

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.06.005

移相全桥磁耦合谐振无线直流变换器的设计

刘 贤, 龙永红, 李中启, 吴煌辉

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对传统电能传输方式中存在的电线摩擦、老化、电能传输过程中容易产生火花等缺点, 设计了一种移相全桥磁耦合谐振无线直流变换器。即采用磁耦合谐振式无线变压器以实现输入输出的物理隔离, 结合移相双闭环控制实现软开关及提高响应速度。并通过 Matlab/Simulink 和 TMS320F28335 对设计的变换器进行了仿真和实现。仿真实验结果表明, 所设计的移相全桥磁耦合谐振无线直流变换器的响应速度较快、损耗较小, 且通过无线变压器进行电能传输提高了设备的安全性能。

关键词: 移相全桥; 无线直流变换器; 磁耦合; 双闭环控制; 无线电能传输

中图分类号: TP273; TM724 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2017)06-0026-06

Design of Phase-Shifted Full-Bridge Magnetically Coupled Resonant DC Converter

LIU Xian, LONG Yonghong, LI Zhongqi, WU Huanghui

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of such disadvantages as wire friction, aging and sparks produced during the transmission of electric energy in the traditional transmission system, a design has been proposed of the phase-shifted full-bridge DC converter. A physical isolation of the input and output can be realized by using the magnetically coupled resonant wireless transformer. Combined with phase-shift double closed loop control, a soft switching can be realized and the response speed can be increased. The designed converter and simulation can be realized by using Matlab / Simulink and TMS320F28335. Experiments show that the designed phase-shifted full-bridge magnetically coupled resonant wireless DC converter shows its advantages: faster in response while small in loss. In addition, the safety performance of the equipment can be improved by power transmission through a wireless transformer.

Keywords: phase-shifted full-bridge; wireless DC converter; magnetic coupling; double closed-loop control; wireless power transmission

0 引言

根据传输软介质和传输原理的差异, 可以将无线电能传输 (wireless power transmission, WPT) 技术划分为电磁辐射式、电场耦合式和磁场耦合谐振式 3 种^[1]。相比于其它两种无线电能传输技术, 磁场耦合

谐振式无线电能传输技术具有定向性能较好、辐射较小、传输距离较远、传输功率较大、传输效率较高等特点。因此, 本文将采用磁场耦合谐振式传输技术对无线直流变压器进行研究。

为了提高输电系统的性能, 需要深入研究无线电能传输的主电路结构、控制策略以及对无线结构模型

收稿日期: 2017-05-01

作者简介: 刘 贤 (1993-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子技术及系统,

E-mail: 549337292@qq.com

的改进。移相全桥变换器的开关管可以实现零电压 (zero voltage switch, ZVS) 开关, 因而开关损耗较小, 有利于开关管的高频化, 并且可以减小变压器的体积, 提高其功率密度^[2-3]。但是, 在轻载或者负载变化较大的情况下, 全桥变换器的滞后桥臂 ZVS 开关的范围较小, 这会导致开关管的损耗增加。若开关管的工作频率较高, 则系统效率会大幅度降低。并且开关管导通瞬间会产生非常大的电流变化率, 这会带来较大的电磁干扰, 使得系统的性能降低。由于 WPT 存在着较大的气隙, 会在功率回路中产生较大的漏感, 常通过加入谐振补偿网络, 利用谐振效应减少原边电流。

由于传统变压器的电能传输方式的安全系数较低、使用不够方便, 因而难以适用于一些特殊的场合, 而采用无线电能传输方式具有方便、可靠、无电火花产生等优点, 因此, 本设计中通过移相全桥的电路进行无线电能传输, 以增加软开关范围, 减少开关电流应力。在该移相全桥闭环控制设计中, 只采用电压单环比例-积分 (proportional integral, PI) 控制, 这虽然可以使 PI 控制设计简化, 但是这种控制方法的响应速度不快^[4]。为了提高系统的响应速度, 本研究在电压闭环控制的基础上引入电流环, 采用电压、电流双闭环控制。同时, 对驱动电路进行了改进, 以便提高驱动的速度。

