

磁耦合谐振式无线电能传输系统多负载特性研究

Characteristic Research on Multiple Receivers of Magnetically-coupled Resonant Wireless Power Transfer System

方本心¹, 覃宇²

FANG Ben-xin¹, QIN Yu²

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西桂林 541000; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410081)

(1. College of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi, 541000, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Changsha, Hunan, 410081, China)

摘要:针对发射线圈面向两个平行的小型接收负载线圈电能传输情况进行研究, 搭建带有频率跟踪装置的双线圈结构磁耦合谐振式无线电能传输装置平台, 并在该平台上对单/双负载线圈的发射线圈间距离(以分米级为单位)与传输效率之间的关系进行实验。单负载实验结果与仿真结果吻合度很好, 但实测效率普遍比仿真效率要差; 多负载实验仿真模型能正确反映传输效率随线圈间距的变化情况, 实际实验测量数据与仿真数据相吻合。表明, 应用磁耦合谐振式技术的双负载无线输电系统在分米级的传输距离下能够达到较高的传输效率。

关键词:无线电能传输 双负载 传输效率 双线圈结构

中图分类号: TN751 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2013)04-0326-05

Abstract: For transmitting coil that received two small parallel load coils, the frequency tracking device was built with double-coil structure transmission device platform, on which an experiment was conducted to evaluate the relationship between the transmission efficiency and the distance of transmitter coils. A brief introduction of the experiment device was given, including a frequency tracking part. This platform overcomes the issue that ordinary double-coil structure easily detuned and the various experimental conditions on the platform were theoretically analyzed. The results obtained from simulation model were consistent with experimental results, indicating that the application of magnetically coupled resonant technology with dual-load wireless transmission system in decimeter transmission distance can reach higher transfer efficiency.

Key words: wireless power transmission, dual load, transmission efficiency, double coils structure

无线输电是一种利用无线电传输电力能量的技术, 与传统的有线电能传输方式相比, 无线输电具有使用安全、方便等优点, 因而受到了广大学者的关注。该技术在军事、矿山、水下、医疗、石油、交通等特殊和

恶劣环境下具有广泛的应用前景^[1]。因此, 对于无线输电技术的研究有很大的实际应用价值。现有的无线能量传输技术主要有 3 种形式: 电磁感应技术; 电磁耦合谐振技术; 基于微波或光波的原场辐射技术。其中磁耦合谐振式技术是一种新型的中等距离无线电能传输技术, 具有安全、稳定、高效的优点, 适合进行单一发射源面向多个接收负载的无线电能传输。简单来讲, 该技术就是在普通的中低频电磁感应输电

收稿日期: 2013-07-10

修回日期: 2013-08-15

作者简介: 方本心(1990-), 男, 学士, 主要从事电子技术研究。

的基础上,让发射线圈产生的电磁波频率与接收线圈产生谐振,从而最大限度地获取发射线圈产生的能量。虽然磁耦合谐振式技术可以在有障碍物的情况下传输,且2008年内华达州雷电实验室已经利用这项技术将800W电力传播了5m。然而,该技术还存在许多不足。首先,模型都可能只针对发射与接收线圈等大小的情况建立,并且接收负载需要按一定的空间架构摆放,这与实际情况下接收线圈往往是小型负载线圈,且可以自由活动的情形不符^[2,3]。其次,虽然有些研究^[4]已对负载线圈小于发射线圈的情况进行了分析,但它的分析仅仅是针对两个同轴负载位于发射线圈的不同面的情形,且仅采用耦合模理论进行了数学分析。在解决频率分裂的问题上,文献^[5]提出了自适应调频技术,但并未具体介绍实现方法。本文研究非同轴非对称两个以上小负载线圈传输系统的传输效率问题,对磁耦合谐振式无线电能传输系统进行设计与制作,搭建带频率跟踪且适合中等功率无线电能传输的实验装置平台,以解决多负载情况下频率分裂的问题,并在该平台上进行实验来验证仿真模型的正确性。

