

用于光伏并网的交错型双管 Buck-Boost 变换器

肖华锋, 谢少军

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏省南京市 210016)

An Interleaving Double-switch Buck-Boost Converter for PV Grid-connected Inverter

XIAO Hua-feng, XIE Shao-jun

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: Charactered with noninverting and step up/down conversion, the double-switch Buck-Boost converter is suit for the front stage of the two-stage photovoltaic (PV) grid-connected inverter. But, the large inductor is needed in conventional control strategy, and the sophisticated control logic and difficult compensation technique for smooth transitions are included in combinatorial control strategy. In order to reduce the inductor and simplify the control logic, an interleaving control strategy was proposed. The operation principle of the proposed control strategy and the characteristics were analyzed, and several indexes in different control strategies were compared. Finally, the interleaving operation principle was verified by a 3 kW two-stage PV grid-connected inverter prototype.

KEY WORDS: grid-connected inverter; double-switch Buck-Boost converter; interleaving control

摘要: 双管 Buck-Boost 变换器拥有输入输出电压同极性和可升降压等特性, 适合于两级式光伏并网逆变器中前级直流变换, 但其同步开关方式需要较大的储能电感, 且组合式开关方式控制电路复杂、实现工作模式无缝切换较困难。提出一种交错开关型双管 Buck-Boost 变换器, 可使储能电感最小、控制电路简单, 并实现无工作模式切换。分析了该变换器的工作原理和特性, 比较 3 种开关方式下几个主要特性的优劣。最后通过一台 3 kW 两级式并网逆变器, 验证了所提变换器工作原理的正确性。

关键词: 并网逆变器; 双管 Buck-Boost 变换器; 交错控制

0 引言

在锂电池供电系统^[1]、燃料电池汽车^[2]、通信电源^[3]和功率因数校正(power factor correction, PFC)^[4]

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008391); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX08B_070Z)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2008391); Project Supported by Colleges and Universities in Jiangsu Province Plans to Graduate Research and Innovation (CX08B_070Z)。

等场合需要采用具有升、降压特性的 DC-DC 变换器, 双管 Buck-Boost 变换器因其输入输出电压同极性、器件应力低和适合较大功率变换等特性近年来受到了广泛关注^[1-3,5-7]。光伏发电并网是一种低维护成本的利用方式, 在世界光伏发电累计装机容量中, 并网利用所占百分比从 1992 年的 29%提高到了 2008 年的 95%^[8], 并呈逐年上升趋势。其中, 户用屋顶光伏并网系统是一种重要的安装形式, 其电池阵列功率等级一般为 2~5 kW, 由多个太阳能电池板串联输出电压约为直流 200~700 V。其较宽的输入电压范围给单级式并网逆变器的优化设计带来了极大挑战, 而采用两级式结构可以使系统分级优化和控制^[9-10], 因此整个系统设计非常方便。目前, 光伏并网逆变器一般采用两级式结构, 其中前级直流变换器主要完成电池电压到中间母线电压的变换和最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT), 按是否带变压器可分为隔离式和非隔离式 2 种。在现有产品中, 非隔离式直流变换器普遍采用 Boost 变换器^[11], 在电池电压较低时实现升压功能, 电池电压升高时则停止 Boost 变换器, 由后级逆变器同时实现降压和并网功能, 这样势必增加逆变器的容量。

双管 Buck-Boost 变换器具有输入输出电压同极性和升降压特性, 适用作宽输入电压的两级式并网逆变器的前级直流变换。双管 Buck-Boost 变换器主要有同步开关和组合开关 2 种控制方式。同步开关方式^[12]下需要较大的储能电感, 不利于变换器效率和体积大小的改善; 组合开关方式^[3,6-7]可降低开关损耗; 两种工作模式的平滑过渡很困难, 需要复杂的控制电路来实现。文献[6-7]研究了组合式双管 Buck-Boost 变换器过渡过程的实现方式和提高平滑过渡特性的补偿措施。文献[3]在 2 种模态的过渡过程中引入“滤波模式”, 使在与输入输出电压大小接

