

一种用于储能的新型软开关双向 DC/DC 变换器

张琦，何园，张鹏，安少亮，孙向东，李敏远

(西安理工大学电气系，陕西省 西安市 710048)

A Novel Soft-switching Bidirectional DC/DC Converter for Energy Storage Applications

ZHANG QI, HE YUAN,ZHANG PENG,AN SHAOLIANG,SUN XIANGDONG,LI MINYUAN

(Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

中图分类号: TN86

文献标识码: B

文章编号: 1606-7517(2016)04-6-132

ABSTRACT: A soft-switching solution implemented to the traditional bidirectional DC/DC converter is developed. Three auxiliary switches, one resonant capacitor and one resonant conductor composed of soft-switching cell which is equipped in the traditional bidirectional DC/DC converter to realize its ZCT or ZVT operations, and the two drive methods are presented for the converter operation in buck mode under the different storage applications systems. The first method with less conduction losses suffers from a hard turning off process in one of the auxiliary switches, while the others experience the soft operation. As for the other method, the zero voltage or zero current transmissions in all switches are realized, and the relative higher but fixed conduction losses is introduced by the resonant circle. And the proposed topology performs ideal soft switching at boost operations. The characteristics of the proposed topology are verified with simulation and experimental results.

KEY WORDS: DC/DC converter; Soft-switching; Zero voltage transition (ZVT); Zero current transition (ZCT)

摘要: 软开关技术实现了传统双向 DC/DC 变换器的发展。为了有效解决开关损耗和电磁干扰等问题, 本文在传统双向 DC/DC 变换器中加入软开关以实现零电压转换或零电流转换, 其中软开关单元包含三个辅助开关, 一个谐振电容和一个谐振电感。变换器在 Buck 模式下的两种驱动方式能够应用于不同的储能系统中。第一种方法通过一个辅助开关管的硬关断和其他的开关管软开关减少了系统导通损耗。另一种方法实现了所有开关管的零电压开通或零电流关断, 并且谐振环中存在相对较高且固定的导通损耗。本文还提出了一种理想的软开关 Boost 拓扑图。仿真与实验结果验证了拓扑图的特征。

关键词: DC/DC 变换器; 软开关; 零电压转换; 零电流转换

1 引言

基金项目: 国家自然科学基金(51477139), 陕西省教育厅基金(2013JK0999)。

Foundation Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51477139), and Specialized Fund of Shaan xi Education Department (2013JK0999).

双向 DC/DC 变换器广泛应用储能系统中, 例如新能源发电系统^[1], 电动车系统^[2], 不间断电源系统, 电梯系统, 航天电源系统^[3], 等等。为了提高能量传输效率, 系统的可靠性与稳定性以及功率等级^[5], 热点仍然集中与拓扑改进^[2-5], 以及控制策略改进^[1-3]。

对于上述问题的主要解决方案之一是软开关技术, 功率开关器件实现了零电压转换 (ZVT) 或零电流转换 (ZCT), 它将有效解决开关损耗和电磁干扰问题。文献[4]研究了一种双向 ZCT 变换器, 所有的主功率开关器件受益于一个辅助软开关管, 然而其缺点是谐振电流始终存在会引入一定损耗。文献[1]研究了由辅助开关管组成的两个单向 ZVZCT DC/DC 变换拓扑, 并且实现了 ZVZCT 功率双向流动, 但其只能工作于连续导通模式。文献[6]研究了一种 ZVT 升压变换器, 其被广泛用于商业应用与一些衍生的拓扑结构研究^[7,8]。

本文研究了一种带有三个辅助开关管的软开关双向 DC/DC 变换器, 在 Buck 模式下分析了两种控制方法, 在 Boost 模式下应用了一种传统的 ZVT-BOOST 驱动方法。在数学分析的基础上本文分析了拓扑的工作模态并在实验中加以验证。

