

文章编号:1671-251X(2016)05-0067-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.05.015

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.

磁耦合谐振式无线电能传输系统频率特性分析

兰永均¹, 龚立娇^{1,2}, 蔡新红¹, 李宏伟¹

(1. 石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832003;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:根据等效电路模型得出了影响线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统与外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统传输功率和传输效率的因素,分析了这 2 种系统的频率特性,实验结果表明:线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统没有发生频率分裂现象且具有较大的传输功率,而外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统谐振频率受线圈等效并联电容和外接串联电容的影响,导致系统在收发线圈间距离小于某一临界值时发生了频率分裂现象。

关键词:无线电能传输;磁耦合谐振;频率特性;频率分裂

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2016-04-29 11:31

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20160429.1131.015.html>

Analysis of frequency characteristics of magnetic coupled resonant wireless power transmission system

LAN Yongjun¹, GONG Lijiao^{1,2}, CAI Xinhong¹, LI Hongwei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Security and
New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Factors that affect transmission power and efficiency of magnetic coupled wireless power transmission system based on self-resonance coils and magnetic coupled wireless power transmission system based on series capacitor tuning were obtained according to equivalent circuit models, and frequency characteristics of the two systems were analyzed. The experimental results show that there is no frequency splitting in the magnetic coupled wireless power transmission system based on self-resonance coils with larger transmission power, while there is frequency splitting in the magnetic coupled wireless power transmission system based on series capacitor tuning when distance between receiving coil and sending coil is less than a critical value, because resonant frequency is influenced by coil equivalent shunt capacitance and external series capacitance.

Key words: wireless power transmission; magnetic coupled resonance; frequency characteristic; frequency splitting

0 引言

磁耦合谐振式无线电能传输技术是利用 2 个或

多个具有相同谐振频率、高品质因数的电磁系统,当其处于谐振状态时彼此之间发生强烈的能量交换,从而通过非辐射近场实现能量高效率传输的一种技

收稿日期:2016-01-02;修回日期:2016-04-02;责任编辑:盛男。

基金项目:国家重点实验室访问学者项目(2007DA10512713407)。

作者简介:兰永均(1990—),男,山西原平人,硕士研究生,研究方向为无线电能传输,E-mail:593059677@qq.com。通信作者:龚立娇(1978—),女,甘肃武威人,副教授,博士,研究方向为传感测试系统及其输配电技术,E-mail:glj_mac@shzu.edu.cn。

术^[1-4]。目前国内外对该技术尤其关于频率分裂方面的研究还处于起步阶段。参考文献[5]提出在磁耦合谐振式无线电能传输实验过程中可以由近及远地改变收发线圈间的距离,同时调节信号发生器的输出频率使传输效率在每个距离处均达到最大,这在一定程度上可以减小频率分裂对能量传输的影响,但并没有从根本上消除频率分裂现象,而且工作量较大。参考文献[6]提出在源线圈与发射线圈、接收线圈与负载线圈之间加入调整匹配网络来消除由于距离变化引起的频率分裂现象,然而额外的匹配网络会增加系统的能量损耗。参考文献[7-8]对频率分裂现象的研究主要是针对电磁感应式无线电能传输系统,结论具有一定的局限性。

本文根据磁耦合谐振式无线电能传输系统中是否外接串联电容,将其分为线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统和外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统2种类型,分别建立了这2种系统的数学模型,分析了影响系统传输功率、传输效率的关键参数,并对这2种系统的频率特性进行了对比实验,得出了频率分裂现象发生的原因。

1 系统建模

1.1 线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统

线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统的等效电路如图1所示。 $\dot{U}_s$ 为电源电压; L_1, L_2 分别为发射线圈、接收线圈的等效电感; C_1, C_2 分别为发射线圈、接收线圈的等效电容; R_1, R_2 分别为发射线圈、接收线圈在高频下的等效电阻; R_L 为负载电阻; M 为发射线圈和接收线圈间的互感系数; $\dot{i}_1, \dot{i}_2$ 分别为发射线圈、接收线圈等效电感支路上流过的电流; $\dot{i}_s$ 为流入发射线圈的总电流。