近的一个小范围内变换效率最大, 但此模式为开环状态, 若应用于光伏并网逆变器时不能实现工作范围内的最大功率点跟踪。

交错控制技术在多通道变换器中应用广泛^[13-14], 可明显地降低输出脉动量和减小滤波电感。在已有的文献^[13-17]中, 交错控制均施加在主电路完全对称的多通道上, 而在单一变换器内部的不对称电路上未见应用。本文基于双管 Buck-Boost 变换器提出一种新的交错开关方式。分析交错开关型双管 Buck-Boost 变换器的工作原理和特性; 重点讨论同步开关方式、组合开关方式和交错开关方式下, 该变换器在几个主要特性方面的比较; 最后通过一台 200~550 V 电池电压输入、3 kW、220 V/50 Hz 交流并网样机, 验证交错开关方式的正确性和在光伏并网逆变器中的实际应用效果。

1 交错控制双管 Buck-Boost 变换器

1.1 电路工作原理

双管 Buck-Boost 变换器主电路如图 1(a)所示, S_1 、 S_2 为主开关管, D_1 、 D_2 为续流二极管, L 为储能电感, C_{pv} 和 C_{dc} 分别为输入侧和输出侧的滤波电容。图 1(b)为双管 Buck-Boost 变换器的传统控制方式(同步开关方式)下的稳态工作波形, 其中 D 为占空比。 S_1 和 S_2 同时开通或关断, 2 个主要工作模式如图 2(a)、(b)所示(电感电流连续时), 分别为电感储能和释能。

双管 Buck-Boost 变换器采用 2 个功率管, 给开关控制方式带来了较大的灵活性。可行的控制方式有: 1) S_1 、 S_2 的开通持续时间相等, 移相 ϕ 角度任

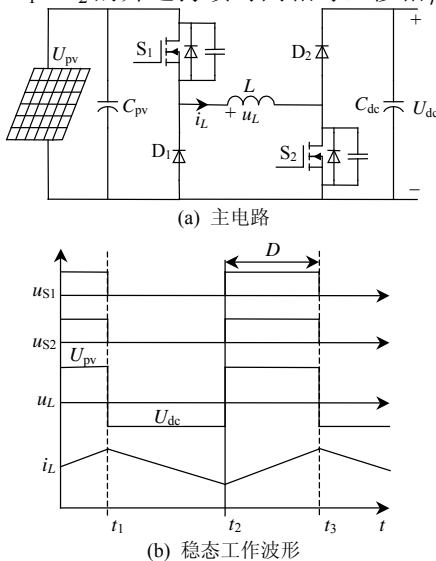


图 1 双管 Buck-Boost 变换器及其同步开关控制策略
Fig. 1 Main circuit and synchronization control scheme of double-switch Buck-Boost converter

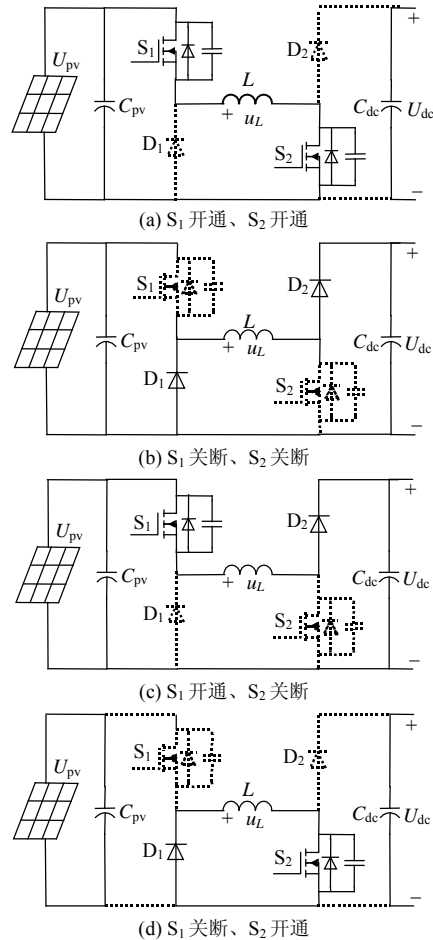
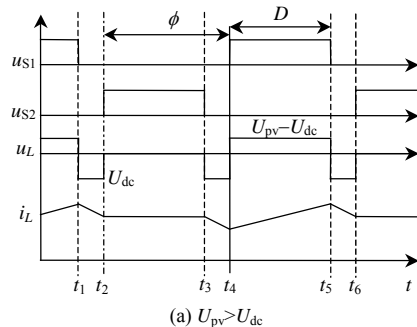


