

基于PWM控制驱动器的新型无线传输技术研究

无线电力传输装置由发射模块和接收模块组成, 基于15 V直流电源作为辅助电源进行研究, 利用系统传输效率的反演技术, 实现IC SG3525处于反转状态的最佳控制, 避免了在脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制过程中复杂的软件调试。发射线圈与接收线圈的线匝数和直径参数设置相同, 两者平行放置。在发射模块中, 由SG3525产生PWM波, 通过调节SG3525周围的外围电阻, PWM波频率与发射和接收电路中的谐振频率相同, 从而实现线圈之间产生最强的磁场, 提高了传输效率及传输距离。

田德春 李天浩 张 菁/辽宁省电力有限公司锦州供电公司

0 引言

电力通过长时间的电气接触方式进行传输, 但在某些特殊情况下仍然存在设备流动性差、电火花、磨损以及接触不良等问题。特别是在阴暗潮湿的条件下不能产生电力^[1], 因此无线电力传输的研究具有实际意义。

无线电力传输也被称为非接触式电力传输(Non-Contact Power Transmission, CPT), 是将电能从电源传输到电气负载而不使用离散的人造导体^[2]。许多学者对脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)控制及无线传输技术进行大量的研究与应用。文献[3]以半桥LLC谐振变换器为例, 通过仿真分析, 研究了PWM控制不同占空比下LLC谐振变换器的工作模态及开关管的开关特性。主电路采用H桥逆变结构, 移相式方波控制移相角的改变, 进行脉宽调制, 实现达10 kHz以上的PWM输出^[4], 对PWM参数和控制流程等关键问题展开讨论^[5]。文献[6]综合

现场图像数字化采集及现场无线语音通话等技术, 把自组网WiFi技术应用于中等距离电力应急视频通信。文献[7]以磁耦合谐振式无线电能传输技术为核心, 通过在发射线圈回路和接收线圈回路之间建立LC谐振振荡电路, 从而实现了一定距离下电能的高效无线传输。

通过分析电路模型的串联谐振结构, 将发射器与接收器并联放置, 并联谐振可以分配电流, 并通过电容产生高能磁场, 有效提高发射功率和传输效率。根据谐振耦合(Wireless Power Transfer, WPT)系统的理论分析, 本文基于硬件设计, 实现数据采集, 通过调整频率及传输距离采集测试数据, 以研究发射距离和频率对发射功率、接收功率和发射效率的影响。

在几种常见的WPT方式中, 磁感应传输、磁共振传输和微波传输是最常见的, 同样适用于其应用。对于不同的转移环境, 每个传输距离、功率和效率都有其自身的优点。因此, 在适当的情况下选择相应的传输方式是提高效率和能力达到期望的唯一途径^[8]。如表1所示, 比较了这三种WPT方式, 表明磁感应传输, 磁共振传输得到了最广泛的应用, 微波传输主要用于军事和国防等特殊领域, 但常规场合传输功率低。虽然磁共振耦合技术与电磁感应技术相比还没有得到很好的发展, 但在中等距离传输的条件下, 由于其特殊优点, 具有更大的发展潜力。本文选择磁耦合谐振WPT作为研究对象, 深入了解其系统传输特性。



田德春/工程师

关键词/Keywords

无线电力传输 ·
磁耦合 ·
谐振 ·
SG3525 ·

表1 比较WPT的三种方法

方法	电磁感应	磁共振耦合	微波
优点	宽的发射功率范围（从几瓦到几千瓦）；短距离传输效率高；工作频率低，易于使用由电子设备生产；倾向于成熟	可以在中距离（几米）内传输；效率比较高，对发射机和接收机之间的不匹配不敏感；对非共振物体影响不大；穿透力强，低电磁干扰	远程传输
缺点	传输距离短（通常在几厘米内），随着距离的增加，其效率将迅速下降。对发射器和接收器之间的不匹配很敏感，遇到外部颗粒时会出局部加热。电磁推理和传输效率之间存在不一致	高工作频率（从几百千赫兹到十几兆赫兹），几乎不被电子设备生产，其传输性能对频率变化敏感；缺乏标准工作频率，发射功率仍有待提高，其技术尚不成熟	工作频率几乎不在微波范围内常用设备产生；系统功率密度低，造成大功率传输困难，对通信设备造成严重干扰。传输效率低
应用	便携式电子设备充电，铁路运输供电等	EV无线充电，为家用电子设备供电	航天飞机充电，太阳能卫星等

