

SS 型磁共振无线充电系统频率分裂研究

唐国深¹, 刘志珍¹, 曾浩¹, 侯延进², 岳增凯¹, 梁留欢¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东科学院能源研究所, 山东 济南 250014)

摘要: 随着无线充电技术的发展以及人们对环保的不断重视, 电动汽车将会取得快速普及。其充电过程中的效率和功率是十分重要的问题, 针对磁共振无线充电系统中由于频率分裂造成的输出功率过小的问题, 利用电路互感耦合模型, 得出在原副边参数不一致情况下的负载电流和传输效率与互感的关系表达式, 并研究了其频率特性。提出了避免过耦合情况的参数选择方法, 进一步经过仿真分析验证了方法的正确性, 从而为参数选择提供了指导。最后设计了实验样机, 验证了理论分析的正确性。

关键词: 电动汽车; 无线充电; 频率分裂; 参数选择

Research on Frequency Splitting of SS-type Magnetic Resonance Wireless Charging System

TANG Guoshen¹, LIU Zhizhen¹, ZENG Hao¹, HOU Yanjin², YUE Zengkai¹, LIANG Liuhuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Energy Research Institute, Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: With the development of wireless charging technology and the importance of environmental protection, electric vehicles will be achieved rapid popularity. The efficiency and power in the charging process are very important. In view of the problem that the output power is too small due to the frequency splitting in the magnetic resonance wireless charging system. Based on the mutual inductance coupling theory of circuit model, the expression of the relationship between the load current and coupling factor is derived, and the expression of the relationship between the transmission efficiency and coupling factor is also derived. Then the frequency characteristics are analyzed. The method of parameter selection to avoid over-coupling is proposed, and the correctness of the method is verified by simulation analysis, which provides guidance for parameter selection. Finally, the experimental prototype is designed to verify the correctness of the theoretical analysis.

Key words: electric vehicles; wireless charging; frequency splitting; parameter selection

0 引言

随着人们对环保问题的不断重视, 传统汽车节能减排的要求越来越高, 电动汽车作为新能源汽车中发展较为迅速的一个方向越来越得到重视。传统有线充电桩的研究逐渐成熟。文献[1]提供了一种基于充电站容量影响因子的机器学习容量规划预测方法, 解决了待建充电站的充电容量定容问题。文献[2]针对现有有序充电策略未能充分考虑和应用后续时段内新增充电请求的问题, 提出了一种计及充电请求预测补偿的住宅区电动汽车有序充电控制策略。文献[3]以微电网为平台, 提出一种具有一定出行规律的电动汽车与可再生能源协同利用的方法。

近年来无线充电技术的发展也为电动汽车能量供应提供了新的途径。磁共振无线电能传输技术是利用近场耦合原理, 使系统工作在谐振点以实现功

率与效率的最大化^[4-6]。近年来各研究机构对磁共振充电技术中出现的频率分裂现象做了广泛的研究。文献[7]根据功率最优传输条件推导了收发端优化耦合系数数学表达式, 提出了闭环优化控制策略。文献[8]针对在过耦合情况下出现的频率分裂问题, 提出了近距离侧移接收线圈的方法, 有效改善了频率分裂的问题。文献[9]分析验证了系统在有中继线圈情况下的频率分裂特性, 文献[10]对四线圈结构的传输系统进行了频率分裂的详细研究, 提出了从线圈结构优化方面消除频率分裂的方法。文献[11]对线圈自谐振与线圈外接电容调谐两种方式产生的频率分裂现象做了详细研究。文献[12]从耦合模理论出发建立了高阶数学模型, 研究了频率分裂的具体影响。文献[13]分析了多负载条件下的频率分裂现象。文献[14]提出了一种混合电磁耦合机构, 利用电、磁耦合系数的异相特性, 解决了近距离耦合

系数过大的问题。文献[15-16]提出了使用自适应频率跟踪方法来改变强耦合区域的工作频率的方法。文献[17-18]设计了反并联谐振环路抑制频率分裂的方法。上述文献中的原副边参数大都一致, 没有从原副边参数不一致的角度进行分析, 本文从实际应用中原副边参数不一致情况出发, 针对系统工作时出现的频率分裂问题, 分析了耦合因数、电感以及负载电阻分别对频率分裂的具体影响。

