

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.04.005

动态无线充电系统功率波动抑制技术研究

殷勇¹, 许本超², 王成亮³, 肖宇华¹

(1. 国网江苏省电力有限公司, 南京 211106; 2. 重庆大学自动化学院, 重庆 400044; 3. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211100)

摘要:设计了一种新型的双通道动态无线充电系统耦合机构,以解决动态无线充电系统在分段式发射导轨切换处的功率跌落问题。通过 LCC-LCC 型补偿拓扑,设计了两路能量传输通道,利用 LCC-LCC 补偿拓扑的恒流特性,推导了系统输出以及损耗与两通道耦合参数之间的关系,实现了较为稳定的功率传输,提升了系统的抗偏移特性以及抗跌落能力。最后对所提方法进行了仿真和实验,验证了双通道动态无线电能传输方案的可行性。

关键词:动态无线充电系统;恒流;输出功率稳定;LCC-LCC 型拓扑

中图分类号:TM724

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)04-046-06

Power fluctuation suppression technology of dynamic wireless charging system

YIN Yong¹, XU Benchao², WANG Chengliang³, XIAO Yuhua¹

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211106, P. R. China; 2.School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 3. Jiangsu Fangtian Electric Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, P. R. China)

Abstract: In order to reduce the power drop of dynamic wireless charging system at the transmission rail switch, a new coupling mechanism of dual channel dynamic wireless charging system is designed. The dual energy transmission channels are designed based on the LCC-LCC compensation topology. By using the constant current characteristics of LCC-LCC compensation topology, the relationship between system output and loss and two channel coupling parameters is deduced. The design of dual energy transmission channels realizes relatively stable power transmission and improves the anti-offset characteristics and anti-drop ability of the system. Finally, the results of the simulation and experiment verify the feasibility of the two-channel dynamic wireless power transmission scheme.

Keywords: dynamic wireless charging system; constant current; constant output power; LCC-LCC topology

收稿日期:2021-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007012)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(52007012).

作者简介:殷勇(1971—),男,博士,高级工程师,主要从事高电压技术、无线电能传输技术方向研究,(E-mail) 3188440199@qq.com。

对于单通道动态无线电能传输(dynamic wireless power transfer, DWPT)系统来说,当系统拾取端位于分段式导轨切换域时,添加控制电路可以防止切换过程中互感的跌落而引起的耦合机构传输功率下降;同时,大功率系统控制电路更加复杂,很容易受到干扰,导致系统工作不稳定。而采用增大发射线圈来增强耦合机构抗偏移性会增大系统损耗,增大耦合机构占地面积,因此动态无线充电系统朝着多发射多拾取发展^[1-3]。

近年来,国内外对 DWPT 系统的功率波动抑制研究取得了很多新成果。比如文献[4]针对双拾取系统,基于互感差异,提出一种在系统效率最优情况下的功率分配策略,但未考虑变换器占空比对其效率的影响以及不同拾取端的变换器效率对双拾取 WPT 系统效率的影响;文献[5]提出一种保证 U 型线圈系统稳定的方法,在电磁感应耦合无线电能传输系统中,新型 U 型线圈比双线圈更节能。文献[6]对电动汽车耦合机构进行优化,设计了交叉 DD 线圈,确保原副边均采用 DD 线圈的情况下,恒流输出及输出性能更好。文献[7]提出了一种新的动态耦合机构,双极性线圈对称放到单极性线圈上,这种特殊有效结构之间的自然耦合,便于设计补偿网络,可以有效减小电磁干扰。文献[8]研究了电磁感应耦合无线电能传输系统中金属环境的影响,提出一种 DD 线圈和在金属环境下提高初级侧和次级侧互感的方法。

针对耦合机构切换域功率跌落严重的问题以及动态无线充电系统拾取端水平偏移时功率下降严重的问题,提出一种双通道传能耦合机构,提升耦合机构在切换域的拾取功率,同时增强拾取机构偏移时的拾取能力。

1 LCC-LCC 型无线电能传输系统

1.1 系统建模

无线电能传输技术中有 4 种常见基本补偿方式:串联-串联(SS)、串联-并联(SP)、并联-串联(PS)、并联-并联(PP)。该技术在 WPT 系统中得到了广泛的应用,但由于结构为单级补偿结构,存在谐振容量小、开关器件电压和电流应力大等缺点^[9]。在电动汽车动态无线充电系统中,拾取端存在移出的情况,所以采用 LCC-LCC 拓扑结构控制原边发射线圈恒流输出^[10],保证系统的安全性与可靠性。

