

输入串联输出串联高增益 Boost 变换器

陆治国¹, 刘捷丰¹, 郑路遥¹, 马召鼎¹, 王洪莲¹, 邓文东²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;
2. 重庆市江北供电局, 重庆市 江北区 401147)

Input-series Output-series High Gain Boost Converter

LU Zhiguo¹, LIU Jiefeng¹, ZHENG Luyao¹, MA Zhaoding¹, WANG Honglian¹, DENG Wendong²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Jiangbei Power Supply Bureau of Chongqing, Jiangbei District, Chongqing 401147, China)

ABSTRACT: A novel input-series output-series high gain Boost converter was proposed in this paper. Operation principle and property of this converter were analyzed. The new topology was composed of two identical high gain subtopologies with input-series and output-series connection. As the C_{f1} and C_{f2} , the new topology not only had high voltage gain, but also automatically evenly could share current without any sensing when the duty cycle was greater than or equal to 0.5. Compared with the traditional two phase interleaved Boost converter, the ripple of the inductor current, the ripple of the input current and the voltage stress of the switches were reduced because of the double-series structure of the new topology. Consequently, the new topology is very suitable for the application (for example, the fuel cell power system) in which it has low input voltage but high output voltage. Finally, the experiment was built to verify the theoretical analysis.

KEY WORDS: input-series output-series; interleaved; Boost; voltage gain; voltage stress

摘要: 提出一种新颖的输入串联输出串联高增益 Boost 变换器, 对其工作原理和性能特点进行详细分析。该拓扑是由两个完全一致的高增益子拓扑经过输入端串联输出端串联构成的。由于升压储能电容 C_{f1} 、 C_{f2} 的存在, 使得新拓扑不仅具有较高的电压增益, 而且当占空比大于或等于 0.5 时, 还实现了电感电流的自动均流。与传统两相交错并联 Boost 变换器相比, 新拓扑的双串联结构使得电感电流纹波、输入电流纹波、开关器件的电压应力得到降低。因此, 新拓扑非常适合应用于低压输入、高压输出的场合(如燃料电池并网发电系统)。最后, 通过实验验证了理论分析的正确性。

关键词: 输入串联输出串联; 交错并联; Boost; 电压增益; 电压应力

0 引言

化石燃料的使用不仅会使全球变暖, 而且会产生空气污染、臭氧消耗、酸雨等一系列环境问题, 严重威胁着人类的生存与发展。为了防止这些环境问题的发生, 节约能源、提高能源效率、减少化石燃料的使用和增加环保能源的供应, 就显得尤为重要, 这就迫使人们努力寻找既有较高的能源利用效率又环保的新能源。燃料电池因其极高的发电效率和功率密度、低噪声与零排放等优点而受到了国内外许多研究人员的关注^[1-12]。但燃料电池的输出为低压大电流的直流电, 应用时一般需多个串联。如果采用过多的单元串联成燃料电池堆以获得比较高的输出电压, 很容易因其中的某个电池单元失效而导致整个电池堆不能正常工作; 另外, 输入电流纹波大会使得燃料电池的使用寿命缩短。因此, 燃料电池在实际应用时需要一种电压增益高、输入电压宽、输入电流纹波小的升压变换器^[13-17]。

传统的交错并联 Boost 变换器^[18-19]具有下列优点: 电路结构简单; 各相电感电流纹波的抵消作用可以减小输入电流纹波; 整个输出功率被各相所分担, 有利于改善散热。但由于其电压增益低、各相的电感电流纹波大, 而且其开关器件的电压应力为输出电压, 电压应力高, 因此它不适宜应用于低压输入、高压输出的场合(如燃料电池并网发电系统)。

针对传统交错并联 Boost 变换器的缺陷, 本文提出一种新颖的升压变换器——输入串联输出串联高增益 Boost 变换器。与传统两相交错并联 Boost 变换器相比, 新拓扑不仅能在相同的占空比下实现较高的电压增益, 同时还大大降低了开关器件的电

压应力,在输入电压、开关频率、占空比、电感量、控制模式相同的情况下,新拓扑升压电感的电流纹波与输入电流的电流纹波分别为传统两相交错并联 Boost 变换器的一半,特别是其工作在占空比大于或等于 0.5 时,还具有自动均衡电感电流的能力。

