

无线电能传输中继线圈位置特性分析

张俊岭¹,尹朋¹,王继伟¹,龙孟姣²

(1. 山东鲁软数字科技有限公司, 山东 济南 250001;

2. 广东电网 广州供电局, 广东 广州 510013)

摘要:增加中继线圈是提升无线电能传输系统性能的一种有效方法,但目前关于中继线圈位置的确定多数还是采用均分距离或经验选定。为了阐明中继线圈对系统性能影响的机理,基于二端口网路理论比较了典型两线圈耦合机构和中继式耦合机构的端口阻抗区别,采用有限元模型的动态扫频分析,总结了中继线圈相对位置变化对互感的影响规律,通过实验测试,验证了中继线圈相对空间位置对系统性能的影响,证明了理论和仿真分析的正确性。针对中继线圈位置特性的研究,对中继式无线电能传输系统的优化设计有一定的参考意义。

关键词:无线电能传输;中继线圈;互感;位置

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25107

Analysis of the Position Characteristics of Wireless Power Transmission with Relay Coils

ZHANG Junling¹, YIN Peng¹, WANG Jiwei¹, LONG Mengjiao²

(1. Shandong Luruan Digital Technology Co., Ltd., Jinan 250001, Shandong, China;

2. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Guangzhou 510013, Guangdong, China)

Abstract: Relay coil is an effective method to improve the performance of wireless power transmission. But the selection of relay coil position is usually based on experience. To elucidate the mechanism of the impact of relay coils on system performance, the port impedance differences between typical two-coil and relay-type coupling mechanisms were compared. The dynamic sweep analysis was used to summarize the influence of relative position on mutual inductance. Experiments was conducted. The impact of relative spatial position of relay coils on system performance was verified, as well as the correctness of theoretical and simulation analysis. The research on the position characteristics of relay coils has some reference significance for the optimization design of relay-type wireless power transmission.

Key words: wireless power transmission; relay coils; mutual inductance; position

电能是生产、生活中不可或缺的一种能源,随着电网覆盖率不断提升,各项技术的不断发展,人们对电能质量的要求也不断提高^[1-2]。为了保障电网的稳定运行、电能的可靠输送,为用户提供符合要求的电能,越来越多的在线监测设备被使用,用以监测电网架构状态、电能智能、气象信息等^[3-5]。各类在线监测设备正常工作的前提是稳定电能供应,但由于户外输电线路所处的特殊环境,在线监测设备的供电问题一直是阻碍其快速发展和应用的关键因素之一^[6-7]。

户外输电线路虽承担着电能输送的重任,但

安装于其上的在线监测设备运行所需的电源却不易获取,且不同功能在线监测设备所处的电位可能也不一样,无法用导线连接进行统一的供电^[8-9]。各设备单独供电的方式中,电池需要定期进行检查更换,带电作业成本高,耗费大量人力物力。风光发电技术受气候因素影响很大,供电稳定性差,需要储能电池进行辅助。线路上的设备会随着线路的摆动而晃动,不适于风光等供电方式。利用取能电流互感器(current transformer, CT)直接从输电线路上获取电能是一种稳定电能获取的有效方式,但所获取的电能只能供给线路

作者简介:张俊岭(1979—),男,硕士,工程师,主要研究方向为智能电网状态监测,Email:ls_zhangjl@163.com

通讯作者:龙孟姣(1990—),女,硕士,工程师,主要研究方向为无线电能传输技术,Email:longmj960@gmail.com

上安装的设备,杆塔上的设备由于无磁场辐射能源,无法利用CT取能供电^[10-11]。

传统的单一供电方式难以解决安装于不同位置的在线监测设备供电难题,近年来有学者提出将CT取能与无线电能传输相结合的方式^[4,12]。基于无线电能传输非接触电能传输的特性,将位于高电位(输电线路)CT获得的电能传递给位于低电位(杆塔)的在线监测设备,而不改变输电线路原有的绝缘状态,这种方式有效解决了跨电位统一供电的难题^[13]。武汉大学王军华教授团队^[14]提出适用于110 kV的两线圈在线监测设备无线供电方案,在1.1 m传输距离获得32.5%传输效率,最大传输功率为30 W。为了提升在线监测设备无线供电方案的整体性能,香港大学HUI Rong教授团队^[15]将线圈与绝缘子进行集成,构建线圈嵌入式绝缘子串,在1.1 m传输距离获得25 W输出功率和高于60%的传输效率。文献[16]利用5个桶状耦合器构造一个2.5 m长的线圈嵌入式支柱绝缘子,适用于220 kV电压等级,在77.8 W输出功率时传输效率为62%^[16]。