基于 LCC-LCC 拓扑的无线电能传输双通道电路图如图 1 所示。其中原边线圈内阻为 R_{p1} 和 R_{p2} ,副边线圈内阻为 R_{s1} 和 R_{s2} 对系统的损耗是最大的。

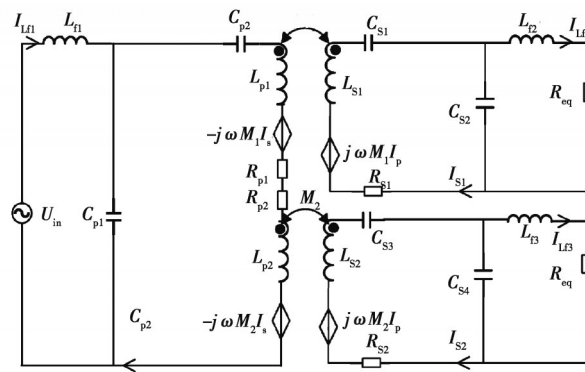


图 1 基于 LCC-LCC 拓扑的无线电能传输双通道电路图

Fig.1 Dual channel circuit diagram based on LCC-LCC topology

谐振网络输入电流以及原副边电流分别为

$$\begin{cases} I_p = \frac{U_{in}}{\omega L_{f1}} \\ I_{s1} = \frac{\omega M_1 I_p}{Z_{s1}} = \frac{U_{in} M_1 R_{eq}}{L_{f1} (\omega^2 L_{f2}^2 + R_{s1} R_{eq})} \\ I_{s2} = \frac{\omega M_2 I_p}{Z_{s2}} = \frac{U_{in} M_2 R_{eq}}{L_{f1} (\omega^2 L_{f3}^2 + R_{s2} R_{eq})} \end{cases} \quad (1)$$

则此时系统损耗为

$$P_{LOSS} = I_p^2(R_{p1} + R_{p2}) + I_{s1}^2 R_{s1} + I_{s2}^2 R_{s2} = \frac{U_{in}(R_{p1} + R_{p2})}{\omega^2 L_{j1}^2} + \frac{U_{in} M_1^2 R_{cq}^2 R_{s1}}{L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2} + \frac{U_{in} M_2^2 R_{cq}^2 R_{s2}}{L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j3}^2 + R_{s2} R_{cq})^2}, \quad (2)$$

由于两拾取机构串联谐振电感相同,此时 $L_{j3}=L_{j2}$ 相等,得

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{LOSS} = I_p^2(R_{p1} + R_{p2}) + I_{s1}^2 R_{s1} + I_{s2}^2 R_{s2} = \\ \frac{U_{in}(R_{p1} + R_{p2})}{\omega^2 L_{j1}^2} + \frac{U_{in} M_1^2 R_{cq}^2 R_{s1}}{L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2} + \frac{U_{in} M_2^2 R_{cq}^2 R_{s2}}{L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j3}^2 + R_{s2} R_{cq})^2} \\ Z_{in} = \frac{\omega^2 L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2}{\Delta}, \\ I_{L_{j1}} = \frac{\left((\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) (\omega^2 (R_{s1} + R_{s2}) (\omega^2 L_{j3}^2 + R_{s2} R_{cq}) + \omega^2 R_{cq} M_2^2) \right) \omega^2 L_{j1}^2}{\omega^2 L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2} + \\ \frac{U_{in} \omega^2 R_{cq} M_1^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s2} R_{cq})^2}{\omega^2 L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2}, \end{array} \right. \quad (3)$$

其中

$$\Delta = \omega^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s2} R_{cq}) (R_{s1} + R_{s2}) (\omega^2 L_{j3}^2 + R_{s2} R_{cq}) + (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) \omega^2 R_{cq} M_2^2 + \omega^2 R_{cq} M_1^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s2} R_{cq}), \quad (4)$$

此时得到系统输出功率及系统效率为

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 = \frac{U_{in}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) \left((\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) \omega^2 (R_{s1} + R_{s2}) + \omega^2 R_{cq} M_1^2 \right)}{\omega^2 L_{j1}^2 (\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq})^2} + \\ \frac{U_{in}^2 \left((\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) (\omega^2 R_{cq} M_2^2 - R_{p1} - R_{p2}) - \omega^2 R_{cq}^2 (R_{s1} M_1^2 + R_{s2} M_2^2) \right)}{\omega^2 L_{j1}^2}, \\ \eta = \frac{(\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s2} R_{cq}) \left((\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) \omega^2 (R_{s1} + R_{s2}) + \omega^2 R_{cq} M_1^2 \right)}{\Delta} + \\ \frac{(\omega^2 L_{j2}^2 + R_{s1} R_{cq}) \left((\omega^2 R_{cq} M_2^2 - R_{p1} - R_{p2}) - \omega^2 R_{cq}^2 (R_{s1} M_1^2 + R_{s2} M_2^2) \right)}{\Delta}. \end{array} \right. \quad (5)$$

