV 模型由 82 个额定电压为 3.5 V 内阻为 1 Ω 单节锂离子电池组成。系统中设有补偿电容器。WPT 充电系统的电路结构如图 11 所示。激励源波形选用 100 Hz 的三角波。

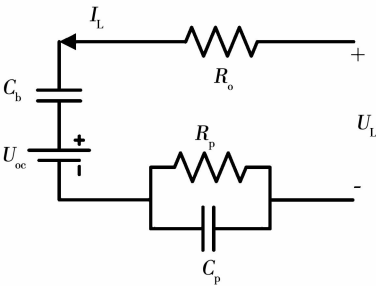


图 10 锂电池 PNGV 模型

Fig. 10 Lithium battery PNGV model

图 12 为系统充电电流和 SOC 波形。可以看出,在充电开始阶段,充电电流缓慢增加,形成缓冲和自适应过程。SOC 缓慢上升以完成电池的充电预热阶段。随后,随着充电电流的迅速增加,SOC 迅速上升。最后,当 SOC 接近 100% 时,充电电流迅速减小,然后 SOC 缓慢上升至 100%,从而完成了锂电池的整个快速充电过程。

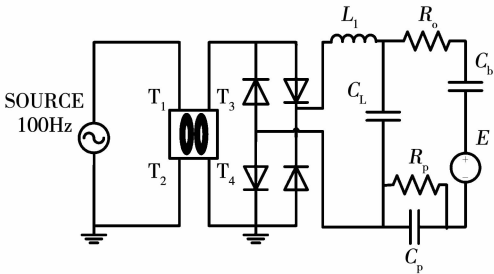


图 11 WPT 充电系统电路结构

Fig. 11 The circuit structure of WPT charging system

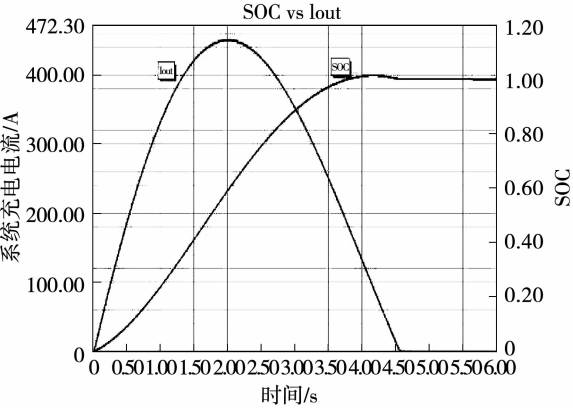


图 12 WPT 系统充电电流和 SOC 波形

Fig. 12 The circuit structure of WPT charging system

在具有 PNGV 锂电池模型的 WPT 充电系统中,系统的输入功率和输出功率随时都在变化。本文采用系统输入功率的正、负包络的代数和,得到系统输入功率的有功功率曲线和系统充电效率。WPT 充电系统输入的有功功率和输出功率如图 13 所示。系统充电效率如图 14 所示。

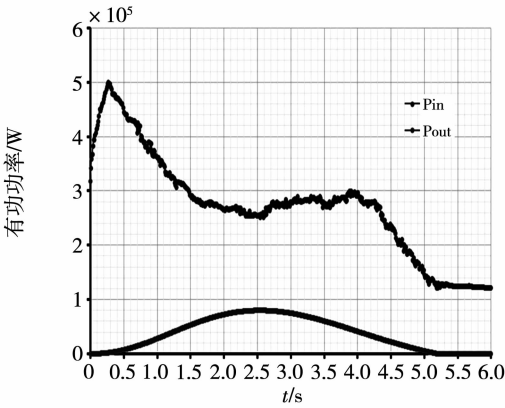


图 13 WPT 系统有功功率和输出功率波形图

Fig. 13 Active power and output power of WPT charging system

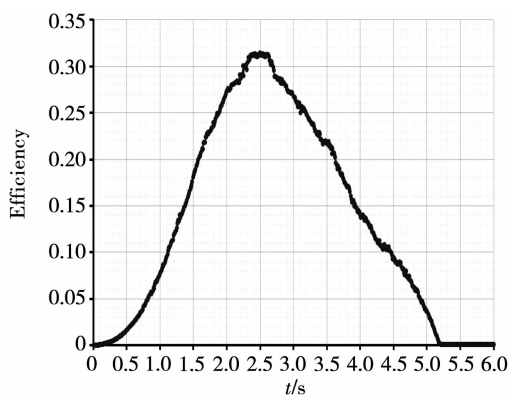


图 14 WPT 系统充电效率

Fig. 14 The system charging efficiency

对比图 13 与图 14 可以看出,WPT 系统对锂电池模型充电在 5.2 s 完成,系统有输出功率在 0.3 s 时刻达到最大值,随后逐渐下降至 1.7 s 左右趋于平稳阶段,稳定至 4.2 s 左右开始逐渐下降至充电完成。系统输出功率呈正弦波状态,在 2.5 s 左右达到最大值,随后开始下降至充电完成。WPT 系统充电效率随着时间的增加,在 2.5 s 左右达到最大达,为 32% 左右,随后逐渐下降至充电完成。

4 结 论

为减少高频电磁波对人和周围电子设备的影响,本文提出一种利用低频激励源的 WPT 充电系统。

通过 Simplorer-Maxwell 联合仿真验证了该方案的可行性。从电磁耦合线圈所处的同轴分布,水平位置偏差分布、角度偏差分布 3 种位置分析了系统的效率。仿真结果表明:

