

一种零电流纹波交错 Boost 变换器

李永超,胡雪峰,李琳鹏,章家岩

(安徽工业大学电气与信息工程学院,马鞍山 243032)

摘要:为了有效利用光伏或燃料电池等低压可再生能源,研究了一种电源直接供电的改进交错连接 Boost 变换器。与基本交错并联 Boost 变换器相比,改进交错连接 Boost 变换器中输入电感交错并联,输出电容交错叠加在输入电源的两端。通过结构改进,使得上述变换器具有较高的电压增益,同时功率开关管和二极管的相对电压应力得到了有效降低;直流电源可以直接供电给负载,提高了效率。在此结构基础上,在输入端引入一个较小的辅助电感,理论上可使输入电流纹波近似等于零。详细分析了该变换器的工作原理及其稳态特性,最后通过实验验证了理论分析的正确性。

关键词:改进交错连接;高电压增益;Boost 变换器;低输入电流纹波

An Interleaving Boost Converter with Zero Current Ripple

LI Yongchao, HU Xuefeng, LI Linpeng, ZHANG Jiayan

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: To utilize the low-voltage renewable energy sources (e.g., photovoltaic or fuel cells) effectively, an improved interleaving Boost converter directly connected with power supply was investigated in this paper. Compared with the basic interleaving Boost converter, the input inductor in the new converter was interleaved, and the output capacitance was staggered and stacked at both ends of the input power supply. By improving the converter's structure, a high-voltage gain was achieved; meanwhile, the relative voltage stress of power switches and diodes were reduced effectively. Since the DC power can supply energy to the load directly, the efficiency of the converter was improved. Based on this topology, a relatively smaller auxiliary inductor was introduced at the input end to theoretically ensure the input current ripple to be approximately zero. Moreover, the operational principle of the converter and its steady-state characteristics were analyzed in detail. Finally, the theoretical analysis was verified by experiments.

Keywords: improved interleaving connection; high-voltage gain; Boost converter; low-input current ripple

由于全球化石能源逐渐枯竭,且其使用过程中产生的空气污染、臭氧消耗、酸雨等一系列环境问题日益凸显,人类的生存和发展受到了严重威胁,因此新能源的开发和利用受到了人们的广泛重视。但是新能源发电中,光伏电池、燃料电池、蓄电池等

的输出电压较低,通常需要一种具有较高升压功能的直流变换器,把上述低压微源的电压升高到一定的电压等级后,才能满足用电设备或并网发电的需求^[1-6]。

传统的 Boost 变换器由于结构简单,在一般升压场合得到了广泛的应用。理论上当其占空比趋近于 1 时,电压增益应趋于无穷大。但在实际应用中,由于电路寄生参数的影响,其最高电压变比受到了很大的限制^[1-7]。基于此,国内外学者研究并提出了多种高电压增益的直流变换器^[8-13]。文献[8-10]将多个 Boost 变换器进行级联,相对于单级的 Boost 变换器而言,它提高了电压增益,但是能量经过两次

收稿日期:2016-04-18;修回日期:2017-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577002);安徽省自然科学基金资助项目(1408085ME80);安徽省教育厅自然科学基金重点资助项目(KJ2012A048)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577002); the Natural Science Foundation of Anhui Province of China(1408085ME80); the Natural Science Foundation of Anhui Education Committee(KJ2012A048)

变换,影响了变换器的整体效率,且后级电路中开关器件的电压应力仍然等于输出电压。传统的两相交错并联 Boost 变换器可以有效地减小输入电流纹波,提高功率等级,但为了获得较高的电压增益,占空比依旧很大,增加了导通损耗。另外功率器件的电压应力仍然等于输出电压,制约了变换器效率的提高^[11-13]。

本文在传统 Boost 变换器及其变形结构的基础上,通过将输入端交错并联,输出端进行交错叠加,提出了一种具有高电压增益、低电压应力的改进交错连接 Boost 变换器。此结构中,在输入端串入一个很小的辅助电感,理论上可实现零输入电流纹波。