1 磁耦合谐振式无线电能传输平台搭建

传输系统实验平台主要由4个部分组成:驱动模块,逆变模块,频率跟踪模块及线圈谐振耦合模块。由整流桥 kbp307 构成的滤波整流模块为每个模块的直流部分供电。传输装置采用集中参数的方案,用两个电感线圈及集中参数的电容元件构成谐振体,如图1所示。

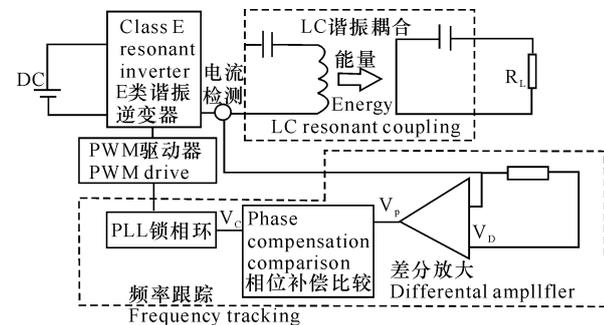


图1 平台总体示意图

Fig. 1 Schematic overview of devices

1.1 驱动电路

驱动电路采用带前置反相器的图腾柱电路,前置反相器可以放大输出电流,图腾柱电路能增强驱动能力,当PWM的输出端为低电平的时候,下管为MOS的结电容提供放电回路。该部分由分立元件构成以增强带负载能力^[6~10],仿真如图2所示。

1.2 逆变电路

逆变电路采用E类高频谐振逆变器,该逆变器

能直接用谐振电感代替高频变压器传递能量,在减少了变压器损耗的同时,还可以大大提高无线传输距离;另外,开关管工作在ZVS和ZCS状态,能大大减少开关损耗,提高了发射源本身的效率;且不需要设置死区时间,特别适合1~10MHz的高频使用^[11~15]。E类谐振逆变电路结构如图3所示。

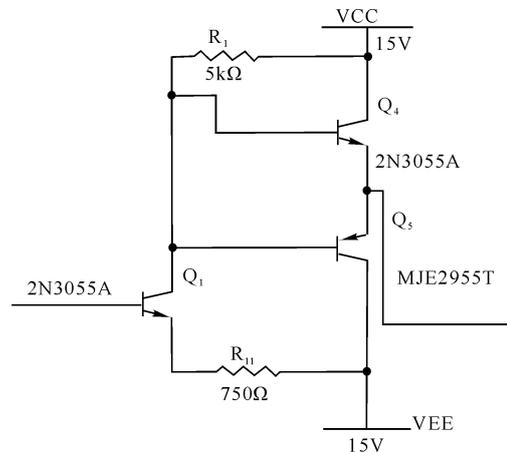


图2 驱动电路仿真

Fig. 2 Driver circuit simulation

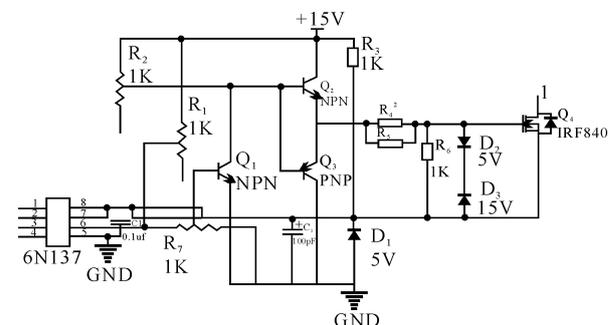


图3 E类谐振逆变电路PCB

Fig. 3 E Class resonant inverter circuit PCB

1.3 频率跟踪电路

频率跟踪电路利用锁相环将PWM的驱动频率锁定在发射电路的实际谐振频率上。频率跟踪装置的电路结构如图4所示。在RLC串联谐振电路中,电抗随输入电流频率的变化而变化。由于电抗为0时,电流频率等于实际谐振频率的电流分量损耗最小,因此总的电流频率有向谐振频率靠拢的趋势。频率跟踪装置就是将这种趋势反馈到PWM驱动上,使驱动输出频率逐渐逼近发射回路的实际谐振频率。这避免了双线圈及四线圈结构下传输系统失谐问题的发生。

