

文章编号:1000-582X(2010)08-012-05

非接触电能传输系统双模控制式交直交变换器

苏玉刚,王小飞,唐春森,王智慧,孙 跃

(重庆大学 自动化学院,重庆 400044)

摘 要:针对传统非接触电能传输系统中初级回路主电路的不足,提出了一种可工作于 Buck 和 Boost 2 种控制模式的新型交直交变换器,该变换器不仅有效地解决了传统非接触电能传输系统中大容量滤波电容和 DC/DC 调压环节所引起的电流冲击、成本高、控制复杂等问题,而且通过 2 种模式的切换和其对应的开关管占空比的调节可实现输入电压大范围波动时的谐振电流恒幅控制。分析了该变换器的拓扑结构和工作原理,阐述了变换器在 2 种模式下的切换控制策略,并给出了仿真验证结果。

关键词:Buck-Boost;非接触电能传输;电流恒幅控制;交直交变换器

中图分类号: TM131.1

文献标志码:A

Dual-mode AC-DC-AC converter for contactless power transfer system

SU Yu-gang, WANG Xiao-fei, TANG Chun-sen, WANG Zhi-hui, SUN Yue

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A new type AC-DC-AC converter which can work in Buck or Boost mode is proposed in order to overcome the deficiencies of the primary circuit of the traditional contactless power transfer system. Through switching this two modes and turning the duty cycles of the switches, not only the resonant current amplitude of the primary resonant current can be controlled to be constant against a wide range variation of input voltage, but also the problems, such as surge current, high cost, complex control etc., caused by the DC filter and DC/DC converter in a traditional CPT system are effectively eliminated. The topology and operation principle of the proposed converter have been analyzed. The corresponding control strategy has been presented and verified by simulation results.

Key words: Buck-Boost; contactless power transfer; current constant amplitude control; AC-DC-AC converter

非接触电能传输(CPT)技术是一种新型电能传输模式,它综合应用电力电子技术、磁场耦合技术和现代控制理论等,通过初级回路和次级回路线圈间的磁场耦合实现电能从电源系统以非电气直接接触的方式向一个或多个用电设备(包括可移动用电设备)传输电能^[1-3]。目前,国内外越来越多学者和公司开始关注非接触电能传输技术^[4-9]。

在多负载模式下,为了减小负载相互之间的耦合影响,将 CPT 系统初级谐振电流调制为恒频恒幅的高频交流电是一个有效的措施,也是 CPT 系统的一个研究重点^[10-13]。

CPT 系统由初级回路和次级回路 2 部分组成,图 1 所示为使用传统 AC-DC-AC 变换器的 CPT 系统结构框图。由图 1 可以看出,传统 CPT 系统的

收稿日期:2010-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50777071,50807057);重庆市科委科技攻关项目(CSTC,2008AC3089)

作者简介:苏玉刚(1962-),男,重庆大学教授,主要从事电力电子与智能控制技术和无线电能传输技术方向研究,
(Tel)023-65112750;(E-mail)yugangsu@gmail.com。

初、次级回路均是通过 DC/DC 环节实现对传输功率的调节,这种结构存在以下 2 个缺点^[12-14]:

1)DC/DC 环节前后的滤波电容,体积大、价格高、寿命有限,随着功率的增加,电容体积也相应增加。

2)当系统功率较大时,整流后的滤波电容还需增加软启动电路以减小冲击电流,增加了系统的体积、成本和控制难度。

针对传统 CPT 系统主电路拓扑及其控制方式 2 方面进行改进,提出了一种新型 AC-DC-AC 电路拓扑。该拓扑一方面去掉了传统拓扑中的直流滤波电容,从而消除了电路启动过程的冲击电流;另一方面,该变换器可工作于 Buck 和 Boost 模式,通过控制两种模式的切换和其对应的开关管占空比的调节可实现输入电压大范围波动时的谐振电流恒幅控制^[15]。阐述了该变换器的工作原理,分析了不同模式下占空比与谐振电流峰值的关系,给出了系统 2 种模式下的切换控制策略,并进行了仿真验证。

