

无线充电系统三种耦合线圈偏移特性研究

李名洋¹, 牛萍娟², 李宇鸿¹, 李颖¹, 隋宇¹

(1. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387;

2. 天津工业大学 半导体光源系统创新团队, 天津 300387)

摘要:不同无线电动汽车厂家制造的发射线圈与接收线圈的偏移特性是保证国内外汽车充电、互联互通的关键性问题。对3.7 kW无线电能传输系统进行建模,针对无线充电的SS型拓扑结构进行推导,得出输出功率和传能效率表达式,又对方形-圆形线圈间互感进行偏移性研究,理论推出线圈平行时进行横向偏移对互感系数的表达式,进而得出偏移距离对传输特性的影响。建立有限元仿真模型,对比圆-方形、DD-方形、DD-圆形三种线圈在一定偏移距离内传输特性的变化,搭建实验平台验证,结果表明,圆-方形线圈间抗偏移特性最强,在一定范围内偏移对耦合系数、传能效率、输出功率三方面均与方-方形线圈传输特性接近。DD-圆形与DD-方形线圈组合在DD线圈非中轴线方向偏移时传输特性比正对时要好,传输特性均有提高,中轴方向很差。该研究为不同线圈间高效充电提供了参考。

关键词:无线充电;偏移特性;线圈类型;SS拓扑结构

中图分类号:TM724 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed23003

Research on Offset Characteristics of Three Coupling Coils in Wireless Charging System

LI Mingyang¹, NIU Pingjuan², LI Yuhong¹, LI Ying¹, SUI Yu¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Tiangong University,

Tianjin 300387, China; 2. Semiconductor Light Source System Innovation Team,

Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The offset characteristics of transmitting and receiving coils manufactured by different wireless electric vehicle manufacturers are a critical issue to ensure the interconnection of domestic and international vehicle charging. The 3.7 kW wireless energy transmission system was modeled and the SS-type topology of wireless charging was derived to obtain the expressions for output power and energy transfer efficiency. The study of the offset characteristics was also conducted for the mutual inductance between square-circular coils, and the expressions for the mutual inductance coefficient were theoretically introduced for the lateral offset performed when the coils were parallel, and then the effect of offset distance on the transmission characteristics was derived. The finite element simulation model was established to compare the changes of transmission characteristics of circle-square, DD-square and DD-circle coils within a certain offset distance, and an experimental platform was built to verify the results, which show that the anti-offset characteristics between circle-square coils are the strongest, and the offset effects on coupling coefficient, energy transfer efficiency and output power within a certain range are close to those of square-square coils. DD-circle and DD-square coil combinations have better transmission characteristics when the DD coils are offset in the non-central direction than when they are square, and the transmission characteristics are both improved, and very poor in the central direction. This study provides a reference for efficient charging between different coils.

Key words: wireless charging; offset characteristics; coil type; SS topological structure

无线电能传输^[1-13](wireless power transmission, WPT)技术是将电网提供的电能输入经过

整流滤波得到直流电压,再经过高频逆变电源,利用线圈间电磁效应进行无线充电,当发射线

基金项目:天津市科技计划资助项目(18ZXZNGX00130);国网天津市电力公司2019年科技服务资助项目(SGTJCN00YJJS1900527)

作者简介:李名洋(1995—),男,硕士研究生,Email:897947491@qq.com

圈和接收线圈有相同频率时,两个线圈发生谐振,这时候谐振耦合的回路阻抗最小,使得发射端的大部分能量通过耦合结构传给负载,系统的能量变化为电能-磁能-电能,最后经过谐振电路回路进行电力变换给负载供电,实现了无线电能传输。线圈之间通过磁场高效、安全地进行能量传输,不同厂商生产线圈类型不同,在特殊情况下车载端与地面端线圈类型难以匹配,同时由于驾驶员在停车时的不确定性,不可避免地出现轴向距离不能对齐的情况,因此线圈在一定范围内进行偏移时,两线圈间可以进行高效充电就显得尤为重要。