1 主电路拓扑结构

1.1 传统全桥主电路的拓扑结构

传统全桥直流变换器主电路的拓扑结构^[5]如图 1 所示。

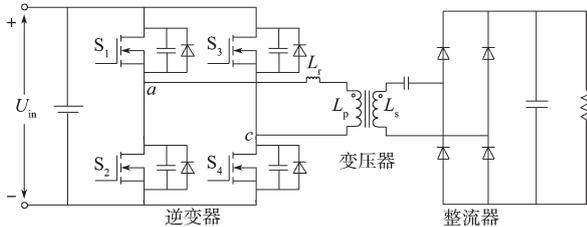


图 1 传统全桥主电路的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of traditional full bridge main circuit

传统全桥直流变换器的整个工作过程如下: 直流电输入通过逆变器逆变成交流电, 一次侧的交流电经过变压器传送到二次侧, 并经整流滤波后给负载进行供电。其中, L_r 是谐振电感, 通常涵盖变压器产生的漏感。开关管通过谐振电感和开关上的二极管和电容实现软开关, 但运行过程中电感容易饱和, 并且绕制工艺要求较高。

1.2 WPT 全桥主电路的拓扑结构

磁耦合谐振式无线电能传输系统主电路的拓扑结构如图 2 所示。

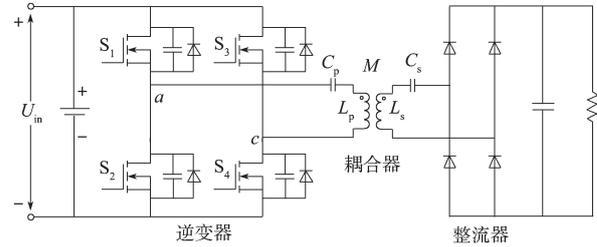


图 2 WPT 主电路的拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of WPT main circuit

如图 2 所示, 磁耦合谐振式变压器将 WPT 系统分为两大部分: 发送端(一次侧)与接收端(二次侧)。发送端主要包括高频逆变器、一次侧补偿电容和磁耦合变压器一次侧。接收端主要包括磁耦合变压器二次侧、二次侧补偿电容、全桥整流电路和负载。这种拓扑结构有以下 3 个优点:

- 1) 输入与输出之间通过磁耦合变压器, 实现了电气隔离与物理隔离, 从而可以减少一次侧与二次侧之间的相互干扰;
- 2) 功率密度和电压利用率较高, 同时开关管承受的电压、电流阈值较小;
- 3) 利用磁耦合变压器的漏感、开关管寄生二极管和电容共同实现开关管的 ZVS 开关。

2 移相控制

2.1 移相全桥控制原理

移相全桥控制策略的基本原理^[6-7]如下: 如图 2 所示, 由 S_1 和 S_3 组合为超前桥臂, 由 S_2 和 S_4 组合为滞后桥臂。上下桥臂的两个开关管之间 180° 互补导通, 但是在现实工况中, 需要设置一定的死区时间, 以防止上下桥臂出现短路现象。同时, S_1 与 S_3 分别超前 S_4 与 S_2 一个相位, 这个相位定义为移相角。可以通过控制移相角的大小控制桥臂电压大小, 进而控制输出电压的大小。

2.2 WPT 的移相双闭环控制

传统的 PI 调节器具有实现容易、鲁棒性强等优点, 因而在实际工程中得到了比较普遍的应用。将 PI 调节器应用于直流变换器中, 可以满足直流输出电压的无静差跟踪。为了满足系统的动态性能指标要求, 在实际系统中引入微分环节, 构成比例积分微分调节器。当系统负载为空载时, 对于传统的移相全桥直流变换器, 相当于是一个欠阻尼的二阶系统, 系统的零点和极点均不固定。在工作过程中, 为了让系统