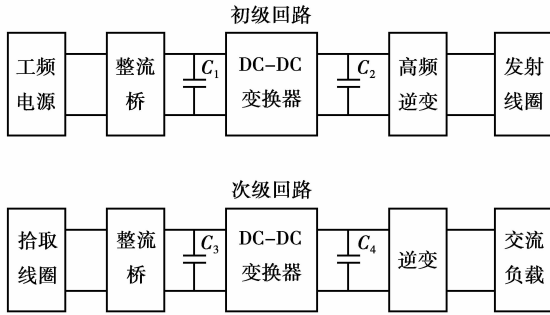


图 1 传统 CPT 系统结构框图

1 基于 Buck-Boost 控制模式的 AC-DC-AC 变换器

图 2 所示为采用基于 Buck-Boost 2 种控制模式的 AC-DC-AC 变换器拓扑。电路由工频电源 v_{ac} 、整流桥(由 $D_1 \sim D_4$ 组成)、Buck 环节(由 S_5 、 D_5 、 L_d 组成)、逆变桥(由 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 D_6 、 D_7 组成)和并联谐振网络(由 L_p 和 C_p 组成, R_p 为谐振电感 L_p 的等效电阻)构成。输入为工频电源 v_{ac} ,谐振网络中 L_p 上的高频电流为输出量。

在输入电压较高的情况下,变换器工作于 Buck 模式,由 S_5 、 D_5 和 L_d 构成 Buck 环节,逆变桥开关管在谐振电容 C_p 两端电压过零点切换。在输入电压较低的情况下, S_5 直通, L_d 和逆变桥中由 S_1 和 S_3 组成的桥臂构成 Boost 环节,这时变换器工作在 Boost 模式。当系统工作在 Boost 模式时,由于同一

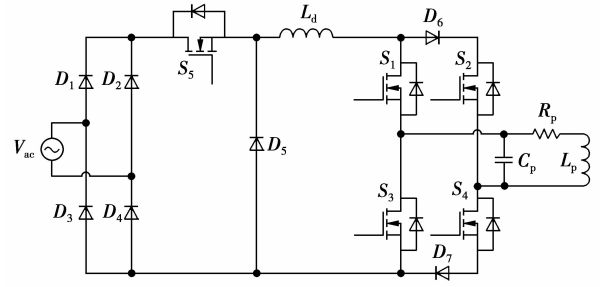


图 2 基于 Buck-Boost 的 AC-DC-AC 变换器

桥臂出现直通现象,因此谐振电路中的电流将会通过保护二极管以及直通开关管反馈到谐振电路中,从而出现电流的串扰现象,为了防止电流的串扰,因此电路中设置了二极管 D_6 和 D_7 。

该变换器通过 Buck 和 Boost 2 种模式之间切换和对 2 种工作模式占空比的控制,可实现对发射线圈 L_p 上的谐振电流幅值的控制,从而实现对系统传输功率的灵活调节。