1 系统设计

1.1 WPT硬件系统构成

磁耦合谐振WPT技术结合了共振技术，不仅增加了能量的传输距离，而且提高了传输效率。此后，磁耦合谐振WPT已经成为WPT的新研究方向。目前，磁耦合谐振WPT的研究尚处于初步阶段，需要解决的问题主要包括发射功率、效率和距离、电磁兼容性、生物安全等^[9]。

磁耦合谐振WPT的硬件结构如图1所示，该系统包括：①由芯片SG3525及其外围电路组成的模块，其产生频率可调的PWM波，避免了复杂的软件调试，简化了实验难度和成本。利用电路的滑动变阻器改变PWM波的频率和占空比。当驱动器

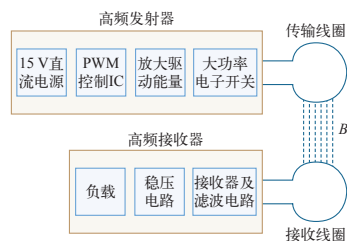


图1 实验电路结构图

IC IR2110进行了能量放大后，PWM波才能驱动开关。②搭建半桥逆变电路，通过PWM控制，将15 V直流电（DC）转换为交流电（AC），在研究整个实验装置时考虑了变频器的效率。③在接收器电路中，通过整流器和滤波电路使交流电流向负载提供稳定电压，基于电压调节器电路和保护电路，使器件获取稳定和安全的直流电源。

1.2 SP模型的耦合共振

在磁耦合谐振无线传输系统中，磁耦合谐振系统的输出功率最为关键，本文选择系统输出功率和系统效率作为研究对象。WPT的基本结构基于两个谐振线圈进行无线电力传输，根据不同的谐振模式可以分为四种类型：串联谐振（SS）系统，串并联谐振（SP）系统，并联串联谐振（PS）系统和并联谐振并行共振（PP）系统。S为与线圈串联的电容器，P为与线圈并联的电容器。为了获得输出端子的最大传输电流和最大电压，本文选择SP系统以提高系统的抗干扰性能^[10]。如图2所示， V_{in} 为系统的等效电压源； C_1 、 C_2 分别为发射器和接收器的电容； L_1 、 L_2 分别为发射器和接收器的电感； R_1 、 R_2 分别为发射和接收线圈的等效串联电阻； R_L 为负载。

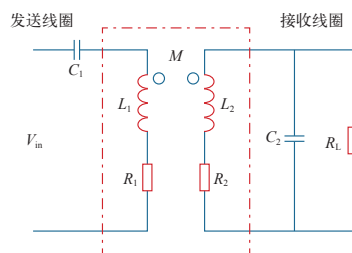


图2 SP共振系统的等效电路结构

电磁耦合谐振WPT系统的线圈电阻损耗主要由欧姆电阻损耗和辐射电阻损耗组成，辐射电阻损耗远小于欧姆电阻损耗，因此可以忽略辐射电阻损耗的影响。欧姆电阻损耗公式为

$$R_{ohm} = \frac{Nr}{a} \sqrt{\frac{\mu_0 \rho \omega}{2}} \quad (1)$$

式中， N 为线圈匝数； r 为线圈的半径， m ； a 为线的半径， m ； μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}$ ； ρ 为电导率。系统谐振角频率 ω ，线圈自身电感 L 和线圈间的互感 M 为

$$\begin{cases} \omega = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} & i=1,2 \\ L = N^2 r \mu_0 [\ln(8r/g) - 2] \\ M = \frac{\pi \mu_0 (N_1 N_2)^{\frac{1}{2}} (r_1 r_2)^{\frac{1}{2}}}{2D^3} \end{cases} \quad (2)$$

式中, D 为两个线圈之间的距离, m。系统中的发送线圈的匝数与接收线圈的匝数相同, 发送线圈的半径与接收线圈的半径相同, 即 $N_1 = N_2$, $r_1 = r_2$ 。如式(3)所示, 二次等效电压源 U_s 为

$$U_s = \frac{\frac{M}{C_2} V_{in}}{\left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_2 + j\omega(L_2 - M) \right) j\omega M + \left(R_1 + j\omega(L_1 - M) + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \right)} \quad (3)$$

功率和系统参数之间的关系可以根据系列的原理推导出来, 如式(4)所示

$$P_{sp} = \frac{(\omega M)^2 V_{in}^2 R_L}{\left[\left(j\omega L_1 + R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \left(j\omega L_2 + R_2 + \frac{R_L}{1 + j\omega C_2 R_L} \right) + (\omega M)^2 \right]^2 (1 + j\omega C_2 R_L)^2} \quad (4)$$

