

一种隔离型有源箝位交错并联 Boost 软开关变换器

吕晓东, 李武华, 吴建德, 何湘宁

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

An Isolated Active-clamp Interleaved Boost Converter

LÜ Xiao-dong, LI Wu-hua, WU Jian-de, HE Xiang-ning

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: A primary-parallel-secondary-parallel (PPSP) interleaved structure is employed to handle the large input current and to reduce the current ripple. Only a set of active-clamp circuit composed of a switch and a small capacitor is necessary to recycle the leakage energy of the coupled-Inductors and to suppress the turn-off voltage spikes. Both the main switches and the active-clamp switch are ZVT soft switching performance during the whole switching transition. Meanwhile, the output diode reverse-recovery problem is alleviated dramatically by the leakage inductance of the coupled inductors. So the reverse-recovery losses are reduced and the EMI noise is suppressed. A prototype with 40 V to 380 V rated at 1 kW has been built to verify the effectiveness of the proposed circuit.

KEY WORDS: interleaved boost converter; active-clamp; ZVT soft switching

摘要: 采用原边并联/副边并联的交错结构, 提出了一种新型的隔离型有源箝位交错并联 Boost 软开关变换器。耦合电感的漏感限制了输出二极管关断电流的下降速率, 抑止了输出二极管的反向恢复, 大大减小了反向恢复电流引起的损耗。由有源开关和箝位电容组成的箝位电路吸收并无损的转移了漏感能量, 消除了主开关管上的电压尖峰, 而两相交错并联电路只需要一组箝位电路, 大大简化了电路结构。在整个开关周期内, 主开关管和辅助开关管都是零电压软开关动作, 大大减小了开关损耗。最后, 设计了一台 40 V 输入、380 V 输出的 1 kW 试验样机。试验结果表明, 所有的功率器件均为软开关工作。

关键词: 交错并联 Boost 变换器; 有源箝位; 零电压软开关

0 引言

太阳能和燃料电池等新能源由于其无污染、绿色环保而得到越来越广泛的应用^[1-3]。太阳能和燃料

电池等新能源的输出电压一般都较低, 而且变换范围较宽, 一般需要一级DC/DC升压调整电路才适合后级逆变使用^[4-7]。为了安全起见, 前级DC/DC变换器采用隔离型Boost变换器是一个较合适的选择。然而, 现有的隔离型Boost变换器一般都是硬开关工作状态^[8], 开关损耗较大, 而且变压器的漏感能量会引起较大的关断电压尖峰, 造成严重的EMI噪声和增加开关管的电压应力。近年来国内外学者提出了很多软开关解决方案^[9-13], 但是电路一般较复杂, 控制相对困难。为了减小输入、输出电流纹波, 提高系统的功率等级, 便于自然均流和热分配, 图1所示的隔离型原边并联/副边并联的交错结构得到越来越广泛的应用^[14-18]。

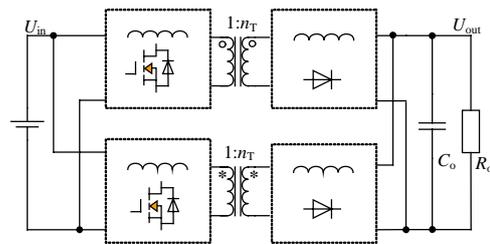


图1 隔离型原边并联/副边并联交错结构

Fig. 1 Isolated primary-parallel-secondary-parallel (PPSP) structure for high power applications

本文在原边并联/副边并联交错结构的基础上, 提出了一种新型的隔离型有源箝位交错并联 Boost 软开关变换器, 该变换器的所有功率开关管在整个开关周期内都处于软开关工作状态, 大大减小了开关损耗, 提高了变换器效率。只需要一组箝位电路就实现了两相交错并联电路的漏感能量的无损吸收和开关管关断电压尖峰的抑制, 简化了电路, 提高了系统的功率密度。耦合电感的漏感限制了输出二极管关断电流的下降速率, 抑止了二极管的反向恢复, 大大减小了反向恢复电流引起的损耗。