上述调研分析中,中继式(多米诺)结构无线供电方案的传输性能优于两线圈结构,但对于中继线圈的位置,目前多数还是采用均分距离或经验选定,中继线圈的位置对于无线供电方案的整体性能是否有影响仍是需要探究的科学问题。因此本文针对中继线圈的位置特性进行相关研究,分析中继线圈多种相对空间位置状态变化与系统性能的耦合关系,为在线监测设备中继式无线供电方案的优化设计提供理论和技术参考。

1 无线电能传输系统特性分析

选取只有一个中继线圈的中继式无线电能传输系统为研究对象,采用串联补偿拓扑,如图1所示,其等效电路如图2所示。采用二端口理论对中继式无线电能传输系统的端口特性、系统性能和中继线圈的影响进行具体分析。等效电路中 U_1 和 U_2 分别为输入和输出的端口电压, I_1 和 I_2 分别为输入和输出端口电流, Z_{in} 为输入端口阻抗, $C_1, C_2, C_p, L_1, L_2, L_p, R_1, R_2, R_p$ 分别为发射线圈、接收线圈、中继线圈的补偿电容、电感和电阻, I_p 为中继线圈的电流。

1.1 二端口网络分析理论

对于图2所示的中继式无线电能传输系统等效电路,若只考虑端口特性,可视为典型无线电

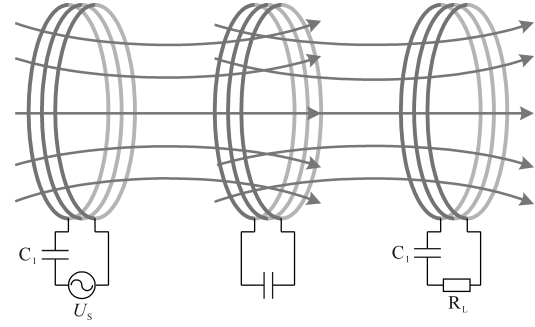


图1 中继式无线电能传输系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of wireless power transmission with relay coils

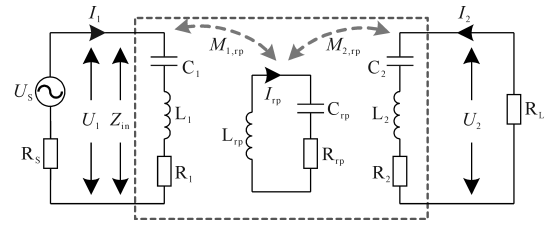


图2 中继式无线电能传输系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of wireless power transmission with relay coils

能传输系统,则有:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, Z_{11}, Z_{12}, Z_{21} 和 Z_{22} 可以通过二端口网络内的线圈集总参数使用等效电路方法计算得到,线圈集总参数包括电阻、自感、补偿电容和线圈之间的互感。

输入和输出功率分别为

$$P_{in} = |I_1|^2 R_{in} = \frac{|U_s|^2}{|Z_{in} + R_s|^2} R_{in} \quad (2)$$

$$P_{out} = |I_2|^2 R_L = \frac{|Z_{21}|^2 |U_s|^2}{|(Z_{in} + R_s)(Z_{22} + R_L)|^2} R_L \quad (3)$$