2 变换器工作原理分析

2.1 变换器结构

双向软开关 DC/DC 变换器拓扑如图 1 所示, 它是在传统的双向变换器基础上加入一个谐振电感 L_r , 一个谐振电容 C_r 和三个辅助开关管 S_{a1} , S_{a2} , S_{a3} 。图 1 中紫色部分为软开关单元。 S_1 , S_2 分别为 Boost 模式与 Buck 模式下的主开关管, L 为滤波电感。为了进一步传输能量, 变换器的高压端通常用于稳定直流母线电压, 其简化为电压源 v_h 。低压端简化为电压源 v_l , 通常为储能设备例如蓄电池或超

级电容器。 v_l 到 v_h 为升压模式, v_h 到 v_l 为降压模式。

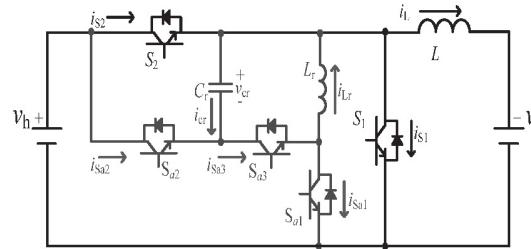


图 1 双向软开关 DC/DC 变换器拓扑

2.2 变换器在降压模式下的模态分析

变换器工作在 Buck 模式时, 通常向储能装置充电, S_1 与 S_{a1} 处于关断状态。拓扑加入辅助开关管 S_{a2} 与 S_{a3} , 能够实现 S_2 零电压转换 (ZVT) 或零电流转换 (ZCT)。Buck 模式下变量的参考方向与其等效电路图如图 2 所示。

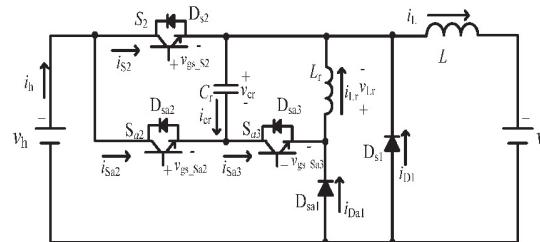


图 2 变换器 Buck 模式下的等效电路拓扑

为满足不同的额定功率要求, 图 3 介绍了两种控制方式。为提高蓄电池的充电效率, 充电电流通常不超过额定放电电流的百分之二十。图 3 (a) 研究了一种适用于小额定电流的驱动方法, 将其定义为 B 型(蓄电池)。在模态 5 中 S_{a3} 虽然处于硬关断, 但其他的开关管在导通或关断时为 ZVT 或 ZCT。B 型工作原理分析如下所示。

模态 0 ($[t_0, t_1]$): S_{a2} 处于开通状态, S_2 , S_{a3} 处于关断状态。 C_r 被反向充电, $v_{cr} = -v_h$, 模态 9 描述了 C_r 的预充电时间和它的数学方程。等效电路工作于续流状态, 当 DCM 时电流逐渐衰减至 0。

模态 1 ($[t_1, t_2]$): 当开通 S_{a3} 模态 1 开始。 i_{sa2} 和 i_{sa3} 线性上升, 公式 (1) 描述了电流上升时间 Δt_1 。

S_{a2} 和 S_{a3} 零电流开通, S_2 上的电压为 v_h 。当 $i_{sa2} = i_{sa3} = i_{lr}$, 模态 1 结束。

$$\Delta t_1 = t_2 - t_1 = L_r \cdot i_{lr} / v_h \quad (1)$$

模态 2 ($[t_2, t_3]$): t_2 时刻 L_r 与 C_r 开始谐振, 模态 2 开始。 i_{cr} 流过 L_r , i_{lr} 可用公式 (2) 表示。公式

(3) 描述了在理想状态下忽略导线与开关的阻抗 i_{lr} 持续增加直到 i_{cr} 达到最大值 i_{crmax} 。随着 C_r 的放电 v_{s2} 降为 0V, 模态 2 结束。公式 (4) 为模态 2 的时间, T_r 为 L_r 与 C_r 的谐振时间。

$$i_{lr} = i_L + i_r \quad (2)$$

$$i_{rmax} = \sqrt{C_r \cdot v_h} \quad (3)$$

$$\Delta t_2 = t_3 - t_2 = \frac{T_r}{4} = \frac{1}{4} \cdot 2\pi\sqrt{L_r C_r} \quad (4)$$