1 拓扑结构与工作原理

1.1 所研究变换器的拓扑结构

图 1 为本文所研究变换器的原理。该拓扑由传统两相交错并联 Boost 变换器改进而成,直流电源、电容 C_1 、电容 C_2 串联连接,为后级负载或功率变换电路供电。输出电压等于直流电源、电容 C_1 、电容 C_2 三者电压之和。

为了便于分析变换器的工作原理,假设如下:
 ①所有开关管、二极管均为理想器件;
 ②电感及电容均为理想器件,寄生效应忽略不计;
 ③ $L_1=L_2, C_1=C_2$, 电容 C_1, C_2, C_0 足够大,可近似为直流电压源;
 ④电感工作于连续导通状态,采用交错移相 180° 的方式控制开关管 S_1 和 S_2 工作,开关管 S_1 和 S_2 的占空比 $D_1=D_2=D$ 。

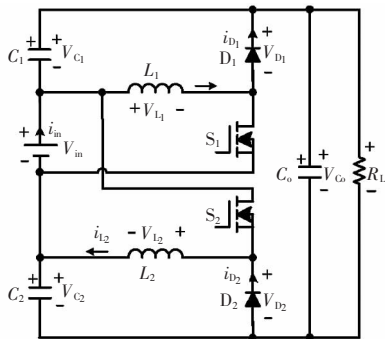


图 1 改进变换器的拓扑结构

Fig.1 Topology of the improved converter

1.2 工作原理分析

在实际应用中,变换器通常工作在占空比 $D > 0.5$ 的情况下。图 2 为变换器工作于 $D > 0.5$ 时变换器的主要工作波形,其各个工作模态对应的等效电路如图 3 所示。

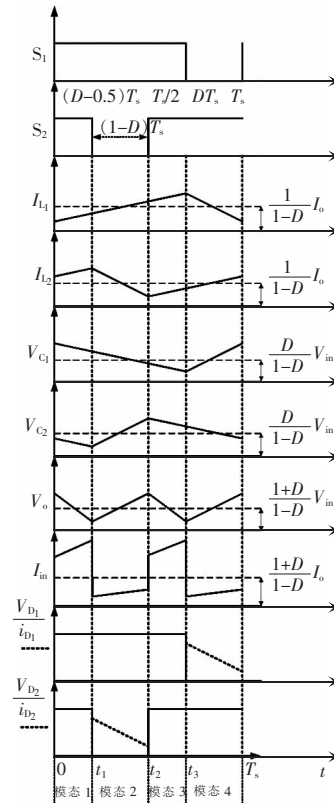


图 2 $D > 0.5$ 时工作波形

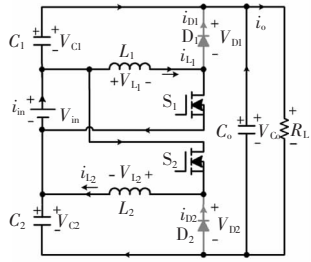
Fig.2 Operation waveforms under duty ratios of higher than 0.5

模态 1 $[0 \sim t_1]$: 开关管 S_1, S_2 导通, 二极管 D_1, D_2 截止, 电源为电感 L_1, L_2 充电, 流过电感 L_1, L_2 的电流线性上升, 负载两端电压 $V_0 = V_{C1} + V_{C2} + V_{in}$, 等效电路示于图 3(a) 中。

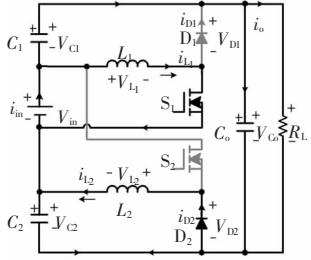
模态 2 $[t_1 \sim t_2]$: 开关管 S_1 导通, S_2 关断, 二极管 D_1 截止, 二极管 D_2 导通, 电源为电感 L_1 充电, 流过电感 L_1 的电流线性上升, 流过电感 L_2 的电流线性下降, 电感 L_2 两端的电压为 $-V_{C2}$ 。负载两端电压 $V_0 = V_{C1} + V_{C2} + V_{in}$, 等效电路如图 3(b) 所示。