1 工作原理

输入串联输出串联高增益 Boost 变换器的拓扑结构如图 1 所示,它是由两个上下完全对称的子拓扑构成(子拓扑 1 为图 1 虚线框中所示)。其中: C_{d1} 、 C_{d2} 为两个输入滤波电容; C_{o1} 、 C_{o2} 为两个输出滤波电容; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为 4 个升压电感; C_{f1} 、 C_{f2} 为两个升压储能电容; S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为 4 只开关管(S_1 与 S_3 的驱动信号相同, S_2 与 S_4 的驱动信号相同,且 S_1 、 S_3 的驱动信号与 S_2 、 S_4 的驱动信号相差 180°); D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为 4 个升压二极管; R 为负载。如果无特殊说明,大写字母 U 、 I 分别对应小写字母 u 、 i 的平均值。在分析新拓扑的工作原理之前,先作如下假设: ① C_{d1} 、 C_{d2} 容量很大且相等,稳态工作时其上的电压为输入电压 U_{in} 的一半; ② C_{o1} 、 C_{o2} 容量相等,且稳态工作时其上的电压为输出电压 U_o 的一半; ③ 4 个升压电感 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 大小相等,设为 L ; ④ 所有功率开关器件为理想器件。

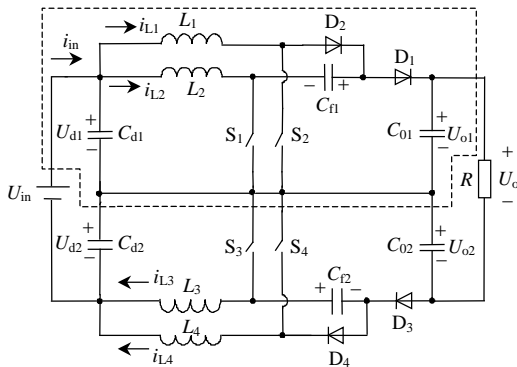


图 1 输入串联输出串联高增益 Boost 变换器

Fig. 1 Input-series output-series high gain Boost converter

下面详细分析电感电流连续(continuous current mode, CCM)情况下的工作原理。由于新拓扑工作在 $0 < D < 0.5$ 和 $0.5 \leq D < 1$ 时,开关模式有所差别,现分别加以讨论。

1) $0 < D < 0.5$ 。

在 1 个开关周期 T_s 内,新拓扑有 4 种开关模式,分别称为模式 a、b、c、d,其开关模式特征表如表 1 所示,模式 a 的等效电路如图 2 所示。由模式 a 的等效电路可以得到以电感电流、电容电压为状态

变量的状态方程,根据状态方程即可得到模式 a 的电压、电流波形。

表 1 $0 < D < 0.5$ 时的开关模式特征表
Tab. 1 States of switch at $0 < D < 0.5$

| 状态 | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a | 开 | 关 | 开 | 关 | 关 | 开 | 关 | 开 |
| b | 关 | 关 | 关 | 关 | 开 | 开 | 开 | 开 |
| c | 关 | 开 | 关 | 开 | 开 | 关 | 开 | 关 |
| d | 关 | 关 | 关 | 关 | 开 | 开 | 开 | 开 |

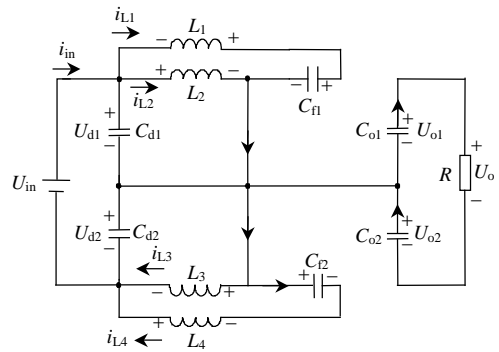


图 2 $0 < D < 0.5$ 时模式 a 的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of a state at $0 < D < 0.5$

模式 a: S_1 、 S_3 、 D_2 、 D_4 导通, S_2 、 S_4 、 D_1 、 D_3 关断,电源对 C_{f1} 、 C_{f2} 、 L_2 、 L_3 充电, C_{f1} 、 C_{f2} 上的电压 U_{Cf1} 、 U_{Cf2} 升高, L_2 、 L_3 上的电流线性增大, L_1 、 L_4 的电流不断减小。

同理,采用同样的方法,可以得到其余 3 种开关模式的等效电路图和状态方程。根据这 4 种开关模式的状态方程,可以得到一个开关周期 T_s 中的电压、电流波形,如图 3 所示。