2 变换器工作模态及建模分析

Buck 和 Boost 模式下系统等效电路分别如图 3、4 所示,下面通过对变换器工作模态的分析来阐述变换器的工作原理。

定义 Buck 模式和 Boost 模式下的占空比均为 d ,则有

$$d = \frac{T_{on}}{T}, \quad (1)$$

式中 T_{on} 对于 Buck 模式是指 S_5 的开通时间,对于 Boost 模式是指同一桥臂直通时间。 T 为控制周期,也是谐振回路的谐振周期。

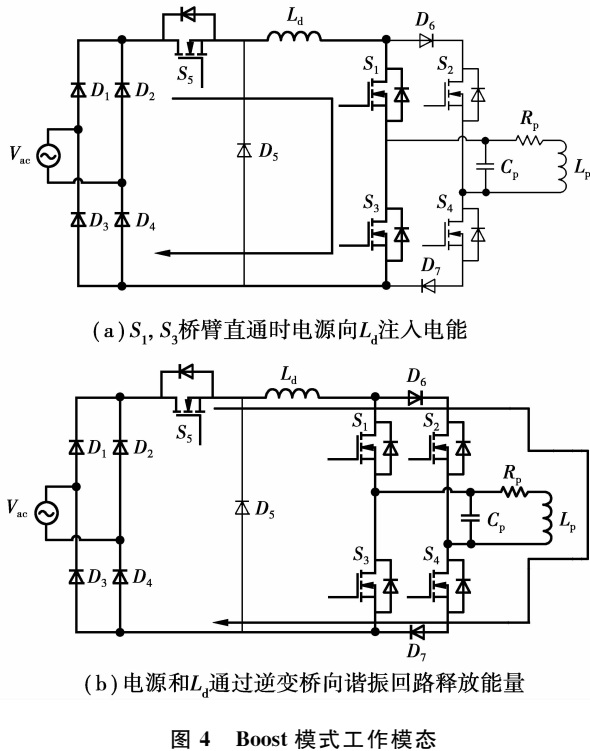
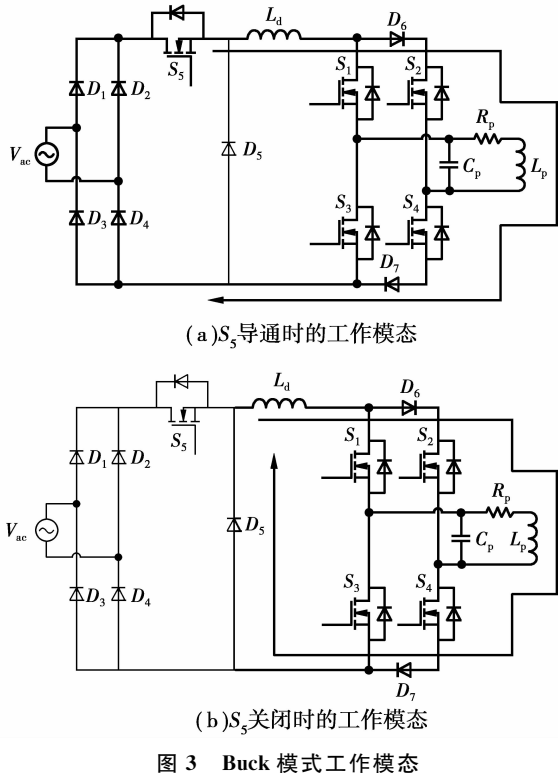
图 2 所示电路拓扑的 Buck 工作模式如图 3 中的(a)和(b)所示。图 3(a)为 S_5 导通时的工作模态,工频电源经整流后向电感 L_d 和负载注入电能,图 3(b)为 S_5 关断时的工作模态,电感 L_d 通过 D_5 续流向逆变网络释放能量。

在 Buck 模式下,谐振电流峰值 \hat{I}_p 与 S_5 占空比 d 、输入电压的解析函数关系可表示为

$$\hat{I}_p = \frac{d\pi v_{ac} \sin\omega_0 t}{2|j\omega L_p + R_p + Z_r|}, \quad (2)$$

式中 ω_0 为输入电压角频率, Z_r 为 CPT 系统次级回路在初级回路的等效反射阻抗。

图 4 所示为变换器工作于 Boost 模式的模态示意图,此模式下,开关管 S_5 处于维持导通状态。图 4(a)是当逆变桥 S_1 、 S_3 桥臂直通时电源向 L_d 注入电能,而图 4(b)是电源和 L_d 通过逆变桥向谐振回