模态 3 $[t_2 \sim t_3]$: 开关管 S_1, S_2 导通, 二极管 D_1, D_2 截止, 这一时间段内电路的工作模态与模态 1 完全一致, 等效电路见图 3(a)。

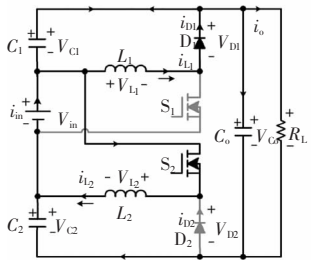
模态 4 [$t_3 \sim T_s$]: 开关管 S_1 关断, 开关管 S_2 导通, 电源为电感 L_2 充电, 二极管 D_1 导通, 二极管 D_2 截止, 流过电感 L_1 的电流线性下降, 流过电感 L_2 的电流线性上升, 电感 L_1 两端的电压为 $-V_{C_1}$ 。负载两端电压 $V_0 = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{in}$, 等效电路如图 3(c) 所示。



(a) 模态 1(3)



(b) 模态 2



(c) 模态 4

图 3 $D > 0.5$ 时所提变换器各模态等效电路

Fig.3 Equivalent circuits of the proposed converter in different modes under duty ratios of higher than 0.5

2 稳态特性分析

2.1 稳态电压增益

根据电感 L_1 和 L_2 的伏秒平衡原理, 结合图 3(a) 和图 3(c) 可得

$$\int_0^{DT_s} V_{in} dt + \int_{DT_s}^{T_s} -V_{C_1} dt = 0 \quad (1)$$

$$\int_0^{DT_s} -V_{C_2} dt + \int_{DT_s}^{T_s} V_{in} dt = 0 \quad (2)$$

$$V_0 = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{in} \quad (3)$$

由式(1)、式(2), 电容 C_1 、 C_2 两端电压分别为

$$V_{C_1} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (4)$$

$$V_{C_2} = \frac{D}{1-D} V_{in} \quad (5)$$

结合式(3)~式(5), 变换器电压增益为

$$M = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1+D}{1-D} \quad (6)$$

2.2 功率器件的电压及电流应力

由上述工作原理及稳态特性分析可推出功率开关管及二极管的电压应力分别为

$$V_{DS1} = V_{DS2} = V_{in} + V_{C_1} = \frac{1}{1+D} V_0 \quad (7)$$

$$V_{D1} = V_{D2} = V_{in} + V_{C_1} = \frac{1}{1+D} V_0 \quad (8)$$

功率开关管及二极管相对于输出电压的应力与占空比关系如图 4 所示。由图可知, 功率开关管及二极管的电压应力均低于输出电压。

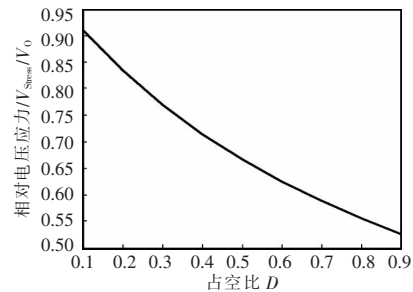


图 4 开关管及二极管的相对电压应力与占空比的关系

Fig.4 Relationship between relative voltage stress and duty ratio of switches and diodes

由电容的安秒平衡效应可知, 电容 C_1 、 C_2 、 C_0 的平均电流在一个开关周期内等于 0, 因此二极管 D_1 、 D_2 的平均电流等于负载电流 I_0 , 结合图 3(a), 可得电感 L_1 的平均电流 i_{L1} 为

$$i_{L1} = \frac{I_0}{1-D} \quad (9)$$

同理可得电感 L_2 的平均电流 i_{L2} 为

$$i_{L2} = \frac{I_0}{1-D} \quad (10)$$

根据图 2,电感 L_1 、 L_2 的电流纹波分别为

$$\Delta i_{L1} = \frac{V_{in}D}{L_1f_s} \quad (11)$$

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_{in}D}{L_2f_s} \quad (12)$$