1.3 逆变电路设计

PWM信号传输电路用于产生高频PWM波, 以控制MOS管导通, 从而实现直流转换为交流。本文选用SG3525芯片作为控制核心产生PWM波, 该芯片包括欠电压锁定模块、软启动模块、PWM信号锁存模块和FM模块。此外, 还可以调整最大占空比。其原理在于采用负反馈技术来调整开关占空比, 以便通过较少的外围器件实现开关电源的稳压。SG3525控制IC具有与外部振荡器同步的功能, 并配有参考电压源, 死区时间调制和PWM锁存器, 具有最佳输出级^[11]。

全桥逆变电路电源和半桥逆变电路的传输功率相对较强, 两者都适合大功率发电的情况。当通过谐振电容器的电流与电源电压相同时, 全桥输出功率比半桥输出功率大两倍。但是对全桥逆变电路的控制比较复杂, 导致硬件设计难度大。根据对发射功率的需求, 在半桥逆变电路的基础上进行一些修改, 如图3所示, 去除两个总线电容, 得到一个不对称的半桥逆变电路。 S_1 和 S_2 分别接收PWM波作为半波整流器的控制信号。

本文研究了使用大直径绕组的方法, 在高频交流的情况下, 线圈的分布电容非常小。线圈本身的电感不能使频率达到260 kHz, 所以需要向变压器串联增加电容和电感。对于接收机, 电容应与电

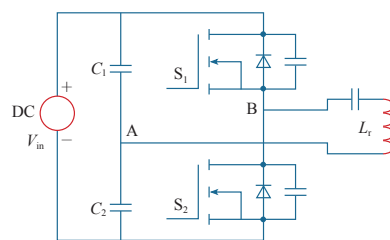


图3 半桥逆变电路

感并联, 以使接收器中的电压全部用于负载。由于系统频率高, 在选择系统频率的过程中需要主要参数, 如耐压、电容、最大电流和频率特性。

1.4 接收器电路设计

接收电路主要由整流电路、滤波电路和稳压电路组成。接收电路在设计中也起着非常重要的作用, 可以有效地转换接收功率, 然后向负载供电。由负载线圈引入的电能通过整流和滤波输出直流电压, 通过电压调节部分向负载提供稳定的输出电压。考虑到系统频率相对较高(通常为兆赫兹), 选择MBR1545CTG作为高效率二极管桥式整流器。

2 电路调试

2.1 调试过程

基于成功的硬件调试和相关数据, 本文对系统参数进行了研究。该研究测量了WPT设备在

不同距离和不同频率下的输入和输出的电压、电流。通过控制WPT过程中的距离和频率,比较收集的数据以分析系统的传输特性,可以推导出频率和距离如何影响发射功率、接收功率和传输效率的规律。

2.1.1 传输距离对传输特性的影响

通过将两个传输线圈对准15 V输入电压和256 kHz的PWM波频率,可以通过改变柱之间的距离来获得数据,如表2所示。

表2 距离对输入输出电压的影响

传输距离 /cm	输入电流 /A	输出电流 /A	输出电压 /V	输入功率 /W	输出功率 /W	效率 (%)
5	0.72	0.46	7.37	10.8	3.39	31.4
10	1.13	0.46	7.36	16.9	3.39	20.0
15	1.27	0.37	7.00	19.1	2.59	13.6
20	1.27	0.17	6.21	19.1	1.06	5.54
25	1.28	0.11	5.96	19.2	0.656	3.41
30	1.27	0.08	5.78	19.1	0.462	2.43
35	1.27	0.05	5.62	19.1	0.281	1.48
40	1.31	0.03	5.50	19.7	0.165	0.84

根据表2的数据,输入功率开始上升,然后保持稳定。输出功率首先保持不变,然后下降,最终趋于稳定;传输效率首先下降,随着距离的增加缓慢下降,最终趋于稳定。

2.1.2 PMW波频率对传输特性的影响

原线圈应与二次线圈对准,两个线圈之间的距离设定为10 cm,输入电压设定为15 V。通过改变SG3525外围电路周围的滑动变阻器,逆变电路的工作频率将发生变化,数据可以被采集,从而也可以计算传输效率,如表3所示。

当SG3525产生的PWM波频率接近线圈共振频率时,一次线圈和二次线圈同时发生谐振,传输效率相对较高。但是,当PWM波频率和线圈共振频率之间的差异较大时,传输效率将迅速下降。

