

新型双输入 Boost 变换器

陆治国, 刘捷丰, 郑路遥, 秦煜森

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对传统的多输入变换器(MIC)具有电路结构复杂、电压增益低或开关器件电压应力高的问题, 提出了一种新型双输入 Boost 变换器拓扑结构, 该拓扑由 2 个完全一致的基本 Boost 变换器子拓扑构成, 每个基本 Boost 变换器的功率开关管分别并联一个功率二极管, 在单输入状态时一个始终导通, 另一个始终关断; 在双输入状态时, 2 个功率二极管全部关断。分析了 2 种输入状态下的工作原理及各个阶段的工作模式, 结果表明该变换器适合工作在双输入状态, 且在此状态时可以实现 2 种不同性质的电源输入, 具有电压增益高、开关器件电压应力低等优点。研制了一台输出功率为 240 W 的双输入 Boost 变换器原理样机, 通过实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 多输入变换器; 双输入 Boost 变换器; 电压增益; 电压应力; 工作模式

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0042-04

0 引言

并网发电是太阳能、燃料电池等可再生能源的一个主要研究方向^[1]。在传统的新能源分布式发电系统中, 每种能源形式均需要一个 DC/DC 变换器^[2], 将各种能源变成直流输出, 并联在公共的直流母线上, 供给并网逆变器等直流负载使用, 其结构较复杂, 且成本较高。为了简化电路结构, 可以用一个多输入变换器(MIC)代替多个单输入直流变换器。文献[3]提出了一种双输入 Buck 变换器, 它可允许多种能源输入, 输入源的性质、幅值和特性可以相同, 也可以差别很大; 多输入源还可以分别或同时向负载供电, 因此提高了系统的稳定性和灵活性, 实现能源的综合利用。但是, 由于此拓扑是降压变换器, 电压增益低, 不能满足并网逆变器的需要。文献[4-8]所提出的 MIC 具有电路结构简单的优点, 但在任一时刻均只能有一种输入源给负载提供能量。文献[9]也提出了一种双输入 Buck 直流变换器, 它与文献[3]所提出的双输入 Buck 变换器具有相同的优缺点, 其主要缺点是电压增益低。文献[10]提出了一种双输入 Boost 变换器, 但这种双输入 Boost 变换器中开关管和二极管的电压应力为输出电压, 电压应力较大。文献[11]也提出了一种双输入 Boost 变换器, 它是在文献[3]所提出的双输入 Buck 变换器的基础上级联了一级传统 Boost 变换器, 这种变换器的开关管和升压二极管的电压应力也较大。文献[12-13]所提出的 2 种无缓冲单元的双输入 Boost 脉冲电流源单元(PCSC)实际上分别是 2 个传统 Boost 变换器的串联形式和并联形式, 这 2 种双输入 Boost PCSC 的开关管和二极管的电压应力为输出电压, 电压应力较大。因此, 上述几种 MIC 均不适宜应用于高压大

功率输出的场合。

传统三电平 Boost 变换器开关管和升压二极管的电压应力为输出电压的一半, 非常适合高压大功率输出的场合^[14-15]。本文提出一种新型双输入 Boost 变换器, 它是从传统的三电平 Boost 变换器演化而来的。

1 工作原理

传统三电平 Boost 变换器如图 1 所示。

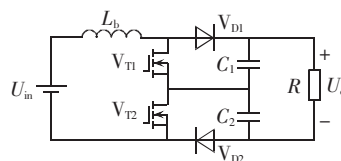


图 1 传统三电平 Boost 变换器

Fig.1 Traditional three-level Boost converter

新型双输入 Boost 变换器的电路拓扑如图 2 所示, 由 2 个直流输入源 U_{in1} 、 U_{in2} , 2 个升压电感 L_1 、 L_2 , 2 个开关管 V_{T1} 、 V_{T2} , 4 个升压二极管 V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 、 V_{D4} , 2 个升压电容 C_1 、 C_2 及负载 R 构成。根据输入源的数量, 有单输入和双输入 2 种工作状态。下面详细分析 2 种输入状态下电路的工作原理。

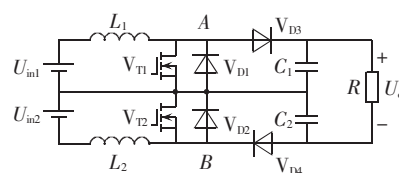


图 2 新型双输入 Boost 变换器

Fig.2 New double-input Boost converter

1.1 单输入状态的工作原理

当拓扑只有 1 个输入源时, 拓扑工作在单输入状态, 其工作原理与传统 Boost 变换器的工作原理类似, 下面以 U_{in1} 作输入源分析其稳态情况下的工作原