1.4 线圈谐振耦合电路

线圈谐振耦合电路设计为双线圈传输结构,发射接收线圈的电感L值要完全相同,串联的电感值也要相同以保证谐振,接收线圈需要带纯阻性负载以避免与发射回路LC谐振参数不一致。

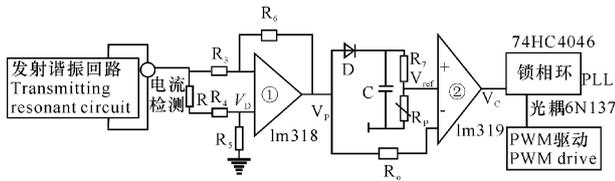


图4 频率跟踪电路

Fig. 4 Frequency tracking circuit

①运放 Operational amplifiers; ②比较器 Comparator.

2 结果及分析

2.1 实际效果

为了使开关管能够工作在 ZVS 和 ZCS 状态,必须合理地选择谐振网络的参数,即逆变器直流电源电压 V_2 , 谐振频率 f , 品质因数 Q , 电感 L_0, L_1 , 电容 C_0, C_1 , 电阻 R_0 的参数。参考文献[6, 9, 10]中的方法,再根据实际情况设置网络仿真参数: $V_2 = 20\text{ V}$, $L_0 = 6.0\ \mu\text{H}$, $L_1 = 0.1\ \text{mH}$, $C_0 = 1.175\ \text{nF}$, $C_1 = 1.57\ \text{nF}$, T1 为理想变压器,原副边电感即发收线圈电感为 $6.0\ \mu\text{H}$ 。在 Multisim11.0 软件中的仿真电路如图 5 所示:

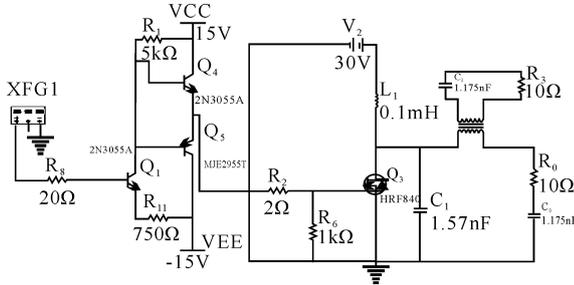


图5 仿真电路

Fig. 5 Simulation circuit

仿真得到的开关管栅源电压波形,电容 V_{C_1} 两端的波形如图 6 所示,电感 L_0 、电容 C_0 两端的波形如图 7 所示。图 6 和图 7 的波形和文献[10]的理论分析结果一致。 V_{GS} 和 V_{C_1} 恰好错峰,表明 E 类谐振逆变的软开关技术得到成功应用, MOS 管实现了零电压开启和零电流关断。这说明仿真所选参数是合理的,所以实际电路也选用此参数。

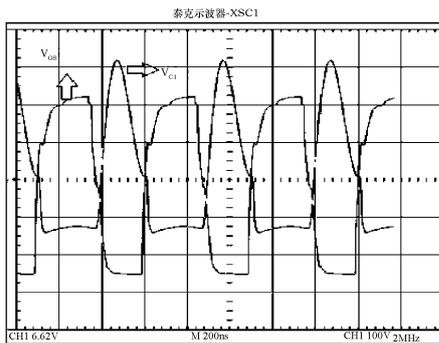


图6 V_{GS} 和 V_{C_1} 波形

Fig. 6 V_{GS} and V_{C_1} waveforms

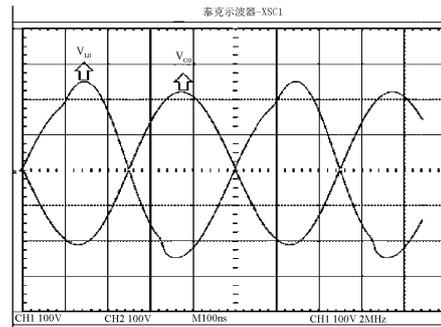


图7 V_{L_0} 和 V_{C_0} 波形

Fig. 7 V_{L_0} and V_{C_0} waveforms

2.2 单负载系统结果

对于单负载系统,实验记录了一组同轴不等大系统的线圈间距 D 与谐振传输效率之间关系的数据。实验平台中设定传输系统参数如下:线圈导线半径 $a_0 = 0.00106\text{m}$;发射线圈半径 $r_1 = 0.21\text{m}$;接收线圈半径 $r_2 = 0.14\text{m}$;发射线圈匝数 $n_1 = 2$;接收线圈匝数 $n_2 = 2.5$;负载电阻大小 $R_l = 5\ \Omega$;发射端谐振电阻 $R_2 = 3\ \Omega$ 。根据这些参数,测出的一组数据如表 1 所示。