模态 3 ($[t_3, t_4]$) ~ 模态 4 ($[t_4, t_5]$): t_3 时刻, C_r 完成放电, 并且 S_2 的体二极管 D_2 导通。流过 D_2 , S_{a2} , S_{a3} , L_r 的谐振电流 i_r 保持最大值 i_{rmax} 。

由于 D_2 的非线性导通, i_r 并不向 C_r 充电, 主开关管 S_2 两端电压为零, 满足零电压导通的条件。 $\Delta t_3 = (t_4 - t_3)$ 是在 t_4 时刻零电压条件下导通 S_2 所用的时间裕量。在 t_4 时刻模态 4 开始, 它与模态 3 的状态相同。在这两种模式中, i_L 不但流经 S_{a2} , S_{a3} , L_r 而且还为负载提供能量。在这期间, 公式 (5) 一直有效, L_r 存在高饱和风险和更多的软开关导通损耗。因此能量传递路径在下一个模式改变。

$$i_{sa3} = i_{sa2} = i_{lr} = i_L + i_{rmax}; i_{s2} = -i_{rmax}; v_{s2} = 0 \quad (5)$$

模态 5 ($[t_5, t_6]$) ~ 模态 6 ($[t_6, t_7]$): 在 t_5 时刻同时关断 S_{a2} , S_{a3} 。 i_{lr} 通过 D_{a1} 续流, L_r 向电源和负载释放能量并且逐渐衰减。公式 (6) 描述了模态 5 所用的时间。 i_{lr} 逐渐衰减至 0, i_{s2} 与 i_L 的值相等并且 S_2 导通, 模态 6 结束。公式 (7) 描述了模态 6 所用的时间。在模态 5 中, S_{a3} 产生硬关断。

$$\Delta t_5 = t_6 - t_5 = (L + L_r) \cdot i_{lrmax} / v_h \quad (6)$$

$$\Delta t_6 = t_7 - t_6 = (L + L_r) \cdot i_L / v_h \quad (7)$$

模态 7 ($[t_7, t_8]$) ~ 模态 8 ($[t_8, t_9]$): 由于软开关单元中无任何电流通过, 电路进入传统的 Buck 模式导通状态。为确保 ZVT, 在关断 S_2 关断之前开通 S_{a2} , 此时电路状态并没有改变。

模态 9 ($[t_9, t_{10}]$): t_9 时刻关断 S_2 , 模态 9 开始。电源开始向 C_r 充电, 电容很快被充满, 电容的充电时间可由公式 (8) 描述, v_{s2} 逐渐增加至 v_h , t_{10} 时刻 $v_{cr} = v_h$, 此时一个开关周期结束。