1)对于三种激励源,无论线圈位置分布如何,正弦波和三角波激励源的系统效率均相近,均大于方波激励源。

2)当耦合线圈处于同轴布置时,随着线圈距离的增加,系统效率随之降低。

3)当耦合线圈处于非同轴平行布置时,随着线圈轴距的增加,系统效率随之降低。

4)当耦合线圈处于非平行布置时,随着线圈角度的增加,系统效率随之升高。

最后,以锂电池的 PNGV 模型作为负载,给出系统输入功率、输出功率及系统效率随时间变化波形图,使系统的充电过程更接近实际充电情况。研究

结果对未来低频激励源下 WPT 系统的研究具有一定的理论价值和实际应用价值。

参 考 文 献:

- [1] 范兴明,莫小勇,张鑫. 磁耦合谐振无线电能传输的研究现状及应用[J]. 电工技术学报,2013,28(12):75.
FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research Status and Application of Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer Technology[J]. Journal of Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 75.
- [2] 王磊. 磁耦合谐振式无线能量传输技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [3] 周永勤,王传宇,朱萌. 一种磁耦合谐振式无线电能传输系统研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(2):55.
ZHOU Yongqin, WANG Chuanyu, ZHU Meng. Research on Wireless Power Transfer System via Magnetically Coupled Resonance[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2017, 22(2): 55.
- [4] BOYS J T, COVIC G A, YONGXIANG X. DC Analysis Technique for Inductive Power Transfer Pick-Ups[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2003, 1(2):51.
- [5] BOYS J T, COVIC G A, ELLIOTT G A J. Pick-up Transformer for ICPT Applications [J]. Electronics Letters, 2002, 38(21):1276.
- [6] BOYS J T, COVIC G A, GREEN A W. Stability And Control Of Inductively Coupled Power Transfer System[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2000, 147(1):37.
- [7] BOYS J T, HU A P, COVIC G A. Critical Q Analysis Of A Current-Fed Resonant Converter For ICPT Applications[J]. Electronics Letters, 2000, 36(17):1440.
- [8] FANG Xingming, GAO Linlin, MO Xiaoyong, et al. Overview of Research Status and Application of Wireless Power Transmission Technology. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7):1353.
- [9] COVIC G A, BOYS J T. Noise Quieting with Random PWM AC Drives[J]. IEE Proceeding Electric Power Applications, 1998, 145(1):1.
- [10] PRTER G L, COVIC G A, BOYS J T. Eliminating Output Distortion in Four-Switch Inverters with Three-Phase Loads [J]. IEE Proceeding Electric Power Applications, 1998, 145(4):326.
- [11] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance [J]. Science, 2007:83.
- [12] ZHU Jiahui, GAO Qiang, LIU Qi, et al. Design and Parameter Optimization on Coupling Coil in Wireless Power Transfer System Via Magnetic Resonance[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(7):67.
- [13] 陈晓娟,贾敏,李明晨. 基于线圈偏移的无线电能传输系统参

- 数优化方法[J]. 中国电力, 2021, 54(7):125.
- CHEN Xiaojuan, JIA Min, LI Mingchen. Parameter Optimization Method of Wireless Power Transfer System Based on Coil Offset [J]. Electric Power, 2021, 54(7):125.
- [14] 王琦婷. 磁耦合谐振式无线充电系统线圈的研究[J]. 电工材料, 2020(6): 56.
- WANG Qiting. The Research on Coil of Magnetically Coupled Resonant Wireless Charging System[J]. Electrical Engineering Materials, 2020(6): 56.
- [15] 贾金亮, 闫晓强. 磁耦合谐振式无线电能传输特性研究动态[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20):4217.
- JIA Jinliang, YAN Xiaoqiang. Research Trends of Magnetic Coupling Resonant Wireless Power Transfer Characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20):4217.
- [16] 赵靖英, 周思龙, 崔玉龙, 等. 磁耦合谐振串并式无线电能传输功率稳定性研究[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(8):17.
- ZHAO Jingying, ZHOU Silong, CUI Yulong, et al. Research on Power Stability of Magnetic Resonance Wireless Power Transmission with Series-Parallel Structure[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(8):17.
- [17] 李晋, 吕朋朋, 缪平, 等. 基于电场耦合的分布式发电电压恒频控制系统设计[J]. 电子设计工程, 2020(2):152.
- LI Jin, LÜ Pengpeng, MIAO Ping, et al. Design of Voltage Constant Frequency Control System for Distributed Generation Based on Electric Field Coupling [J]. Electronic Design Engineering, 2020(2):152.
- [18] 刘志凯, 王春芳, 李厚基, 等. 两用机电电路参数和磁耦合机构的优化[J]. 电子设计工程, 2020(22):93.
- LIU Zhikai, WANG Chunfang, LI Houji, et al. Optimization of Dual-use Machine Circuit Parameters and Magnetic Coupling Mechanism [J]. Electronic Design Engineering, 2020(22):93.
- [19] QIANG Hao, ZHU Weiyong, ZHENG Jianfeng. Simulation Study on Coil Design of Wireless Power Transfer System for Optimal Transmission Efficiency [J], Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 5(21): 5039.
- [20] 张文杰, 毕鲁飞, 齐伶艳. 磁耦合谐振式无线电能传输系统磁耦合结构错位性能的研究 [J]. 高电压技术, 2020, 46(11):4087.
- ZHANG Wenjie, BI Lufei, LIN Lingyan. Research on Misalignment Performance of Magnetic Coupling Structure in Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer System [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11):4087.
- [21] 李有全. 低频无线电能传输系统性能优化及实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [22] 张波, 疏许健, 吴理豪. 无线电能传输技术亟待解决的问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 1.
- ZHANG Bo, SHU Xujian, WU Lihao. Problems of Wireless Power Transmission Technology Urgent to be Solved and Corresponding Countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):1.

(编辑:温泽宇)