表1 单负载系统距离-效率关系

Table 1 Distance efficiency relation in single load system

间距 Spacing (D/cm)	输入功率 Input power (Pin/W)	输出功率 Output power (Pout/W)	传输效率 Transmission efficiency ($\eta/\%$)	理论传输效率 Theoretical transfer efficiency($\eta/\%$)
5	52.33	24.74	47.28	52.44
10	51.42	17.75	34.52	41.26
15	51.04	11.47	22.35	27.24
20	50.82	6.43	12.66	15.76
25	50.79	3.30	6.50	8.37
30	50.77	1.67	3.28	4.32
35	50.77	0.91	1.77	2.30

再根据这些参数,构建仿真模型,得出的实验数据对比情况如图 8 所示。

图 8 结果显示,实验结果与仿真结果吻合度很好,但实测效率普遍比仿真效率要差。应该是布板和采用器件有瑕疵,导致传输电压波形有畸变,以及测量仪器有误差导致的。

2.3 双负载系统结果

因为单负载实验已经验证过同轴的情况,且非同轴也符合多负载的应用特点,所以双负载系统采用非同轴的不等大平行线圈间的互感的计算方法来进行仿真。由于接收线圈圆心与发射线圈圆心的径向距离不好测量,且实验平台采用悬挂式结构,不好改变径向距离。因此让 3 号负载线圈固定,2 号负载线圈改变轴向距离,以此测量一组轴向距离 z_2 与谐振传输效率 η 的关系的数据。实验平台中设定传输系统参数如下:线圈导线半径 $a_0 = 0.00106\text{m}$;发射端谐

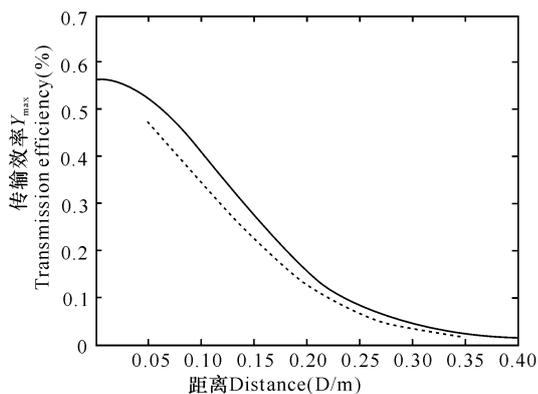


图 8 仿真结果与实验数据对比

Fig. 8 Comparison of simulation results with experimental data

—: 仿真结果;: 实验数据。

—: The simulation results;: Experimental data.

振电阻 $R_1 = 3\Omega$; 两个接收线圈的负载电阻 $RL_2 = 5\Omega$; $RL_3 = 5\Omega$; 发射线圈 1 半径 $r_1 = 0.21\text{m}$; 接收线圈 2 半径 $r_2 = 0.14\text{m}$; 接收线圈 3 半径 $r_3 = 0.10\text{m}$; 发射线圈 1 匝数 $n_1 = 2$; 接收线圈 2 匝数 $n_2 = 2.5$; 接收线圈 3 匝数 $n_3 = 3$; 接收线圈 2 坐标 $x_2 = 0$; $y_2 = 0.06$; 接收线圈 3 坐标 $x_3 = 0$; $y_3 = 0.10$; $z_3 = 0.15$ (坐标单位: m)。根据这些参数, 测出的一组数据如表 2 所示。