理。假设各器件均为理想器件,电路工作在连续导通模式(CCM)下,稳态时忽略2个升压电容 C_1 、 C_2 上的电压脉动。图3与图4为拓扑开关模式的等效电路。

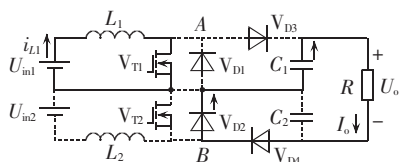


图3 模式1的等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of mode 1

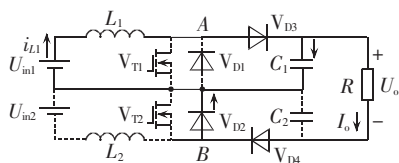


图4 模式2的等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of mode 2

在1个开关周期 T_s 内拓扑有2种工作模式。

模式1:如图3所示, V_{T1} 、 V_{D2} 、 V_{D4} 开通, V_{T2} 、 V_{D1} 、 V_{D3} 关断,升压电感 L_1 的电流线性增大,升压电容 C_1 通过 V_{D2} 、 V_{D4} 给负载 R 供电。

模式2:如图4所示, V_{T1} 、 V_{T2} 、 V_{D1} 关断, V_{D2} 、 V_{D3} 、 V_{D4} 开通,电源 U_{in1} 与升压电感 L_1 通过 V_{D2} 、 V_{D4} 共同向升压电容 C_1 、负载 R 供电。

由上述模式分析可知在整个开关周期 T_s 内,升压二极管 V_{D2} 、 V_{D4} 始终导通, V_{T2} 、 V_{D1} 始终关断,因此在单输入状态下 V_{D2} 、 V_{D4} 作钳位二极管,目的是使升压电容 C_2 的电压钳位在1.4V左右。

根据电感的伏秒平衡原理可得:

$$U_{C1} = \frac{1}{1-D_1} U_{in1} \quad (1)$$

由前述已知 $U_{C2} \approx 1.4V$,所以负载输出电压 $U_o = U_{C1} - U_{C2} \approx U_{C1}$,由式(1)可得:

$$U_o \approx \frac{1}{1-D_1} U_{in1} \quad (2)$$

由此可知,拓扑工作在单输入状态时电压增益与传统Boost变换器相同。

1.2 双输入状态的工作原理

当拓扑有2个输入源时,其工作在双输入状态,下面详细分析在双输入状态下的工作原理。假设条件与单输入状态相同,2个开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 的开关频率可以相等也可以不相等。为了减小电路中的电磁干扰,方便滤波器的设计,2个开关管工作在相同的开关频率下,此时它们可以工作在交错控制状态或同时开通状态^[3]。本拓扑在理论分析中采取了交错控制状态。在1个开关周期 T_s 内,拓扑存在4种工作模式。图5给出了拓扑4种工作模式下的主要工作波形,图6~8分别是拓扑在4种不同工作模式下的等效电路。

模式1: $[t_0, t_1]$,等效电路如图6所示。 V_{T1} 与 V_{T2} 同时开通, V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 、 V_{D4} 4个升压二极管全部关断,电源 U_{in1} 与 U_{in2} 分别对升压电感 L_1 与 L_2 充电,

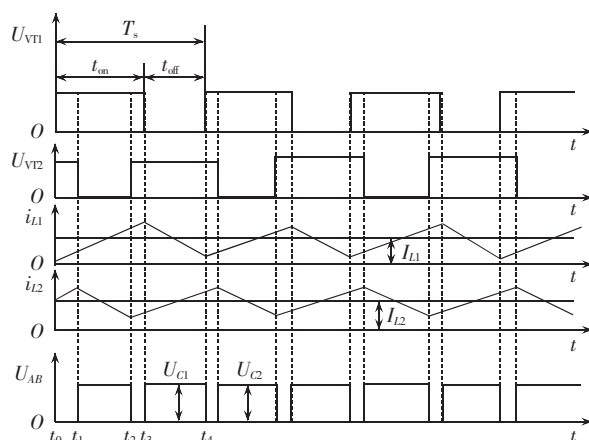
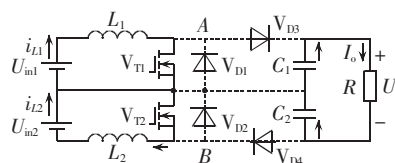
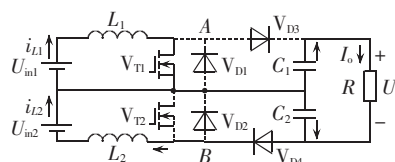
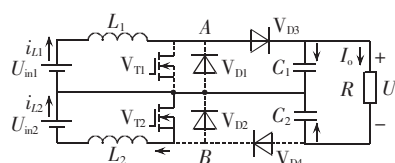