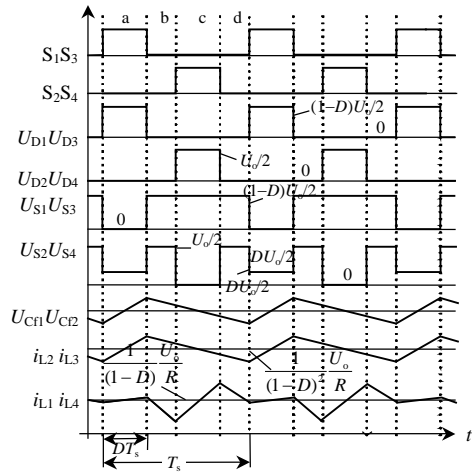


图 3 $0 < D < 0.5$ 时新拓扑的主要工作波形

Fig. 3 Key operation waveforms of the new topology at $0 < D < 0.5$

2) $0.5 \leq D < 1$ 。

在 1 个开关周期 T_s 内,新拓扑也有 4 种开关模式,其开关模式特征表如表 2 所示,模式 a 的等效

电路如图 4 所示。

表 2 $0.5 \leq D < 1$ 时的开关模式特征表
Tab. 2 States of switch at $0.5 \leq D < 1$

| 状态 | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D ₄ |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| a | 关 | 开 | 关 | 开 | 开 | 关 | 开 | 关 |
| b | 开 | 开 | 开 | 开 | 关 | 关 | 关 | 关 |
| c | 开 | 关 | 开 | 关 | 关 | 开 | 关 | 开 |
| d | 开 | 开 | 开 | 开 | 关 | 关 | 关 | 关 |

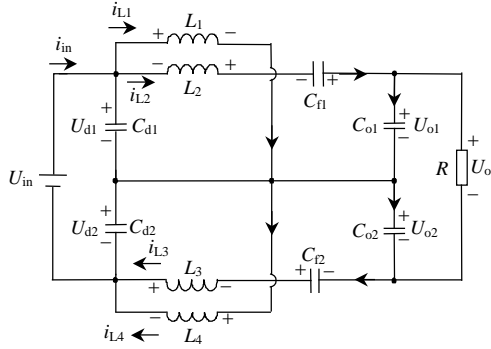


图 4 $0.5 \leq D < 1$ 时模式 a 的等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of a state at $0.5 \leq D < 1$

模式 a: S₂、S₄、D₁、D₃ 导通, S₁、S₃、D₂、D₄ 关断, 电源、C_{f1}、C_{f2}、L₂、L₃ 同时对负载 R 供电, 同时电源对 L₁、L₄ 充电, L₁、L₄ 的电流线性增大, L₂、L₃ 的电流不断减小, U_{Cf1}、U_{Cf2} 不断降低。

采用同样的方法, 可以得到一个开关周期 T_s 中的电压、电流波形, 如图 5 所示。

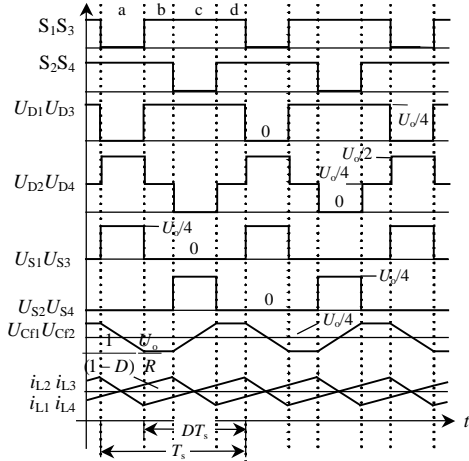


图 5 $0.5 \leq D < 1$ 时新拓扑的主要工作波形

Fig. 5 Key operation waveforms of the new topology at $0.5 \leq D < 1$

2 稳态工作性能分析

2.1 稳态电压增益

基于拓扑在 $0 < D < 0.5$ 下的工作原理, 对子拓扑 1 的 L₁、L₂、C_{f1}、C_{o1} 应用电感的伏秒平衡原理和电容的安秒平衡原理可得:

$$\begin{cases} \frac{U_{o1}}{U_{d1}} = \frac{1}{(1-D)^2} \\ U_{Cf1} = \frac{1}{2}DU_o \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_{L1} = \frac{1}{(1-D)} \frac{U_o}{R} \\ I_{L2} = \frac{D}{(1-D)^2} \frac{U_o}{R} \end{cases} \quad (2)$$