式中, f_s 为开关频率, $f_s=1/T_s$ 。

二极管 D_1 的电流峰值为

$$i_{D1p} = i_{L1p} = \frac{V_0}{(1-D)R_L} + \frac{V_{in}D}{2L_1f_s} \quad (13)$$

二极管 D_2 的电流峰值为

$$i_{D2p} = i_{L2p} = \frac{V_0}{(1-D)R_L} + \frac{V_{in}D}{2L_2f_s} \quad (14)$$

根据图 3(a)可知,开关管 S_1 的电流峰值为

$$i_{DS1p} = i_{D1p} = \frac{V_0}{(1-D)R_L} + \frac{V_{in}D}{2L_1f_s} \quad (15)$$

根据图 3(c)可知开关管 S_2 的电流峰值为

$$i_{DS2p} = i_{D2p} = \frac{V_0}{(1-D)R_L} + \frac{V_{in}D}{2L_2f_s} \quad (16)$$

2.3 零输入电流纹波的实现

从图 2 可以看出,该变换器的输入电流纹波较大,较大的输入电流纹波不仅会降低变换器效率,还会使直流电源的使用寿命缩短。

为了减小输入电流纹波,对上述变换器做如下改进:在直流电源输入侧,串入一个很小的辅助电感 L_s ^[14],改进后的变换器拓扑结构如图 5 所示。

由图 5 可知,改进后的变换器输入电流纹波即为电感 L_s 的电流纹波,即

$$\Delta i_{Ls} = \frac{V_{Ls}}{L_s} \Delta T \quad (17)$$

其中, ΔT 为开关周期。由式(17)可知,减小输入电流纹波有多种方法,如增大开关频率、增大电感、或

者减小电感两端电压。但由于功率器件自身的限制,实际电路中开关频率不可能无限大,且开关频率越大,开关损耗就越大,变换器的效率就越低。若采用增大电感的方法,则会增加变换器的体积和成本,进而导致功率密度的降低。由图 5 可知,在一个开关周期内,辅助电感 L_s 、电容 C_1 、电容 C_2 、直流电源 V_{in} 与输出电容 C_0 构成一个电压回路,理论上可认为所选电容足够大,电容上的纹波电压很小,电压近似恒定不变。则辅助电感 L_s 两端的电压 V_{Ls} 近似为 0。综上,辅助电感 L_s 的电压 V_{Ls} 可表示为

$$V_{Ls} = V_0 - V_{C1} - V_{C2} - V_{in} \approx 0 \quad (18)$$

由式(17)及式(18),稳态时 L_s 两端的电压近似为 0,因此 L_s 的电流纹波也近似为 0。

3 实验验证

以数字信号处理器 TMS320F2812 作为核心控制器,搭建了一台原理样机,验证所提变换器的工作原理。具体电路参数如表 1 所示。

图 6~图 10 给出了该变换器的实验结果。图 6 为 2 个开关管驱动电压的驱动波形,可以看出,2 个开关管驱动信号相位交错 180° 。图 7 为变换器中流过电感 L_1 、 L_2 的电流 i_{L1} 和 i_{L2} 的实验波形。图 8 为输出电压与输入电流的波形,可以看出,输入电流纹波近似为 0。

图 9 为 2 个开关管的电压应力和电流应力的

表 1 实验电路参数

Tab.1 Circuit parameters in the experiment

参数	数值
输入电压 V_{in}/V	45~56
输出电压 V_0/V	200
额定功率 P_0/W	200
输入电感 $L_1, L_2/\mu H$	450
辅助电感 $L_s/\mu H$	20
电容 C_1, C_2	200 $\mu F/250 V$
输出滤波电容 C_0	220 $\mu F/400 V$
功率开关管 S_1, S_2	IRFP260
二极管 D_1, D_2	DESI60-06A
开关频率 f_s/kHz	40