表 2 的对比结果表明, 仿真模型能正确反映传输效率随各种变量的变化情况, 与实际实验测量数据相吻合。另外从图 9 可以看出, 当 2 号接收线圈从发射线圈向 3 号接收线圈靠近时, 3 号负载的传输效率先增大后减小, 这是因为此时 2 号线圈起到了一个中继线圈的作用。这与文献[16]提出的中继线圈对接收端负载传输效率提高带来的帮助相符。

图 9~10 的结果表明, 仿真模型能正确反映传输效率随线圈间距的变化情况, 实际实验测量数据与仿真数据相吻合。虽然只进行了一组实验, 但从采集的数据可以看出, 实验平台搭建成功。从图 11 中还可以看出, 随着负载线圈与发射线圈间的距离增加, 总

表 2 双负载系统距离-效率关系

Table 2 Distance efficiency relation in dual load system

接收线圈 2 轴距 Receiving coil 2 wheelbase (z0/cm)	输入总功率 Input power (Pin/W)	2 号输出功率 The 2nd output power P ₂ /W	3 号输出功率 The 3rd output power P ₃ /W	总输出功率 Total output power P _{out} /W	2 号传输效率 The 2nd transmission efficiency $\eta_2/\%$	2 号理论效率 The 2nd theoretical efficiency $\eta_2/\%$	3 号传输效率 The 3rd transmission efficiency $\eta_3/\%$	3 号理论效率 3 theoretical efficiency $\eta_3/\%$	总传输效率 Overall transmission efficiency $\eta/\%$	总理论效率 Total theoretical efficiency $\eta/\%$
5	59.73	18.65	4.04	22.69	31.23	35.36	6.76	8.66	38.00	44.23
10	58.82	9.92	4.64	14.56	16.87	20.82	7.89	10.18	24.76	31.25
15	57.94	4.66	3.49	8.15	8.04	11.63	6.02	7.95	14.06	19.67
20	57.22	3.67	2.74	6.41	6.42	8.33	4.79	5.61	11.21	13.96
25	56.68	2.69	1.94	4.63	4.75	6.00	3.42	4.93	8.17	10.93
30	56.44	1.72	2.27	3.99	3.04	3.74	4.03	5.21	7.07	8.95
35	56.37	0.95	2.38	3.34	1.69	2.11	4.22	5.52	5.91	7.62

传输效率下降。但该系统在 10~20cm 的距离上传输效率仍能够达到 20% 左右, 与目前广泛采用的电磁感应式无线传输相比有较明显的优势。

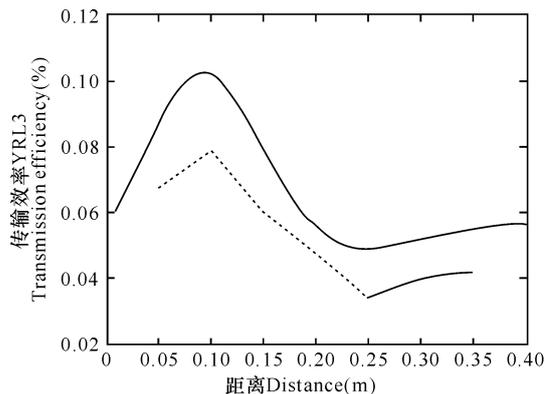


图 9 3 号负载的传输效率与 2 号线圈移动量之间的关系

Fig. 9 The relation between transmission efficiency of the load 3 and the moving coil of the load 2.

—: 仿真结果;: 实验数据。

—: The simulation results;: Experimental data.

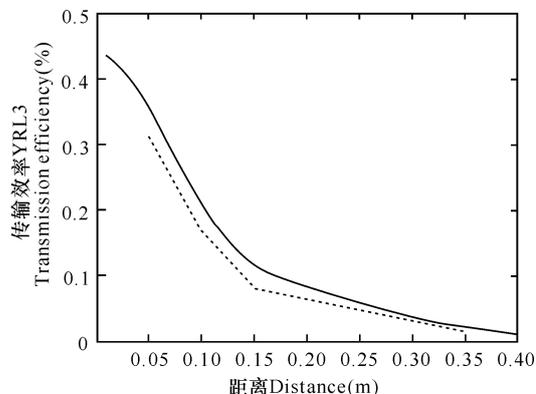


图 10 2 号负载的传输效率与 2 号线圈移动量之间的关系

Fig. 10 The relation between transmission efficiency of the load 2 and the moving coil of the load 2

—: 仿真结果;: 实验数据。

—: The simulation results;: Experimental data.