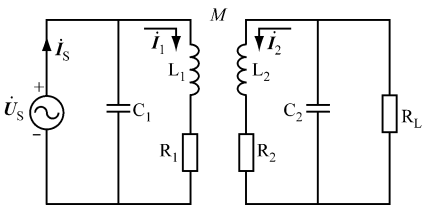


图1 线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统等效电路

根据基尔霍夫电压定律可得

$$(R_1 + j\omega L_1)\dot{i}_1 - j\omega M\dot{i}_2 = \dot{U}_s \quad (1)$$

$$-j\omega M\dot{i}_1 + Z_{22}\dot{i}_2 = 0 \quad (2)$$

式中: ω 为系统角频率, $\omega=2\pi f$, f 为电源电压频率;

Z_{22} 为接收端总阻抗, $Z_{22}=R_2+j\omega L_2+\frac{R_L}{1+j\omega C_2 R_L}$ 。

由式(1)和式(2)可得

$$\dot{i}_2 = \frac{j\omega M\dot{U}_s}{(\omega M)^2 + (R_1 + j\omega L_1)Z_{22}} \quad (3)$$

由图1可知

$$\dot{i}_s = \frac{\dot{U}_s}{Z_{11} + Z_{12}} \quad (4)$$

式中: Z_{11} 为自阻抗, $Z_{11}=\frac{R_1+j\omega L_1}{1+j\omega C_1 R_1-\omega^2 C_1 L_1}$; Z_{12}

为反映阻抗, $Z_{12}=\frac{(\omega M)^2}{Z_{22}}$ 。

由于 $Z_{12} \ll Z_{11}$, 所以

$$\dot{i}_s \approx \frac{\dot{U}_s}{Z_{11}} \quad (5)$$

当电路发生并联谐振时, $\dot{U}_s$ 与 $\dot{i}_s$ 同相位,所以系统输入功率为

$$P_{in} = U_s I_s = \frac{U_s^2}{|Z_{11}|} \quad (6)$$

系统传输功率为

$$P_{out} = \frac{\omega^2 M^2 U_s^2 |Z_{22}|}{(\omega^2 M^2 + |R_1 + j\omega L_1| |Z_{22}|)^2} \quad (7)$$

系统传输效率为

$$\eta_1 = \frac{\omega^2 M^2 |Z_{11}| |Z_{22}|}{(\omega^2 M^2 + |R_1 + j\omega L_1| |Z_{22}|)^2} \quad (8)$$

1.2 外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统

外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统除了外接串联电容外,其他部分结构与线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统相同,其等效电路如图2所示,其中 C_3, C_4 分别为与发射线圈、接收线圈串联的电容。

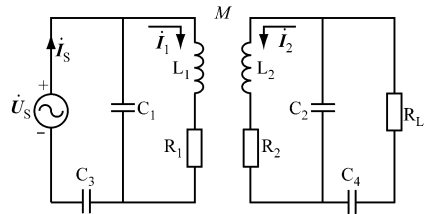


图2 外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统等效电路

由图2可知,系统发射端总阻抗为

$$Z_{33} = \frac{R_1 + j\omega L_1}{j\omega C_1 R_1 - \omega^2 C_1 L_1 + 1} + \frac{1}{j\omega C_3} \quad (9)$$

接收端总阻抗为

$$Z_{44} = R_2 + j\omega L_2 + \frac{1 + j\omega C_4 R_2}{j\omega C_4 + j\omega C_2 (1 + j\omega C_4 R_L)} \quad (10)$$

系统传输功率为

$$P_{\text{out}2} = \frac{\omega^2 M^2 U_S^2 |Z_{44}| |j\omega C_3 Z_{33} - 1|^2}{(\omega^2 M^2 + |R_1 + j\omega L_1| |Z_{44}|)^2 |j\omega C_3 Z_{33}|^2} \quad (11)$$

系统传输效率为

$$\eta_2 = \frac{\omega^2 M^2 |Z_{33}| |Z_{44}| |j\omega C_3 Z_{33} - 1|^2}{(\omega^2 M^2 + |R_1 + j\omega L_1| |Z_{44}|)^2 |j\omega C_3 Z_{33}|^2} \quad (12)$$

1.3 模型分析

由式(7)、式(8)、式(11)和式(12)可知:当线圈、电源电压和负载确定后,线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统与外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统的传输功率和传输效率均与频率和互感系数有关,其中互感系数是关于收发线圈间距离的函数^[9-10]。所以,影响2种系统电能传输性能的主要参数为频率和收发线圈间距离。此外,外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统的传输性能还与外接串联电容密切相关。