图 2 双管 Buck-Boost 变换器工作模式
Fig. 2 Operation mode of double-switch Buck-Boost converter

意(图 1(b)和图 3 分别为 $\phi=0^\circ$ 和 $\phi=180^\circ$ 的特例); 2) S_1 、 S_2 开通持续时间不等, 开通时刻移相 ϕ 角度; 3) S_1 开通持续时间恒定, S_2 开通持续时间变化, 开通时刻移相 ϕ 角度(特例为 S_1 一直开通, S_2 调节, 即 Boost 模式); 4) S_2 开通持续时间恒定, S_1 开通持续时间变化, 开通时刻移相 ϕ 角度(特例为 S_2 一直关断, S_1 调节, 即 Buck 模式)。其中实现方式最简单的为 S_1 、 S_2 的占空比相等, 可以同步开关, 也可以交错任意角度开关, 即本文提出的交错开关方式。

交错开关方式工作波形图如图 3 所示, 此时



(a) $U_{pv} > U_{dc}$

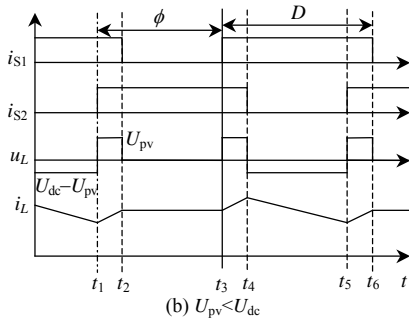


图 3 双管 Buck-Boost 变换器的交错控制策略
Fig. 3 Interleaving control strategy for double-switch Buck-Boost converter

$\phi=180^\circ$ 。当 $U_{pv} > U_{dc}$ (如图 3(a)所示)时, 变换器的主要工作模态如图 2(b)、(c)、(d)所示; 当 $U_{pv} < U_{dc}$ (如

图 3(b)所示)时, 变换器的主要工作模态如图 2(a)、(c)、(d)所示。对比图 3 和图 1(b)可以发现, 同步开关方式下电感 L 上的电压仅 U_{pv} 和 $-U_{dc}$ 2 种电平, 而交错开关方式下出现 3 种电平, 即 $U_{pv}-U_{dc}$ 、 0 、 $-U_{dc}$, 或 U_{pv} 、 0 、 $U_{pv}-U_{dc}$, 且幅值有所降低, 这有效降低了电感电流脉动量, 有利于减小电感体积。

1.2 变换器特性分析

以图 3 中描述的交错开关方式为例, 分析双管 Buck-Boost 变换器的直流特性。由电感伏秒平衡得到变换器的输入输出关系和电感量的表达式:

$$\frac{U_{dc}}{U_{pv}} = \frac{D}{1-D} \quad (1)$$

$$L = \begin{cases} \frac{(U_{pv} - U_{dc})U_{dc}}{(U_{pv} - U_{dc})\Delta if_S}, & 0.5 > D < \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D < 1 \\ \frac{U_{pv}U_{dc}/(U_{pv} - U_{dc}) - U_{pv}(1 - \phi/360)}{\Delta if_S}, & 0.5 < D < \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D > 1 \\ \frac{U_{pv}U_{dc}/(U_{pv} - U_{dc}) - U_{dc}(1 - \phi/360)}{\Delta if_S}, & 0.5 > D < \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D > 1 \\ \frac{U_{pv}U_{dc}/(U_{pv} - U_{dc}) - U_{pv}\phi/360}{\Delta if_S}, & 0.5 < D > \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D < 1 \\ \frac{U_{pv}U_{dc}/(U_{pv} - U_{dc}) - U_{dc}\phi/360}{\Delta if_S}, & 0.5 > D > \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D < 1 \\ \frac{U_{pv}(U_{dc} - U_{pv})}{(U_{pv} - U_{dc})\Delta if_S}, & 0.5 > D > \frac{\phi}{360} \text{ 或 } \frac{\phi}{360} + D > 1 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可得, 在太阳能电池电压变化范围为 200~600 V 时, 电感量 L 与输入电压 U_{pv} 在不同相移角度时的关系如图 4 所示。可见, 随着相移角度在 $0\sim 360^\circ$ 之间变化时达到同样的电感电流脉动量所需的电感值先变小再变大, 在 $\phi=180^\circ$ 时最小。特别地, 当输入电压和输出电压相等, 即 $U_{pv}=U_{dc}=400$ V 时, 电感电流脉动量为零。本文重点研究 $\phi=180^\circ$ 时的变换器特性, 所以下文中交错开关方式均特指 $\phi=180^\circ$ 。