具有良好的静态性能与动态性能,需要认真匹配PID的参数。

对于传统的移相全桥变换器,大多采用单闭环PI控制,并且以负载的输出电压作为闭环控制量,但是当负载有扰动信号输入时,控制器的动作较慢,响应速度不够灵敏。因此,本研究设计的移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器采用双闭环控制方式。该方式下电压外环以负载输出电压作为控制器的输入量,将负载电压与给定电压相比较,得到输出的误差变量,然后通过PI调节器得到峰值电流的控制量。电压内环以负载输出电流作为控制器的输入量,将负载电流与峰值电流的控制量相比较,得到输出的误差变量,然后通过PI调节器控制变换器的移相角。移相全桥变换器通过引入电流内环,可以提高系统的动态响应速度,实现限流与过流保护,因而能提高系统的响应速度。

3 驱动电路设计

由于TMS320F28335的输出电压为3.3V左右,这一电压值与开关管的驱动电压值不匹配,因而通常需要设计驱动电路以使其兼容。驱动电路的主要作用是放大DSP(digital signal processing)的控制信号,通过对控制电路与主电路进行电气隔离,以提高系统的抗干扰能力。因此,驱动电路的设计直接影响着系统开关速度。

在全桥电路设计中,驱动同一桥臂开关管的控制信号是互补的,以便减少隔离电源驱动信号应用自举类型。因此,本设计中,驱动电路中的驱动芯片采用IR2110^[8],它是由美国国际整流公司制造的一种高速、高压的开关管驱动芯片。该芯片可以进行光电与电磁隔离,并且其结构简单,体积很小,驱动速度较快。但是已有的实验数据表明,这样设计的驱动电路,其开通和关断延时时间较长(其驱动电路波形如图3所示),因而会严重影响开关管的响应速度,对于高频开关电路,还会大幅度增加开关管的损耗,从而降低系统的整体效率。基于这一原因,本研究对驱动电路设计进行了相应改进,采用两级驱动的方式:1)前级。通过TM74HC245芯片,对控制信号的驱动功率进行放大。2)后级。通过TLP152芯片,进行光电与电磁隔离。这种两级结构的控制效果与IR2110芯片一样,但是大大缩短了开通和关断延时时间(其驱动波形如图4所示)。对比图3和图4中的波形曲线可知,该设计提高了控制电路的响应速度。