2 实验分析

2.1 实验参数

在实验室搭建了线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统,其中发射线圈和接收线圈采用相同的双层螺线管线圈,线圈参数:铜线直径为0.29 mm,线圈外径为15.4 mm,线圈高度为8.0 mm,线圈匝数为52。利用阻抗分析仪 LCR-8105 测量螺线管线圈的动态阻抗特性,得到阻抗模、电抗、阻抗角曲线,如图3所示。

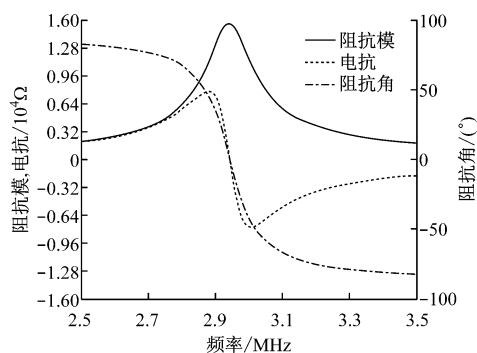


图3 线圈阻抗模、电抗、阻抗角测试曲线

由图3可知,频率约为2.93 MHz时,阻抗模达到最大值15.56 kΩ,螺线管线圈发生并联谐振;频率约为2.88 MHz时,电抗(显感性)达到最大值。

2.2 实验结果

实验过程中,由近及远地改变收发线圈间的距离,同时各个距离处通过扫频得到线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统频率、传输功率和收发线

圈间距离的关系,如图4所示。其中,使系统传输功率在各个距离处达到最大值时的频率即为系统的谐振频率。

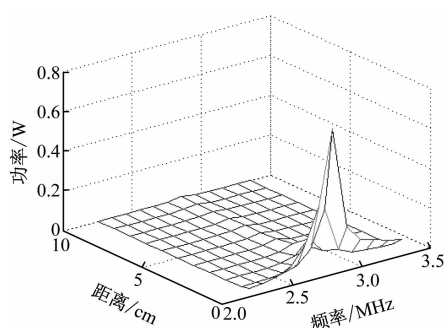


图4 线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统频率、传输功率和收发线圈间距离的关系

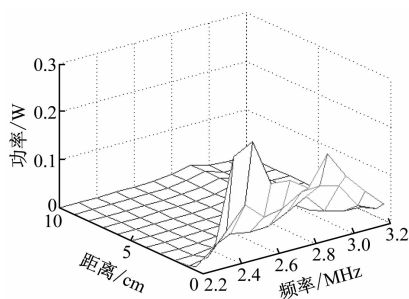
由图4可知:①线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统的谐振频率不随收发线圈间距离的变化而改变,始终保持在2.85 MHz,该频率与阻抗分析仪测得的单个线圈谐振频率略有差别,这是由收发线圈间电磁耦合作用引起的;②随着频率增加,系统传输功率开始缓慢增加,当接近谐振频率后传输功率迅速上升,到谐振频率点时传输功率达到最大值,此后随着频率继续增加,传输功率迅速下降,当远离谐振频率后,传输功率下降速度减缓;③当系统处于谐振状态时,随着收发线圈间距离的增大,开始时传输功率下降迅速,大于一定值后下降速度减缓。

在线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统的基础上,在发射线圈和接收线圈处分别串联1个完全相同的电容,当电容分别为40,60,80 pF时,测得外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统频率、传输功率和收发线圈间距离的关系如图5所示。

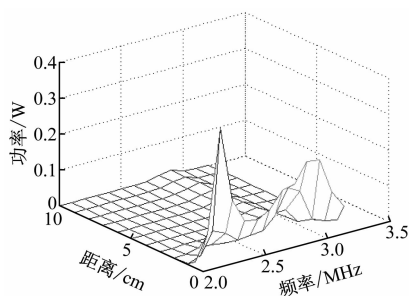
由图5可知:①外接串联电容可以调节系统的谐振频率,且电容的大小对系统传输功率也有一定影响,选择合适的电容能提高系统的传输功率;②外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统在收发线圈间距离较近时会发生频率分裂现象,即当收发线圈间距离小于某一临界值时,随着系统工作频率逐渐变化,系统的传输功率会出现2个极大值,而且距离越近,分裂现象越明显;③外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统发生频率分裂时,其中一个频率始终没有发生改变,而且该频率与线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统的谐振频率相近,另一个频率则随外接串联电容的增大而减小。

