

DOI:10.13234/j.issn.2095-2805.2018.1.14

中图分类号:TM46

文献标志码:A

基于耦合电感的新型 Buck 软开关的研究

杨玉岗,丁晶晶,赵若冰,许 静

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院,葫芦岛 125105)

摘要:针对传统 Buck 软开关变换器开关损耗大和轻载条件下效率低的缺点,提出了一种新型 Buck 软开关拓扑结构。通过在传统 Buck 软开关的拓扑结构中增加一个小电感、一个二极管和与主电感反向耦合的电感,实现了主开关在 ZCS 下的导通和关断,减小开关损耗,从而提高变换器的效率。最后对新拓扑结构的工作过程做了详细分析,并通过实验对分析过程进行了验证。

关键词:新型 Buck 软开关;反向耦合;ZCS;ZVS

Study on Novel Buck Soft-switch Based Coupled Inductor

YANG Yugang, DING Jingjing, ZHAO Ruobing, XU Jing

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Considering that the traditional Buck soft-switching converter had larger switching losses and a lower efficiency under light load, a novel Buck soft-switching topology was proposed in this paper. By adding a small inductor, a diode, and an inductor which was reverse coupled with the main inductor to the traditional Boost soft-switching topology, the conduction and shutdown of the main switch was realized in ZCS; at the same time, switch loss was reduced, and thus the converter's efficiency was improved. The operation process of the novel topology was analyzed in detail, which was further proved by experiments.

Keywords: novel Buck soft-switching; reverse coupled; ZCS; ZVS

Buck 变换器作为一种最基本的 DC/DC 变换器被广泛应用到燃料电池、电动汽车、通信以及航天等各种领域。随着科技发展的日新月异,对变换器体积小、重量轻以及可靠性的需求越来越高。高频率可以有效减少变换器的体积和重量,但同时也增加了变换器的开关损耗。提高变换器的效率,国内外学者提出软开关技术^[1]。针对大多数软开关中满载时效率可以得到有效提高、而轻载效率不高这一问题,本文提出一种改进型的 Buck 软开关,其辅助回路主要由一个与主电感反向耦合的电感,一个小的电感和一个二极管组成。主开关 MOSEFT 管在

零电流开关 ZCS(zero current switching)下导通,在零电压开关 ZVS(zero voltage switching)下关断,且流过小电感的电流不连续。本文分析了改进型 Buck 软开关的拓扑结构和工作原理,并通过仿真和实验验证了该新型 Buck 软开关的可行性。

1 电路的拓扑结构和工作原理

新型 Buck 软开关的拓扑结构如图 1 所示。图中, L_1 为主电感,电感 L_1 和 L_2 完全耦合。 S_1 和 D_1 为主要的功率开关, D_2 为附加的二极管。 L_1 、 L_2 和 L_3 理论上的电压波形如图 2 所示。因为 L_3 非常小, i_3 的下降速度要比 i_1 下降速度快,因此在 S_1 导通之前 i_3 已经减小到 0,即实现了 S_1 在 ZCS 下导通。由于缓冲电容 C_{pi} ,可实现 S_1 在 ZVS 下关断。 C_{pi} 为 S_1 的寄生电容。

收稿日期:2016-05-13;修回日期:2017-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1510128),辽宁省教育厅重点实验室基础研究资助项目(LZ2015045)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1510128); Fundamental Research Program of Key Lab of Liaoning Province Education Department (LZ2015045)