1 无线充电系统拓扑结构

如图 1 所示, 无线电能传输模型由发射部分与接收部分组成, 一般直流电源经过逆变转换为高频交流电, 通过发射线圈将电能转换为磁能传送给接收端, 接收端再根据负载的需要将交流电进一步转换为直流电给负载供电。无线电能传输系统的 SS(原边串联-副边串联)拓扑结构的电路示意图如图 2 所示, 由发射端和接收端组成。其中线圈自感为 L_1 、 L_2 , 线圈内阻为 r_1 、 r_2 , 负载电阻为 r_L , 补偿电容为 C_1 、 C_2 , 原边和副边的电流为 i_1 、 i_2 , u 为原边交流电压源。



图 1 磁共振无线电能传输模型图

Fig. 1 The model of magnetic resonance wireless transmission

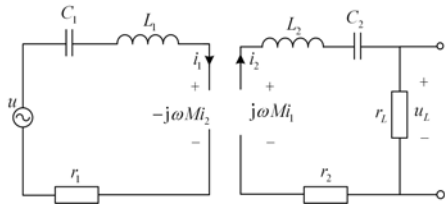


图 2 SS 补偿结构等效电路图

Fig. 2 SS compensation structure equivalent circuit

可得初级侧、次级侧回路电压方程为

$$\begin{cases} u = r_1 i_1 + j\omega L_1 i_1 - j\omega M i_2 \\ j\omega M i_1 = r_2 i_2 + j\omega L_2 i_2 + r_L i_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为系统工作频率; M 是线圈之间的互感。对式(1)求解可以得到

$$\begin{cases} i_1 = \frac{u(R + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2})}{(r_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1})(R + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}) + \omega^2 M^2} \\ i_2 = \frac{j\omega M u}{(r_1 + j\omega L_1 - j\frac{1}{\omega C_1})(R + j\omega L_2 - j\frac{1}{\omega C_2}) + \omega^2 M^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $R = r_2 + r_L$ 。在式(2)的基础上做以下变换:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{\omega M}{\sqrt{R r_1}} \\ \xi_1 = Q_1 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \\ \xi_2 = Q_2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: λ 、 ξ_1 、 ξ_2 定义为广义耦合因数和广义失谐因子; ω_0 为系统谐振频率。

这样式(2)可进一步化为

$$\begin{cases} i_1 = \frac{u(1 + j\xi_2)}{r_1(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \omega^2 M^2 / R} \\ i_2 = \frac{j\lambda u}{[(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \lambda^2] \sqrt{R r_1}} \end{cases} \quad (4)$$

接收端电流的模值为

$$|I_2| = \frac{\lambda U}{\sqrt{[(1 - \xi_1 \xi_2 + \lambda^2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2] R r_1}} \quad (5)$$

由式(5)可知其取最大值时:

$$I_{2\max} = \frac{U}{2} \sqrt{\frac{1}{R r_1}} \quad (6)$$

电流归一化处理得到

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\sqrt{(1 - \xi_1 \xi_2 + \lambda^2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}} \quad (7)$$

当系统工作在谐振点时, 可以通过 α 对 λ 求导来预测式(7)极值点发生的条件, 因此可以通过分析 λ 的大小进一步判断系统是否会发生频率分裂。

同时可以继续得到功率与效率的表达式为

$$\begin{cases} P = i_1 u_s = \frac{u_s^2 (1 + j\xi_2)}{r_1(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \omega^2 M^2 / R} \\ P_L = i_2^2 r_L = \frac{\lambda^2 u_s^2 r_L}{[(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \lambda^2]^2 R r_1} \\ \eta = \frac{P_L}{P} = \frac{\lambda^2 r_L [r_1(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \omega^2 M^2 / R]}{[(1 + j\xi_1)(1 + j\xi_2) + \lambda^2]^2 R r_1 (1 + j\xi_2)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P 、 P_L 、 η 分别为系统的输入功率、输出功率以及传输效率。

2 仿真分析

为了进一步探索影响频率分裂的因素, 在 Matlab 中分别对耦合因数、负载阻值以及电感值进行了仿真分析, 得出对系统电流以及输出效率影响的关系曲线。线圈参数设置如表 1 所示。

表 1 线圈参数取值

Table 1 Coil parameter value

线圈	电感/ μH	电容/nF	内阻/ Ω
原边	233	15	0.3
副边	140	25	0.2

图 3 为不同耦合因数下系统的负载电流归一化曲线图,从图中可以看出,在过耦合情况下系统会发生频率分裂现象,耦合因数为 1 是临界耦合状态,因此原副边互感、负载阻值以及原边内阻都是影响频率分裂的因素。