2.2 调试结果

1) 当保持PWM波的频率恒定并缓慢增加两个线圈之间的距离时,输入功率首先大幅上升,然后保持稳定,相应的输出功率在一开始就保持不变,然后下降,最后往往是稳定。

表3 频率对输入输出电压的影响

频率 /kHz	输入电流 /A	输出电流 /A	输出电压 /V	输入功率 /W	输出功率 /W	效率 (%)
200	0.14	0.000	3.20	2.10	0	0
210	0.15	0.003	5.12	2.25	0.02	0.70
220	0.20	0.049	5.62	3.00	0.27	9.18
230	0.23	0.086	5.84	3.45	0.50	14.6
240	0.29	0.13	6.02	4.35	0.78	18.0
250	0.49	0.24	6.51	7.35	1.56	21.3
260	1.38	0.62	7.91	20.7	4.89	23.7
270	0.67	0.32	6.73	10.05	2.14	21.3
280	0.29	0.14	5.92	4.35	0.82	19.0
290	0.23	0.09	5.83	3.45	0.52	15.1
300	0.19	0.05	5.61	2.85	0.28	9.82

2) 当保持PWM波频率不变时,两个线圈之间的距离逐渐增大,传输效率首先下降,随着距离的增加而缓慢下降,最终趋于稳定。

3) 当保持线圈10 cm之间的距离不变,然后变化PWM波频率变慢时,可以发现:传输效率明显增加,而SG3525产生的PWM频率缓慢接近线圈共振频率。当一次线圈和二次线圈同时发生谐振时,传输效率将达到最大。当SG3525产生的PWM频率缓慢离开线圈共振频率时,传输功率急剧下降。

3 结束语

本文详细介绍了无线传输技术的原理,特别是磁耦合谐振传输,目的是提高传输效率。另外,研究中设计了WPT系统,为论文提供必要的。根据数据和分析,传输距离、传输功率和传输效率可以实现最大化。详情如下所述。

1) 为了获得最大的系统效能和最大的抗干扰能力,系统基于耦合谐振的SP模型。

2) 本文选用15 V直流电源作为辅助电源,考虑了变频器的效率。该研究充分利用硬件电路本身在反演过程中控制PMW,从而避免了SCM或ARM等复杂的调试软件。

3) 根据频率特征,以实验为基础,对系统频率与传输效率之间的关系进行了有意义的探索。

参考文献

[1] Li Yang, Yang Qingxin, Yan Zhuo, et al.

- The analysis on effective distance of WPT and its influence [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (1) : 106-112.
- [2] Huang Xueliang, Tan Linlin, Chen Zhong, et al. Summary on the development and application of WPT technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (10) : 1-11.
- [3] 包尔恒, 王红涛, 高军. PWM控制LLC谐振变换器开关特性研究 [J]. 电气应用, 2016, 35 (24) : 30-33.
- [4] 刘星, 张加胜, 张勇. 单相H桥逆变器移相PWM控制的单片机实现 [J]. 电气应用, 2009, 28 (14) : 52-55.
- [5] 吴志祥, 吴惠娟, 方晓毅, 等. 基于PWM技术的欠电压脱扣器研究与设计 [J]. 电气应用, 2014, 33 (24) : 42-45.
- [6] 倪振华, 林亦雷, 曾惠兰. 基于变电站通信网的应急现场无线通信覆盖技术和装备研究 [J]. 电气应用, 2015, 34 (9) : 126-129.
- [7] 边岗莹, 张灿, 樊波, 等. 谐振式无线电能传输系统的设计 [J]. 电气应用, 2015, 34 (17) : 41-43.
- [8] 廖承林, 李均锋, 陶成轩, 等. 无线电能传输系统控制方法综述 [J]. 电气工程学报, 2015, 10 (6) : 1-6.
- [9] Zhong W X, Chi Kwan L, Hui S Y. Wireless power dominoresonator systems with noncoaxial axes and circular structures [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (11) : 4750-4762.
- [10] Huang Hui. Research on WPT efficiency and power supply based on magnetic field coupling [D]. Nanjing: Southeast University, 2011.
- [11] Zhao Zhengming, Zhang Yiming, Chen Kainan. New development of magnetic coupling resonant WPT technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (3) : 1-13.
- (收稿日期: 2017-12-25) **EA**

广告 | AD



Weidmüller 

魏德米勒迎接未来的挑战

PROtop电源 — 满足高要求的工业通讯解决方案

魏德米勒的高端电源PROtop系列应用全新的DCL(输出动态过流)专利技术, 并且能在系统运行受到影响之前, 识别出性能的波动及故障。即使在恶劣的工业环境中, PROtop电源的高可靠性、长使用寿命和高效率等特性都使其成为用户的不二之选, 能满足各种技术应用的需求。

魏德米勒电联接(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 官网: www.weidmueller.com.cn

扫一扫, 关注魏德米勒官方微信



Let's connect.