1.2 耦合机构设计

设计了一种新型的双通道动态无线充电系统耦合机构,具有较低的应力、低耦合系数以及不占多余空间的优势。耦合机构仿真模型如图2所示,发射端DD线圈为 L_{p1} 、矩形线圈为 L_{p2} ,而拾取端DD线圈为 L_{s1} 、矩形拾取线圈为 L_{s2} 。

通过COMSOL软件仿真可得拾取端沿 x 轴和 y 轴移动下的互感变化曲线分别如图3(a)和图3(b)所示。图3(a)可以看出,沿 x 轴移动时, L_{p1} 与 L_{s2} 以及 L_{p2} 与 L_{s1} 不存在交叉耦合。图3(b)可以看出,沿 y 轴移动时, L_{p2} 与 L_{s1} 之间存在交叉耦合,并且呈现出先增大后减小的趋势。

在动态充电过程中,存在通道1(L_{p1} 与 L_{s1})和通道2(L_{p2} 与 L_{s2})2个功率传输通道。通道1一直处于工作状态,原边发射端采用分段式导轨,并且是不断切换的,而在切换过程中,由于原边发射线圈激发的磁场并不是均匀分布的,使通道1副边线圈与原边线圈在切换过程中的互感减小,进而降低了副边感应电压,从而输出给负载的电压下降,也就是说通道1输出给负载的电压是变化的。此时需要通道2开始提供功率,以此补偿通道1由互感减小造成的功率跌落,解决通道1由于导轨切换带来的系统输出电压波动问题,保证总的叠加处于一定范围内的动态平衡之中,减小切换域带来的功率剧烈波动问题。