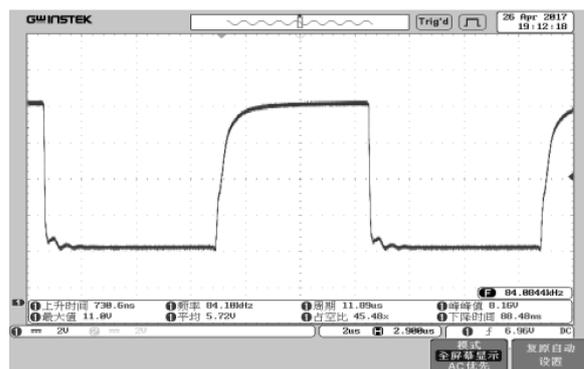


图3 采用IR2110芯片的驱动电路波形

Fig. 3 IR2110 drive waveform

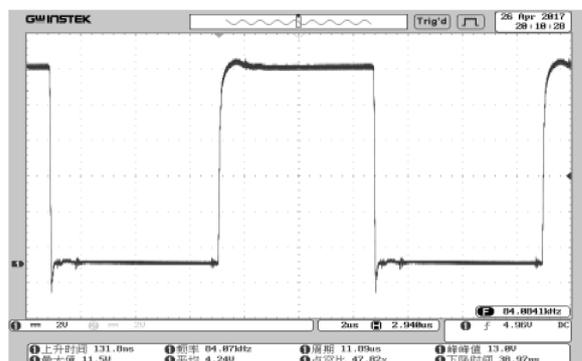


图4 两级式驱动电路波形

Fig. 4 Two-stage drive circuit waveform

4 无线收发模型设计

常用的无线收发结构模型是对称的^[9],但当接收线圈与发送线圈发生错位时,会使得耦合系数发生变化。因此,本文设计的无线收发模型为非对称结构:接收端线圈小于发送端线圈,这使得当接收端线圈在发送端线圈内移动时,耦合系数可以维持恒定。磁耦合变压器线圈的形状为平面螺旋线圈,并将耦合线圈铺设在平板型磁芯上。磁芯具有非常高的导磁率,因而可以增加线圈的电感量、互感强度,提高线圈的品质因数^[10]。本设计中,接收端线圈的形状如图5所示,发送端线圈的形状如图6所示。

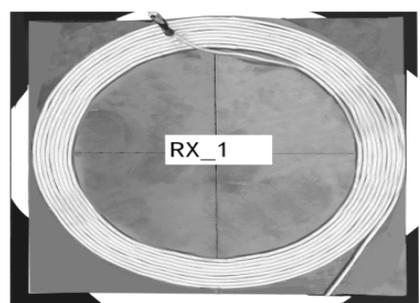


图5 WPT的接收线圈

Fig. 5 WPT receiving coil

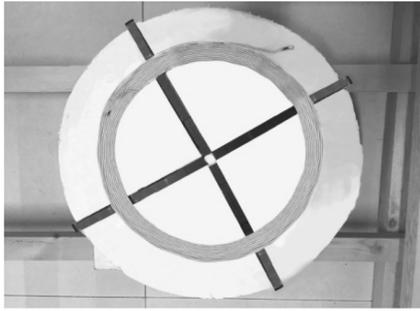


图 6 WPT 的发送线圈

Fig. 6 WPT sending coil

与空芯的耦合线圈平台相比, 搭建这样的两个耦合线圈平台, 不仅提高了空间交变磁场的均匀度, 而且增强了空间磁场的强度, 使得系统具有更远的传输距离、更高的传输效率以及更大的传输功率。

无线收发模型的平台搭建方式如下: 一次侧线圈平放在底层木架上, 二次侧线圈平放在顶层木架

上, 通过改变顶层木架的高度控制两线圈之间的间距。在本设计中, 依照移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器确认负载电阻、传输距离时效率最大化以及工业应用需求, 将发射端与接收端的距离设置为 15 cm 左右。

5 仿真与实验波形分析

5.1 WTP 的仿真波形分析

基于移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的理论分析, 通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的双闭环降压仿真模型 (如图 7 所示), 并利用仿真实验验证理论分析的正确性。本实验设定的仿真参数如下: 开关频率为 85 kHz, 输入电压为 48 V, 输出电压为 24 V, 补偿电容为 120 μ F, 滤波电容为 3 mF, 负载为 20 Ω 。