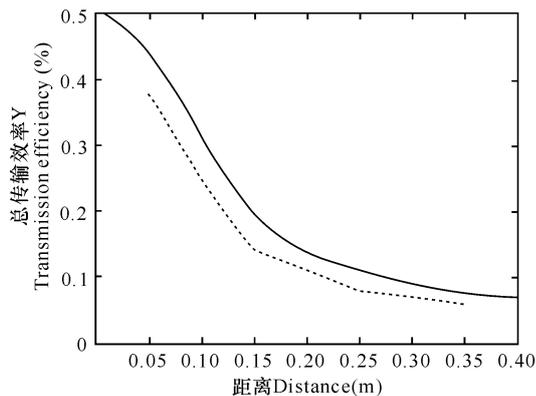


图 11 系统总传输效率与 2 号线圈移动量之间的关系

Fig. 11 The relation between total system transmission efficiency and the 2nd distance of moving coil

—: 仿真结果;: 实验数据。

—: The simulation results;: Experimental data.

3 结论

实验结果表明,仿真模型所反映的传输效率随各种变量的变化情况与实际中实验测量数据基本一致。因此可以看出,磁耦合谐振式技术在分米级的传输距离上较电磁感应式技术有较明显的优势。从理论上分析,在进行双负载线圈的传输时,假如存在一个空载或小负载线圈,系统对另一个负载线圈的传输效率肯定有所提升。

参考文献:

[1] 赵相涛. 无线输电技术研究现状及应用前景[J]. 科技信息, 2011(10):121,123.
 [2] Jin Wook K, Hyeon Chang S, Do Hyun K, et al. Analysis of wireless energy transfer to multiple devices using CMT[C]. Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings Melbourne, Australia: IEEE, 2010: 2149-2152.
 [3] 张青. 谐振耦合式无线输电多载系统建模及特性研究

[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.

[4] Kurs A, Moffatt R, Soljacic M. Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96: 044102.
 [5] Yong Hae K, Seung Youl K, Sanghoon C, et al. Wireless power transmission to multi devices through resonant coupling[C]. International Conference on Electrical Machines and Systems Incheon, South Korea: IEEE, 2010: 2000-2002.
 [6] 沈锦飞, 惠晶, 吴雷. E 类高频谐振式 DC/AC 变换器[J]. 电力电子技术, 2002(01): 4-6.
 [7] 李浩昱, 满慎燕. ZVS 全桥变换器高频振荡抑制方法研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(1): 31-33.
 [8] 朴贞爱, 陈辉明. 超高频 E 类逆变电源的新型控制方法及仿真研究[J]. 机电工程, 2004, 21(10): 35-38.
 [9] 朴贞爱. 单管超高频感应加热电源的研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
 [10] 武猛. 感应加热用 E 类软开关逆变器[D]. 天津: 天津大学, 2007.
 [11] 惠斌. 一种高速高压半桥驱动电路的分析与设计[D]. 西安: 西北大学, 2010.
 [12] 吴凤江, 孙力, 高晗瓒, 等. 桥式驱动功率 MOSFET 的电磁干扰与抑制[J]. 南京航空航天大学学报, 2005, 01: 29-33.
 [13] 龚春英, 刘煜, 肖岚. 几种 MOSFET 驱动电路的研究[J]. 电源技术应用, 2001, 03: 95-98.
 [14] 鲁莉容, 李晓帆, 蒋平, 等. 功率 MOSFET 高速驱动电路的研究[J]. 电力电子技术, 2001, 35(6): 45-47.
 [15] 苏娟. 高频功率 MOSFET 驱动电路及并联特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2003.
 [16] 傅文珍, 张波, 丘东元. 频率跟踪式谐振耦合电能无线传输系统研究[J]. 变频器世界, 2009, 08: 41-46, 103.

(责任编辑: 尹 闯)