其中

$$Z_{in} = U_1 / I_1 = Z_{11} - Z_{12} Z_{21} / (Z_{22} + R_L)$$

$$R_{in} = \text{Re}(Z_{in})$$

二端口网络和系统整体的传输效率分别为

$$\eta_{port} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|Z_{21}|^2 R_L}{|Z_{22} + R_L|^2 R_{in}} \quad (4)$$

$$\eta_{sys} = \frac{P_{out}}{|U_s|^2 / (4R_s)} = \frac{4|Z_{21}|^2 R_s R_L}{|(Z_{in} + R_s)(Z_{22} + R_L)|^2} \quad (5)$$

为了对线圈特性进行分析,对等效阻抗 Z_{11}, Z_{12}, Z_{21} 和 Z_{22} 的实部 R_{ij} 和虚部 X_{ij} 分别进行定义,即 $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ 。基于图2所示二端口网络的对称性,则 $Z_{12} = Z_{21}$ 。依据共振匹配的原理,系统整体效率 η_{sys} 最大时,输入阻抗 Z_{in} 的实部和虚

部分别满足:

$$R_{in} = \text{Re}(Z_{in}) = R_s \quad (6)$$

$$X_{in} = \text{Im}(Z_{in}) = 0 \quad (7)$$

1.2 中继式无线电能传输系统特性

若只考虑无线电能传输系统的端口特性,则无法直接体现中继线圈的影响。因此采用电路定理,分析中继线圈参数对二端口网络的阻抗影响。由基尔霍夫电压和电流定律,可得:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ 0 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & j\omega M_{1,rp} & j\omega M_{1,2} \\ j\omega M_{1,rp} & Z_{rp} & j\omega M_{2,rp} \\ j\omega M_{1,2} & j\omega M_{2,rp} & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_{rp} \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + jX_1 & Z_2 &= R_2 + jX_2 \\ Z_{rp} &= R_{rp} + jX_{rp} \\ &= \omega L_1 - X_2 / (\omega C_1) \\ &= \omega L_2 - 1 / (\omega C_2) \\ X_{rp} &= \omega L_{rp} - 1 / (\omega C_{rp}) \end{aligned}$$

式中: $M_{1,rp}$ 为发射线圈与中继线圈间互感; $M_{2,rp}$ 为中继线圈与接收线圈间互感; $M_{1,2}$ 为发射线圈与接收线圈间互感。

基于式(8)可以分别求解出二端口网络阻抗 Z_{11}, Z_{12}, Z_{21} 和 Z_{22} 的实部和虚部,将典型两线圈和中继式无线电能传输阻抗参数进行对比,如表1所示,可以发现,由于增加了中继线圈,二端口网络的端口阻抗实部和虚部都有相应的变化,都受到中继线圈的影响。对于二端口网络,系统整体效率 η_{sys} 最大的条件不变,仍是式(6)和式(7)。因此,中继式无线电能传输系统最大效率所对应的系统参数不仅与发射和接收线圈参数相关,还受到中继线圈参数的影响。

表1 典型两线圈和中继式无线电能传输的阻抗参数

Tab.1 Impedance parameters for typical two-coil and relay-type wireless power transmission

参数	典型两线圈	中继式结构
R_{11}	R_1	$R_{rp}(\omega M_{1,2})^2 / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$
R_{12}	0	$R_{rp}\omega^2 M_{1,rp}M_{2,rp} / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$
R_{22}	R_2	$R_2 + R_{rp}(\omega M_{2,rp})^2 / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$
X_{11}	X_1	$X_1 - X_{rp}(\omega M_{1,rp})^2 / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$
X_{12}	ωM_{12}	$\omega M_{12} - X_{rp}\omega^2 M_{1,rp}M_{2,rp} / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$
X_{22}	X_2	$X_2 - X_{rp}(\omega M_{2,rp})^2 / (R_{rp}^2 + X_{rp}^2)$

2 中继线圈的偏移特性

当中继式无线电能传输系统的耦合机构、频

率等参数已定,中继线圈的相对空间位置对其自身参数(自感 L_{rp} 和电阻 R_{rp})几乎无影响,但发射线圈与中继线圈间互感 $M_{1,rp}$ 、中继线圈与接收线圈间互感 $M_{2,rp}$ 与中继线圈的位置密切相关,也就是对系统的整体效率 η_{sys} 产生影响。