对于子拓扑 2 可得出类似的表达式。注意到 $U_{in} = U_{d1} + U_{d2}$ 、 $U_{d1} = U_{d2}$ 、 $U_o = U_{o1} + U_{o2}$ 、 $U_{o1} = U_{o2}$ 、 $I_{L1} = I_{L4}$ 、 $I_{L2} = I_{L3}$, 结合式(1)可得

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{1}{(1-D)^2}, \quad 0 < D < 0.5 \quad (3)$$

同理, 可得 $0.5 \leq D < 1$ 时, 有

$$\begin{cases} \frac{U_{o1}}{U_{d1}} = \frac{2}{(1-D)} \\ U_{Cf1} = U_o/4 \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{L1} = I_{L2} = \frac{1}{(1-D)} \frac{U_o}{R} \quad (5)$$

注意到 $U_{in} = U_{d1} + U_{d2}$ 、 $U_{d1} = U_{d2}$ 、 $U_o = U_{o1} + U_{o2}$ 、 $U_{o1} = U_{o2}$ 、 $I_{L1} = I_{L4}$ 、 $I_{L2} = I_{L3}$, 结合式(4)可得

$$\frac{U_o}{U_{in}} = \frac{2}{(1-D)}, \quad 0.5 \leq D < 1 \quad (6)$$

图 6 为新拓扑与传统两相交错并联拓扑的电压增益对比曲线(横坐标为占空比 D, 纵坐标为电压增益 M)。从图 6 可知, 在占空比相同的条件下(实线为新拓扑, 虚线为传统两相交错并联拓扑), 新拓扑的电压增益比传统两相交错并联拓扑的电压增益有很大的提高。

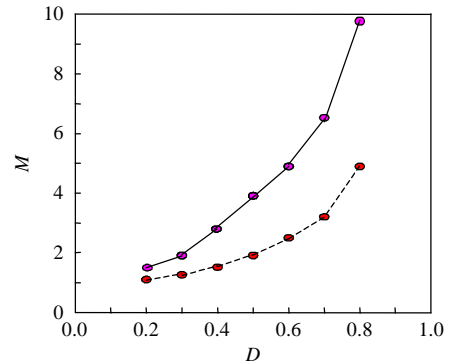


图 6 新拓扑与传统两相交错并联拓扑的电压增益

Fig. 6 Voltage gain of the new topology and the traditional two phase interleaved topology

2.2 开关器件的电压应力

由图 3 可知, 当 $0 < D < 0.5$ 时, S₁、S₃、D₁、D₃ 上的最大电压应力为 $(1-D)U_o/2$, 小于输出电压的一

半。而 S_2 、 S_4 、 D_2 、 D_4 上的最大电压应力为输出电压的一半。由图 5 可知, 当 $0.5 \leq D < 1$ 时, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 D_1 、 D_3 上所承受的最大电压应力为输出电压的 $1/4$, 而 D_2 、 D_4 上所承受的最大电压应力为输出电压的一半。相比传统两相交错并联拓扑, 所有开关器件的最大电压应力(为输出电压), 新拓扑开关器件的电压应力大大降低。

2.3 升压电感与输入电流的电流纹波

由图 5 可知, 输入串联输出串联高增益 Boost 变换器各个升压电感的电流纹波相等, 设其为 Δi_L , 其值为

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} \frac{U_{in} D T_s}{L} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 在输入电压、开关频率、占空比、电感量、控制模式相同的情况下, 新拓扑升压电感的电流纹波为传统两相交错并联拓扑的一半, 从而, 新拓扑输入电流的电流纹波也为传统两相交错并联拓扑的一半。

2.4 自动均流功能

下面以子拓扑 1 为例分析新拓扑在稳态时如何实现电感电流的自动均流功能。在一个开关周期 T_s 内, 模态 a: C_{f1} 的放电电流为升压电感 L_2 的放电电流; 模态 c: C_{f1} 的充电电流为升压电感 L_1 的放电电流; 模态 b、d: 其上的电压保持不变。假设 $I_{L1} < I_{L2}$, 则会导致 C_{f1} 充放电不平衡, 不满足电容的安秒平衡原理。因此, 最后两个升压电感的电流将自动均衡。