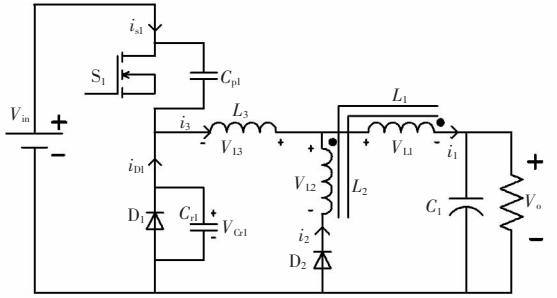


图 1 新型 Buck 软开关的拓扑结构

Fig.1 Topology of the novel Buck soft-switch

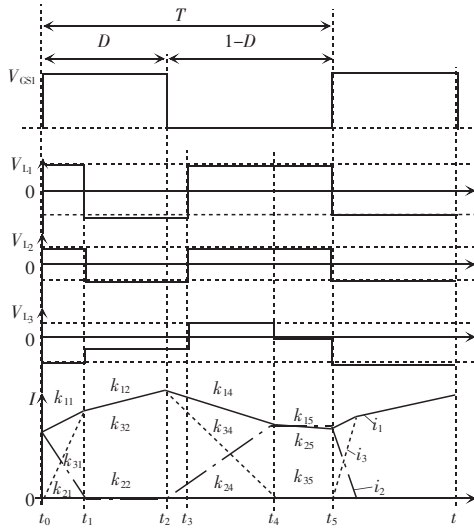


图 2 各电感理论上的电压纹波

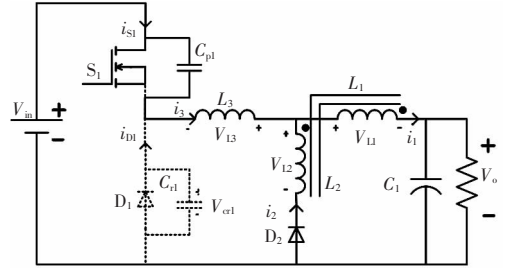
Fig.2 Theoretical voltages ripper of different inductors

图 2 中,根据电感电压的纹波可将变换器的一个工作周期分为 5 个工作模式,图 2 中 k_{ij} 表示不同的电感电流在不同的模式下的斜率, i 表示电感, j 表示不同的工作模式。其等效电路如图 3 所示。

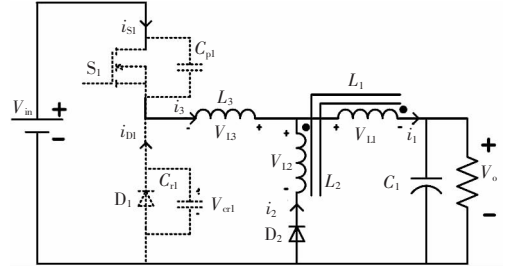
各模式的分析如下:

模式 I $[t_0-t_1]$:如图 3(a)所示,在 t_0 时刻之前变换器工作在电流储能状态, i_3 和 i_{s1} 均为 0; 在 t_0 时刻, S_1 触发导通。 i_{s1} 由于 L_3 的存在而缓慢增加,此时,Buck 变换器进入 ZCS 模式, i_1 和 i_3 逐渐增加, i_2 减小。由于 L_3 非常小,其电流的上升率远大于 L_1 的电流上升率。在 t_1 时刻 $i_1=i_3, i_2=0, D_2$ 关断。根据 KVL 和 KCL 可知

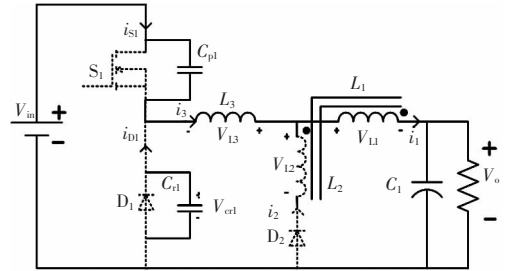
$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ V_{in} - V_{L1} - V_{L3} = 0 \\ V_{L2} + V_o - V_{L3} = 0 \end{cases} \quad (1)$$



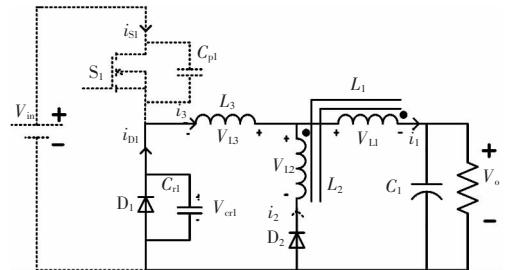
(a) 模式 I $[t_0-t_1]$



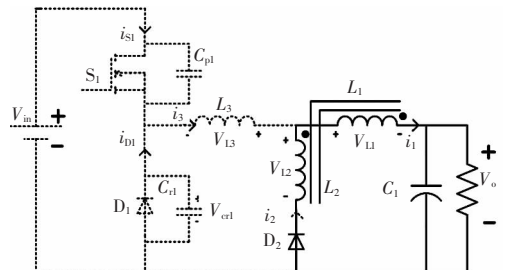
(b) 模式 II $[t_1-t_2]$



(c) 模式 III $[t_2-t_3]$



(d) 模式 IV $[t_3-t_4]$



(e) 模式 V $[t_4-t_5]$

图 3 各工作模式等效电路

Fig.3 Equivalent circuits in different operation modes

则电感 L_1, L_2, L_3 两端的电压分别为

$$\begin{cases} V_{L1} = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ V_{L2} = -M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \\ V_{L3} = -L_3 \frac{di_3}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