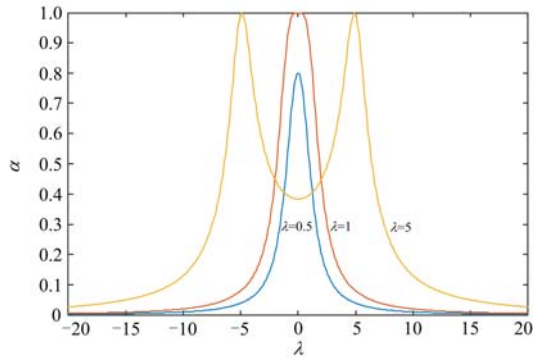


图 3 不同耦合情况下负载电流归一化曲线图

Fig. 3 Normalized Load Current in Different Coupling Conditions

从图 4 可以看出,在负载阻值较小的情况下,由于 $\lambda > 1$,导致系统处于过耦合状态,发生了频率分裂现象。与此相反,图 5 的负载阻值较大,避免了 $\lambda > 1$ 情况的出现,因此系统并未出现频率分裂。因此,合理选择负载阻值以使 $\lambda \leq 1$ 可以有效避免频率分裂发生。

在实际应用中,接收端参数往往由于空间等原因限制不能与发射端保持完全一致,导致原副边参数不同,因此需要进行参数匹配。从图 6 可以看出,随着副边电感值的减小效率在不断减小,图 7 可以