$$\Delta t_9 = t_{10} - t_9 = C_r \cdot v_h / i_L \quad (8)$$

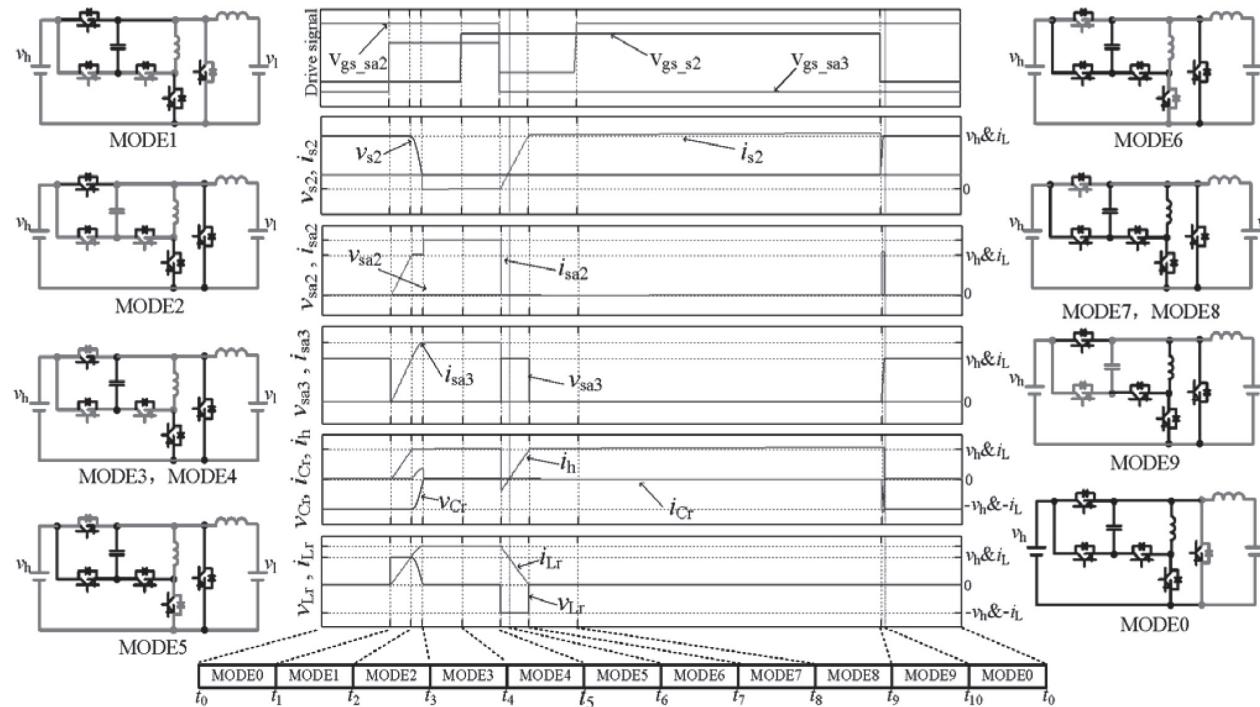


图 3 (a) Buck 模式下主要仿真波形 (B 型)

图 3 (b) 研究了一种适用于相对较大的额定电流的驱动方法, 将其定义为 C 型 (超级电容器)。这两种方法详细的工作模态如下所示。在这两种方法中, MODE0~MODE4 为五个完全相同的工作模态。图 3 为这两种方法在 Buck 模式时一个开关周期内的各模态等效电路图及其主要波形图。波形图描述了理想状态下每个开关管的工作特性, 为了便于说明, 三个驱动信号有所偏移。虽然图 3 (b) 中 C 型工作模式出现了更多的导通损耗, 但所有的开关管包括两个辅助开关管均实现了软开通或软关断。随着电流的增大, 导通损耗所占功率的百分比将会减小, 这一特性能够实现对超级电容器充电。C 型工作原理分析如下所示。

模态 5 ($[t_5, t_6]$): 与 B 型的方法不同, 在 t_5 时刻关断 S_{a2} , S_{a3} 在 S_{a2} 关断之后才关断。由于电感电流连续性, C_r 与 L_r 之间产生谐振 C_r 充电, 经过 Δt_5 ($t_6 - t_5$) 时刻 $v_{cr} = v_h$, S_{a2} 零电压关断。公式 (9) 中 C_r 的充电时间远小于 $T_r / 4$ 。

$$\Delta t_5 = t_6 - t_5 = C_r \cdot v_h / (i_L + i_r) \quad (9)$$

模态 6 ($[t_6, t_7]$) ~ 模态 7 ($[t_7, t_8]$): t_6 时刻电容充满电, i_{Lr} 通过 D_{sa1} 续流。 i_{Lr} 仍大于 i_L , i_{Lr} 通过 S_2 的反并联二极管反馈至 v_h 。 t_7 时刻, i_{Lr} 线性衰减

