

单 Buck/Boost 集成三端口双向 DC/DC 变换器研究

刘飞龙, 孙孝峰, 申彦峰, 王立乔

(电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 河北省 秦皇岛市 066004)

Research on Single Buck/Boost-Integrated Three-Port Bidirectional DC/DC Converter

LIU Feilong, SUN Xiaofeng, SHEN Yanfeng, WANG Liqiao

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation & Motor Drive of Hebei Province (College of Electrical Engineering, Yanshan University), Qinhuangdao 066004, Hebei Province, China)

中图分类号: TN86 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2016)05-4-140

摘要: 该文通过复用原边开关管, 将双向 Buck/Boost 电路与 DAB 集成在一起构成三端口双向 DC/DC 变换器。DAB 的移相角控制变压器两侧的能量双向流动, 调节输出电压; 而双向 Buck/Boost 电路的占空比用来控制前级母线电压, 该端口可接入光伏等新能源, 前级全桥单元采用交错并联 PWM 方式可以自动实现变压器原边伏秒平衡。论文分析系统稳态特性及软开关特性, 在前级母线电压宽范围幅值变化情况下, 所有的功率开关可以在宽范围内实现软开关。最后通过实验样机进行方案验证。

关键词: 三端口变换器; 双向 DC/DC 变换器; 移相 PWM 控制; 软开关

1 引言

能源危机及环境污染问题使得以风力、光伏为代表的新能源分布式发电技术得到迅速发展^[1]。分布式发电系统将分布式能源、储能单元等各自通过 DC/DC 变换器并联在公共直流母线上, 为本地负载供电或通过一个 DC/AC 单元并网运行^[2]; 对小容量混合供电系统, 为实现结构紧凑, 降低成本, 可采用多输入 DC/DC 变换器^[3-4]。多端口变换器以其单级功率变换、开关管或无源滤波器件复用等优点成为了很好的解决方案, 并被广泛研究^[5-7]。

为实现节能, 双向能量控制对于变流系统而言越来越重要, 例如分布式供电系统中储能环节的充放电控制等。双有源桥式(Dual Active Bridge, DAB)变换器是典型的 DC/DC 双向变流单元, 具有双向、可实现软开关等特点^[8], 但也存在电压源端口电流纹波大及宽输入电压范围时软开关范围降低等缺点, 优化 DAB 特性或以 DAB 为基本电路拓扑单元进行演化改进电路拓扑成为一个热点问题^[9-11]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077112)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (51077112).

文献[9]在 DAB 变换器基础上引入 Buck/Boost 电路, 其特点是在输入端口串有电感, 电流纹波减小。文献[10]提出变压器原副边半周期伏秒积相等概念, 能够保证 DAB 宽输入电压范围下实现软开关。文献[11]在 DAB 基础上拓展成为三端口 DC/DC 变换器, 但其电压利用率低, 承受的电流应力较高, 通态损耗和开关损耗较大。

本文在 DAB 原边侧复合一个双向 Buck/Boost 电路, 构成一个三端口变换器, 其特点是: 内部集成两个能量双向单元; 复用一个开关桥臂; 在调节输出电压的同时可以控制 Buck/Boost 一个端口电压或电感电流; 前级采用交错并联 PWM 方式, 前后级采用移相方式控制。

2 三端口双向 DC/DC 变换器拓扑

三端口双向 DC/DC 变换器拓扑如图 1 所示, 该拓扑由两部分复合而成: S_1 - S_2 桥臂对与 S_3 - S_4 桥臂对构成一个全桥单元, 通过变压器连接副边半桥单元, 构成 DAB 电路; 电感 L_b 通过与 S_1 - S_2 桥臂对复用构成一个双向 Buck/Boost 单元。该变换器任意两个端口间都可进行能量的双向流动, 可以应用在新能源+储能单元联合供电等系统中。

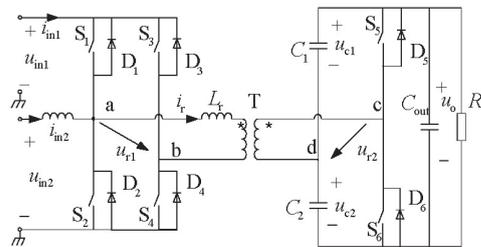


图 1 三端口双向 DC/DC 变换器拓扑及等效电路图

图 2 所示为移相 PWM 控制方法: S_1 与 S_2 的驱动信号互补, S_3 与 S_4 的驱动信号互补, S_1 的驱动信号超前 S_3 180° , 且 S_1 和 S_3 的导通时间相等,