因为 L_1 和 L_2 完全耦合, 所以 $M = \sqrt{L_1 L_2}$, 由式(1)和式(2)可得各电感在模式 I 中的斜率分别为

$$\begin{cases} k_{11} = \frac{di_1}{dt} = \frac{V_o L_2}{(L_2 + M)L_3} - \frac{(V_{in} - V_o)(L_3 + L_2)}{(L_1 + L_2 + 2M)L_3} \\ k_{21} = \frac{di_2}{dt} = \frac{V_o L_1}{(L_1 + M)L_3} - \frac{(V_{in} - V_o)(M - L_3)}{(L_1 + L_2 + 2M)L_3} \\ k_{31} = \frac{di_3}{dt} = \frac{V_o}{L_3} - \frac{(V_{in} - V_o)L_2}{(L_2 + M)L_3} \end{cases} \quad (3)$$

模式 II [t_1-t_2]: 如图 3(b)所示, 在 t_1 时刻之后, i_1 和 i_3 相等且呈线性增长。故在此模式下 D_2 始终反向截止, L_2 所在支路不工作。在 t_2 时刻 S_1 关断。在此模式下该变换器为常规 Buck 变换器, C_1 对负载供电, 可得各电感 L_1, L_2, L_3 在模式 II 下的斜率为

$$k_{12} = k_{32} = \frac{di_1}{dt} = \frac{di_3}{dt} = \frac{V_{in} - V_o}{L_1 + L_3} \quad (4)$$

$$k_{22} = 0$$

模式 III [t_2-t_3]: 如图 3(c)所示, L_3 与 C_{p1}, C_{r1} 产生共振, 在此期间内 C_{p1} 充电、 C_{r1} 放电, 当 C_{r1} 减小到 0 时, D_1 导通。

模式 IV [t_3-t_4]: 如图 3(d)所示, 先假设 D_2 没有导通, L_1 和 L_2 的匝数分别为 n_1 和 n_2 , 所以

$$V_{L1} = (V_{in} - V_o) \frac{L_1}{L_1 + L_3} \quad (5)$$

$$V_{L2} = \frac{n_2}{n_1} V_{L1} = \frac{n_2}{n_1} (V_{in} - V_o) \frac{L_1}{L_1 + L_3} \quad (6)$$

根据 KVL 可知

$$V_{in} - V_{L1} - V_{L2} - V_{D2} - V_o = 0 \quad (7)$$

故可以得到

$$V_{D2} = V_{in} - V_{L1} - V_{L2} - V_o = (V_{in} - V_o) \frac{L_3 - M}{L_1 + L_3} \quad (8)$$

在 $L_3 < M$ 时 D_2 导通。 D_1 导通, 对 L_1 充电, 由于 L_1 和 L_2 完全反向耦合, i_3 减小, 则有

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ V_{in} - V_{L1} - V_{L3} - V_o = 0 \\ V_{L2} - V_{L3} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

将式(2)代入式(9), 可得各电感在模式下的斜率为

$$\begin{cases} k_{14} = \frac{di_1}{dt} = -\frac{(V_{in} - V_o)(L_3 + L_2)}{(L_1 + L_2 + 2M)L_3} \\ k_{24} = \frac{di_2}{dt} = -\frac{(V_{in} - V_o)(M - L_3)}{(L_1 + L_2 + 2M)L_3} \\ k_{34} = \frac{di_3}{dt} = -\frac{(V_{in} - V_o)(M + L_2)}{(L_1 + L_2 + 2M)L_3} \end{cases} \quad (10)$$

模式 V [t_4-t_5]: 在 t_4 时刻, D_1 关断, 在 L_3 和 C_{r1} 产生一个小的共振, 此时, i_3 在 0 附近上下振荡, 且振幅非常小, 故 i_3 在此模式下始终为 0。如图 3(e)所示, 电流只流过 L_1 和 L_2 , 且 $i_1 = i_2$, 则各电感在该模式下的斜率为

$$\begin{cases} k_{15} = \frac{di_1}{dt} = -\frac{V_{in} - V_o}{L_1 + L_2 + 2M} \\ k_{25} = \frac{di_2}{dt} = -\frac{V_{in} - V_o}{L_1 + L_2 + 2M} \\ k_{35} = \frac{di_3}{dt} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