至 i_L , 反馈电流截至。模态 7 中, S_{a3} 上既没有电压也没有电流, 此时 S_{a3} 的关断同时满足 ZVT, ZCT。公式 (10) 描述了模态 7 的工作时间。

$$\Delta t_7 = t_8 - t_7 = L_r \cdot i_L / v_h \quad (10)$$

模态 8 ($[t_8, t_9]$): 由于谐振 t_8 时刻 C_r 的能量开始向 L_r 传递。 C_r 放电并且 v_{cr} 衰减至 0V。 Δt_8 ($t_9 - t_8$) 为 C_r 的放电时间, 与方程 4 中 Δt_2 相同。

模态 9 ($[t_9, t_{10}]$) ~ 模态 10 ($[t_{10}, t_{11}]$): t_9 时刻 C_r 完全放电。由于电感电流不能突变, 电感上的电流将流过 S_2 , D_{a2} , D_{a3} , C_r 不会被反向充电。在理想状态下, i_{Lr} 保持不变, $i_{S2} = i_{Lr} + i_L$, 将会产生更多的导通损耗。在 S_{a3} 关断之后, t_{10} 时刻开通 S_{a2} , S_{a2} 实现了 ZVT 与 ZCT。在一个开关周期中, 主要是在这两个模式内向负载提供能量。

模态 11 ($[t_{11}, t_{12}]$) ~ 模态 12 ($[t_{12}, t_{13}]$): t_{11} 时刻, S_2 零电压关断。 i_L 与 i_{Lr} 开始为 C_r 反向充电, 充电时间与公式 (9) 中的 Δt_5 相同。当电容被充满电, 模态 12 开始, L_r 上剩余的能量反馈给电源, 同时 i_L 通过 D_1 续流。模态 12 结束之后开始下一个工作周期。