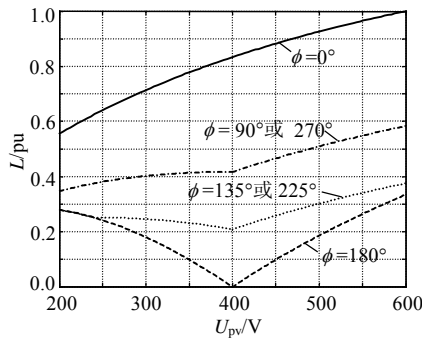


图 4 储能电感 L 与输入电压 U_{pv} 的关系曲线
Fig. 4 Curves of the inductor L versus the input voltage U_{pv} at different ϕ angle

2 几种开关方式的比较

2.1 储能电感大小

在双管 Buck-Boost 变换器的开关方式中, 研究和应用最普遍的是同步开关方式和 Buck、Boost 分时单独工作(根据输入输出电压大小关系而定)的组合式开关方式。

同步开关方式下双管 Buck-Boost 变换器电感量的表达式为

$$L = \frac{U_{pv}U_{dc}}{(U_{pv} + U_{dc})\Delta if_S} \quad (3)$$

单 Buck 模式下变换器电感量的表达式为

$$L = \frac{U_{dc}(U_{pv} - U_{dc})}{U_{pv}\Delta if_S} \quad (4)$$

单 Boost 模式下变换器电感量的表达式为

$$L = \frac{U_{pv}(U_{dc} - U_{pv})}{U_{dc}\Delta if_S} \quad (5)$$

结合式(2)~(5), 可绘制出不同开关方式下电感量 L 与输入电压 U_{pv} 关系曲线, 如图 5 所示。可见,

交错开关方式下所需电感量最小。

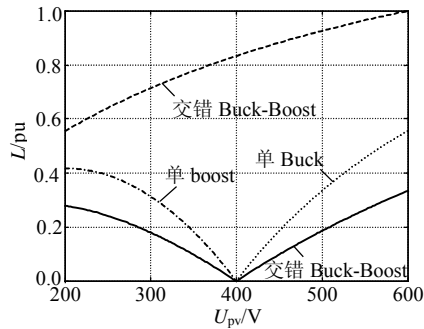


图5 不同开关方式下 L 与 U_{pv} 的关系曲线对比
Fig. 5 Comparison of curves of the inductor L versus the input voltage U_{pv} at different control strategy

2.2 能量传输方式

文献[5]描述了 Buck 和 Boost 变换器的能量传输方式, 输出功率 P_{out} 由 2 部分组成: $P_{indirect}$ 经储能电感由开关器件处理, P_{direct} 直接由输入流向输出。这种功率直接传输能力降低了器件应力、能量存储, 提高了效率。在同步开关方式下, 输出功率全部经开关器件处理, $P_{direct}=0$; 交错开关方式下, 图 3(c)所示模态即为功率直接由输入流向输出, 故 $P_{direct} \neq 0$ 。

2.3 控制电路实现方式

双管 Buck-Boost 变换器无论用同步开关方式还是交错开关方式控制, 2 个开关管在整个输入电压范围内均高频工作, 仅需一套脉宽调制(pulse width modulation, PWM)形成电路和闭环补偿电路, 实现简单, 稳定性和可靠性高。而在 Buck、Boost 组合开关方式下存在 2 种工作模式的切换(当输入电压与输出电压相等时为切换点), 且寄生参数和元件导通损耗的存在导致不同输出功率时模式切换点不同, 这就需要引入过渡状态(Buck-Boost 模式^[6]或滤波模式^[3]), 使得切换过程更加复杂, 降低了输出电压质量。另外, 一般需要 2 套 PWM 形成电路和闭环补偿电路, 稳定性和可靠性不高。