3 实验验证

为了验证理论分析的正确性, 对新拓扑与传统两相交错并联拓扑进行对比实验研究, 两个电路均工作在开环状态, 新拓扑实验参数如下: $U_{in}=36\text{V}$, $P_o=360\text{W}$, $U_o=240\text{V}$, $I_o=1.5\text{A}$, $C_{d1}=C_{d2}=1000\mu\text{F}$, $f_s=100\text{kHz}$, $L_1=L_2=L_3=L_4=100\mu\text{H}$, $C_{f1}=C_{f2}=33\mu\text{F}$, $C_{o1}=C_{o2}=4.7\mu\text{F}$ (传统两相交错并联拓扑与新拓扑的输入电压、占空比、开关频率、电感量、控制模式相同)。由于在实际应用中, 新拓扑适宜工作在 $0.5 \leq D < 1$, 而且新拓扑的两个子拓扑工作是完全一致的, 因此, 下文仅给出了子拓扑 1 与传统两相交错并联拓扑工作在 $0.5 \leq D < 1$ 时的实验波形, 并对实验结果进行了分析。

图 7(a)与图 7(b)相比较, 在输入电压、开关频率、占空比、电感量相同的条件下, 新拓扑升压电感的电流纹波约为传统两相交错并联拓扑升压电感电流纹波的一半; 图 7(c)与图 7(d)相比较, 新拓

扑输入电流的电流纹波约为传统两相交错并联拓扑输入电流的电流纹波的一半。从图 7(e) 与图 7(f) 可以看出, 子拓扑 1 的功率开关管 S_1 、 S_2 和功率二极管 D_1 在开通与关断转化过程中, 其最大电压应力约为 60V 左右(只有输出电压的 $1/4$)。虽然二极管 D_2 的电压应力波形有 3 种状态(0、60 和 120V), 但其最大电压应力仅为输出电压的一半, 相比传统的两相交错并联拓扑(所有开关器件的最大电压应力为输出电压), 显然新拓扑开关器件的电压应力小得多, 理论分析与实验结果基本一致。

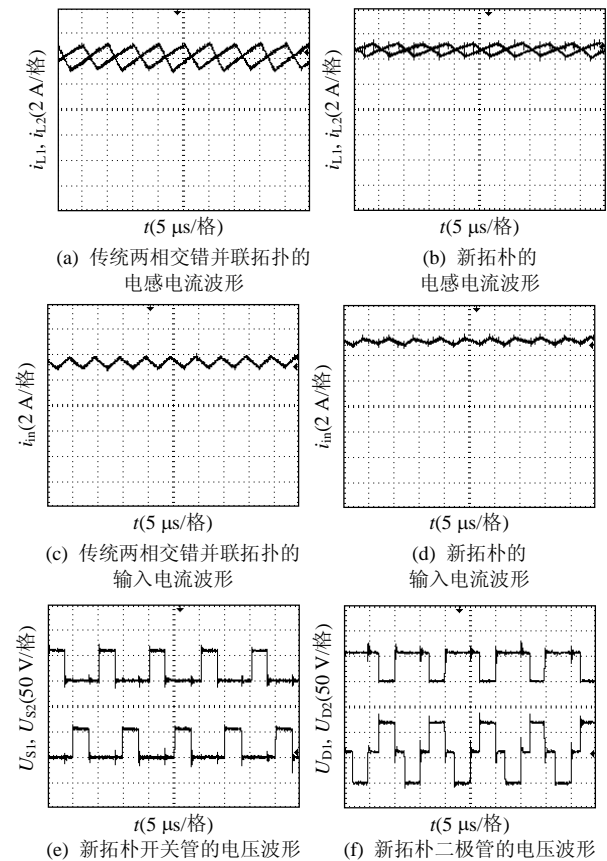


图 7 实验波形

Fig. 7 Experimental waveforms

4 结论

本文提出了一种新颖的升压变换器——输入串联输出串联高增益 Boost 变换器, 相比传统两相交错并联 Boost 变换器, 实验结果表明, 新拓扑具有下列优点:

- 1) 电压增益高。非常适合应用于低压输入、高压输出的场合, 如燃料电池并网发电系统。
- 2) 开关器件的电压应力低, 特别是 $0.5 \leq D < 1$ 时, 新拓扑大部分开关器件的电压应力只有输出电压的 $1/4$ 。

3) 升压电感的电流纹波与输入电流的电流纹波都小。在输入电压、开关频率、占空比、电感量、控制模式相同的情况下, 新拓扑升压电感的电流纹波与输入电流的电流纹波分别为传统两相交错并联拓扑的一半。