对于线圈偏移对传输特性的影响研究,段青^[1]在原边线圈和副边线圈中间加入了一个中继线圈,对三线圈结构进行了参数分析,得出原边线圈结构不动,仅仅副边线圈发生偏移对系统传输效率的影响小于副边线圈与中继线圈共同移动对系统传输效率的影响。王辰羽^[2]运用耦合模理论推导了无线电能传输功率效率,并界定了耦合范围,得出两线圈在横向和纵向旋转时总有一个角度可以达到功率和效率同时兼得。刘丹丹^[3]对方-圆线圈进行建模,得出相比于圆形线圈,发射线圈、接收线圈均为方形线圈时耦合效果更好,当线圈进行偏移时,单方向偏移比对角线偏移传输效率更高。白雪宁^[4]等通过与方形-方形线圈比较,从功率等级、划分耦合参考区域 Z_{GA} 与 Z_{VA} 重合数量等方面提出了一种评价线圈间互操作性方法,评价了圆-方、DD-圆、DD-方线圈间互操作性。

本文通过推导无线电能传输SS拓扑结构,得出系统输出功率、传能效率表达式。分析轴向偏移距离^[5]对互感系数 M 的影响,进而得出三种线圈(圆-方、DD-方、DD-圆形线圈)偏移对传输特性的影响^[6],通过仿真与实验的验证,为不同种类线圈间高效充电提供了参考。

1 MCR-WPT系统理论分析

图1为两线圈结构无线电能传输系统串联-串联补偿结构^[7]电路图。其中 U_s 为系统的驱动电源, R_1 和 R_2 分别为系统发射和接收线圈的等效电阻, R_s 为系统电源电阻, L_1 和 L_2 分别为发射和接收线圈的等效电感, M 为两线圈间互感, C_1 和 C_2 分别为发射和接收线圈的等效电容。 I_1 和 I_2 分别为发射线圈和接收线圈电流, R_L 为负载电阻。

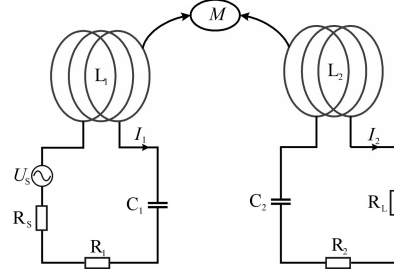


图1 MCR-WPT系统示意图

Fig.1 MCR-WPT system schematic diagram

根据基尔霍夫电压定律,构建S-S等效电路回路方程为

$$U_s = (R_1 + R_s)I_1 + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1})I_1 - j\omega M I_2 \quad (1)$$

$$0 = j\omega M I_1 - (R_L + R_2)I_2 - j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})I_2 \quad (2)$$

式中: ω 为谐振条件下的角频率。

其中串联谐振的条件为

$$\text{Im}(Z(j\omega)) = 0 \quad (3)$$

$$\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} = 0 \quad (4)$$

设 $L_1=L_2=L$, $C_1=C_2=C$,可得系统谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5)$$

发射端电流 I_1 和接收端电流 I_2 分别为

$$\begin{cases} I_1 = \frac{R_2 + R_L}{(R_1 + R_s)(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2} U_s \\ I_2 = \frac{j\omega M}{(R_1 + R_s)(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2} U_s \end{cases} \quad (6)$$

负载输出功率及系统的输入功率为

$$P_{out} = I_2^2 R_L = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{[(R_1 + R_s)(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2]^2} U_s^2 \quad (7)$$

$$P_{in} = U_s I_1 = \frac{R_2 + R_L}{(R_1 + R_s)(R_2 + R_L) + \omega^2 M^2} U_s^2 \quad (8)$$

系统的传能效率为

$$\tau = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{I_2^2 R_L}{U_s I_1} = \frac{R_L}{R_2 + R_L} \frac{\omega^2 M^2}{\omega^2 M^2 + (R_1 + R_s)(R_2 + R_L)} \quad (9)$$

根据式(7)与式(9),当磁耦合谐振式无线电能传输(magnetic coupling resonance wireless power transmission, MCR-WPT)系统正常工作,即保证电路各参数保持不变时,线圈间的互感 M 直接决定负载接收功率及系统整体效率^[8]。要研究偏