2.1 线圈间互感

当两个线圈间有耦合时,互感定义为:与任一线圈所交链的互感磁链与产生此互感磁链的回路电流比。互感值取决于线圈本身尺寸和两线圈的相对几何位置。互感的定义计算式为

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{I_1} \quad (9)$$

式中: Ψ_{21} 为线圈1的电流 I_1 产生并于线圈2所交链的磁链; M_{21} 为线圈1对线圈2的互感, $M_{21} = M_{12}$ 。

由式(9)可知,当线圈交链的磁链发生变化时,两线圈间的互感就会对应发生变化。在有限元仿真软件中建立典型两线圈耦合机构模型,如图3所示,发射线圈和接收线圈的参数相同,具体如下:线径2 mm,线间距2.5 mm,线圈内径200 mm,匝数20,传输距离150 mm。发射线圈位置固定,当改变接收线圈相对位置时,接收线圈所交链的磁链变化如图4所示。

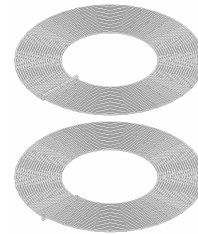


图3 典型两线圈耦合机构模型

Fig.3 Model of two-coil coupler

图4所示为两线圈相对位置发生变化时,线圈相互交链磁链的对应变化。可以发现,当线圈发生纵向、横向和角度偏移时,线圈所交链的磁链都会发生变化。为了进一步研究偏移程度与互感变化程度的对应关系,进行动态扫频分析,结果如图5所示。在线圈发生横向和角度偏移时,纵向传输距离保持为15 cm恒定。

互感随接收线圈相对位置变化的规律如图5所示。随着传输距离(纵向偏移)和横向偏移距离的增加,互感都不断减小。在传输距离增加时,互感减小速率先快后慢。但线圈发生横向偏移时,互感的减小速率先慢后快,然后不断减小。当两线圈相对角度发生偏移时,随着偏转角的不

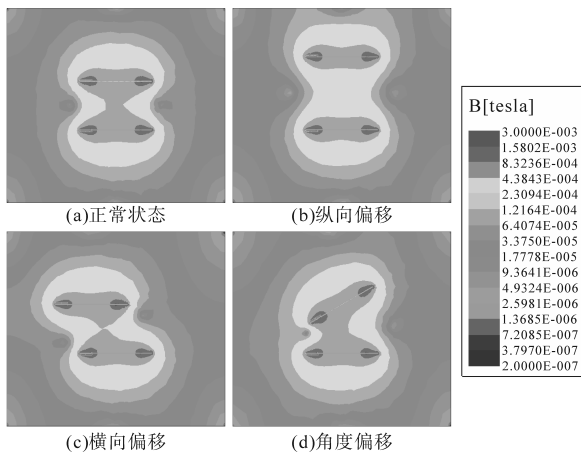


图4 线圈相对位置变化对磁链的影响

Fig.4 The influence of relative position of coils on magnetic flux
断增大,互感先几乎恒定不变,然后急速下降,下降的速率先慢后快。