S_5 与 S_6 的驱动信号互补, 且导通时间相等; ϕ 为变压器原副边电压的相位差, D 表示 S_1 的占空比。

3 工作特性分析

3.1 基本工作原理分析

文献[10]针对 DAB 中变压器两侧波形的相位关系, 分为左外部、右外部、内部三种工作模式, 下面以左外部工作模式为例, 结合图 2 来分析变换器的工作原理, 图 3 为该变换器在一个周期内各个工作状态图。

状态 1 ($t_0 \sim t_1$): 如图 3(a)所示, t_0 时刻, S_2 关断, D_1 续流, 可以实现 S_1 的零电压开通, 原边电流 i_r 迅速反向减小, 当 i_r 换向时, 由 D_4 、 D_6 导通分别转换为 S_4 、 S_6 导通。

状态 2 ($t_1 \sim t_2$): 如图 3(b)所示, t_1 时刻, S_6 关断, D_5 续流, 可以实现 S_5 的零电压开通, 原边电流 i_r 正向增大, 当 i_r 大于 i_{in2} 时, 由 D_1 导通转换为 S_1 导通。

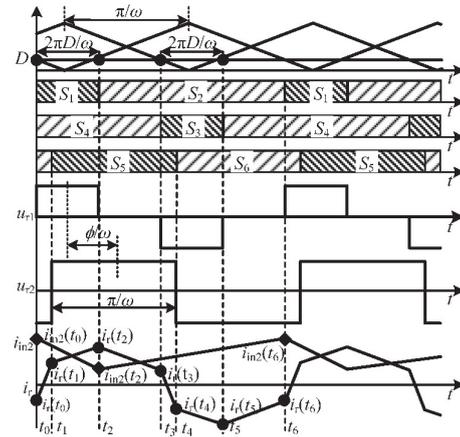


图 2 系统控制信号及相应工作波形

状态 3 ($t_2 \sim t_3$): 如图 3(c)所示, t_2 时刻, S_1 关断, D_2 续流, 可以实现 S_2 的零电压开通, 原边电流 i_r 正向减小, 当 i_r 小于 i_{in2} 时, 由 D_2 导通转换为 S_2 导通。状态 4($t_3 \sim t_4$)、状态 5($t_4 \sim t_5$)、状态 6($t_5 \sim t_6$)分别与上述三个状态相似, 这里不再赘述。