图5 电路的主要工作波形

Fig.5 Main waveforms of circuit

图6 V_{T1} 与 V_{T2} 同时开通的等效电路Fig.6 Equivalent circuit when both V_{T1} and V_{T2} are on图7 V_{T1} 开通、 V_{T2} 关断的等效电路Fig.7 Equivalent circuit when V_{T1} is on, V_{T2} is off图8 V_{T1} 关断、 V_{T2} 开通的等效电路Fig.8 Equivalent circuit when V_{T1} is off, V_{T2} is on

L_1 、 L_2 的电流线性增大,升压电容 C_1 、 C_2 两者串联共同向负载 R 供电, C_1 、 C_2 的电压不断减小,此时有

$$U_{AB} = 0 \quad (3)$$

$$i_{L1}(t) = I_{L1}(t_0) + \frac{U_{in1}}{L_1} (t - t_0) \quad (4)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2}(t_0) + \frac{U_{in2}}{L_2} (t - t_0) \quad (5)$$

模式2: $[t_1, t_2]$,等效电路如图7所示。 V_{T1} 、 V_{D4} 开通, V_{T2} 、 V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 关断,电源 U_{in1} 对升压电感 L_1 充电,使其电流线性增大,电源 U_{in2} 与升压电感 L_2 一起对升压电容 C_2 充电,同时 U_{in2} 、 L_2 、 C_1 三者一起向负载 R 供电。 L_2 的电流减小, C_1 的电压 U_{C1} 不断减小, C_2 的电压 U_{C2} 不断增大,此时有

$$U_{AB} = U_{C2} \quad (6)$$

$$i_{L1}(t) = I_{L1}(t_1) + \frac{U_{in1}}{L_1}(t-t_1) \quad (7)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2}(t_1) + \frac{U_{in2}-U_{C2}}{L_2}(t-t_1) \quad (8)$$

模态 3: $[t_2, t_3]$, 工作过程同模态 1。

模态 4: $[t_3, t_4]$, 等效电路如图 8 所示。 V_{T1} 、 V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{D4} 关断, V_{T2} 、 V_{D3} 开通, 电源 U_{in1} 与升压电感 L_1 一起对升压电容 C_1 充电, 电源 U_{in2} 对升压电感 L_2 充电, 同时 U_{in1} 、 L_1 、 C_2 三者一起向负载 R 供电。 C_1 的电压 U_{C1} 不断增大, C_2 的电压 U_{C2} 不断减小, L_1 的电流不断减小, L_2 的电流线性增大, 此时有

$$U_{AB} = U_{C1} \quad (9)$$

$$i_{L1}(t) = I_{L1}(t_3) + \frac{U_{in1}-U_{C1}}{L_1}(t-t_3) \quad (10)$$

$$i_{L2}(t) = I_{L2}(t_3) + \frac{U_{in2}}{L_2}(t-t_3) \quad (11)$$

由上述 2 种工作状态下的模态分析可知, 在整个开关周期 T_s 内, 当 U_{in1} 独立向负载 R 供电时, V_{T2} 、 V_{D1} 始终关断, V_{D2} 、 V_{D4} 始终开通, U_{in1} 、 L_1 、 V_{T1} 、 V_{D2} 、 V_{D3} 、 V_{D4} 、 C_1 和 R 相当于一个传统 Boost 变换器。当 U_{in1} 与 U_{in2} 2 个输入源同时向负载 R 供电时, 拓扑的输出电压是 2 个传统 Boost 变换器输出电压的串联, 因此拓扑的电压增益高。