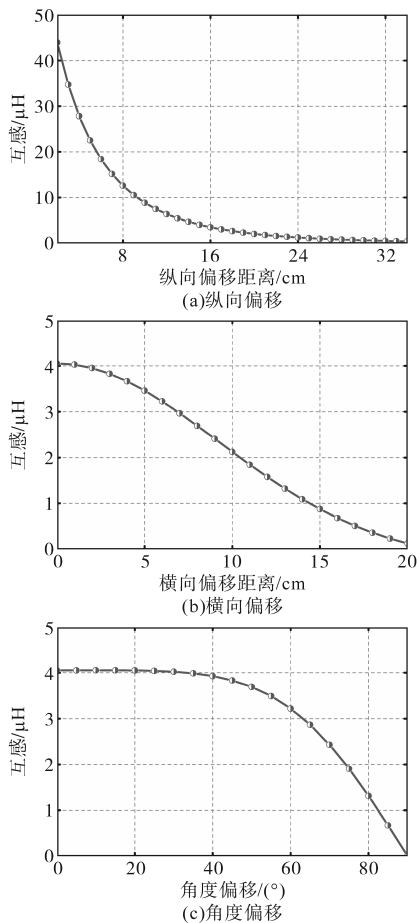


图5 互感随接收线圈位置变化规律

Fig.5 Mutual inductance changing with the position of receiving coil

2.2 位置特性

为了分析中继线圈相对位置变化对系统整体效率 η_{sys} 的影响,首先探索其对互感的影响。在图3所示的典型两线圈耦合机构模型中添加中

继线圈,中继线圈的参数与发射和接收线圈的参数完全相同。发射和接收线圈间传输距离恒定为30 cm,在中继线圈发生横向和角度偏移时,相邻两线圈的纵向传输距离保持为15 cm。有限元仿真模型如图6所示。

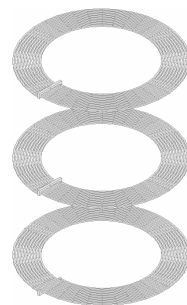


图6 中继式无线电能传输耦合机构仿真模型

Fig.6 Model of relay-type coupler

图7所示为中继线圈相对位置变化对互感的影响。可以发现,中继线圈相对位置的变化对发射线圈与接收线圈间互感 $M_{1,2}$ 几乎无影响。发射线圈与中继线圈间互感 $M_{1,rp}$ 、中继线圈与接收线圈间互感 $M_{2,rp}$ 的变化规律与图5中典型两线圈耦合机构所示规律几乎完全一致。

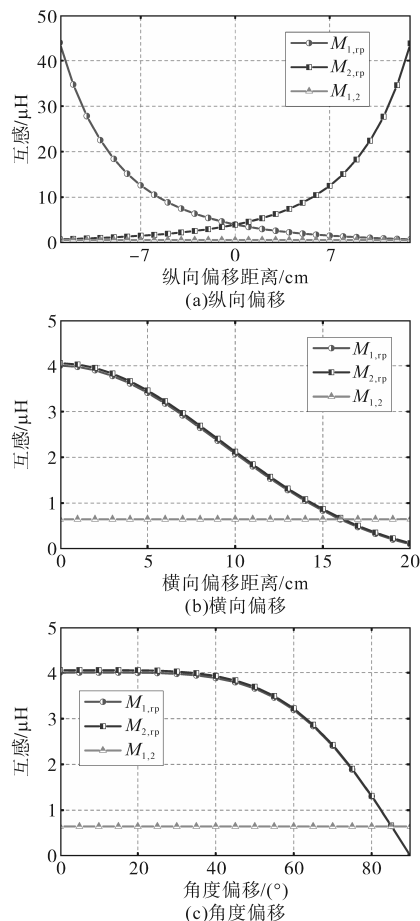


图7 互感随中继线圈位置变化规律

Fig.7 Mutual inductance changing with the position of relay coil

由于发射和接收线圈之间的距离恒定不变,故中继线圈向发射线圈移动时,中继线圈与接收线圈之间的距离会不断增大,反之亦然,故当中继线圈发生纵向偏移时,互感 $M_{1,r}$ 和 $M_{2,r}$ 的变化是对称的。当中继线圈发生横向和角度偏移时,中继线圈相对发射和接收线圈的横向距离和角度是同步变化的,故此时互感 $M_{1,r}$ 和 $M_{2,r}$ 的变化是一致的。

互感与系统性能密切相关,互感值越大,两线圈间耦合程度越强,线圈间能量传输效率越高。基于此理论以及图7中中继线圈位置变化对互感的影响规律,不难得出中继线圈发生纵向和横向偏移时都会导致系统整体效率 η_{sys} 下降,而发生角度偏移时,系统整体效率 η_{sys} 先会恒定,然后加速下降。