2 实验验证

2.1 主电路的设计

为了确保 Buck 变换器可以工作在软开关的条件, 必须对其构成参数进行合理设计, 特别是 L_1, L_2, L_3 的选取。由于 L_3 的电流不连续才可以实现软开关。随着负载电流的增加, L_3 的电流保持为 0 的持续时间将减少到 0, L_3 将工作在 CCM 下, 即不能实现软开关。因此, 应选取 CCM 和 DCM 的临界状态 BCM 来计算主电路的参数。假设该 Buck 变换器在理论最大负载的情况下工作在 BCM 下, 其理论的电感电流波形如图 4 所示。在此设计中, 理论最

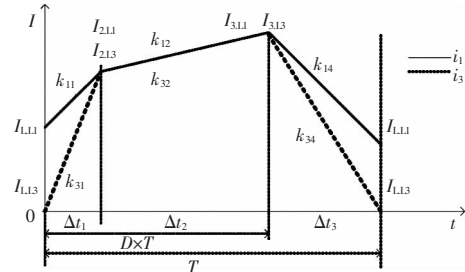


图 4 BCM 下电感电流的理论纹波

Fig.4 Theoretical waveforms of inductor currents in BCM

大负载为实际最大负载的 1.1 倍。

如图 4 所示,在 BCM 下没有模式 V 发生。且因为模式 III 的持续时间非常短,在计算电感参数时均不予考虑,故一个开关周期被分为 3 个区间。根据各电感电流的大小及斜率可知

$$\begin{cases} \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = T \\ k_{11} \times \Delta t_1 = I_{2,1,1} - I_{1,1,1} \\ k_{31} \times \Delta t_1 = I_{2,1,3} - I_{1,1,3} \\ k_{12} \times \Delta t_2 = I_{3,1,1} - I_{2,1,1} \\ k_{14} \times \Delta t_3 = I_{1,1,1} - I_{3,1,1} \\ k_{34} \times \Delta t_3 = I_{1,1,3} - I_{3,1,3} \end{cases} \quad (12)$$

式中:电流 $I_{1,1,1}, I_{2,1,1}, I_{3,1,1}, I_{1,1,3}, I_{2,1,3}$ 和 $I_{3,1,3}$ 通过理论最大平均负载电流和电感电流纹波系数获得; T 是开关周期。 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3, L_1, L_2$ 和 L_3 通过式(10)可以求出,且 $D = (\Delta t_1 + \Delta t_2) / T$ 。该 Buck 变换器的目标参数如表 1 所示。

PSpice 软件根据表 1 和表 2 中的参数进行仿真,在理论负载最大值为 18.4 A 时,其电感电流的

表 1 Buck 变换器的目标参数

Tab.1 Target specifications of Buck converter

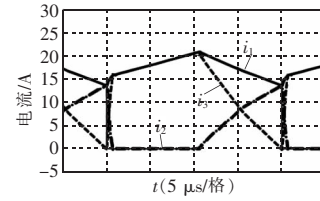
参数	数值
V_{in} / V	30
V_o / V	12
P_{max} / W	200
f_{sw} / kHz	50
$T / \mu s$	20
I_{load_real} / A	16.7
$I_{load_theoretic} / A$	18.4
$I_{1,1,1} / A$	10.19
$I_{2,1,1} / A$	10.52
$I_{3,1,1} / A$	20.29
$I_{1,1,3} / A$	0
$I_{2,1,3} / A$	1.30
$I_{3,1,3} / A$	20.29

表 2 各电感及持续时间的计算结果

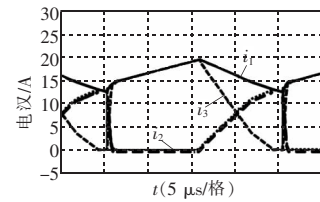
Tab.2 Calculation results of inductances and corresponding time durations

$\Delta t_1 / \mu s$	$\Delta t_2 / \mu s$	$\Delta t_3 / \mu s$	$L_1 / \mu H$	$L_2 / \mu H$	$L_3 / \mu H$	D
0.623	9.66	9.710	20.30	2.92	2.37	0.51

波形如图 5(a)所示,在实际最大负载电流为 16.7 A 时,其电感电流波形如图 5(b)所示。由图 5 可知, i_3 在很短的时间保持为 0,即此时存在模式 V,且可实现 ZCS 开启。