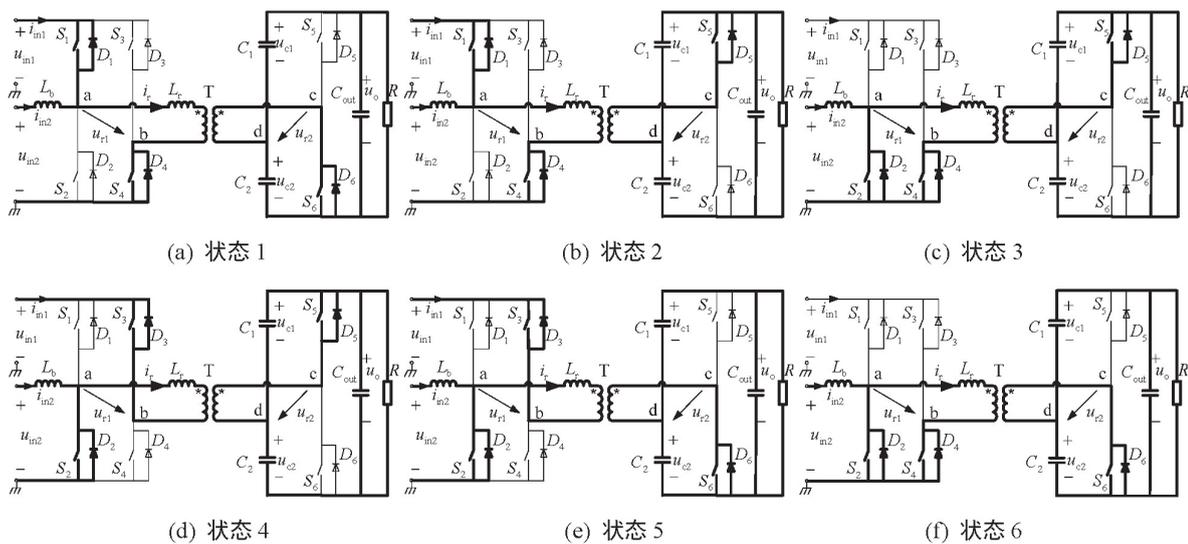


图 3 三端口双向 DC/DC 变换器各工作状态

3.2 稳态特性及软开关条件分析

当移相角满足 $\phi > \pi(1/2 - D)$ 时, 变换器工作在左外部模式, 由上述各状态分析可以求出

$$\begin{cases} i_r(t_0) = -(U_{in2}/\pi f_s L_r)[\phi - \pi(1/2 - D)] \\ i_r(t_1) = (U_{in2}/2\pi D f_s L_r)[\phi - \pi(1/2 - D)] \\ i_r(t_2) = (U_{in2}/\pi f_s L_r)[\phi + \pi(1/2 - D)] \end{cases} \quad (1)$$

对于输入电感, 通过功率守恒可以求出

$$\begin{cases} i_{in2}(t_0) = (P_o - P_{in1})/U_{in2} + U_{in2}(1 - D)/2 f_s L_d \\ i_{in2}(t_2) = (P_o - P_{in1})/U_{in2} - U_{in2}(1 - D)/2 f_s L_d \end{cases} \quad (2)$$

左外部工作模式下, 实现 ZVS 需要满足

$$\begin{cases} i_r(t_0) < i_{in2}(t_0), & i_r(t_2) > i_{in2}(t_2) \\ i_r(t_0) < 0, & i_r(t_2) > 0 \\ i_r(t_1) > 0 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(1)、(2)、(3), 求得左外部 ZVS 条件

$$\begin{cases} \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi - \pi(\frac{1}{2} - D)] + \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} + \frac{U_{in2}(1 - D)}{2 f_s L_d} > 0 \\ \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi + \pi(\frac{1}{2} - D)] - \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} + \frac{U_{in2}(1 - D)}{2 f_s L_d} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

同理推导出右外部模式实现 ZVS 条件如下

$$\begin{cases} \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi - \pi(\frac{1}{2} - D)] - \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} - \frac{U_{in2}(1-D)}{2f_s L_d} < 0 \\ \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi + \pi(\frac{1}{2} - D)] + \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} - \frac{U_{in2}(1-D)}{2f_s L_d} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

内部模式下, $i_r(t_2) = 0$, 说明内部模式变换器副边半桥单元开关管实现 ZCS, 原边全桥单元实现 ZVS 的限制条件如下

$$\begin{cases} \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi - \pi(\frac{1}{2} - D)] - \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} - \frac{U_{in2}(1-D)}{2f_s L_d} < 0 \\ \frac{U_{in2}}{\pi f_s L_r} [\phi + \pi(\frac{1}{2} - D)] - \frac{P_o - P_{in1}}{U_{in2}} + \frac{U_{in2}(1-D)}{2f_s L_d} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

令 $\phi_A = \pi(1/2 - D)$, 求出输出功率表达式为

$$P_o = \begin{cases} \frac{U_{in2}^2}{\pi^2 D f_s L_r} [\phi(\pi - \phi) - \pi^2(\frac{1}{2} - D)^2], (\phi > \phi_A) \\ \frac{2\phi U_{in2}^2}{\pi f_s L_r}, (|\phi| \leq \phi_A) \\ \frac{U_{in2}^2}{\pi^2 D f_s L_r} [\phi(\pi + \phi) + \pi^2(\frac{1}{2} - D)^2], (\phi < -\phi_A) \end{cases} \quad (7)$$

功率表达式看出, 通过改变移相角 ϕ 、占空比 D 、开关频率 f_s 、输入电压 U_{in2} 以及变压器漏感 L_r , 可以调节系统的输出功率。图 4 画出了 P_o 与 ϕ 和 D 关系图, 图中 $P_o(\text{p.u.})$ 是以 $P_A = U_{in2}^2 / (\pi f_s L_r)$ 为基值归一化的结果。

图 5 给出不同占空比时实现 ZVS 的条件, 随着 D 减小, 可实现 ZVS 范围增大。传统的移相控制方式, 占空比固定为 0.5, 能量反向时, S_1 - S_2 桥臂不能实现 ZVS 开通; 采用本文提出的移相加 PWM 控制方式, 在能量双向流动情况下, 系统均可以实现 ZVS (除内部模式下 S_5 - S_6 桥臂为 ZCS 以外)。