2.3 结果分析

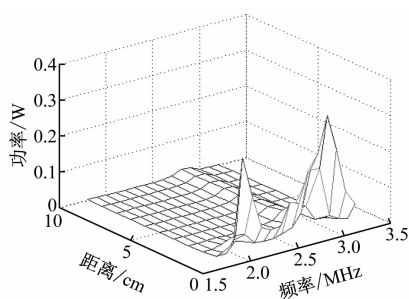
线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统没有发



(a) 外接串联电容 40 pF



(b) 外接串联电容 60 pF



(c) 外接串联电容 80 pF

图5 外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统频率、传输功率和收发线圈间距离的关系

生频率分裂现象,且传输功率与外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统相比更大。外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统发生了频率分裂现象,是因为其谐振频率不仅受线圈等效并联电容的影响,还受外接串联电容的影响,二者共同作用导致系统在不同工作频率下存在多个谐振频率点:当电源电压频率达到串联谐振频率 f_1 时,系统发生串联谐振;当电源电压频率达到并联谐振频率 f_2 时,系统发生并联谐振。

外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统在收发线圈间距离小于某一临界值时出现频率分裂现象,大于该临界值时频率分裂现象消失的原因可能与互感系数有关。收发线圈间距离较近,处于 f_1 和 f_2 处系统的有效传输距离内时,系统传输功率在 f_1 和 f_2 处均会出现峰值,产生频率分裂现象;随着收发线圈间距离增加,互感系数迅速减小,当收发线圈间距离大于 f_1 处系统的有效传输距离后,系统传输功率在 f_1 处不会出现明显的峰值,而这个距离还

处于 f_2 处系统的有效传输距离内,所以频率增大到 f_2 时,系统发生谐振,传输功率达到峰值。

3 结语

通过对2种类型的磁耦合谐振式无线电能传输系统频率特性的分析,得出以下结果:线圈自谐振时磁耦合无线电能传输系统随着工作频率变化没有出现频率分裂现象,且传输功率较大;外接串联电容调谐时磁耦合无线电能传输系统在收发线圈间距离小于某一临界值时发生了频率分裂现象,原因是系统受外接串联电容与线圈等效并联电容共同作用,存在串联谐振频率点和并联谐振频率点。因此,实际应用中可以通过合理设计线圈,尽量避免外接串联电容,从而消除频率分裂现象。

参考文献:

- [1] 张国圆,王习,赵端. 磁耦合谐振式无线电能传输系统传输特性分析[J]. 工矿自动化,2015,41(8):85-88.
- [2] 王国东,原璐璐. 无线电能传输系统谐振线圈优化设计[J]. 工矿自动化,2014,40(3):53-56.
- [3] 张献,杨庆新,陈海燕,等. 电磁耦合谐振式无线电能传输系统的建模、设计与实验验证[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):153-158.
- [4] ZHANG X, YANG Q, CHEN H, *et al.* Analysis of a novel near-field non-radiative wireless power transmission system[C]//International Conference on Control, Automation and Systems Engineering, Singapore, 2011:1-4.
- [5] SAMPLE A P, MEYER D A, 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.
- [6] GILER E R, HALL K L, KESLER M P, *et al.* Wireless energy transfer using repeater resonators: USA, US8587155 B2[P]. 2013-11-19.
- [7] 封阿明,毛志鑫,秦海鸿. 非接触感应电能传输系统的频率分叉现象及移相控制策略[J]. 上海电机学院学报,2010,13(1):17-21.
- [8] 韩腾,卓放,闫军凯,等. 非接触电能传输系统频率分叉现象研究[J]. 电工电能新技术,2005,24(2):44-47.
- [9] 谭林林,黄学良,黄辉,等. 基于频率控制的磁耦合共振式无线电力传输系统传输效率优化控制[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(7):913-919.
- [10] 傅文珍,张波,丘东元,等. 自谐振线圈耦合式电能无线传输的最大效率分析与设计[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18):21-26.