路释放能量。

在 Boost 模式下, 谐振电流峰值 \hat{I}_p 与桥臂直通占空比、输入电压的解析函数关系可表示为

$$\hat{I}_p = \frac{\pi v_{ac} \sin \omega_0 t}{2 |j\omega L_p + R_p + Z_r| \cos \frac{d\pi}{2}} \quad (3)$$

3 控制策略

控制系统主要根据输入电压 v_{ac} 瞬时值、谐振电流 I_p 峰值和谐振电压 v_{cp} 过零信号进行 Buck 和 Boost 模式切换、占空比调节以及逆变桥控制等。变换器控制结构框图如图 5 所示, I_p 经采样电路后进行微分运算, 微分运算输出过零时, 即为谐振电感电流达到峰值的时刻。控制器根据 v_{ac} 和 \hat{I}_p 采样确定变换器工作模式及其占空比, 根据 v_{cp} 过零信号确定开关管触发时间。

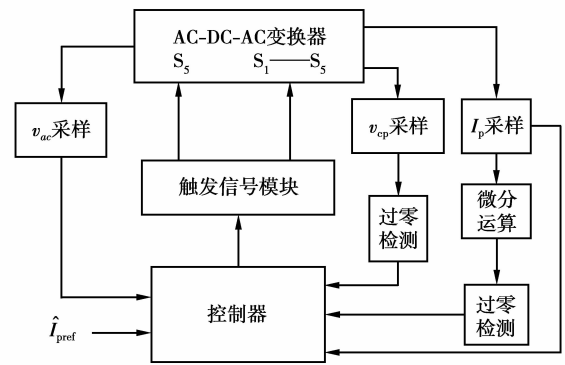


图 6 所示为系统控制流程图, 在系统启动时, 控制器根据采样所得的输入电压值和谐振电感电流峰值, 由式(2)、(3)得出系统初始工作模式和初始占空比, 为了减小谐振网络的谐波含量, 这里限制 Boost 模式占空比上限值为 d_{max} 。以符号 ξ 表示变换器的工作模式, 如式(4)所示

$$\begin{cases} \xi = 1, \text{Boost 模式;} \\ \xi = 0, \text{Buck 模式。} \end{cases} \quad (4)$$

如图 6 所示, 在 Buck 模式下, 当谐振电流峰值 \hat{I}_p 大于参考值 \hat{I}_{pref} 时, 控制器减小 S_5 的占空比, 直至 S_5 完全关断让系统处于无能量注入状态, 从而减小谐振电流。当谐振电流峰值 \hat{I}_p 小于参考值 \hat{I}_{pref} 时, 控制器增大 S_5 的占空比, 直至 S_5 直通。如果此时谐振电流峰值还小于参考值, 则系统进入 Boost 工作模式。

同理, 在 Boost 模式下, 在其占空比减小至零, 而谐振电流还大于参考电流时, 系统将进入 Buck 工作模式。根据电流幅值的波动要求, 结合式(2)、(3)可以得出电流控制过程中的占空比变化值 Δd 的取值。