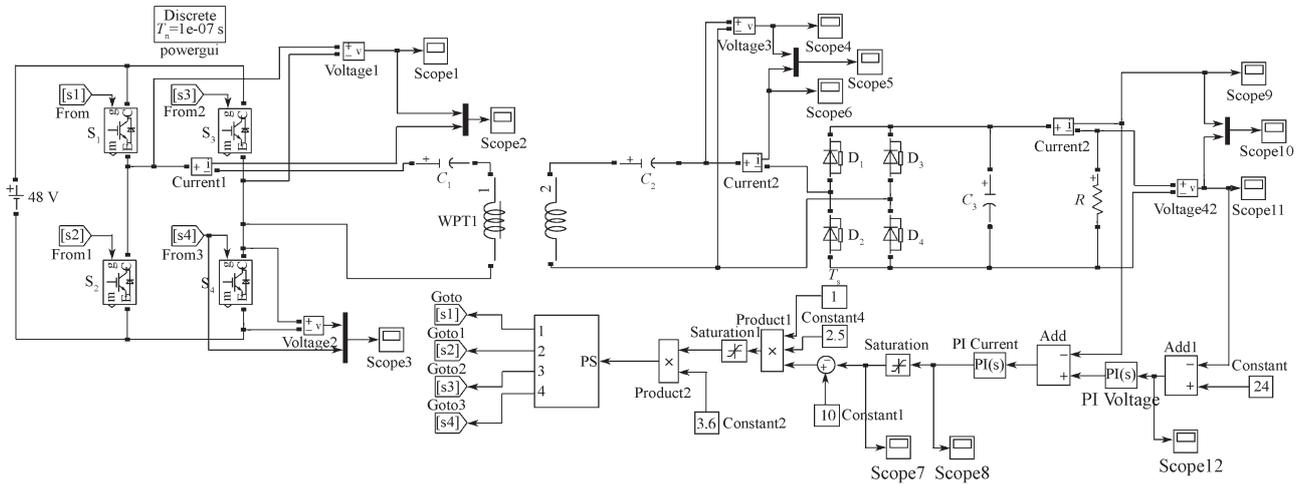


图 7 WPT 的移相全桥仿真模型

Fig. 7 WPT phase-shifting full-bridge simulation model

仿真所得磁耦合变压器一次侧的电压、电流波形如图 8 所示。

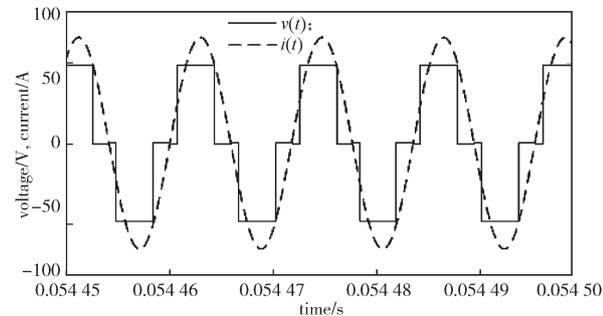


图 8 一次侧电压、电流波形

Fig. 8 Primary voltage current waveforms

由图 8 所示磁耦合变压器一次侧的电压、电流波形可知, 电流是略微滞后于电压的正弦波, 这可能是因为补偿电容与变换器的漏感产生了谐振, 使得电流波形为正弦波。

仿真所得磁耦合变压器的开关管电压 V_s 、驱动电压 V_g (放大 10 倍) 的波形如图 9 所示。

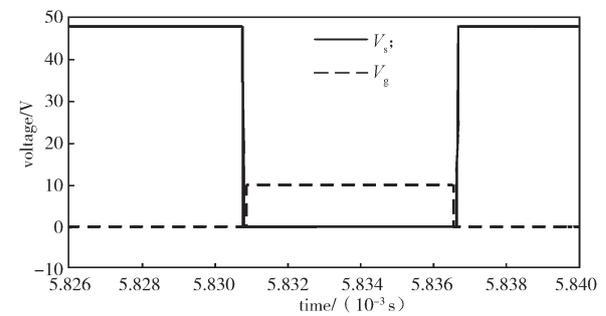


图 9 软开关波形

Fig. 9 Soft switching waveforms

由图 9 所示软开关波形可知, 驱动开关管开通关断之前, 开关管承受的电压为 0。可见, 本文给出的设计可以实现 4 个桥臂的零电压开关, 因而可实现开关管的软开关。

仿真所得移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的电压闭环控制电压输出波形如图 10 所示, 电压、电流双闭环控制电压输出波形如图 11 所示。