4) 当占空比大于或等于 0.5 时由于升压储能电容 C_{f1} 、 C_{f2} 的作用, 新拓扑能够自动均衡各相电感电流。

参考文献

- [1] 金科, 杨孟雄, 阮新波. 三电平双向变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 41-46.
Jin Ke, Yang Mengxiong, Ruan Xinbo. Three-level bidirectional DC-DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 41-46 (in Chinese).
- [2] 翁史烈, 翁一武, 苏明. 熔融碳酸盐燃料电池动态特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 168-172.
Weng Shilie, Weng Yiwu, Su Ming. Study of molten carbonate fuel cell on thermodynamic properties[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 168-172(in Chinese).
- [3] 汪茂海, 郭航, 马重芳, 等. 直接甲醇燃料电池动态性能的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 161-165.
Wang Maohai, Guo Hang, Ma Chongfang, et al. Study of dynamic performance of a direct methanol fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 161-165(in Chinese).
- [4] Chandrasekaran S, Gokdere L U. Integrated magnetics for interleaved DC-DC boost converter for fuel cell powered vehicles[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen: IEEE, 2004: 356-361.
- [5] Liu Changrong, Lai Jihsheng. Low frequency current ripple reduction technique with active control in a fuel cell power system with inverter load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1429-1436.
- [6] Li Wuhua, Lü Xiaodong, Deng Yan, et al. A review of non-isolated high step-up DC/DC converters in renewable energy applications [C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Washington DC: IEEE, 2009: 1-6.
- [7] Sudhakar B C, Veerachary M. Predictive controller for interleaved Boost converter[C]//International Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai: IEEE, 2006: 1-5.
- [8] Choe G Y, Soo K H, Lee B K, et al. Design consideration of interleaved converters for fuel cell applications[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Seoul, 2007: 1-10.
- [9] Viet D B, Yves L, Paul F J, et al. New high power-high ratio non isolated DC-DC boost converter for Fuel cell applications[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Jeju: IEEE, 2006: 238-243.
- [10] Palma L, Todorovic M H, Enjeti P. A high gain transformer-less DC-DC converter for fuel-cell applications[C]//IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Recife: IEEE, 2005: 1-7.
- [11] Huang X, Wang X, Nergard T, et al. Parasitic ringing and design issues of digitally controlled high power interleaved boost converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1341-1352.
- [12] 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): 19-23.
Ruan Xinbo, Li Bin, Chen Qianhong. A new approach for high voltage and high power three-level dc-dc converter[J]. Proceeding of the CSEE, 2003, 23(5): 19-23(in Chinese).
- [13] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 一种新颖的三电平软开关谐振型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 24-28.
Gu Yilei, Lü Zhengyu, Qian Zhaoming. A novel three level soft switching resonant DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 24-28(in Chinese).
- [14] 胡庆波, 瞿博, 吕征宇. 一种新颖的升压型电压调整器—两相交错并联耦合电感 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 94-98.
Hu Qingbo, Qu Bo, Lü Zhengyu. A novel step-up VRM Two-phase interleaved coupled-boost converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 94-98(in Chinese).
- [15] 王勇, 谢晓高. 燃料电池电力变换器的低频纹波电流抑制策略 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 86-89.
Wang Yong, Xie Xiaogao. A scheme for suppressing low frequency ripple current in the fuel cell power conditioning system [J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(23): 86-89 (in Chinese).
- [16] De Caro S, Testa A, Triolo D, et al. Low input current ripple converters for fuel cell power units[C]//European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, 2005: 1-10.
- [17] 汪东, 赵一, 石健将, 等. 具有开关电容的隔离型交错并联 Boost 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 14-20.
Wang Dong, Zhao Yi, Shi Jianjiang, et al. Interleaved and isolated Boost converter with switched capacitors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 14-20(in Chinese).
- [18] Hinz V der B, Lbrahim T. 1 kW dual interleaved boost converter for low voltage applications[C]//International Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai: IEEE, 2006: 1-5.
- [19] Calderon-Lopez G, Forsyth A J, Nuttall D R. Design and performance evaluation of a 10-kW interleaved Boost converter for a fuel cell electric vehicle[C]//International Power Electronics and Motion Control Conference. Shanghai: IEEE, 2006: 1-5.



陆治国

收稿日期: 2010-07-22。

作者简介:

陆治国(1964), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子变换器、高压直流输电的研究工作, zglu@cqu.edu.cn;

刘捷丰(1985), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高增益 DC/DC 变换器, 高压直流输电等;

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

马召鼎(1983), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高增益 DC/DC 变换器, 功率因数校正等;

王洪莲(1983), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子变换器拓扑, 功率因数校正等;

邓文东(1980), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统保护与控制, 功率因数校正等。

(责任编辑 吕鲜艳)