图 7 所示为输入电压为 110 V, 控制谐振电流峰值为 20 A 时, 在输入电源的半个周期内, Buck-

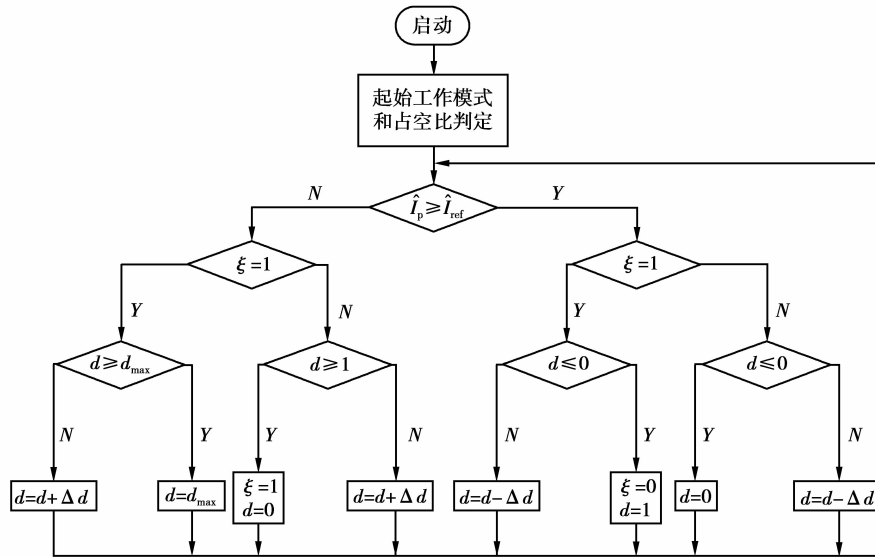


图 6 系统控制流程图

Boost 2 种控制模式的切换以及占空比 d 随时间的变化曲线。从图 7 中可以看出, t_1 和 t_2 为 Buck-Boost 2 种模式的切换时刻。

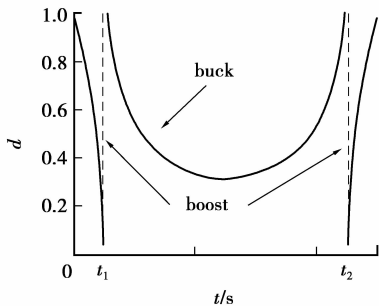


图 7 buck-boost 2 种模式及占空比变化曲线

图 9 所示。图 8 所示为流过谐振线圈 L_p 的电流波形, 仿真时间为 20 ms, 正好是输入工频电源 v_{ac} 的 1 个周期。从图 8 中可以看出, 电流波形的峰值在 20 A 附近基本得到稳定, 虽然在输入电源过零时, 由于无输入能量而导致谐振电流存在沉坑, 但此沉坑并不影响系统功率的传输。

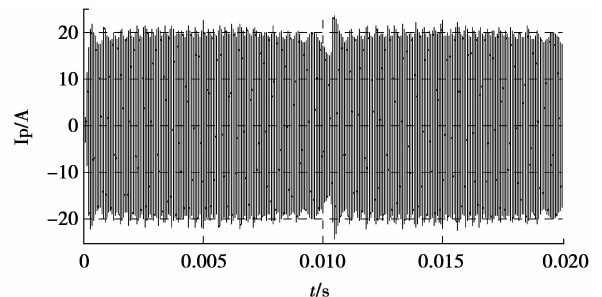


图 8 发射线圈 L_p 谐振电流波形

4 仿真验证

表 1 仿真系统主要参数取值

参数	取值
输入电压 v_{ac}/V	110
直流电感 $L_d/\mu H$	500
谐振电感 $L_p/\mu H$	31.6
谐振电容 $C_p/\mu F$	2
谐振电感等效电阻 R_p/Ω	0.1

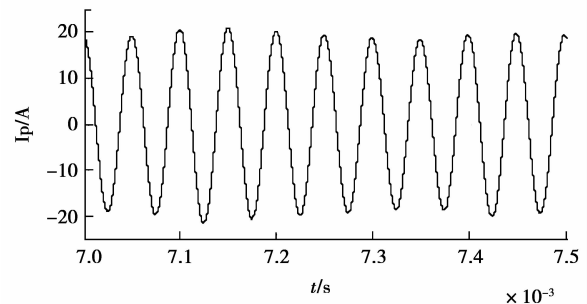


图 9 发射线圈 L_p 电流波形局部展开图

采用 MATLAB 软件对图 2 所示电路搭建仿真模型, 根据表 1 所示参数进行仿真, 结果如图 8 和

图 9 为该电流的局部展开图, 由图 9 可以看出谐振电流波形为畸变较小的准正弦波形式。

5 结 论

针对传统非接触电能传输系统主电路结构存在的缺陷,提出了一种可工作于 Buck 和 Boost 2 种模式的新型 AC-DC-AC 高频变换器,实现了在输入电压大范围波动情况下对初级回路发射线圈上谐振电流的恒幅控制。详细分析了变换器的控制策略,并在理论分析的基础上设计了仿真系统,通过仿真验证了该控制策略的可行性。