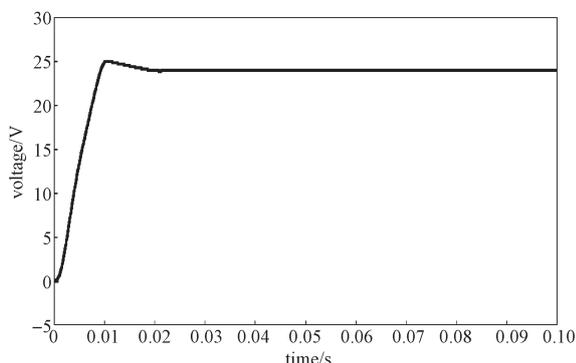


图 10 单闭环电压输出波形

Fig. 10 Single closed loop voltage output waveform

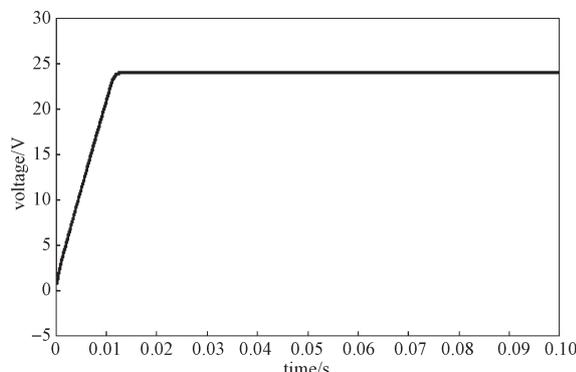


图 11 双闭环电压输出波形

Fig. 11 Double closed-loop voltage output waveform

对比图 10 所示移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的电压闭环控制和图 11 所示电压、电流双闭环控制的电压输出波形可知, 双闭环控制的输出电压过渡过程更加平缓, 这说明电流环的引入明显改善了系统输出的超调量, 提高了系统的响应速度。

5.2 WTP 的实验波形分析

设计了移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的主电路、驱动电路、采样电路以及磁耦合谐振式无线变换器, 如图 12 所示。通过示波器记录重要波形, 并对波形进行分析。所得实验结果证明设计的变换器实现了无线电能的传输, 验证了理论分析的正确性。

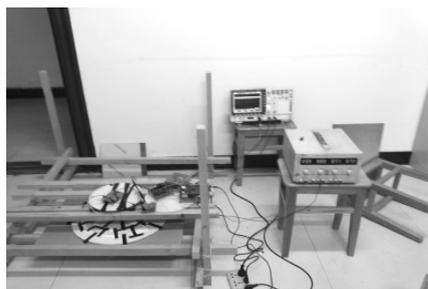


图 12 硬件电路

Fig. 12 Hardware circuit

实验设计产生了两路移相驱动波形, 可以实现 $0\sim 180^\circ$ 的任意移相, 可用来控制全桥变换器斜对角桥臂。本研究以 90° 移相波形为例, 得到其实际移相波形如图 13 所示。