4 系统控制与实验

应用在光伏+储能单元联合供电系统中, 该变换器的端口 1 和 2 可分别接入光伏电池和蓄电池。通过控制占空比 D 可以实现对光伏电池输出电压的控制, 从而实现其最大功率输出。为简化系统设计与实验, 本文用直流源代替光伏电池接入端口 1, 采用图 6 所示的双电压环控制, 建立一个 $\pm 200\text{W}$ 输出的实验样机: $U_{in1} = 48 \sim 80\text{V}$, $U_{in2} = 24\text{V}$, $U_o = 96\text{V}$, $n = 1$, $L_r = 11.74 \mu\text{H}$, $L_b = 106 \mu\text{H}$, $f_s = 50\text{kHz}$ 。

图 7 为不同模式下变换器稳态实验结果, 可以看出, 与上述工作原理分析一致。图 8 给出变换器负载切换波形, i_{in2} 为蓄电池电流, 图 8(a)为负载耗能切换到负载馈能的波形, 图 8(b)为负载馈能切换

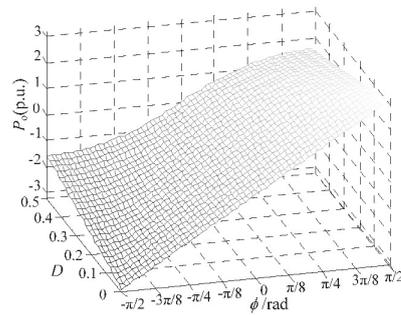
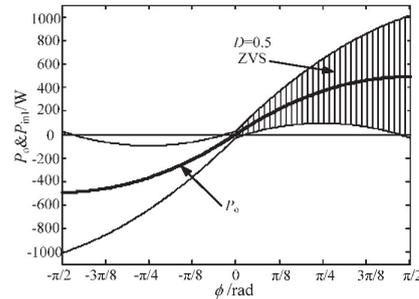
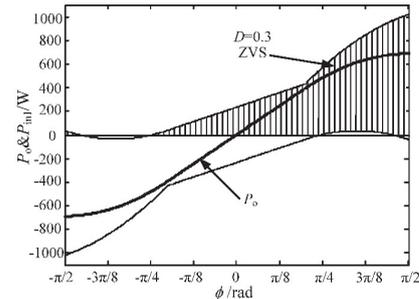


图 4 输出功率与移相角及占空比关系



(a) $D=0.5$



(b) $D=0.3$

图 5 不同占空比时实现 ZVS 的条件

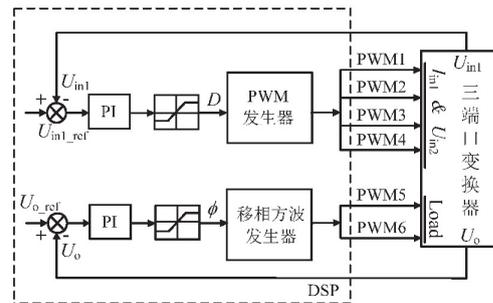


图 6 系统控制结构图

到负载耗能的波形, 负载耗能较重时, 蓄电池放电, 负载馈能时, 蓄电池充电用来吸收来自端口 1 与负载的能量之和。负载切换瞬间, 端口 1 电压与输出电压经过短暂的调节后基本保持不变。

由于电路对称性, S_4 、 S_6 分别与同一桥臂 S_3 、 S_5 软开关相似, 图 9 为开关管 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_5 零电压开通波形, 漏源极电压下降沿超前于相应开关管驱动电压的上升沿, 开关管在导通之前, 其反并联