所提出的新型高频变换拓扑去掉了传统 CPT 系统初级回路的直流滤波电容和 DC/DC 调压环节,减小了系统体积,降低了系统成本,可用于替代传统 CPT 系统初级回路的 AC-DC-AC 变换器,也可推广应用与其他类似需要高频变换的场合。

参考文献:

- [1] LI H L, HU A P, COVIC G A, et al. Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(1): 76-77.
- [2] COVIC G A, BOYS J T, KISSIN M L, et al. A three-phase inductive power transfer system for roadway-powered vehicles[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(6): 3370-3378.
- [3] SEKITANI T, TAKAMIYA M, NOGUCHI Y, et al. A large-area wireless power-transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches [J]. *Nature Materials*, 2007, 6(6): 413-417.
- [4] CHEN Q H, WONG S C, TSE C K, et al. Analysis, design and control of a transcutaneous power regulator for artificial hearts [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 3(1):23-31.
- [5] 周雯琪,马皓,何湘宁. 基于动态方程的电流源感应耦合电能传输电路的频率分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(3): 119-124.
ZHOU WEN-QI, MA HAO, HE XIANG-NING. Frequency analysis of a current source inductively coupled power transfer system based on dynamic circuit equations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(3): 119-124.
- [6] MIURA H, ARAI S, KAKUBARI Y, et al. Improvement of the transcutaneous energy transmission system utilizing ferrite cored coils for artificial hearts [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 3578-3580.
- [7] TANG C S, SUN Y, SU Y G, et al. Determining multiple steady-state ZCS operating points of a switch-mode contactless power transfer system [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(2): 416-425.
- [8] LIU X, HUI S Y R. Optimal design of a hybrid winding structure for planar contactless battery charging platform [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2008, 23(1): 455-463.
- [9] 武瑛,严陆光,徐善刚. 新型无接触电能传输系统的稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2004(5): 63-66.
WU YING, YAN LU GUANG, XU SHAN-GANG. Stability analysis of the new contactless power delivery system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004(5):63-66.
- [10] 苏玉刚,唐春森,孙跃,等. 非接触供电系统多负载自适应技术[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(1):153-157.
SU YU-GANG, SUN YUE, TANG CHUN-SEN, et al. Load adaptive technology of contactless power transfer system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(1): 153-157.
- [11] HAO L L, AIGUO P H et al. Development of a direct AC-AC converter based on a DSPACE platform [J]. *International Conference on Power System Technology*, 2006, 28(3):28-32.
- [12] HU A P, CHEN Z J, HUSSMANN S, et al. A dynamically on-off controlled resonant converter designed for coalmining battery charging applications [C] // *Proceedings of PowerCon 2002. International Conference on Power System Technology. USA: IEEE*, 2002:1039-10442.
- [13] 孙跃,陈国东,戴欣,等. 非接触电能传输系统恒流控制策略[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(7):766-769.
SUN YUE, CHEN GUO-DONG, DAI XIN, et al. A constant current control method for contactless power transmission systems [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(7):766-769.
- [14] DON A G P, ANDREW D B, et al. A contactless electrical energy transmission system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1999, 46(1): 23-30.
- [15] 苏玉刚,王智慧,孙跃,等. 非接触供电移相控制系统建模研究[J]. *电工技术学报*, 2008, 23(7): 92-97.
SU YU-GANG, WANG ZHI-HUI, SUN YUE, et al. Modeling of contactless power transfer systems with a phase-shifted control method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2005, 23(7):92-97.

(编辑 侯 湘)