表 1 为 3 种开关方式下几个主要性能的定性比较。可以看出, 组合开关方式和交错开关方式各有优劣。对于以效率为设计目标的应用场合, 组合开关方式是最优的, 它可在较复杂的实现方式下使高频工作的器件最少, 特别适合用于锂电池供电的便携式产品, 可延长电池的使用时间, 而高集成度实现技术可缓解控制电路复杂的劣势。在太阳能并网发电领域, 成本是当前制约其普及的最重要的因素^[18-20], 本文提出的交错开关方式是更适合的选

择, 它使成本最低并兼顾了效率的提高, 性价比高。

表 1 3 种开关方式下几个主要方面的比较

Tab. 1 Comparison of three control strategies

性能指标	同步开关	组合开关	交错开关
储能电感	最大	较大	最小
能量直接传输	无	有	有
控制电路实现	简单	复杂	简单
高频开关器件数量	2	1/2	2

3 实验研究

本文开发了 3 kW 两级式非隔离光伏并网逆变器样机, 前级为非隔离式双管 Buck-Boost 变换器, 后级为全桥逆变结构。前级部分的主要参数如表 2 所示。图 6 为 3 kW 两级式并网逆变器中双管 Buck-Boost 变换器主要元件的布局。

图 7(a)、(c)、(e)为双管 Buck-Boost 变换器同步开关方式下, 不同输入电压时的稳态工作波形图, 图 7(b)、(d)、(f)为交错开关方式下不同输入电压下的稳态工作波形图, 均与理论分析完全一致。图 6 中, $U_{dc}=375$ V, $P_{out}=2.8$ kW。通过对比图 7(a)和(b)、

表 2 两级式并网逆变器样机中 Buck-Boost 变换器参数

Tab. 2 Parameters of Buck-Boost converter in two stage grid-connected inverter

参数	数值
输入电压/V	200~550
输出电压/V	375
额定功率/W	3 200
开关频率/kHz	50
S_1 、 S_2	3×STY60NM60
D_1 、 D_2	3×RHRG5060
储能电感 L	磁心 4×55 439-A2 (MPP, From Magnetics Company.)
	线径 d /mm 2.24
	匝数 N 58
输入侧 π 型滤波器	电容 1 2 只 470 μ F/400 V 串联
	磁心 3×55 076-A2 (MPP, From Magnetics Company.)
	线径 d /mm 2×1.35
	匝数 N 40
	电容 2 36 μ F/600 V
输出母线电容 C_{dc}/μ F	2 820

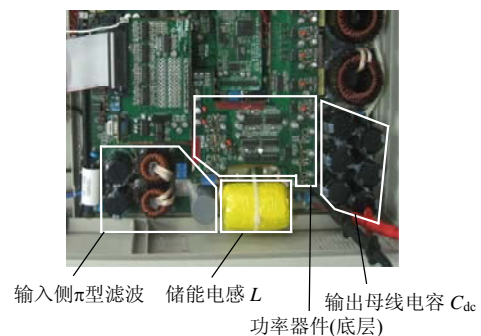
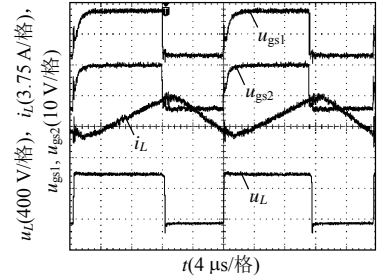


图 6 样机内部图

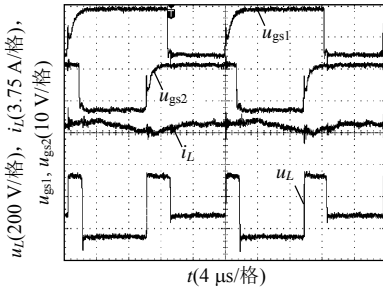
Fig. 6 Figure of prototype

(c)和(d)、(e)和(f)，可以看出在相同的实验条件下，交错开关方式下的电感电流脉动量明显减小，电感上电压为 3 种电平。特别地，图 7(d)中电感电流脉动量几乎为零，与理论分析一致。