(a)理论最大负载



(b)真实最大负载

图 5 电感电流的仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of inductor currents

2.2 实验结果

在此模式的测试中样机的电压较高一侧的值 $V_2 = 26 V$, 电压较低一侧的值 $V_1 = 8.1 V$, 占空比 $D = 0.4$, 每通道开关频率 $f_s = 50 kHz$ 。电感 $L_1 = 18 \mu H$, $L_2 = L_3 = 3 \mu H$, 电容值 $C_{r1} = 4700 \mu F$ 。用霍尔电流传感器 CHB-25NP 检测电流的电压,图 6 为实验测试系统。

L_3 和 S_1 在最大输出功率 200 W 时的电流波形和开关波形如图 7 所示。图 7(a)示出了在一个开关周期的波形,其中, L_3 的电流在 S_1 触发前短时内一直为 0。

S_1 的导通过程如图 7(b)。在门栅极触发信号

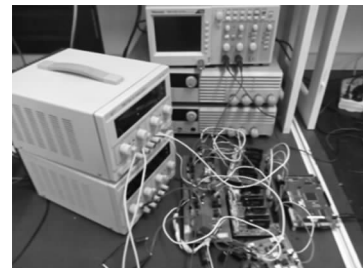
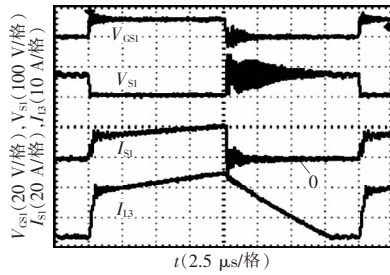


图 6 实验测试系统

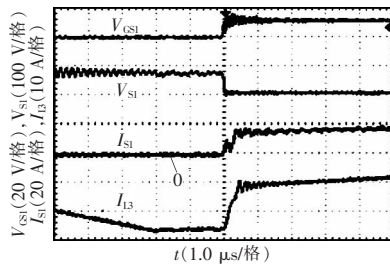
Fig.6 Test system used in the experiment

VGS1 被施加之后, i_{s1} 电流缓慢增加, 此时实现 ZCS。在图 7(c) 中, S_1 关断, 当关断触发信号被施加, i_{s1} 急剧减小到 0, 随之 V_{s1} 增加到 V_{in} , 此时实现 ZVS。

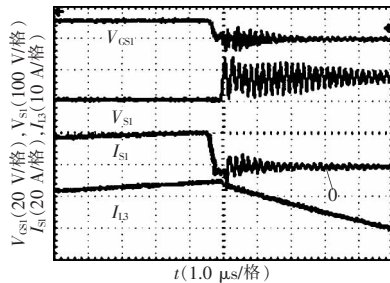
所提出的新型 Buck 变换器的效率曲线如图 8



(a) S_1 和 L_3 的电压、电流



(b) ZVS 导通时 S_1 和 L_3 的电压、电流



(c) ZVS 关断时 S_1 和 L_3 的电压、电流

图 7 实验波形

Fig.7 Experimental waveforms

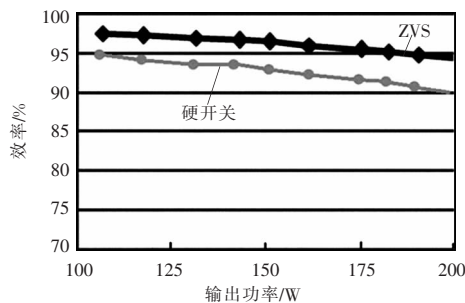


图 8 不同输出功率下的效率对比曲线

Fig.8 Comparison curves of efficiency at different output power

所示,在轻载时,变换器的转换效率为 94.57%,可以看出新型 Buck 软开关变换器有效地提高了变换器的轻载效率,拓宽了高效率的运行区间,与硬开关方式相比效率明显提高。

3 结语

本文提出了一种基于耦合电感的新型 Buck 软开关技术,经过详细的理论分析和主电路设计方法的讨论,建立变换器模型。通过实验结果验证了可以通过开关 S_1 实现 ZCS 的开启和 ZVS 的关闭,利用开关 S_1 的切换来实现所提出新型软开关的技术。通过这种新型 Buck 软开关技术可以有效减小开关损耗,提高变换器的效率。

参考文献:

- [1] 陈刚. 软开关双向 DC-DC 变换器的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2001.
Chen Gang. Soft-switching bidirectional DC-DC converters [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001 (in Chinese).
- [2] Jabbari M, Farzanehfard H. New resonant step-down/up converters[J]. IEEE Trans Power Electron, 2010, 25(1):249-256.
- [3] Bodur H, Bakan A F. An improved ZCT-PWM DC-DC converter for high-power and frequency applications[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2004, 51(3):89-95.
- [4] 贾贵玺, 张春雁, 肖有文, 等. 新型 Buck 软开关电路的设计与仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2):33-37.
Jia Guixi, Zhang Chunyan, Xiao Youwen, et al. Design and simulation of a new type of buck soft-switching circuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2):33-37 (in Chinese).
- [5] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2013, 33(12):39-46.
Lu Zhiguo, Zhu Wanpin, Liu Jiefeng, et al. A novel interleaved parallel bidirectional DC/DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 33(12):39-46 (in Chinese).
- [6] Adib E, Farzanehfard H. Family of zero-current transition

- rsity of Aeronautics and Astronautics, 2010(in Chinese).
- [9] Chen Y M, Liao C Y. Three-port flyback-type single-phase micro-inverter with active power decoupling circuit [C]. 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2011: 501-506.
- [10] Kwon J M, Kwon B H, Nam K H. High-efficiency module-integrated photovoltaic power conditioning system[J]. IET Power Electronics, 2009, 2(4): 410-420.
- [11] 袁义生, 张育源, 陈进, 等. 两级式逆变器中间母线电压低频纹波抑制[J]. 电源学报, 2016, 14(3):38-46.
Yuan Yisheng, Zhang Yuyuan, Chen Jin, et al. Low frequency ripple rejection of the middle bus voltage of two stage inverter[J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(3):38-46(in Chinese).
- [12] 袁义生, 张育源, 周盼, 等. 抑制两级式逆变器中间母线电压二次纹波的方法[J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(6):93-99.
Yuan Yisheng, Zhang Yuyuan, Zhou Pan, et al. A technique for the secondary ripple reduction of the bus voltage in two-stage DC-AC inverter[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2015, 32(6):93-99(in Chinese).
- [13] 张敬南, 张军伟. 基于数字控制的双向直流变换装置的设计[J]. 电力电子技术, 2012, 46(11):90-92.
Zhang Jingnan, Zhang Junwei. Bi-directional DC/DC converter unit based on digital control[J]. Power Electronics, 2012, 46(11): 90-92(in Chinese).



袁义生

作者简介:

袁义生(1974-),男,博士,教授,研究方向:电力电子系统及控制技术,E-mail:cloudstone_yuan@aliyun.com。

张育源(1989-),男,通信作者,硕士,研究方向:电力电子控制技术,E-mail:zyyuyuan_zhang@163.com。

钟青峰(1992-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子电路,E-mail:626317218@qq.com。

胡根连(1990-),女,硕士研究生,研究方向:电力电子控制技术,E-mail:1428087011@qq.com。

(上接第 18 页)

- PWM converters[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2008, 55(8): 3055-3063.
- [7] Do H L. Nonisolated bidirectional zero voltage switching DC/DC converter[J]. IEEE Trans Power Electron, 2011, 2563-2569.
- [8] 冯本成, 杨玉岗, 韩占岭. 双向 DC/DC 变换器中耦合电感的应用研究[J]. 电源学报, 2012, 10(3):52-55.
Feng Bengcheng, Yang Yugang, Han Zhanling. Application of the coupled inductor in bi-directional DC/DC converter[J]. Journal of Power Supply, 2012, 10(3):52-55 (in Chinese).
- [9] Zhang Yingqi, Sen P C. A new soft-switching technique for buck, boost and buck-boost converters[J]. IEEE Trans Ind Appl, 2003, 39(6):1775-1782.
- [10] Tsai C T, Shen C L. Interleaved soft-switching buck converter with coupled inductors[J]. IEEE Int Conf Sustain. Energy Technol, 2008, 10(3):877-882.



杨玉岗

作者简介:

杨玉岗(1967-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:电力电子技术及其磁集成技术,E-mail:yangyugang21@126.com。

丁晶晶(1990-),通信作者,女,硕士研究生,研究方向:电力电子技术及其磁集成技术,E-mail:18342915206@163.com。

赵若冰(1988-),女,硕士,研究方向:电力电子与电力传动,E-mail:1019682390@qq.com。

许静(1991-),女,硕士研究生,研究方向:LLC 谐振变换器,E-mail:1264685773@qq.com。