2通道共同工作时系统输出功率为2个拾取线圈输出功率之和,当不考虑线圈内阻,由公式(5)可得输出与2通道互感关系表达式如下

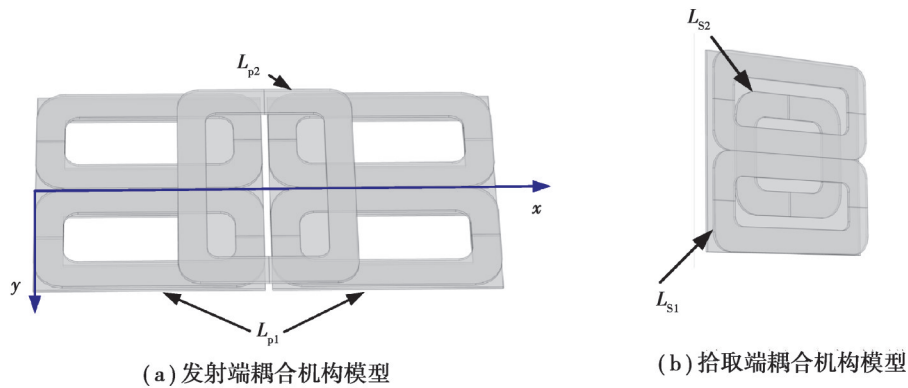


图 2 耦合机构仿真模型图

Fig.2 Transmitter simulation model diagram

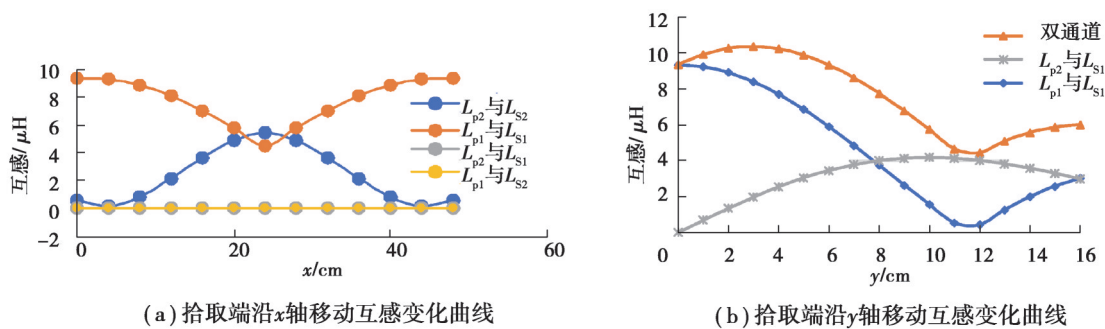


图 3 耦合机构互感与偏移变化情况

Fig.3 Mutual inductance curve of coupling mechanism

$$P_0 = \frac{U_{in}^2(M_1^2 L_{j3}^2 + M_2^2 L_{j2}^2) R_{cq}}{\omega^2 L_{j1}^2 L_{j2}^2 L_{j3}^2} = \frac{U_{in}^2(M_1^2 + M_2^2) R_{cq}}{\omega^2 L_{j1}^2 L_{j2}^2}, \quad (6)$$

由公式(6)可知,输出功率与2通道互感的平方之和成正比,保证2通道互感的平方之和稳定即能够稳定系统总的输出功率。

2 实验验证

基于对系统性能与耦合机构的研究,最终搭建了实验平台对系统进行实验验证,实验平台如图4所示,相关实验参数如表1所示。

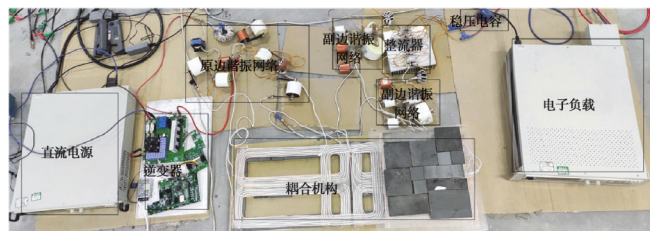


图 4 实验装置整体实物图

Fig.4 Overall physical drawing of experimental device

实验中,设置系统输入直流电压为220 V,负载为10 Ω,分别得到通道1(L_{p1} 与 L_{s1})正对、通道2(L_{p2} 与 L_{s2})正对以及拾取端沿y轴偏移下的实验波形图如图5(a)、图5(b)以及图5(c)所示。3个工况下对应的系统输出波形分别如图6(a)、图6(b)以及图6(c)所示,其中CH1、CH2和CH3分别为逆变器输出电流、逆变器输出电压和系统输出电流。

表1 耦合机构参数表

Table 1 Parameters of the coupling mechanism

参数	数值
原边DD线圈长度/mm	480
原边DD线圈宽度/mm	320
原边DD线圈匝数	6
原边矩形线圈长度/mm	250
原边矩形线圈宽度/mm	320
原边矩形线圈匝数	5
副边矩形线圈长度/mm	220
副边矩形线圈宽度/mm	200
副边矩形线圈匝数	8
副边DD线圈长度/mm	320
副边DD线圈宽度/mm	320
副边DD线圈匝数	6

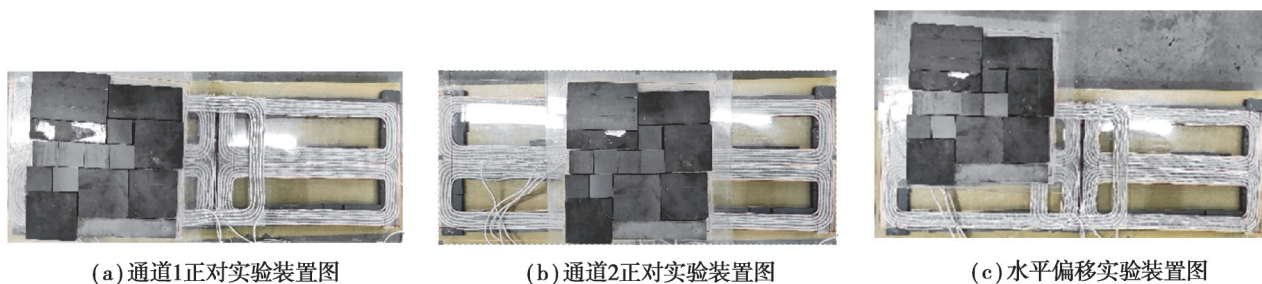
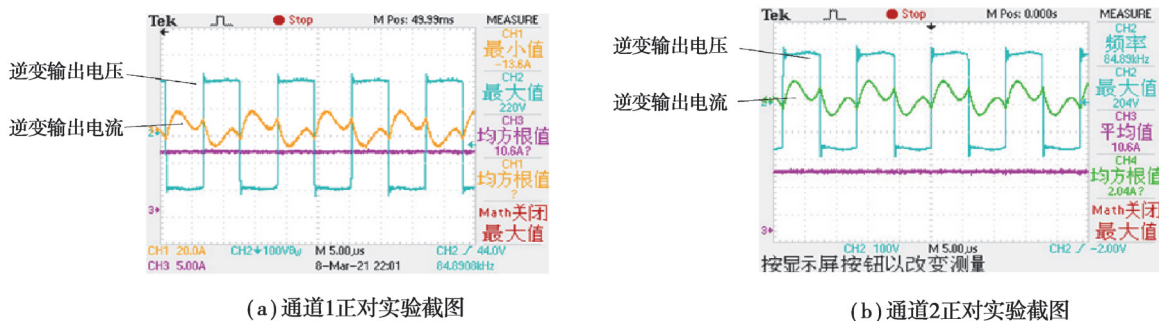