2 输入/输出的数量关系

对拓扑的 L_1 与 L_2 应用电感的伏秒平衡原理可得下式:

$$U_{in1}D_1T_s + (U_{in1} + U_{C2} - U_o)(1-D_1)T_s = 0 \quad (12)$$

$$U_{in2}D_2T_s + (U_{in2} + U_{C1} - U_o)(1-D_2)T_s = 0 \quad (13)$$

$$U_{C1} + U_{C2} = U_o \quad (14)$$

由式(12)~(14)可得输出电压:

$$U_o = \frac{1}{1-D_1}U_{in1} + \frac{1}{1-D_2}U_{in2} \quad (15)$$

同理, 分别对拓扑的升压电容 C_1 与 C_2 应用电容的安秒平衡原理可得:

$$-I_oD_1T_s + (I_{L1} - I_o)(1-D_1)T_s = 0 \quad (16)$$

$$-I_oD_2T_s + (I_{L2} - I_o)(1-D_2)T_s = 0 \quad (17)$$

由式(16)(17)可得:

$$I_{L1} = \frac{1}{1-D_1}I_o \quad (18)$$

$$I_{L2} = \frac{1}{1-D_2}I_o \quad (19)$$

其中, D_1 、 D_2 分别为开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 的占空比; I_{L1} 、 I_{L2} 分别为电感 L_1 、 L_2 的平均电流; I_o 为输出电流的平均值。

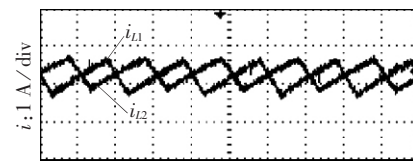
由式(15)(18)(19)可知拓扑中 2 个传统 Boost 变换器的工作是独立的, 其电压增益、电流增益与传统 Boost 变换器相同, 本拓扑与文献[3]所提出的双输入 Buck 变换器一样, 其输入源的性质、幅值和特性可以相同, 也可以差别很大, 因此提高了系统的稳定性和灵活性, 实现了能源的综合利用。所以, 新提出的双输入 Boost 变换器非常适合作为分布式发电并网逆变器的前级升压变换器, 其既可工作在单输入

状态, 又可工作在双输入状态, 但单输入状态不是其最佳工作状态, 因为此时开关管和升压二极管承受的电压应力较高, 所以实际应用时, 拓扑最适宜工作在双输入状态, 这样有利于减小开关器件的电压应力, 便于开关管和二极管的选择。

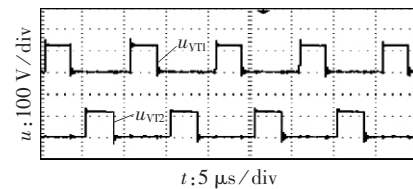
3 实验验证

为了验证新拓扑理论分析的正确性, 在实验室完成了一台输出功率为 240 W 的原理样机, 实验所用数据如下: U_{in1} 在 20~50 V 中选择, U_{in2} 在 30~60 V 中选择, $L_1=L_2=0.3$ mH, $C_1=C_2=4.7$ μ F, $U_o=240$ V, $f_s=100$ kHz。

2 个开关管交错 180° 开通。图 9、10 为拓扑电压、电流的实验波形。



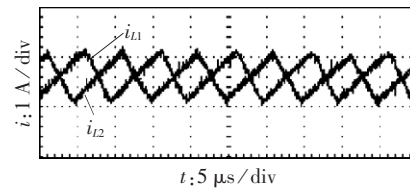
(a) 两电感的电流实验波形



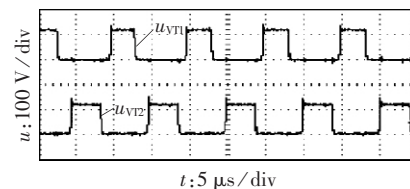
(b) 开关管 V_{T1} 和 V_{T2} 的电压实验波形

图 9 $U_{in1}=U_{in2}=36$ V 时的实验波形

Fig.9 Experimental waveforms when $U_{in1}=U_{in2}=36$ V



(a) 两电感的电流实验波形



(b) 开关管 V_{T1} 和 V_{T2} 的电压实验波形

图 10 $U_{in1}=36$ V 和 $U_{in2}=48$ V 时的实验波形

Fig.10 Experimental waveforms when $U_{in1}=36$ V and $U_{in2}=48$ V

4 结论

本文提出了一种新型双输入 Boost 变换器拓扑结构, 该变换器具有下列优点: 电路结构简单, 可以实现 2 种不同性质的能源输入, 电压增益高, 开关器件电压应力低, 其既可单独向负载供电, 也可同时向负载供电。基于工作原理的分析, 推导了拓扑的输入

/输出关系,并通过一台 240 W 的原理样机验证了理论分析的正确性。

参考文献:

- [1] 金科,阮新波,杨孟雄,等. 复合燃料电池供电系统[J]. 电工技术学报,2008,23(3):92-98.
JIN Ke,RUAN Xinbo,YANG Mengxiong,et al. Hybrid fuel cell power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008,23(3):92-98.
- [2] LI Q,WOLFS P. A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations [J]. IEEE Trans Power Electron,2008,23(3):1320-1333.
- [3] 李艳,阮新波,杨东升. 一种新的双输入直流变换器[J]. 电工技术学报,2008,23(6):10-19.
LI Yan,RUAN Xinbo,YANG Dongsheng. A new double input DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(6):10-19.
- [4] DOBBS B G,CHAPMAN P L. A multiple-input DC-DC converter topology[J]. IEEE Power Electron Lett,2003,1(1):6-9.
- [5] SEBASTIAN J,VILLEGAS P J,NUNO F. High-efficiency and wide-band width performance obtainable from a two-input buck converter[J]. IEEE Trans Power Electron,1998,13(4):706-717.
- [6] BENAVIDES N D,ESRAM T,CHAPMAN P L. Ripple correlation control of a multiple-input DC-DC converter[C]//Proc of IEEE Power Electron Spec Conf. Urbana,USA:IEEE,2005:160-164.
- [7] MATSUO H,LIN W Z,KUROKAWA F,et al. Characteristics of the multiple-input DC-DC converter [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2004,51(3):625-631.
- [8] KOBAYASHI K,MATSUO H,SEKINE Y. Novel solar cell power supply system using the multiple-input DC-DC converter[J]. IEEE Trans Ind Electron,2006,53(1):281-286.
- [9] YALAMANCHILI K P,FERDOWSI M,CORZINE K. New double input DC-DC converters for automotive applications[C]//Vehicle Power and Propulsion Conference,2006. VPPC' 06. Windsor,UK: IEEE,2006:1-6.
- [10] CARPANETO M,FERRANDO G,MARCHESONI M,et al. The average switch model of a new double-input DC / DC Boost converter for hybrid fuel-cell vehicles[C]//IEEE ISIE 2005. Dubrovnik,Croatia:IEEE,2005:601-607.
- [11] VAZQUEZ N,HERNANDEZ A,HERNANDEZ C,et al. A double input DC/DC converter for photovoltaic/wind systems[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Rhodes,Greece: IEEE,2008:2460-2464.
- [12] LI Yan,YANG Dongsheng,RUAN Xinbo. A systematic method for generating multiple-input DC / DC converters [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin,China:IEEE, 2008:1-6.
- [13] 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):74-79.
LI Yan,RUAN Xinbo,YANG Dongsheng,et al. Multiple-input DC / DC converters without buffer cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(5):74-79.
- [14] 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):21-23.
RUAN Xinbo,LI Bin,CHEN Qianhong. A new approach for high voltage and high power three level DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(5):21-23.
- [15] 阮新波,危健,薛雅丽. 输入输出共地的三电平变换器[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):19-22.
RUAN Xinbo,WEI Jian,XUE Yali. Three level converters with input and output sharing the ground[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(11):19-22.

(编辑:李育燕)

作者简介:

陆治国(1964-),男,四川遂宁人,副教授,博士,主要从事电力电子变换器的研究工作(E-mail:zggu@cqu.edu.cn);

刘捷丰(1985-),男,河北衡水人,硕士研究生,主要研究方向为多输入 DC/DC 变换器拓扑、新能源发电等(E-mail:liujiefeng9999@163.com);

郑路遥(1987-),男,湖北松滋人,硕士研究生,主要研究方向为变换器建模、功率因数校正等;

秦煜森(1982-),男,重庆人,硕士研究生,主要研究方向为高增益 DC/DC 变换器。

Double-input Boost converter

LU Zhiguo,LIU Jiefeng,ZHENG Luyao,QIN Yusen

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University,Chongqing 400044,China)

Abstract: As the traditional MIC(Multi-Input Converter) has complex structure,low voltage gain and high switch voltage stress,a double-input Boost converter is proposed,which consists of two identical basic Boost converters. A power diode is added in parallel to the power switch of each Boost converter. In single-input state,one diode is always on and the other always off,while in double-input state,both are off. The operating principle and modes of both states are analyzed and the results show that the double-input Boost converter has high voltage gain and low switch voltage stress when it operates in double-input state with different power supplies. A 240 W prototype is developed to verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: MIC; double-input Boost converter; voltage gain; voltage stress; operating mode