基金项目: 教育部博士点基金项目(20050335059); 浙江省科技计划项目(2007C21005)。

1 工作原理

新型的隔离型有源箝位交错并联Boost软开关变换器如图2所示。图中 L_{1a} 、 L_{1b} 和 L_{1c} 为一组耦合电感， L_{2a} 、 L_{2b} 和 L_{2c} 为另一组耦合电感， L_{1b} 、 L_{1c} 、 L_{2b} 和 L_{2c} 的匝数均为 n_2 ； L_{1a} 和 L_{2a} 的匝数为 n_1 。同名端如图1中“o”和“*”标号所示。由 S_c 和 C_c 组成的箝位电路无损转移了两组耦合电感中的漏感能量，消除了主开关管 S_1 和 S_2 上关断时的电压尖峰。

耦合电感的模型可以由励磁电感、理想变压器再串上漏感组成。本文所提拓扑的等效电路如图3所示。其中， L_{m1} 、 L_{m2} 为耦合电感的励磁电感； L_{Lk1} 、 L_{Lk2} 为耦合电感的等效漏感； S_1 和 S_2 为主开关管； C_{s1} 、 C_{s2} 为开关管上的并联电容； C_c 为箝位电容； S_c 为辅助开关管； D_{o1} 和 D_{o2} 为输出二极管；耦合电感的匝比定义为 $N=n_2:n_1$ 。

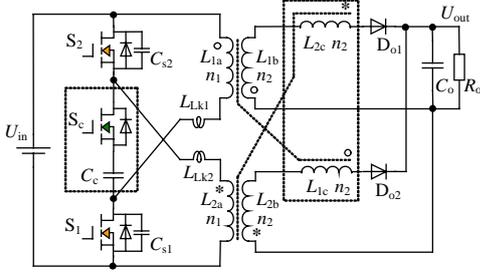


图2 隔离型有源箝位交错并联 Boost 软开关变换器
Fig. 2 Proposed isolated active-clamp ZVT interleaved Boost converter

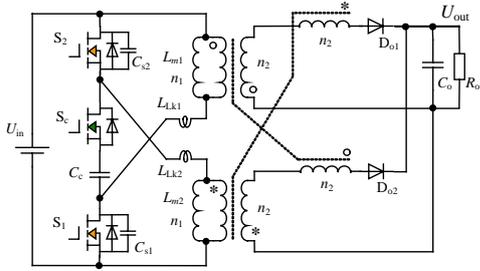


图3 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of the proposed converter

一个开关周期内共有16个工作模式，由于电路结构的对称性，这里只分析其中8个模式。电路的静态工作波形如图4所示。图5为每个阶段的等效电路图。具体工作过程分析如下：

1) 工作模式1 (t_0-t_1): 主开关管 S_1 和 S_2 处于导通，辅助开关管 S_c 处于关断，输出二极管 D_{o1} 和 D_{o2} 处于反向截止状态，励磁电感 L_{m1} 和 L_{m2} 上电流在输入电压作用下线形上升，上升率为

$$\frac{di_{L_{m1}}}{dt} = \frac{U_{in}}{L_{m1} + L_{Lk1}} \quad (1)$$

$$\frac{di_{L_{m2}}}{dt} = \frac{U_{in}}{L_{m2} + L_{Lk2}} \quad (2)$$

2) 工作模式2 (t_1-t_2): t_1 时刻，主开关管 S_1 关断，由于开关管上外并电容 C_{s1} 的作用，主开关管 S_1 实现零电压关断。 S_1 上的电压线性上升，上升率为

$$\frac{du_{ds1}}{dt} = \frac{I_{L_{m1}}(t_1)}{C_{s1}} \quad (3)$$

3) 工作模式3 (t_2-t_3): t_2 时刻，辅助开关管 S_c 上的电压下降到零， S_c 的体内反并二极管开始导通。励磁电感 L_{m1} 上的电流对箝位电容 C_c 充电，主开关管 S_1 上的电压继续线性增加，由于 $C_c \gg C_{s1}$ ，主开关管 S_1 上电压上升率可近似为

$$\frac{du_{ds1}}{dt} \approx \frac{I_{L_{m1}}(t_2)}{C_c} \quad (4)$$

4) 工作模式4 (t_3-t_4): t_3 时刻，箝位电容 C_c 上的电压上升到一定值，使得输出二极管 D_{o1} 正向导通，变换器开始向负载传递能量。漏感 L_{Lk1} 和箝位电容 C_c 发生谐振，漏感 L_{Lk1} 上能量向开始向箝位电容 C_c 转移。