移距离对传输特性的影响,就要研究偏移距离对互感 M 的影响。

2 方形-圆形线圈间互感分析

对方-圆形线圈之间的互感进行理论推导,如图2所示为非共轴方-圆形线圈示意图,设方形线圈边长为 $2a$,圆形线圈半径为 r ,两线圈径向偏移距离为 t ,两线圈轴向偏移距离为 l , $dl_1 \sim dl_4$ 为方形线圈各部分的积分因子^[9],圆形线圈上任意一点的坐标为 $(r\cos\theta, r\sin\theta+t, l)$,方形线圈边长为AB,BC,CD,DA,线段AB与圆形线圈间的互感为

$$M_{ABr} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-a}^a \frac{r\cos\theta \cos\theta}{\sqrt{(a-r\cos\theta)^2 + (y-t-r\sin\theta)^2 + l^2}} d\theta dy \quad (10)$$

式中: μ_0 为磁导率,与介质有关^[10]; y 为 y 轴的偏移距离; θ 为线圈偏移的角度。

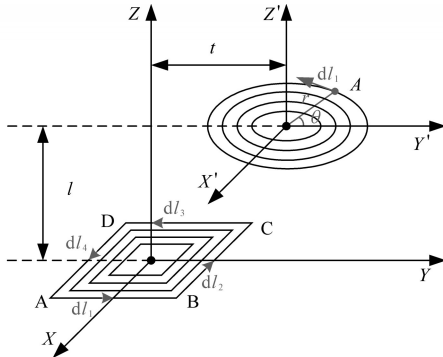


图2 方形-圆形线圈之间互感图

Fig.2 Mutual inductance diagram between square-circular coils

同理可得到其他边长的互感:

$$M = M_{ABr} + M_{BCr} + M_{CDr} + M_{DAr} \quad (11)$$

两方形线圈之间的互感:

$$M = M_{11la} + M_{12lb} + M_{13lc} + M_{14ld} + M_{11le} + M_{12ld} + M_{13ld} + M_{14ld} \quad (12)$$

$$M_{11la} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-\frac{1}{2}l_1}^{\frac{1}{2}l_1} \int_{-\frac{1}{2}l_2}^{\frac{1}{2}l_2} \frac{dxdy}{\sqrt{d^2 + (y_2 - y_1)^2 + h^2}} \quad (13)$$

式中: l_1, l_2 分别为发射线圈的边长; h 为两线圈之间的间距; d 为线圈横向偏移距离; y_1, y_2 分别为两线圈 y 轴方向偏移距离。

同理可以求得其他边长互感 $M_{11la}, M_{12lb}, M_{13lc}, M_{14ld}, M_{11le}, M_{12ld}, M_{13ld}, M_{14ld}$ 等参数。

根据式(10)和式(13),互感 M 受线圈间距 t 和偏移角度 θ 的影响,DD-方形、DD-圆形线圈互感也是如此。根据式(7),系统接收功率 P_{out} 受互感变化的影响更大^[11],对互感变化更为“敏感”,所

以可将接收功率 P_{out} 作为系统传输特性界定依据之一,应保持传输频率、负载电阻、线圈半径和线圈径向距离不变,仅仅改变横向偏移,观察传输特性变化。

3 三种典型线圈偏移耦合系数与效率有限元仿真

无线充电系统的耦合机构中,发射线圈在路面下,接收线圈安装在汽车底盘上,目前汽车距离地面端的距离变化范围一般在100~250 mm之间,本文选取的纵向距离在200 mm,利用有限元仿真分析发射线圈与接收线圈之间的耦合系数与传能效率,图3为不同类型线圈。

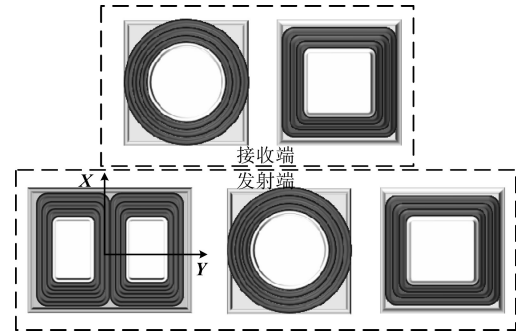


图3 三种不同类型耦合线圈

Fig.3 Three different types of coupling coils

耦合系数 k 由耦合线圈结构、有无铁心、线圈间距与线圈偏移距离决定^[12-13],表现了接收线圈接收到的磁通量转化为电能的能力,不同横向位置,耦合系数 k 也不同, k 值越大,线圈间耦合效果越好,选择耦合系数作为传能特性的评价标准。系统的主要仿真参数如表1所示。