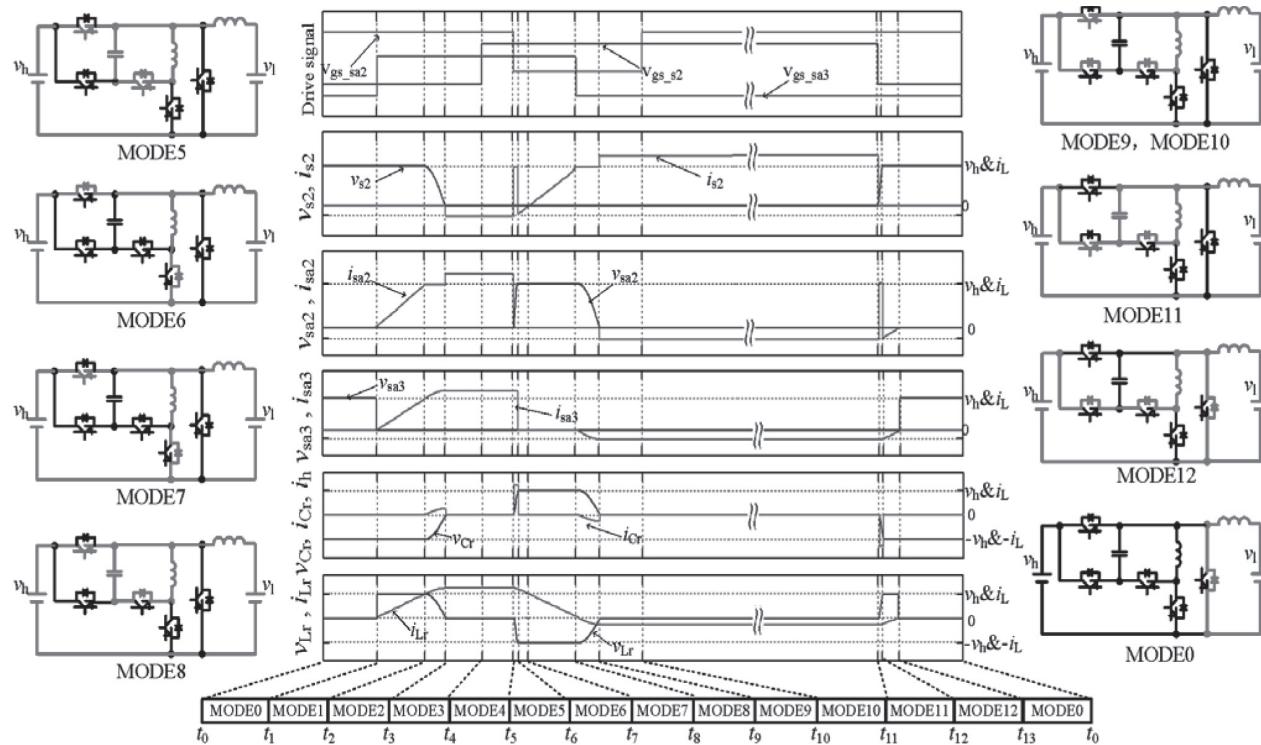


图 3 (b) Buck 模式下的主要仿真波形 (C 型)

2.3 变换器在升压模式下的模态分析

Boost 模式下变量的参考方向与其等效电路图如图 4 所示。当变换器工作在 Boost 模式时, S_2 , S_{a1} , S_{a2} 处于关断状态, 它们相当于三个二极管。此时变换器与传统的 ZVT-BOOST 电路的工作原理相同, S_1 , S_{a1} 实现了 ZVT 或 ZCT。驱动方式与工作模态如图 5 所示。其良好的工作特性已在广泛的商业应用中得到了验证。

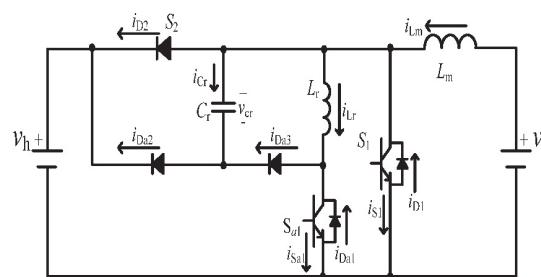


图 4 变换器 Boost 模式下的等效电路拓扑

Boost 模式下变换器的模态分析如下:

模态 1 ($[t_1, t_2]$): t_1 时刻, 辅助开关 S_{a1} 受控开通, 流过二极管上 D_2 的电流 i_{D2} 开始向 S_{a1} 、 L_r 换流。

模态 2 ($[t_2, t_3]$) ~ 模态 3 ($t_3, t_4]$): L_r 上的电流线性上升直至 $i_{Lr}=i_L$ 时, $i_{D2}=0$, D_2 过零关断。

模态 4 ($[t_4, t_5]$): t_4 时刻, 关断 S_{a1} , L_r 与 C_r 开始谐振, 电感上的能量通过 D_{a3} 传输至 C_r 中, 此时电容反向充电。 D_1 导通, S_1 两端的电压钳位在 $-0.7V$, 即 $v_{s1}=0V$, 主管 ZVT 开通。

模态 5 ($[t_5, t_6]$): 此阶段为传统的 Boost 导通电路, S_1 开通, v_l 给电感充电。

模态 6 ($[t_6, t_7]$) ~ 模态 0 ($[t_0, t_1]$): 主管 S_1 关断, D_{a2} 导通, 直至电容电压为 $0V$ 。 D_2 导通, 进入到模态 0 阶段, 此时电路为传统的 Boost 电路, 通过 D_2 向负载传递能量。模态 0 结束后, 进入下一个工作周期。