5) 工作模式5 (t_4-t_5): t_4 时刻，辅助开关管 S_c 开通，由于 S_c 的反并二极管已经导通，因此 S_c 零电压开通。 S_c 的导通并不影响主开关管工作。本模式的等效电路与模式4类似。箝位电容 C_c 上的电流由于 L_{Lk1} 和 C_c 的谐振而改变方向，直接向负载传递能量。

6) 工作模式6 (t_5-t_6): t_5 时刻，辅助开关管 S_c 关断，由于主开关管上的并联电容 C_{s1} 的作用， S_c 零电压关断，箝位电容 C_c 退出工作，漏感 L_{Lk1} 和 C_{s1} 形成新的谐振电路。 C_{s1} 上的能量逐渐被抽走。

7) 工作模式7 (t_6-t_7): t_6 时刻，开关 S_1 上的电压下降到零， S_1 的反并二极管导通。漏感 L_{Lk1} 上电流在电压 U_{out}/N 作用下线形下降。输出二极管的 D_{o1} 关断电流的下降速率。开关管 S_1 实现零电压开通，同时也抑制了输出二极管的反向恢复。

$$\frac{di_{D_{o1}}(t)}{dt} \approx \frac{U_{out}}{N^2 \cdot L_{Lk1}} \quad (5)$$

8) 工作模式8 (t_7-t_8): t_7 时刻，主开关管 S_1 的电流下降到零并开始正向导通，输出二极管 D_{o1} 上的电流随着漏感 L_{Lk1} 上电流上升而下降。 t_8 时刻，漏感 L_{Lk1} 上电流等于励磁电感上的电流，输出二极管 D_{o1} 上的电流下降到零， D_{o1} 关断。输入电压对励磁电感和漏感充电。