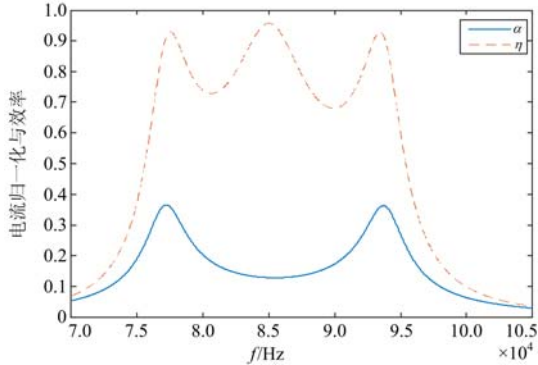
图 4 负载阻值 5 Ω 时频率特性曲线

Fig. 4 The frequency characteristic curve at 1 ohm

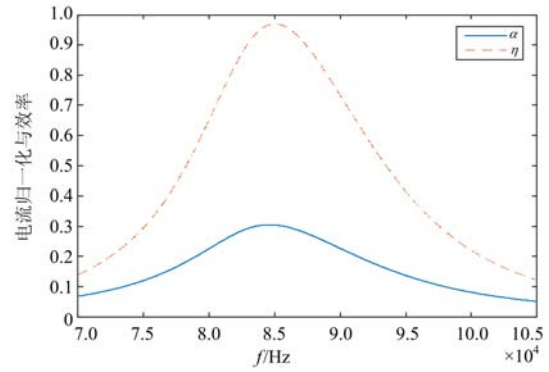
图 5 负载阻值 30 Ω 时频率特性曲线

Fig. 5 The frequency characteristic curve at 50 ohm

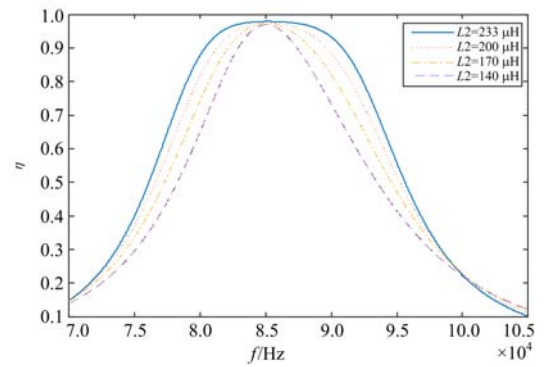


图 6 不同副边电感对效率的影响曲线

Fig. 6 The curve of different secondary inductors on efficiency

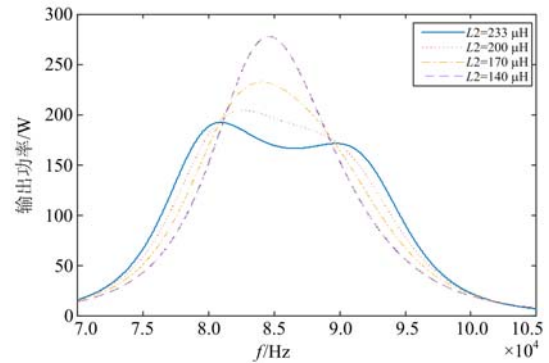


图 7 不同副边电感对输出功率的影响曲线

Fig. 7 The curve of different secondary inductors on output power

看出,随着副边电感值的减小输出功率在不断增大,因此可以根据效率和输出功率的具体要求进行副边电感值参数选择,同时注意电感值匹配应该避免系统发生频率分裂。

3 实验验证

为了进一步验证负载大小不同会对系统造成频

率分裂, 搭建了实验样机, 如图 8 所示。实验样机主要由电源模块、逆变模块、发射端线圈以及接收端线圈及接收端电路组成。本样机采用平板磁芯铺设螺旋线圈的结构, 线圈参数按照表 1 设定。在负载为 $5\ \Omega$ 、 $30\ \Omega$ 时, 分别测量不同频率下的输出功率, 测得数据绘制成图 9 所示。负载为 $5\ \Omega$ 时系统出现了频率分裂的现象, 最大功率点不在谐振频率处, 当负载为 $30\ \Omega$ 时, 系统在谐振点取得最大功率, 没有发生频率分裂, 进一步验证了图 4、图 5 分析的正确性。

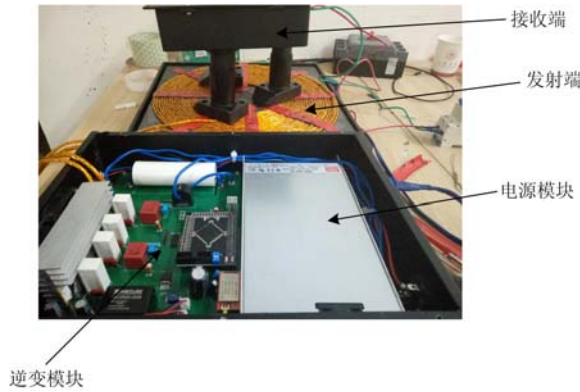


图 8 实验样机

Fig. 8 Experimental prototype

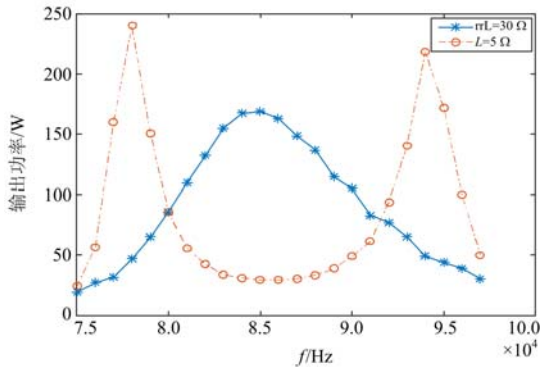


图 9 不同负载下输出功率曲线图

Fig. 9 Output power curve at different loads

4 结论

本文从互感耦合理论出发, 建立了电动汽车无线充电系统的等效电路, 分析了在原副边参数不一致情况下的频率分裂现象, 对系统产生频率分裂的因素进行了详细地分析, 对影响耦合因数的参数进行了单独的讨论。为了更符合实际应用, 在原副边电感值不一致时对输出功率和效率的影响进行了仿真, 从而可以根据输出功率和效率的要求选择合适的电感值, 对实际的原副边参数选择提供了方法,

避免因参数选择所造成的频率分裂问题, 同时可以根据实际需求进行参数匹配。最后设计了实验样机验证了理论分析的正确性, 从而为进一步设计充电系统参数选择方面提供了理论指导。