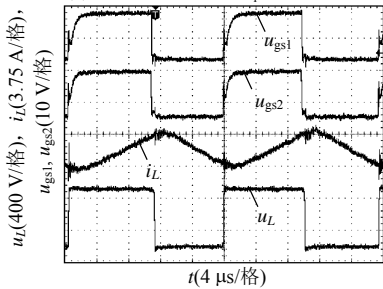
交错开关方式有效地减小了滤波电感电流脉



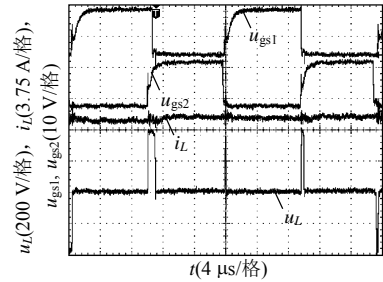
(a) 同步开关方式, $U_{pv}=250\text{ V}$



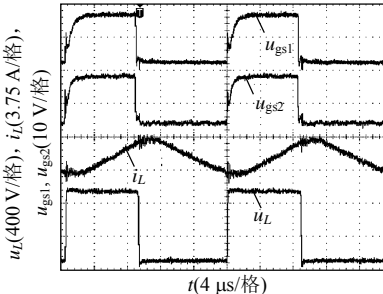
(b) 交错开关方式, $U_{pv}=250\text{ V}$



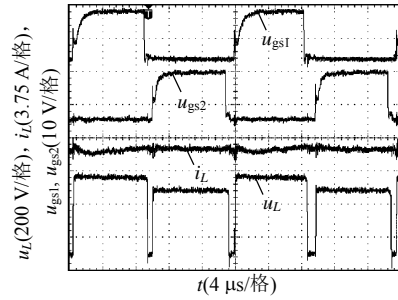
(c) 同步开关方式, $U_{pv}=370\text{ V}$



(d) 交错开关方式, $U_{pv}=370\text{ V}$



(e) 同步开关方式, $U_{pv}=450\text{ V}$



(f) 交错开关方式, $U_{pv}=450\text{ V}$

图 7 同步开关方式和交错开关方式下双管 Buck-Boost 变换器稳态工作波形对比

Fig. 7 Key waveforms comparison in traditional control mode and improved control mode

动，在降低磁心损耗和线圈损耗的同时也减小了器件导通损耗和关断损耗，同时还存在功率直接传输模式，这些改进均有利于变换器效率的提高。图 8 为两种控制方式下不同输入电压时变换器的效率比较，可以看出，交错开关方式下变换器效率有明显的提高，这对提高两级式并网逆变器整机效率和充分利用太阳能电池有重要意义。

组合开关方式下双管 Buck-Boost 变换器的实验研究文献较多^[1, 3, 6-7]，本文将文献[3]作为参考。比较可得，组合开关方式比交错开关方式下开关损耗有所降低，但开关管的导通损耗和磁心损耗会增加；随着开关频率的提高，组合开关方式的效率会略有提高。当然，由于实验条件的不一致，不能与文献[3]作完全对比，但作为参考是可行的。

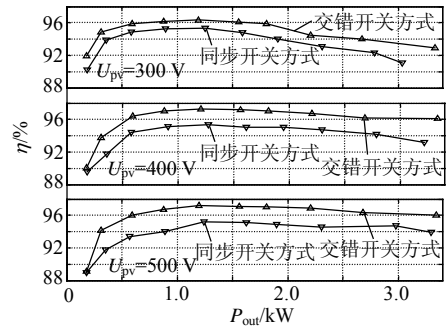


图 8 两种控制方式下

双管 Buck-Boost 变换器效率曲线对比

Fig. 8 Efficiency comparison in traditional control mode and improved control mode

4 结论

双管 Buck-Boost 变换器具有升降压、输入输出同极性、器件应力小等特性，适合应用于两级式光伏并网逆变器的前级直流变换；将提出的交错开关方式应用于双管 Buck-Boost 变换器，可以使储能电感最小、有能量直接传输模式和控制电路简单，是