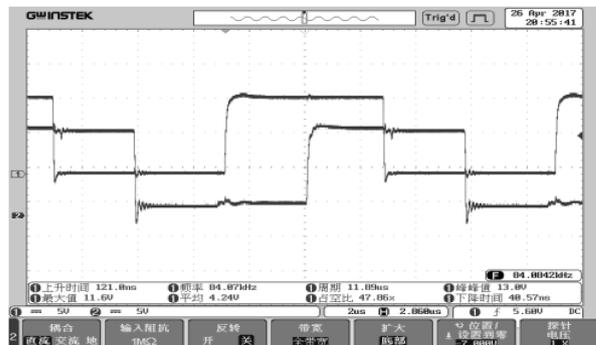


图 13 移相波形

Fig. 13 Phase shift waveforms

磁耦合变压器一次侧的电压波形, 如图 14 所示, 可见其与理论分析波形基本一致。

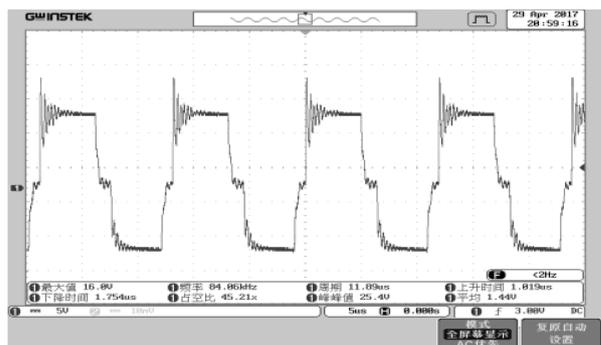


图 14 磁耦合变压器一次侧电压波形

Fig. 14 Primary voltage waveform of magnetic coupling transformer

6 结语

本文介绍了移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器的拓扑结构, 并采用无线变压器实现了输入、输出的完全隔离。利用 Matlab/Simulink 仿真软件对本文给出的移相全桥磁耦合谐振式无线直流变换器进行了仿真实验, 验证了双闭环控制的优越性, 并实现了开关管的软开关。通过对驱动电路和无线线圈结构的改进, 应用实物平台进行实验, 验证了本文设计方案的合理性和正确性, 并且该设计能减少开关管的损耗, 提高系统的响应速度。

本设计可以解决传统输电方式的缺点和不足, 提高电能传输的安全性, 适用于更多的用电场合。为了进一步提高无线电能传输的多样性, 可以采用双主动拓扑结构实现能量的双向流动。

参考文献:

- [1] SHOKI H. Issues and Initiatives for Practical Use of Wireless Power Transmission Technologies in Japan[C]//IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS). Kyoto: IEEE, 2011: 87-90.
- [2] PAHLEVANINEZHAD M, PAN S Z, JAIN P. A ZVS Phase-Shift Full-Bridge DC/DC Converter with Optimized Reactive Current Used for Electric Vehicles[C]//Industrial Electronics Society, IECON-39th Annual Conference of the IEEE. Vienna: IEEE, 2013: 4546-4551.
- [3] 张文鼎, 肖强晖, 廖无限. 用于 EPS 的 12 V/48 V 开关电源变换器研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29 (1): 70-75.
ZHANG Wending, XIAO Qianghui, LIAO Wuxian. Research of 12 V/48 V Soft Switching Power Converter for EPS[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(1): 70-75.
- [4] 冷志伟, 陈希有. 基于 TMS320F28335 的移相全桥 ZVS DC / DC 变换器 [J]. 电气自动化, 2012, 34 (3): 60-62.
LENG Zhiwei, CHEN Xiyou. A Phase-Shifted Full-Bridge ZVS DC/DC Converter Based on TMS320F28335[J]. Electrical Automation, 2012, 34 (3): 60-62.
- [5] 尹 路, 易吉良, 张 宝, 等. 基于 IGBT 全桥式逆变焊机主电路的设计与仿真 [J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(1): 26-31.
YIN Lu, YI Jiliang, ZHANG Bao, et al. Design and Simulation of Main Circuit for IGBT-Based Full-Bridge Inverter Welding Machine[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(1): 26-31.
- [6] YADAV G N B, NARASAMMA N L. An Active Soft Switched Phase-Shifted Full-Bridge DC-DC Converter: Analysis, Modeling, Design, and Implementation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 4538-4550.
- [7] LAI Y S, SU Z J, CHANG Y T. Novel Phase-Shift Control Technique for Full-Bridge Converter to Reduce Thermal Imbalance Under Light-Load Condition[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1651-1659.
- [8] 颜香梅. 磁耦合谐振式无线电能传输输出稳压控制策略的研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
YAN Xiangmei. Study on Control Strategy of Output Voltage Regulation for Magnetically Harmonic-Type Radio Energy Transmission[D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [9] 卢闻州, 沈锦飞, 方楚良. 磁耦合谐振式无线电能传输电动汽车充电系统研究 [J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9): 46-54.
LU Wenzhou, SHEN Jinfei, FANG Chuliang. Study of Magnetically-Coupled Resonant Wireless Power Transfer Electric Car Charging System[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20 (9): 46-54.
- [10] 吕 超. 磁耦合无线能量传输系统的线圈优化设计 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LÜ Chao. Electrode Optimization Design of Magnetic Energy Wireless Transmission System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

(责任编辑: 廖友媛)