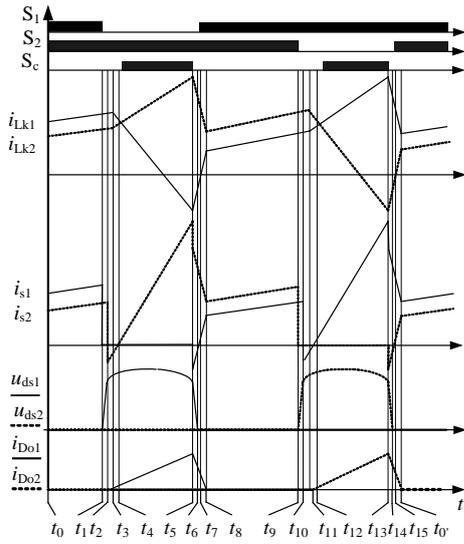


图 4 主要工作波形

Fig. 4 Key waveforms of the proposed converter

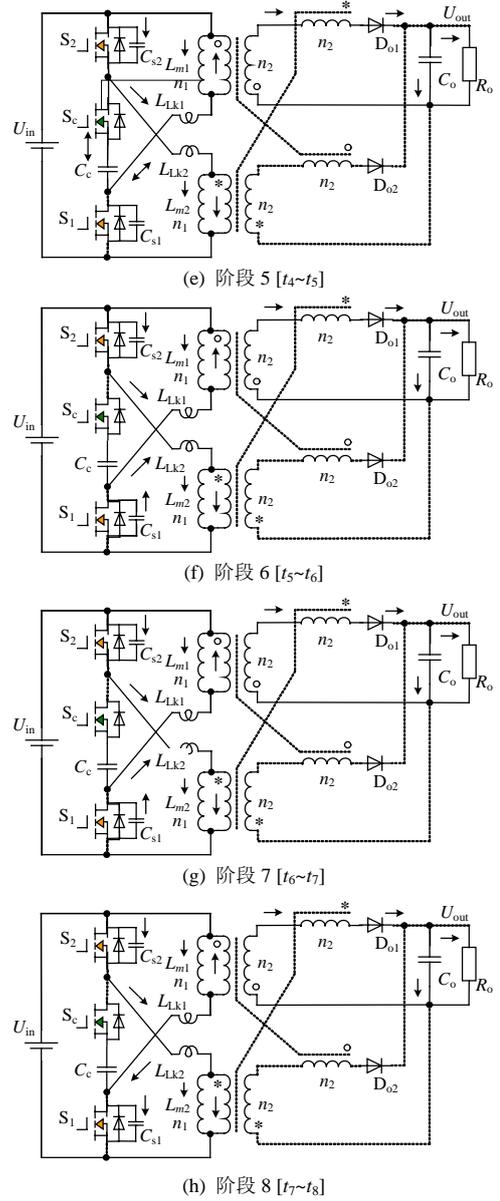
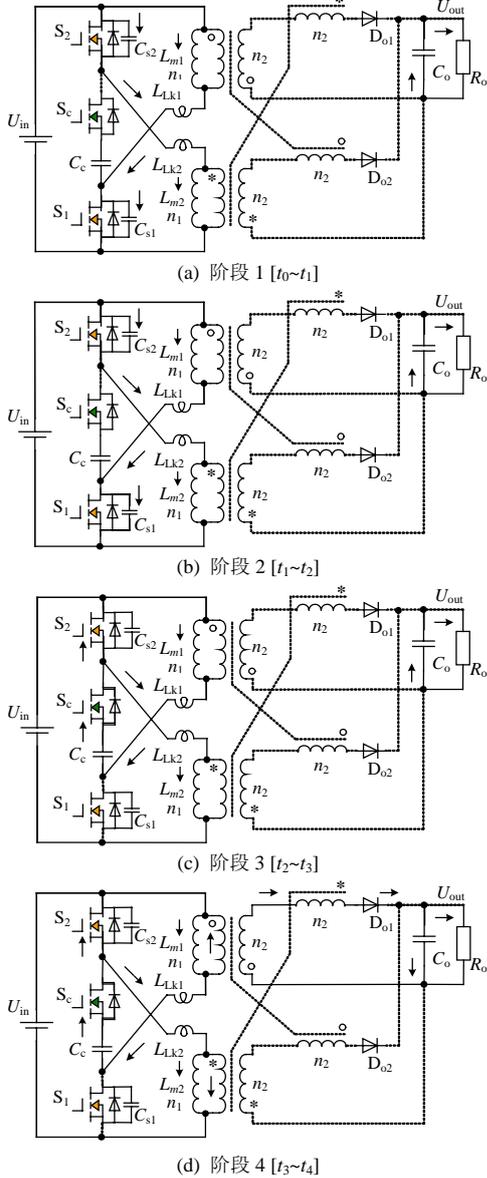


图 5 变换器的各阶段等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit for each stage of the converter

由于电路的对称性，接下来的工作模式与前面分析类似，这里不再赘述。

2 电路特性讨论

2.1 输出增益表达式

为了简化分析，假定耦合电感的励磁电感 $L_{m1}=L_{m2}$ ，耦合电感的漏感 $L_{Lk1}=L_{Lk2}=0$ 。由前面的静态工作分析可知，在主开关管导通时，励磁电感电流在输入电压作用下线形上升；在主开关管关断时，相应励磁电感电流在电压 $(U_{out}/N-U_{in})$ 作用下线形下降。对励磁电感采用伏-秒平衡原理，输出电压增益表达式为

$$M = U_{out} / U_{in} = N / (1 - D) \quad (6)$$

式中: N 为耦合电感的匝比; D 为变换器的占空比。

从式(6)可以看出, 该变换器具有 Boost 特性, 相对较适用于升压场合。

2.2 功率器件电压应力

假定箝位电容足够大, 主开关管的关断电压纹波忽略不计, 主开关管的电压应力为

$$U_{\text{stress_main}} = \frac{U_{\text{in}}}{1-D} \quad (7)$$

主开关管的电压应力由输入电压和占空比决定, 辅助开关管的电压应力等于主开关管的电压应力。

输出二极管的电压应力为

$$U_d = 2U_{\text{out}} \quad (8)$$

输出二极管的应力等于输出电压的 2 倍, 由于反向恢复被抑止和电流应力很小, 输出二极管的开关损耗较小。

2.3 ZVT 软开关性能

由于辅助有源箝位电路的引入, 在整个开关周期内, 主开关管和辅助开关管都是零电压软开关动作, 大大减小了开关损耗。输出二极管关断电流的下降速率为

$$\frac{di_{D_o}(t)}{dt} = \frac{U_{\text{out}}}{N^2 \cdot L_{\text{lk}}} \quad (9)$$