3 实验

为了验证中继线圈相对位置变化对系统整体效率的影响规律,制作了如图8所示的中继式耦合机构。线圈的物理参数与仿真模型一致,设定系统的谐振频率为85 kHz,线圈由于是手工绕制,参数上存在一定差异,发射线圈、接收线圈和中继线圈的自感分别为76.6 μH , 73.1 μH , 74.4 μH 和45.77 μH ,补偿电容分别为45.77 nF, 47.96 nF, 47.12 nF。

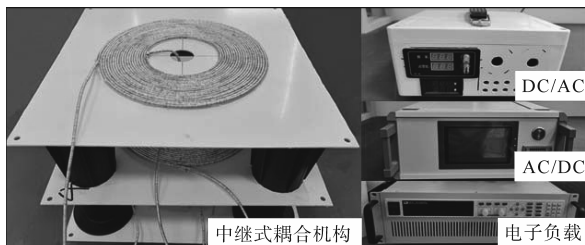


图8 实验平台

Fig.8 Experiment platform

图9所示为中继线圈相对位置变化对传输功率和效率的影响。图9a中“0”代表中继线圈位于发射和接收线圈中间位置,负偏移距离代表向发射线圈方向移动,正偏移距离代表向接收线圈方向移动。可以发现中继线圈由靠近发射线圈向接收线圈移动过程中,传输功率和效率都是先增大后减小,在发射和接收线圈中间偏发射线圈处获得最大传输功率和效率。当中继线圈发生横向偏移时,图9b中所示传输效率与图7b中的互感变化规律相同,而传输功率呈现先增大后减小

的趋势,在偏移距离为8 cm处获得最大功率。图9c所示为中继线圈发生角度偏移时对传输功率和效率的影响,其中传输效率的变化与图7c中互感变化趋势近似,呈现先恒定,而后在偏转角大于60°时急速下降。传输功率先缓慢下降,然后加速上升,在偏转角为70°~75°间达到最大值,而后急速下降。

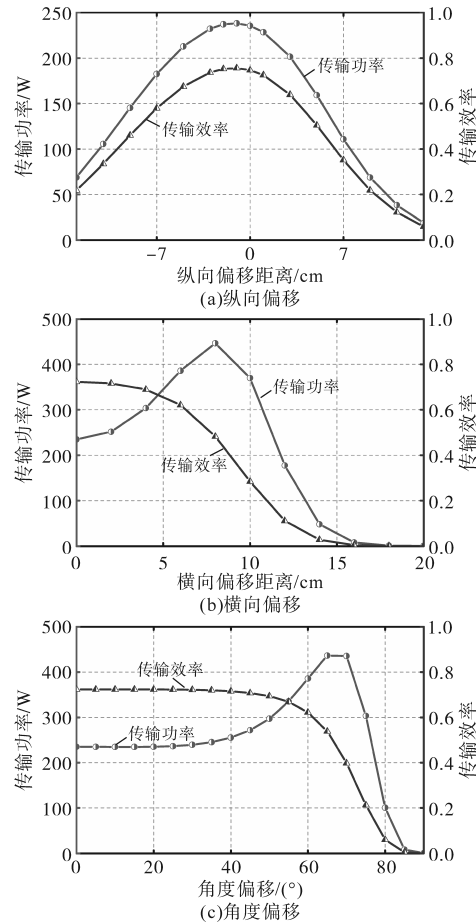


图9 系统性能随中继线圈位置变化规律

Fig.9 Performance changing with the position of relay coil

4 结论

本文针对中继式无线电能传输系统中中继线圈的位置特性进行了相关研究。基于二端口网络理论分析了典型两线圈结构和中继式磁耦合机构的端口阻抗区别,阐明了中继线圈对端口阻抗的影响,通过建立有限元仿真模型和动态扫频分析,总结了中继线圈相对位置变化对互感的影响规律,最后搭建了相应的实验平台,对系统传输性能与中继线圈相对位置之间的对应关系进行了验证。本文对中继线圈位置特性的分析,为中继式无线电能传输系统的优化分析提供了参考。