参考文献

- [1] 李智, 侯兴哲, 刘永相, 等. 基于深度学习的充电站容量规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017(21): 67-73. LI Zhi, HOU Xingzhe, LIU Yongxiang, et al. A capacity planning method of charging station based on depth learning[J]. Power System Protection and Control, 2017(21): 67-73.
- [2] 徐浩, 夏鑫珏, 李辉, 等. 计及充电请求预测补偿的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 74-81. XU Hao, XIA Xinjue, LI Hui, et al. An ordered charging strategy for electric vehicles accounting the compensation of predicted charging requests[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 74-81.
- [3] 杨晓东, 陈宇, 张有兵, 等. 考虑交互功率与可再生能源功率波动的微电网调度优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 30-38. YANG Xiaodong, CHEN Yu, ZHANG Youbing, et al. Scheduling optimization model for microgrid considering interactive power and renewable energy output fluctuation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 30-38.
- [4] 陈文仙, 陈乾宏. 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 35-47. CHEN Wenxian, CHEN Qianhong. Review and research progress of magnetic resonance wireless power transmission technology[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(9): 35-47.
- [5] 黄学良, 王维, 谭林林. 磁耦合谐振式无线电能传输技术研究动态与应用展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 2-14. HUANG Xueliang, WHANG Wei, TAN Linlin. Technical Progress and Application Development of Magnetic Coupling Resonant Wireless Power Transfer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 2-14.
- [6] KURS A, KARALIS A, MOFFATT R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [7] 李长生, 张合, 曹娟, 等. 磁共振耦合电能传输系统功率与效率传输特性分析与优化[J]. 电力系统自动化, 2015(8): 92-97. LI Changsheng, ZHANG He, CAO Juan, et al. Analysis and Optimal Design for Power and Efficiency

- Transmission Characteristics of Magnetic Resonance Coupling Power Transmission Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 92-97.
- [8] 狄东照, 张开如, 顾华利, 等. 小功率磁耦合谐振式无线电能传输频率分裂的研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 188-191.
- DI Dongzhao, ZHANG Kairu, GU Huali, et al. Study on the Frequency Splitting of the Small-power Magnetic Coupling Resonance Wireless Power Transmission[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 188-191.
- [9] Dukju A, Songcheol H. A study on magnetic field repeater in wireless power transfer. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2013; 60(1): 360-371.
- [10] 秦小磊, 陈国平, 任仪. 谐振式能量传输系统频率分裂特性研究[J]. 数字通信, 2014, 41(1): 11-14.
- QIN Xiaolei, CHEN Guoping, REN Yi. Characteristics of frequency splitting in coupling resonance power transmission system[J]. Digital Communication, 2014, 41(1): 11-14.
- [11] 兰永均, 龚立娇, 蔡新红, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统频率特性分析[J]. 工矿自动化, 2016, 42(5): 67-70.
- LAN Yongjun, GONG Lijiao, CAI Xinhong, et al. Analysis of frequency characteristics of magnetic coupled resonant wireless power transmission system[J]. Industry and Mine Automation, 2016, 42(5): 67-70.
- [12] 张献, 杨庆新, 陈海燕, 等. 电磁耦合谐振式传能系统的频率分裂特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 24, 191-197.
- ZHANG Xian, YANG Qingxin, CHEN Haiyan, et al. Research on characteristics of frequency splitting in electromagnetic coupling resonant power transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 24, 191-197.
- [13] 刘溯奇, 谭建平, 薛少华, 等. 多负载无线电能传输系统耦合机理特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 84-90.
- LIU Suqi, TAN Jianping, XUE Shaohua, et al. Analysis on Coupling Mechanism Characteristics of Multi-load Wireless Power Transmission System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 84-90.
- [14] ZHANG X Y, XUE C D, LIN J K. Distance-Insensitive Wireless Power Transfer Using Mixed Electric and Magnetic Coupling for Frequency Splitting Suppression[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2017, PP(99): 1-10.
- [15] PARK J, TAK Y, KIM Y, et al. Investigation of Adaptive Matching Methods for Near-Field Wireless Power Transfer[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2011, 59(5): 1769-1773.
- [16] SAMPLE A P, MEYER D T, SMITH J R. Analysis, Experimental Results, and Range Adaptation of Magnetically Coupled Resonators for Wireless Power Transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 544-554.
- [17] LEE W S, SON W I, OH K S, et al. Contactless Energy Transfer Systems Using Antiparallel Resonant Loops[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(1): 350-359.
- [18] LEE W S, OH K S, YU J W. Distance-Insensitive Wireless Power Transfer and Near-Field Communication Using a Current-Controlled Loop With a Loaded Capacitance[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2014, 62(2): 936-940.

收稿日期: 2017-09-30; 修回日期: 2018-05-02

作者简介:

刘志珍(1967—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电气设备的优化设计及运行分析, 电能质量研究, 无线电能传输研究; E-mail: liuzhizhen@sdu.edu.cn

唐国深(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输。E-mail: guoshentang@126.com