表1 主要仿真参数设定

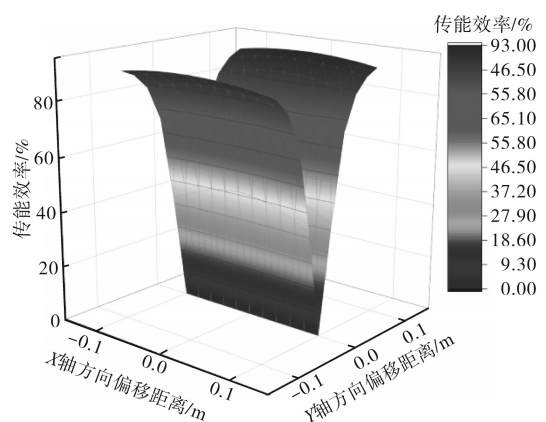
Tab.1 Main simulation parameter settings

参数	仿真设定值
工作频率/kHz	85
线圈半径/mm	200
线圈匝数	12
线圈发射功率/kW	3.7
补偿电容/nF	25

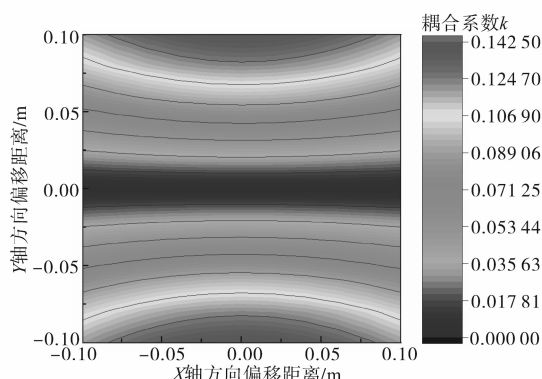
3.1 DD-方形线圈传能效率和耦合系数随偏移距离变化图

DD线圈为发射线圈,方形线圈为接收线圈,坐标系以图3为量纲,由于安培环路定理和法拉第电磁感应定律以及DD线圈绕制方式,对称结构产生大小相等、方向相反感应电流,在DD线圈中轴线方向 $i_1(t)$ 和 $i'_1(t)$ 在中心产生的磁场抵消,所以接收线圈做 X 轴方向偏移,无论偏移多大距

离,线圈间耦合系数 k 和传能效率都很低,接近于0。在远离DD线圈中轴线方向线圈磁场互相增强,所以在Y轴方向做单向偏移,偏移距离越大,耦合系数和传能效率越大,耦合效果越好,在偏移0.1 m时耦合系数高达0.142 5,传能效率达93.0%。在X轴和Y轴方向同时偏移时,偏移距离分别为0.05 m和0.1 m,分别占线圈半径的25%和50%时,耦合系数和传能效率为0.091,0.119和69%,84.5%,整体比Y轴单向偏移低,耦合效果一般。