参考文献

- [1] BILAL Ahmad, KIM Seho, LIN Feiyang, et al. Analysis of IPT intermediate coupler system for vehicle charging over large air gaps[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2022, 3(4): 1149–1158.
- [2] 高世萍,冯玉明. 感应式和电场式结合的无线电能传输系统研究[J]. 电气传动, 2020, 50(12): 88–92.
GAO Shiping, FENG Yuming. Research on an inductive and capacitive combined wireless power transfer system[J]. Electric Drive, 2020, 50(12): 88–92.
- [3] 胡凡君,汪德超,张晓林,等. 应用于高压监测传感器的无线充电系统[J]. 电气自动化, 2020, 42(4): 72–74.
HU Fanjun, WANG Dechao, ZHANG Xiaolin, et al. Wireless charging system applied to high-voltage monitoring sensors[J]. Electrical Automation, 2020, 42(4): 72–74.
- [4] 何继勇,周海阔,朱仁勋. 高压输电线路在线监测设备无线供电电磁耦合机构优化[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 139–147, 165.
HE Jiyong, ZHOU Haikuo, ZHU Renxun. Optimization of magnetic coupling mechanism for wireless power supply of high-voltage transmission line on-line monitoring equipment[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 139–147, 165.
- [5] 郭贲佳,王国庆,徐帅,等. 直流高压开关柜用无线电能传输系统优化研究[J]. 电气传动, 2021, 51(12): 74–80.
GUO Laijia, WANG Guoqing, XU Shuai, et al. Research on the optimization of a wireless power transfer system employed in DC high-voltage switchgear[J]. Electric Drive, 2021, 51(12): 74–80.
- [6] 王维,曾振炜,王劭恣,等. 输电杆塔无线供电系统非均匀多米诺单元性能分析与优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4315–4325.
WANG Wei, ZENG Zhenwei, WANG Jiemin, et al. Performance analysis and optimization of non-uniform domino unit in wireless power supply system of transmission tower[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4315–4325.
- [7] ZHOU H, GAO X, LAI J, et al. Natural frequency optimization of wireless power systems on power transmission lines[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14038–14047.
- [8] WANG W, HUANG X, TAN L, et al. Optimization design of an inductive energy harvesting device for wireless power supply system overhead high-voltage power lines[J]. Energies, 2016, 9(4): 242.
- [9] 亢凯,侯信宇,左志平,等. 多中继模式无线电能传输系统建模与传输效率分析[J]. 电器与能效管理技术, 2019(17): 50–55.
KANG Kai, HOU Xinyu, ZUO Zhiping, et al. Modeling and transmission efficiency analysis of wireless power transfer system with multi-relay mode[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(17): 50–55.
- [10] CUI Y, LIN Z, DAI Z, et al. The design of a long-distance high-efficiency WPT for online monitoring equipment based on a new relay structure[J]. Electrical Engineering, 2022(15): 30–32.
- [11] 陶炳权,汪超,曲皓玥,等. 基于垂直中继的U型高压线路无线供电系统设计[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 217–224.
TAO Bingquan, WANG Chao, QU Haoyue, et al. Design of U-shaped high-voltage transmission line wireless power transfer system based on vertical relay coil[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 217–224.
- [12] WANG K, LIANG R, YANG Y. A load-independent self-oscillating control of domino wireless power transfer systems for high-voltage power grid monitoring equipment[J]. Energies, 2022, 15(12): 4228.
- [13] ZHOU J, LI Z, LEE C, et al. A weather-independent and renewable power supply with wireless power transfer feature for powering online monitoring systems in smart grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(6): 6414–6424.
- [14] CAI Changsong, WANG Junhua, LIU Rong, et al. Resonant wireless charging system design for 110 kV high-voltage transmission line monitoring equipment[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4118–4129.
- [15] ZHANG C, LIN D, TANG N, et al. A novel electric insulation string structure with high-voltage insulation and wireless power transfer capabilities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 87–96.
- [16] GU P, LIU Z, GUAN H, et al. A 2.5 m long-range IPT system based on domino cylindrical solenoid coupler compensated respectively in layers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1409–1420.

收稿日期:2023-04-26

修改稿日期:2023-07-06