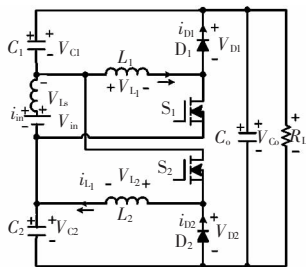


图 5 进一步改进后的变换器拓扑结构

Fig.5 Topology of the converter after further improvement

实验波形。图 10 是 2 个二极管的电压和电流应力的实验波形,可见, D_1 、 D_2 的电压应力约为输出电压的 0.615。图 11 为负载扰动时的动态实验波形,可见,保持输入电压等其他实验参数不变,当负载从 150 W 突变到 250 W 时,输出电压具有较快的动态响应及稳定性,实验结果与理论分析非常吻合。

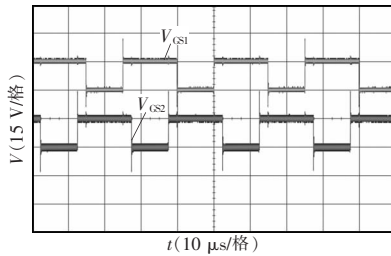


图 6 开关管驱动电压实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of the gate-source voltage

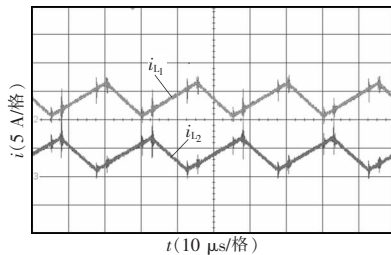


图 7 电感电流的实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of inductor current

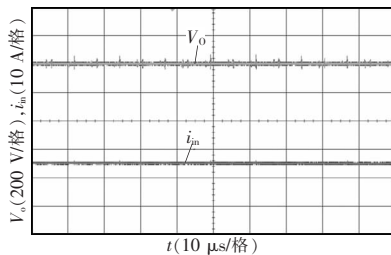


图 8 输出电压和输入电流的实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of output voltage and input current

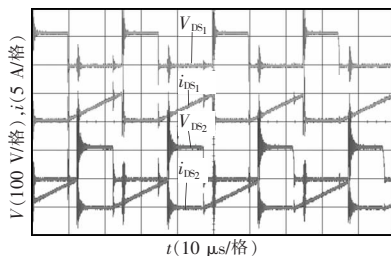


图 9 开关管电压和电流应力的实验波形

Fig.9 Experimental waveforms of stress switch voltages and current

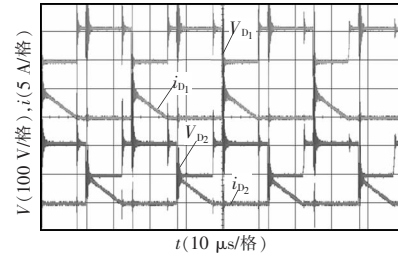


图 10 二极管电压和电流应力的实验波形

Fig.10 Experimental waveforms of stress diode voltages and current

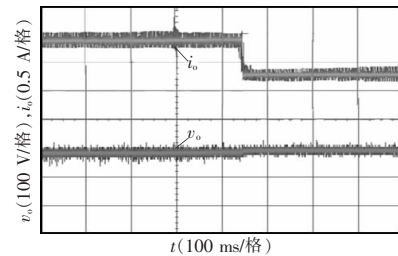


图 11 负载扰动时的动态波形

Fig.11 Dynamic waveforms with step load variation

4 结语

在传统两相交错并联 Boost 的基础上,提出了改进交错并联 Boost 变换器结构,该变换器具有下列特点:

- (1)电压增益高,适用于低压新能源发电场合;
- (2)功率器件的电压应力低,有利于电路选低耐压、高性能的器件来降低电路的损耗。
- (3)输入电流纹波很小,近似为 0。有利于提高直流供电系统的效率。

基于本拓扑结构的有效性,后续研究可以围绕该结构展开,如:将本文中零输入电流纹波技术应用到其他变换器拓扑中,也可以在本拓扑中引入耦合电感技术和倍压单元技术,从而可使该变换器在输入电流纹波近似为 0 的前提下,获得更高的电压增益。

参考文献:

- [1] Choi S, Agelidis V G, Yang J, et al. Analysis, design and experimental results of a floating-output interleaved-input boost-derived DC-DC high-gain transformer-less converter

- [J]. IET Power Electronics, 2011, 4(1):168-180.
- [2] 吴红飞, 古俊银, 张君君, 等. 高效率高增益 Boost-Flyback 直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 40-45.
Wu Hongfei, Gu Junyin, Zhang Junjun, et al. High efficiency high step-up boost-flyback DC-DC converter[J] Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24):40-45(in Chinese).
- [3] Wai R J, Duan R Y. High step-up converter with coupled-inductor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(5):1025-1035.
- [4] 陈文明, 黄如海, 谢少军. 交错并联 Boost PFC 变换器设计[J]. 电源学报, 2011, 9(4):63-67.
Chen Wenming, Huang Ruhai, Xie Shaojun. Optimal design of interleaved Boost power factor correction circuit[J]. Journal of Power Supply, 2011, 9(4):63-67(in Chinese).
- [5] 王琳, 胡雪峰, 代国瑞, 等. 一种适于燃料电池发电用高增益 Boost 变换器[J]. 电源学报, 2014, 12(5):60-66.
Wang Lin, Hu Xuefeng, Dai Guorui, et al. A high step-up boost converter applicable for fuel cell power system [J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(5):60-66(in Chinese).
- [6] 胡义华, 陈昊, 徐瑞东, 等. 一种高升压比直流变换器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9):224-230.
Hu Yihua, Chen Hao, Xu Ruidong, et al. A type of high step-up DC-DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 224-230(in Chinese).
- [7] Huber L, Jovanovic M M. Design approach for server power supplies for networking applications[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE. IEEE, 2000:1163-1169.
- [8] Walker G R, Sernia P C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4):1130-1139.
- [9] Luo F L, Ye H. Positive output cascade boost converters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2004, 151(5):590-606.
- [10] Vinnikov D, Roasto I, Strzelecki R, et al. Step-up DC/DC converters with cascaded quasi-Z-source network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10):3727-3736.
- [11] 姜志玲, 陈维荣, 游志宇, 等. 用于燃料电池的前级 DC/DC 变换器[J]. 电力电子技术, 2010, 44(6):67-68.
Jiang Zhiling, Chen Weirong, You Zhiyu, et al. A front-end DC/DC converter for fuel cell power system[J]. Power Electronics, 2010, 44(6):67-68(in Chinese).
- [12] Changchien S K, Liang T J, Chen J F, et al. Novel high step-up DC-DC converter for fuel cell energy conversion system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(6):2007-2017.
- [13] 陆洽国, 郑路遥, 马召鼎, 等. 带开关电容网络的交错并联高增益 Boost 变换器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 153-159.
Lu Zhiguo, Zheng Luyao, Ma Zhaoding, et al. Interleaved high gain Boost converter with switched capacitor network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11):153-159 (in Chinese).
- [14] 陈章勇, 许建平, 吴建雪. 基于耦合电感倍压单元的零输入电流纹波高增益非隔离变换器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18):25-34.
Chen Zhangyong, Xu Jianping, Wu Jianxue, et al. Zero-input-current-ripple non-isolated high voltage gain converter based on coupled inductor voltage-doubler cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 30(18):25-34(in Chinese).
- [15] 罗全明, 闫欢, 孙明坤, 等. 基于拓扑组合的高增益 Boost 变换器[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 96-102.
Luo Quanming, Yan Huan, Sun Mingkun, et al. High step-up Boost converter based on topology combination[J] Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 96-102(in Chinese).



李永超

作者简介:

李永超(1991-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:新能源发电及其控制技术,E-mail:chao1991_ly@foxmail.com。

胡雪峰(1973-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:新能源发电及其控制技术,E-mail:hxu-123@163.com。

李琳鹏(1992-),男,硕士研究生,研究方向:新能源发电及其控制技术,E-mail:651341756@qq.com。

章家岩(1963-),男,硕士,教授,研究方向:新能源发电及其控制技术,E-mail:1195400036@qq.com。