(a)DD-方形线圈偏移距离传能效率图



(b)DD-方形线圈偏移距离耦合系数

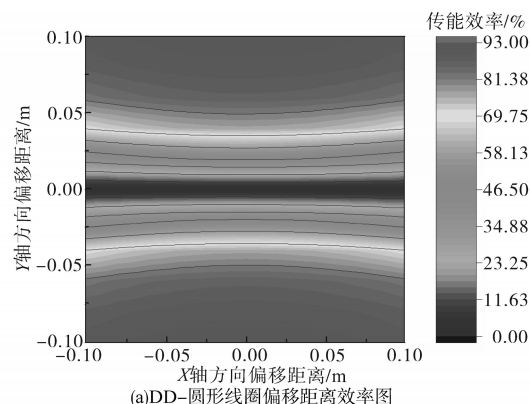
图4 DD-方形线圈模型及传输特性

Fig.4 DD-square coil model and transmission characteristics

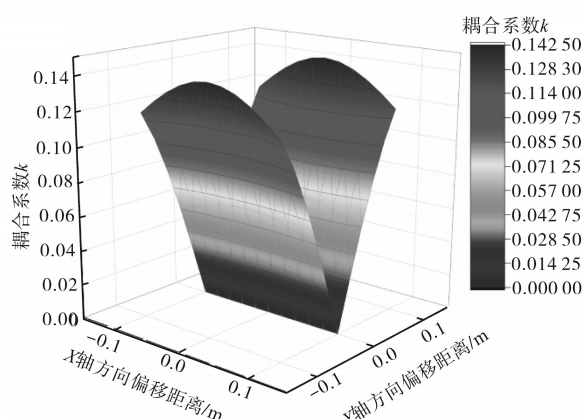
3.2 DD-圆形线圈传能效率和耦合系数随偏移距离变化图

DD线圈为发射线圈,圆形线圈为接收线圈,对图5中做X轴方向单向偏移,无论偏移距离多大,两项数值均无明显变化,接近0,耦合效果很差。做Y轴单向偏移,随着偏移距离变大,耦合系数 k 和传能效率都增大,偏移距离越大,线圈耦合效果越好,Y轴方向单向偏移0.1 m,耦合系数最大为0.142 5,传能效率最高为93%。在X轴与Y轴方向都做偏移时,偏移距离分别偏移0.05 m和0.1 m,分别占线圈半径的25%和50%时,耦合系

数和传能效率为0.09,0.120和85%,90%,数值比Y轴单向偏移低,耦合效果一般。



(a)DD-圆形线圈偏移距离效率图



(b)DD-圆形线圈偏移距离耦合系数图

图5 DD-圆形线圈模型及传输特性

Fig.5 DD-circular coil model and transmission characteristics

4 实验验证

根据无线电能传输系统结构,搭建实验平台和测量系统如图6所示,电动汽车无线充电系统主要由高频逆变电源、发射线圈和接收线圈、接收控制器、负载箱组成,多自由度偏移系统做发射线圈横向偏移。实验参数与仿真参数基本一致。

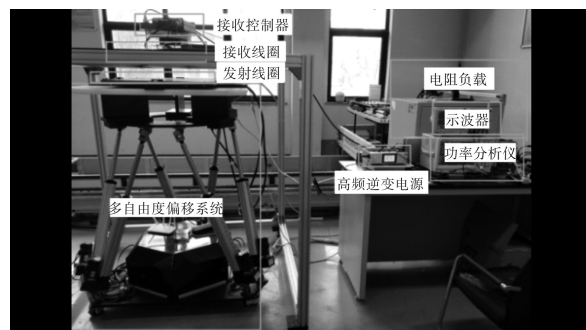


图6 线圈偏移实验台

Fig.6 Coil offset test bench

实验得出四种线圈组合偏移距离对输出功

率及传能效率的影响,如图7、图8所示,以方形-方形线圈为参考,圆形-方形线圈之间无论是X轴方向还是Y轴方向做平行偏移对传输特性的影响一致,传能效率在线圈半径50%之内均在90%以上,保证了高效传能。在耦合系数方面,圆形-方形线圈明显比DD形-圆形、DD形-方形耦合效果更好,且随着偏移距离增大,耦合效果越来越差。在输出功率方面,在线圈正对时输出功率达到3 300 W,接近输入功率,在两个方向偏移时,与方形-方形线圈之间各项指标差距不大,表现出了很好的抗偏移特性。