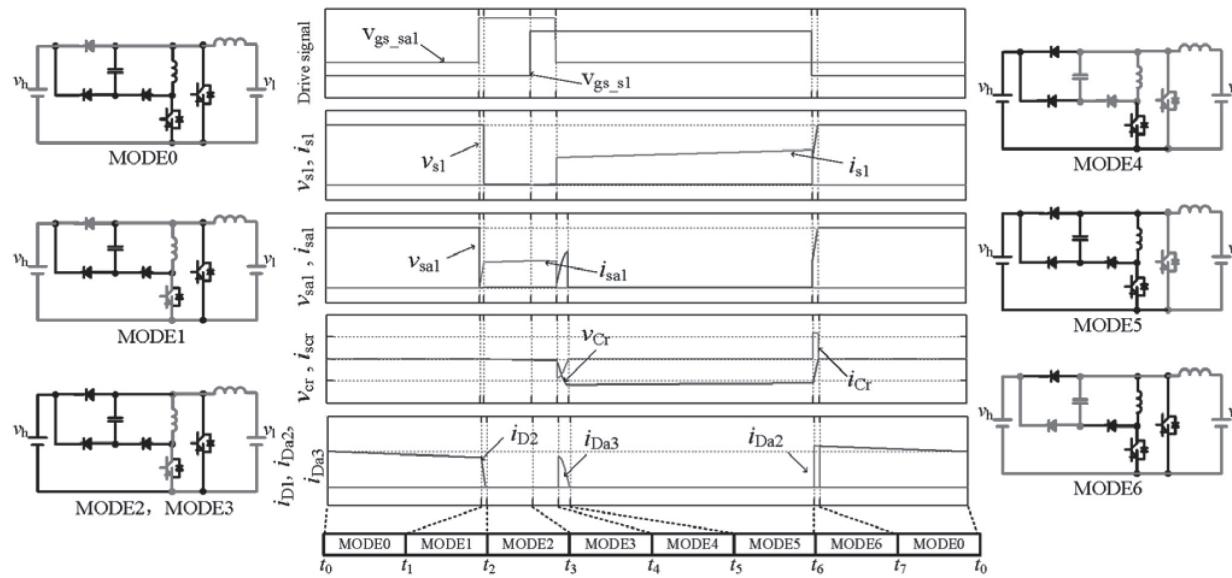
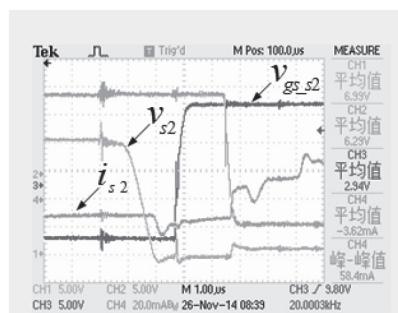


图 5 Boost 模式下的主要仿真波形

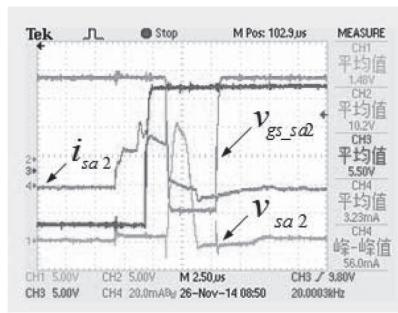
3 实验结果分析

为了验证变换器在 Buck 模式下的正确性与有效性，搭建了试验平台。实验时 $V_h=20V$, $V_l=12V$, $L_m=1.25mH$, $L_r=16uH$, $C_r=22nF$ 。分别测量了 C 型三个开关管的驱动波形，如图 6 所示。



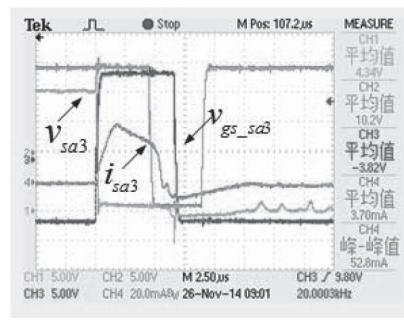
(a)

图 6(a)中通道 1 为主开关管 S_2 的电压波形，通道 4 为主开关管 S_2 的电流波形，通道 3 为辅助开关管 S_{a2} 的驱动信号。能够验证 S_2 零电压开通，降低了开关管的功率损耗。



(b)