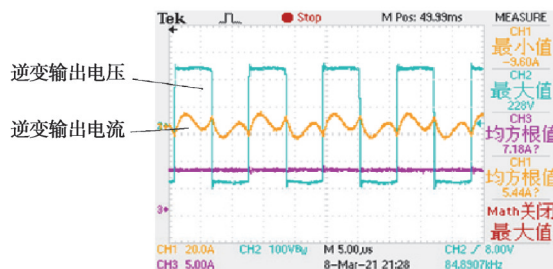
图5 不同工况实验装置图

Fig.5 Diagram of experimental equipment under different working conditions



(a) 通道1正对实验截图

(b) 通道2正对实验截图



(c) 拾取端沿y轴偏移实验截图

图6 不同工况实验波形截图

Fig. 6 Screenshot of experimental waveform under different working conditions

对比图 6(a)、图 6(b)以及图 6(c)可知,当拾取端位于切换域时拾取功率基本稳定,未出现功率大幅跌落现象。而拾取端沿 y 轴移动时,拾取功率出现了轻微的跌落,此时矩形拾取线圈与 DD 拾取线圈共同为负载供电。

3 结 论

针对动态无线充电系统的偏移以及功率跌落问题,提出了一种新型的双通道动态无线充电系统耦合机构,推导出系统输出以及系统损耗与耦合参数的关系。实验以及仿真说明提出的双通道动态无线充电系统可以有效提升系统在切换域的拾取功率,能改善系统的抗偏移特性。

参考文献

- [1] 宋贝贝. 车辆动态无线供电三相耦合机构研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
Song B B. Research on three-phase coupling mechanism for electric vehicles dynamic wireless charging[D]. Haerbin: Journal of Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] Budhia M, Boys J T, Covic G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.
- [3] 杨金明, 刘鹏航. 三线圈无线电能传输系统的恒压控制[J]. 电力电子技术, 2018, 52(5): 51-53, 57.
Yang J M, Liu P H. Constant voltage control of three-coil wireless power transfer system[J]. Power Electronics, 2018, 52(5): 51-53, 57. (in Chinese)
- [4] 陈国东, 吴剑青, 孙跃, 等. 基于互感差异的双拾取无线电能传输系统功率分配控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 154-159.
Chen G D, Wu J Q, Sun Y, et al. Power allocation control strategy for dual pickup wireless power transmission system based on mutual inductance difference[J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(21): 154-159. (in Chinese)
- [5] Ye Z, Sun Y, Dai X, et al. Energy efficiency analysis of U-coil wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4809-17.
- [6] Xiang L, Sun Y, Tang C, et al. Design of crossed DD coil for dynamic wireless charging of electric vehicles[C]//2017 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW). Chongqing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [7] Li X, Hu J, Wang H, et al. A new coupling structure and position detection method for segmented control dynamic wireless power transfer systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6741-5.
- [8] Wang D, Dai X, Deng P. Design and optimization of DD coupling mechanism of inductively coupled power transmission system in metal environment[C]//2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). IEEE, 2020: 206-210.
- [9] 孙跃, 张欢, 唐春森, 等. LCL 型非接触电能传输系统电路特性分析及参数配置方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 103-107.
Sun Y, Zhang H, Tang C S, et al. Circuit characteristics analysis and parameter configuration method of LCL type non-contact power transmission system[J]. Power system automation, 2016, 40(8): 103-107. (in Chinese)
- [10] Budhia M, Boys J T, Covic G A, et al. Development of a single-sided flux magnetic coupler for electric vehicle IPT charging systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 318-328.

(编辑 侯 湘)