一种高性价比的控制方案。实际光伏并网逆变器样机实验验证了交错开关型双管 Buck-Boost 变换器的工作原理和特性。

参考文献

- [1] Sahu B, Rincon-Mora G A. A low voltage, dynamic, noninverting, synchronous Buck-Boost converter for portable applications[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, 19(2): 443-452.
- [2] Qiao Haibo, Zhang Yicheng, Yao Yongtao, et al. Analysis of Buck-Boost converters for fuel cell electric vehicles[C]. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shanghai, China, 2006.
- [3] 任小永, 唐钊, 阮新波, 等. 一种新颖的四开关 Buck-Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 15-19.
Ren Xiaoyong, Tang Zhao, Ruan Xinbo, et al. A novel four switch Buck-Boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 15-19(in Chinese).
- [4] Chen Jingquan, Maksimovic D, Erickson E W. Analysis and design of a low-stress Buck-Boost converter in universal-input PFC applications [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2006, 21(2): 320-329.
- [5] Chen Jingquan, Maksimovic D, Erickson E W. Buck-Boost PWM converters having two independently controlled switches[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, 2001.
- [6] Lee Y J, Alireza K, Arindam C, et al. Digital combination of Buck and Boost converters to control a positive Buck-Boost converter and improve the output transients[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(5): 1267-1279.
- [7] Lee Y J, Alireza K, Ali E. A compensation technique for smooth transitions in a noninverting Buck-Boost converter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2009, 24(4): 1002-1016.
- [8] Photovoltaic Power Systems Programme. Trends in photovoltaic applications: survey report of selected IEA countries between 1992 and 2008[R/OL]. Switzerland: International Energy Agency, 2009 [2009-09-25]. http://www.iea-pvps.org/products/download/rep1_18.pdf.
- [9] Ponnaluri S, Linhofer G O, Steinke J K. et al. Comparison of single and two stage topologies for interface of BESS or fuel cell system using the ABB standard power electronics building blocks[C]. 11th European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, Germany, 2005.
- [10] Bae H S, Park J H, Cho B H. New control strategy for 2-stage utility-connected photovoltaic power conditioning system with a low cost digital processor[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Recife, Brazil, 2005.
- [11] SMA. Sunny boy 5000TL multi-string: operating instructions [S/OL]. Niestetal, Germany: SMA Solar Technology AG, 2008 [2009-09-25]. <http://www.sma.de>.
- [12] Chomsuwan K, Prisuwana P, Monyakul V. Photovoltaic grid-connected inverter using two-switch Buck-Boost converter [C]. IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 2002.
- [13] Garth D R, Muldoon W J, Benson G C, et al. Multiphase, 2 kiloWatt, high voltage, regulated power supply[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, Boston, Massachusetts, USA, 1971.
- [14] Miwa B A, Otten D M, Schlecht M F. High efficiency power factor correctin using interleaving techniques[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Boston, Massachusetts, USA, 1992.
- [15] Zhou Xunwei, Zhang Xinzhu, Liu Jiangang, et al. Investigation of candidate VRM topologies for future microprocessors[C]. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim, CA, USA, 1998.
- [16] Czogalla J, Li J, Sullivan C R. Automotive application of multiphase coupled-inductor DC-DC converter[C]. IEEE Industry Applications Conference, Salt Lake City, USA, 2003.
- [17] Wolfs P J. A current-sourced DC-DC converter derived via the duality principle from the half-bridge converter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 139-144.
- [18] 张耀明. 中国太阳能光伏发电产业的现状与前景[J]. 新能源与新材料, 2007(1): 1-6.
Zhang Yaoming. The current status and prospects of solar photovoltaic industry in China[J]. Energy Research & Utilization, 2007(1): 1-6(in Chinese).
- [19] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47-51.
Liu Fangrui, Yu Mi, Zhang Yu, et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47-51(in Chinese).
- [20] 刘邦银, 段善旭, 胡欢, 等. 直流模块式建筑集成光伏系统的协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(14): 109-114.
Liu Bangyin, Duan Shanxu, Hu Huan, et al. Coordinate control of DC-module-based building integrated photovoltaic system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(14): 109-114(in Chinese).



肖华锋

收稿日期: 2009-09-27。

作者简介:

肖华锋(1981—), 男, 湖北当阳人, 博士研究生, 从事软开关变换技术、新能源利用技术研究, xiaohf@nuaa.edu.cn;

谢少军(1968—), 男, 湖北天门人, 教授, 博士生导师, 从事功率电子变换及航空电源等领域研究。

(责任编辑 张玉荣)