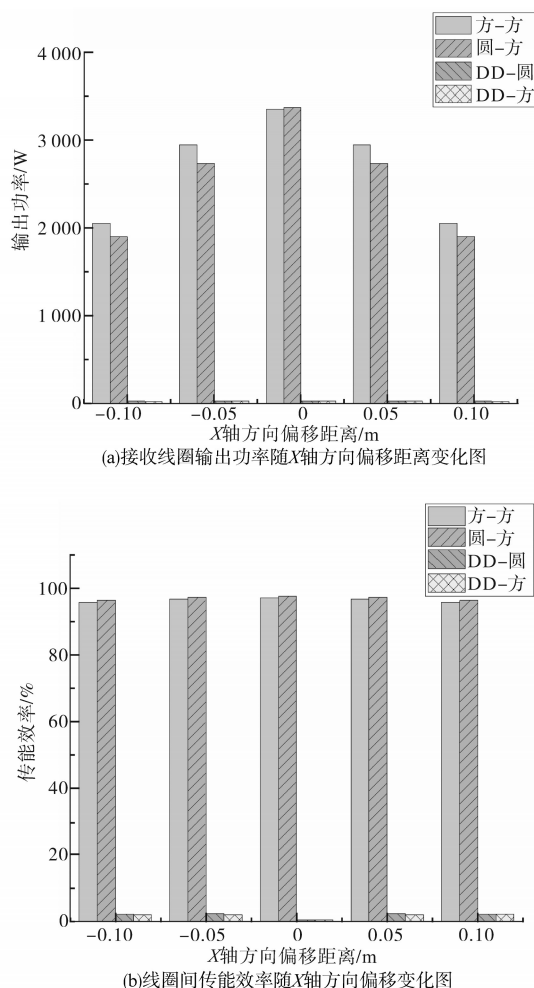


图7 四种线圈组合偏移特性随X轴方向变化实验结果图
Fig.7 The experimental results of the deviation characteristics of the four coil combinations changing with the X-axis direction

DD形-方形线圈在平行移动两个方向传输特性差距很大,如图7当DD型线圈与方形线圈处于正对位置时,存在功率和效率的零点,由于耦合磁场的相互抵消作用,导致在两线圈正对时,传输效率最低。在DD线圈中轴线方向偏移(即X方向)时,无论偏移多大,传能效率与输出功率均

接近于0,所以在X方向单向偏移时传能效果很差。在Y轴单向偏移时,随着偏移距离增大,传能效率由快到慢一直变大,在单向偏移距离占线圈半径的50%时,传输效率达到90%,输出功率为1 150 W,传输特性有所提高。

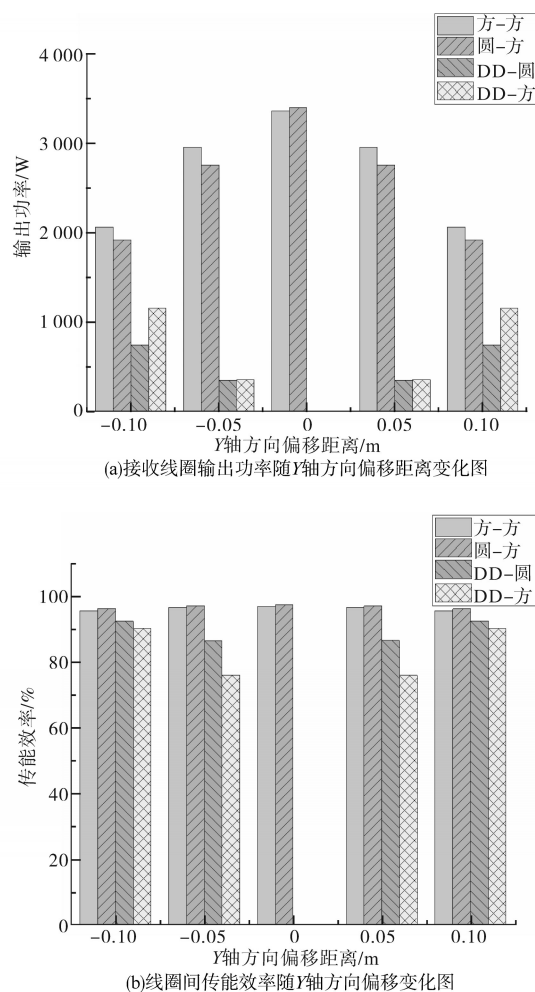


图8 四种线圈组合偏移特性随Y轴方向变化实验结果图

Fig.8 The experimental results of the deviation characteristics of the four coil combinations changing with the Y-axis direction

DD形-圆形线圈在平行方向移动时两个方向差异性较大,与DD形-方形线圈原理类似,由于磁场抵消作用,在线圈正对时,三项传输特性均很差,基本无能量传输。在DD线圈中轴线方向偏移,传能效率与输出功率都很低,接近于0,认为基本无能量传输。在非中轴线方向偏移(即Y方向),传能效率随着偏移距离变大逐渐变缓,在Y轴方向单向偏移0.1 m,占线圈半径50%时,传能效率超过90%,输出功率随着距离增大基本呈线性变大,输出功率最大达到742 W,传输特性此时最好。表2为四种线圈组合传输特性最佳点对比。