的二极管首先续流导通，实现了零电压开通。

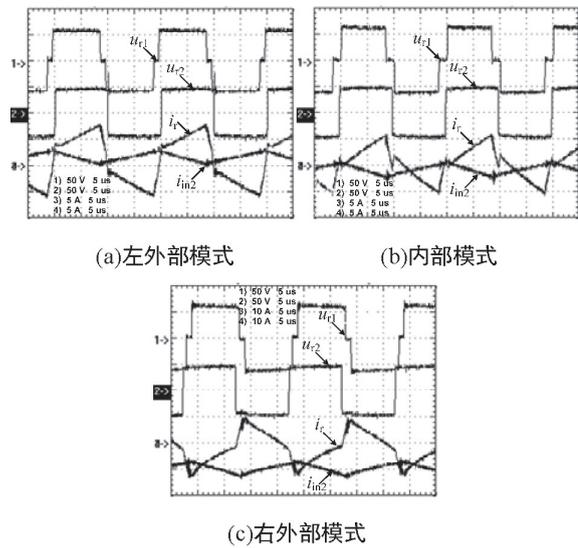


图7 不同模式下变换器稳态工作波形

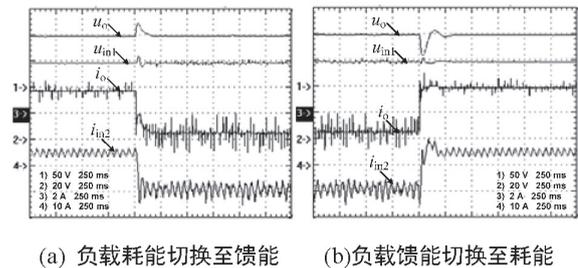


图8 负载突变相关工作波形

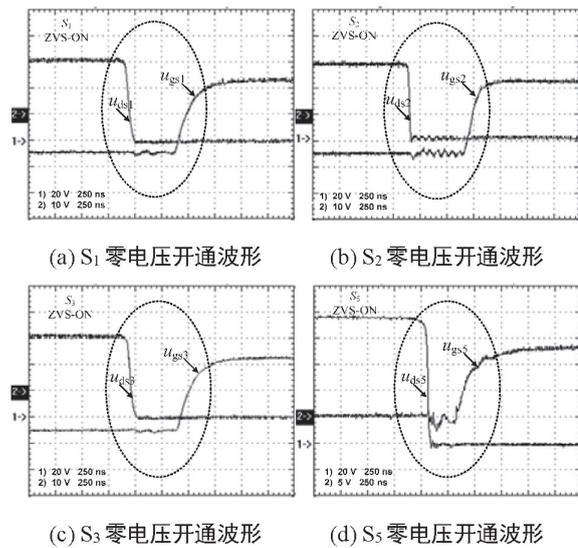


图9 开关管零电压开通波形

4 结论

本文将双向 Buck/Boost 电路与 DAB 电路集成构成三端口双向变换器，实现桥臂开关管的共享，简化电路结构，降低系统成本。采用交错并联 PWM 方式控制前级一个端口电压，通过控制前后级移相

角来调节系统能量的双向流动及输出电压。当原边母线电压在较宽范围变化时，能保证所有开关管在较宽的工作范围内实现软开关。该变换器适用于可再生能源发电和燃料电池电动汽车等系统中。

参考文献

- [1] Iannone F, Leva S, Zaninelli D. Hybrid photovoltaic and hybrid photovoltaic-fuel cell system: economic and environmental analysis[C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, IEEE, 2005: 1503-1509.
- [2] Solero L, Lidozzi A, Pomilio J A. Design of multiple-input power converter for hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5): 1007-1016.
- [3] 李艳, 阮新波, 杨东升, 等. 无缓冲单元的多输入直流变换器电路拓扑[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 73-79.
- [4] 王勤, 阮新波, 张杰, 等. 基于脉冲源单元的单次绕组隔离型多输入变换器[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 115-122.
- [5] 吴红飞, 夏炎冰, 邢岩. 基于双输入/双输出变换器的三端口变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 45-51.
- [6] 刘福鑫, 阮新波. 一种多端口直流变换器的系统生成方法——采用单极性脉冲电源单元[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(6): 72-80.
- [7] Zhao Chuanhong, Round S D, Kolar J W. An isolated three-port bidirectional DC/DC converter with decoupled power flow management[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2443-2453.
- [8] Donker R W, Divan D M, Kheraluwala M H. A three-phase soft-switched high-power-density dc/dc converter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(1): 63-73.
- [9] Peng Fangzheng, Li Hui, Su Guijia, et al. A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 54-65.
- [10] Tao Haimin, Kotsopoulos A, Duarte J L, et al. Transformer-coupled multiport ZVS bidirectional DC-DC converter with wide input range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(2), 771-781.
- [11] Su Guijia, Peng Fangzheng. A low cost, triple-voltage bus DC-DC converter for automotive applications[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition Records, Austin, IEEE, 2005: 1015-1021.

作者简介: 刘飞龙(1987), 男, 博士, 主要从事新能源发电, 变流器拓扑与控制方面的研究工作, 910719199@qq.com。