图 6 (b) 中通道 1 为辅助开关管 S_{a2} 的电压波形，通道 4 为 S_{a2} 的电流波形，通道 2 为 S_{a2} 的驱动信号。能够验证 S_{a2} 零电压开通，降低了开关管的功率损耗。



(c)

图 6 Buck 模式下开关管的实验波形 (C 型)

图 6 (c) 中通道 1 为辅助开关管 S_{a3} 的电压波形，通道 4 为 S_{a3} 的电流波形，通道 3 为 S_{a3} 的驱动信号。能够验证 S_{a3} 零电流关断，降低了开关损耗，提高了系统效率。

本文在低压下验证了变换器在 Buck 工作模式时主开关管 S_2 零电压开通与 S_{a2} 零电压开通 S_{a3} 零电流关断。变换器在 Boost 模式下的工作原理与传统的 ZVT-BOOST 电路工作原理相同，已在商业中得到了良好的应用。因此本文实验不验证 Boost 模式。

4 结论

虽然变换器加入了三个辅助开关管，在一些情

况下会增加系统的复杂性和功率损耗，但所有的开关管器件在开通和关断时均实现了 ZVS 或 ZCS，有效的减少了电磁干扰。此外，驱动信号可由简单的逻辑电路产生，降低了变换器控制的难易程度。本文将含有两种工作方式的 Buck 变换器与传统的 ZVT-BOOST 变换器相结合研究了一种新型软开关双向 DC/DC 变换器。有望在今后的储能系统应用中得到广泛而深刻的讨论。

参考文献

- [1] Guoyi Xu, Lie Xu, D. John Morrow, and Dong Chen, “Coordinated DC Voltage Control of Wind Turbine With Embedded Energy Storage System,” IEEE Trans. Energy Conversion., vol. 27, no. 4, Dec. 2012, pp. 1036-1045.
- [2] Jung-Hyo Lee, Dong-Ho Yu, Jun-Gu Kim, Young-Ho Kim, Soo-Cheol Shin, Doo-Yong Jung, Yong-Chae Jung, and Chung-Yuen Won , “Auxiliary Switch Control of a Bidirectional Soft-Switching DC/DC Converter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 28, no. 12, pp. 54–65, Dec. 2013.
- [3] R. T. Naayagi, Andrew J. Forsyth, and R. Shuttleworth, “High-Power Bidirectional DC-DC Converter for Aerospace Applications,” IEEE Trans. Power Electron. , vol. 27, no. 11, Nov. 2012, pp. 4366-4379.
- [4] M. Ahmadi M.R. Mohammadi E. Adib H. Farzanehfard, “Family of non-isolated zero current transition bi-directional converters with one auxiliary switch,” IET Power Electron., 2012, Vol. 5, Iss. 2, pp. 158–165.
- [5] J.-S. Lai and D. J. Nelson, “Energy management power converters in hybrid electric and fuel cell vehicles,” Proc. IEEE, vol. 95, no. 4, pp. 766–777, Apr. 2007.[D].
- [6] Hacı Bodur, and A. Faruk Bakan, “A New ZVT-PWM DC-DC Converter,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 17, no. 1, pp. 40–47, Jan. 2002.
- [7] Burak Akin and Haci Bodur, “A New Single-Phase Soft-Switching Power Factor Correction Converter,” IEEE Trans. Power Electron. , vol. 26, no. 2, Feb. 2011, pp. 436-443.
- [8] Jong-Lick Lin, and Chin-Hua Chang, “Small-Signal Modeling and Control of ZVT-PWM Boost Converters” IEEE Trans. Power Electron. , vol. 18, no. 1, Jan. 2003, pp. 2-10.
- [9] 吴飞红, 陆珏晶, 石巍, 张君君, 邢岩, 一族非隔离双向直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012 年 9 期
- [10] 潘雨辰, 张相军, 佟德军, 徐殿国, 基于超级电容的数字双向变换器的研究[J]. 中国电工技术学会电力电子学会第十三届学术年会, 2012, 20 (4): 50-55.