表2 不同线圈组合传输特性对比

Tab.2 Comparison of transmission characteristics of different coil combinations

线圈类型	传输特性最佳
方形-方形	正对
圆形-方形	正对
DD形-方形	Y轴偏移0.1 m
DD形-圆形	Y轴偏移0.1 m

5 结论

本文针对相同拓扑结构研究三种线圈结构间横向偏移对传输特性的影响,通过分析系统输出功率和传能效率等关键参数,得出当线圈结构为圆形-方形线圈结构组合时,在停车充电时不能保证线圈正对,平行方向无论向哪个方向偏移,差距都不大。对DD形-方形线圈与DD形-圆形线圈组合,停车充电应保证DD线圈非中轴线方向有一定的偏移量,可在一定范围内对汽车充电。

参考文献

- [1] 段青, 盛万兴, 于丰玮, 等. 中继线圈错位对无线电能传输系统效率的影响[J]. 中国科技论文, 2020, 15(3): 336-340.
Duan Qing, Sheng Wanxing, Yu Fengwei, *et al.* The effect of relay coil misalignment on the efficiency of wireless power transmission system[J]. Chinese Science and Technology Paper, 2020, 15(3): 336-340.
- [2] 王辰羽, 牛萍娟, 张献, 等. 谐振式无线电能传输有效耦合范围设定方法[J]. 中国科技论文, 2020, 15(3): 314-319.
Wang Chenyu, Niu Pingjuan, Zhang Xian, *et al.* Setting method of effective coupling range of resonant wireless power transmission[J]. Chinese Science and Technology Paper, 2020, 15(3): 314-319.
- [3] 刘丹丹. 磁耦合谐振式无线电能传输系统线圈偏移问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Liu Dandan. Research on coil offset of magnetic coupling resonance wireless power transmission system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [4] 张献, 白雪宁, 沙琳, 等. 电动汽车无线充电系统不同结构线圈间互操作性评价方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4150-4160.
Zhang Xian, Bai Xuening, Sha Lin, *et al.* Research on the evaluation method of interoperability between coils of different structures in electric vehicle wireless charging system[J]. Chinese Journal of Electrotechnical Technology, 2020, 35(19): 4150-4160.
- [5] Patil Devendra, McDonough Matthew K, Miller John M, *et al.* Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 3-37.
- [6] Kamineni Abhilash, Neath Michaelj, Zaheer Adeel, *et al.* Interoperable EV detection for dynamic wireless charging with existing hardware and free resonance[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, 3(2): 370-379.
- [7] Zhang Wei, White Jeffc, Abraham Arpithmathew, *et al.* Loosely coupled transformer structure and interoperability study for EV wireless charging systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6356-6367.
- [8] 庄亚杰. 磁耦合谐振无线电能传输系统的拓扑结构研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
Zhuang Yajie. Research on the topological structure of magnetic coupling resonance wireless power transmission system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020.
- [9] Li Weihang, Zhao Han, Kan Tianze, *et al.* Inter-operability considerations of the double-sided LCC compensated wireless charger for electric vehicle and plug-in hybrid electric vehicle applications[C]//2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power(2015 WoW). New York, 2015: 1-6.
- [10] 黄云霄, 张强, 徐晨洋, 等. 电动汽车无线充电线圈偏移情况下的效率提升[J]. 测控技术, 2017, 36(5): 148-151, 155.
Huang Yunxiao, Zhang Qiang, Xu Chenyang, *et al.* The efficiency improvement of electric vehicle wireless charging coil under the condition of offset[J]. Measurement and Control Technology, 2017, 36(5): 148-151, 155.
- [11] 胡宏晟, 蔡涛, 段善旭, 等. 用于WPT系统的一次侧失谐SS型补偿拓扑及其参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 73-82.
Hu Hongsheng, Cai Tao, Duan Shanxu, *et al.* Primary-side detuning SS compensation topology and its parameter design method for WPT system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 73-82.
- [12] 刘向立, 刘振威, 秦力, 等. 电动汽车移动式无线电能传输功率分配技术研究及实现[J]. 电子世界, 2020(17): 158-160.
Liu Xiangli, Liu Zhenwei, Qin Li, *et al.* Research and implementation of mobile wireless power transmission power distribution technology for electric vehicles[J]. Electronic World, 2020(17): 158-160.
- [13] Yang Guang, Song Kai, Wei Ruizhi, *et al.* Interoperability improvement for wireless electric vehicle charging system using adaptive phase-control transmitter[J]. IEEE Access, 2019, 7: 41365-41379.

收稿日期: 2021-01-22

修改稿日期: 2021-03-15