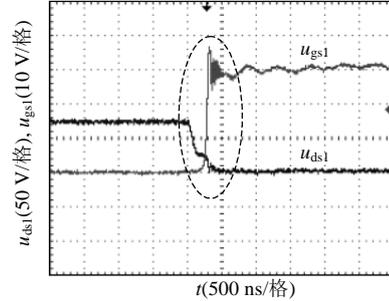
由式(9)可知, 耦合电感的漏感抑止了二极管反向恢复, 减小了由于反向恢复电流带来的损耗。

3 实验结果

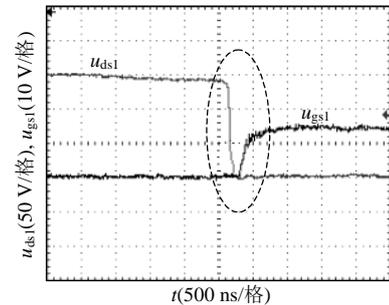
为了验证以上分析的正确性, 在试验室完成了一台 1 kW 的原理样机。规格和主要参数指标: 输入电压为 40 V; 输出电压为 380 V; 最大输出功率为 1 kW; 工作频率为 50 kHz; 主开关管 S_1 、 S_2 为 2 片 IRF250N 并联; 辅助开关管 S_c 为 IRF250N; 输出二极管 D_{o1} 、 D_{o2} 为 RHRP15120; 箝位电容 $C_c = 2.2 \mu\text{F}$; 输出滤波电容 $C_o = 940 \mu\text{F}$; 主管上并联电容 C_{s1} 、 C_{s2} 为 2.2 nF; 耦合电感为 $N=n_2:n_1=60:22$ 。

图 6 是 1 kW 下的试验结果。图 6(a) 是主开关管的零电压关断试验波形。图 6(b) 是主开关管的零电压开通试验波形。从试验结果可以看出, 主开关管实现了零电压软开关动作, 减小了变换器的开关损耗, 同时, 主开关管关断时, 开关管上电压尖峰较小, 说明漏感能量得到较好吸收。图 6(c) 是辅助开关管 S_c 的软开关试验波形, 从图 6(c) 可以看出, 在整个开关周期内, 箝位开关管实现了零电压软开关动作。所有功率开关管的软开关动作减小了系统的

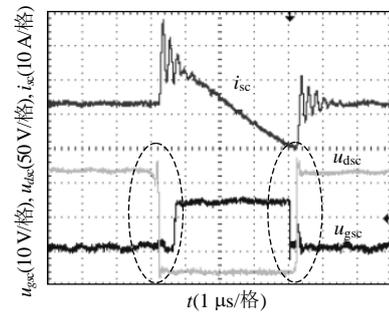
开关损耗, 提高了系统效率。图 6(d) 是输出二极管 D_{o1} 关断电流的试验细节波形, 从图中可以看出, 输出二极管的反向恢复电流几乎为零, 大大减小了由反向恢复电流带来的损耗, 也降低了 EMI 噪声。



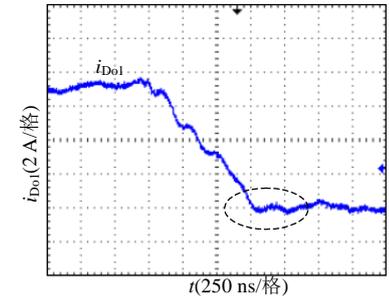
(a) S_1 零电压关断实验波形



(b) S_1 零电压开通实验波形



(c) S_c 零电压软开关试验波形



(d) D_{o1} 电流实验波形

图 6 1 kW 负载下实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms at 1 kW

4 结论

前面的分析和试验结果表明, 本文提出的变换器有如下优点:

1) 原边并联/副边并联交错工作方式减小了输入输出的电流纹波, 提高了变换器的功率容量。

2) 在整个开关周期内, 主开关管和辅助开关管都实现了零电压开关, 大大减小了开关损耗。

3) 只需要一组箝位开关管就实现了两相交错并联电路的漏感能量无损吸收和转移, 简化了电路。

4) 耦合变压器自身的漏感抑制了输出二极管反向恢复问题, 大大减小了反向恢复损耗。

因此, 该拓扑很适合低压大电流输入、高压输出、隔离式 DC/DC 变换场合。

参考文献

- [1] 翁史烈, 翁一武, 苏明. 熔融碳酸盐燃料电池动态特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 168-172.
Weng Shilie, Weng Yiwu, Su Ming. Study of molten carbonate fuel cell on thermodynamic properties[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 168-172(in Chinese).
- [2] 汪茂海, 郭航, 马重芳, 等. 直接甲醇燃料电池动态性能的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 161-165.
Wang Maohai, Guo Hang, Ma Chongfang, et al. Study of dynamic performance of a direct methanol fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 161-165(in Chinese).
- [3] Huang X, Wang X, Nergaard T, et al. Parasitic ringing and design issues of digitally controlled high power interleaved boost converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1341-1352.
- [4] Liu C, Johnson A, Lai J S. A novel three-phase high-power soft-switched DC/DC converter for low-voltage fuel cell applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 41(6): 1691-1697.
- [5] 金科, 杨孟雄, 阮新波. 三电平双向变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 41-46.
Jin Ke, Yang Mengxiong, Ruan Xinbo. Three-level bidirectional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 41-46 (in Chinese).
- [6] 阮新波, 李斌, 陈乾宏. 一种适用于高压大功率变换器的三电平直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 19-23.
Ruan Xinbo, Li Bin, Chen Qianhong. A new approach for high voltage and high power three-level dc-dc converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(5): 19-23(in Chinese).
- [7] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 一种新颖的三电平软开关谐振型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 24-28.
Gu Yilei, Lü Zhengyu, Qian Zhaoming. A novel three level soft switching resonant dc/dc converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 24-28(in Chinese).
- [8] Yan L, Lehman B, An integrated magnetic isolated two-inductor boost converter: analysis, design and experimentation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(2): 332-342.
- [9] 许峰, 徐殿国, 柳玉秀. 一种新型的全桥零电压零电流开关 PWM 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 147-152.
Xu Feng, Xu Dianguo, Liu Yuxiu. A novel zero-voltage and zero-current-switching (ZVZCS) fullbridge PWM converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 147-152(in Chinese).
- [10] 周林泉, 阮新波. 一种新颖的 ZCZVS PWM Boost 全桥变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 10-14.
Zhou Linquan, Ruan Xinbo. A novel ZCZVS PWM boost full-bridge converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 10-14(in Chinese).
- [11] 朱选才, 徐德鸿, Umid H, 等. 应用逆阻型 IGBT 的移向控制电流型全桥零电流开关 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 45-49.
Zhu Xuancai, Xu Dehong, Umid H, et al. Current-fed phase shift controlled full bridge ZCS DC/DC converter with reverse block IGBT [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 45-49 (in Chinese).
- [12] Zhu L, Wang K R, Lee F C, et al. New start-up schemes for isolated full-bridge boost converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(4): 946-951.
- [13] Zhu L. A novel soft-commutating isolated boost full-bridge ZVS-PWM DC - DC converter for bidirectional high power applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2): 422-429.
- [14] 石健将, 洪峰, 严仰光. 双管正-反激组合变换器研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 87-90.
Shi Jianjiang, Hong feng, Yan Yangguang. Study of two-transistor forward-flyback combined converter[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 87-90 (in Chinese).
- [15] 张方华, 严仰光. 带隔离变压器 DC/DC 变换器零电流转换方案[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 63-66.
Zhang Fanghua, Yan Yangguang. ZCT scheme of isolated DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 63-66(in Chinese).
- [16] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 34-38.
Chen Alian, Deng Yan, He Xiangning. A multilevel converter topology with redundancy ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 34-38(in Chinese).
- [17] 石健将, 严仰光, 何湘宁. 一种具有输入端电容均压的串-并型双管正激组合变换器研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 92-97.
Shi Jianjiang, Yan Yangguang, He Xiangning. A study on seriesparallel connection of dual two-transistor forward converter modules with voltage sharing between input-capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 92-97(in Chinese).
- [18] 穆新华. 交错并联式双管正激变换器工作模式分析及系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 38-42.
Mu Xinhua. Model analysis and system design of interleaving double-transistor-forward converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 38-42(in Chinese).



吕晓东

收稿日期: 2007-09-13。

作者简介:

吕晓东(1970—), 男, 博士后, 主要从事新能源开发与应用研究;

李武华(1979—), 男, 博士研究生, 主要从事高频 DC/DC 变换器、软开关技术和系统建模与分析工作;

吴建德(1973—), 男, 讲师, 主要从事电力电子网络化数字化研究;

何湘宁(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子技术及其工业应用方面的研究和工程设计工作。

(编辑 王彦骏)