

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.10.018

基于 Boost/Buck 的直流集成光伏模块串联系统*

陈予吒¹, 李玉玲^{2*}, 王管建²

(1. 杭州士兰微电子股份有限公司, 浙江 杭州 310013; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对光伏模块在各模块功率不均衡条件下, 直流集成光伏模块串联系统最大功率跟踪失衡、系统母线电流受限等问题, 提出了一种基于 Boost/Buck 电路的直流集成光伏模块串联系统, 通过对该 Boost/Buck 电路工作机理和参数对系统性能影响的研究, 引入了基于载波重叠的调制方式控制电路的开关管通断, 并通过合理设计载波重叠区域, 使该系统变换器可根据光伏模块输入侧的不同工况, 在 Boost、Buck 以及 Boost/Buck 三种工作模式之间自动切换。研究表明, 该变换器能够实现系统宽范围的最大功率跟踪, 并且即使在各模块功率严重失衡的情况下, 也能使各模块跟踪到自身的最大功率点, 使得各串联光伏模块之间互不影响。

关键词: Boost/Buck 电路; 载波重叠; 最大功率跟踪; 直流集成光伏模块

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)10-1248-05

DC modularized PV modules serial-connected system based on Boost/Buck

CHEN Yu-zha¹, LI Yu-ling², WANG Guan-jian²

(1. Hangzhou Silan micro-electronics incorporated company, Hangzhou 310013, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems that the maximum power point tracking was defeated and output current of DC bus was limited in DC modularized photovoltaic (PV) modules serial-connected system under mismatching power of PV modules condition, a Boost/Buck converter was proposed to be applied in the DC modularized PV modules serial-connected system. Work principle of Boost/Buck circuit and influence of parameters on the system performance were investigated. Then a carrier-wave overlap modulation strategy was introduced to the system to control the switches, and carrier-wave overlap range was designed reasonably. Consequently, the presented Boost/Buck modularized PV modules can work in Boost, Buck and Boost/Buck mode, and can transfer automatically with different work condition of the PV modules input side. The results indicate that the system can achieve wide range maximum power point tracking with this converter, and system can track the maximum power point even in severe imbalanced condition, and each PV module in serial-connected system does not affect each other.

Key words: Boost/Buck; carrier-wave overlap; maximum power point track; DC modularized PV system

0 引 言

在直流集成光伏模块发电系统中, 每个光伏组件与其自身的 DC/DC 变换器集成在一起组成光伏模块, 该模块能够实现各自的最大功率点跟踪, 而不影响其他模块, 有效地提高了光伏系统的能量利用率。且模块能够即插即用, 便于组合, 受到了研究者的青睐^[1-3]。然而, 单个直流集成光伏模块输出电压、电流、

功率有限, 在中高功率场合, 常需要将多个集成模块串联、并联或串并联以满足实际需要^[4]。在光伏并网系统中, 为了实现后级逆变器并网, 也需要串联多个集成光伏模块以提高直流母线电压。

与光伏组件集成的 DC/DC 变换器拓扑通常有 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk 四种^[5]。在串联直流模块集成光伏发电系统中, Boost 直流变换器以其性能良好、电路简单而最为常用^[6-7]。

收稿日期: 2016-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277164)

作者简介: 陈予吒(1975-), 男, 浙江金华人, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子系统及应用方面的研究。E-mail: chenyzha@silan.com.cn

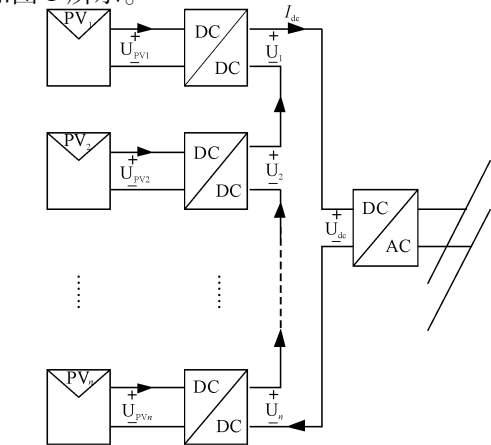
通信联系人: 李玉玲, 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: liyl@zju.edu.cn

然而,由于光照不均,灰尘等影响常使各光伏模块功率不均衡^[8]。这种情况下,由于 Boost 变换器工作的输出电流必须小于输入电流,若某个光伏模块输出电流严重减小,串联光伏系统的母线电流 I_{dc} 也会受到限制,从而使得整个系统的输出功率下降甚至无法正常工作。为了解决这一问题,一些研究者通过在 Boost 电路输出端增加能量均衡电路^[9],使能量从输出功率大的模块转移到输出功率小的模块,以减小串联模块之间功率不均衡的影响。但该能量均衡电路及所需的驱动和控制增加了系统的复杂性和成本。若采用传统 Buck, Boost 或 Buck-Boost 以及 Cuk 电路^[10],在功率不均衡时,不同模块可工作在 Boost 或 Buck 的不同工作模式,能有效减小或消除功率不均衡时各模块之间的影响。但这两种变换器输出电压与输入电压极性相反,且工作效率比 Boost 变换器低。

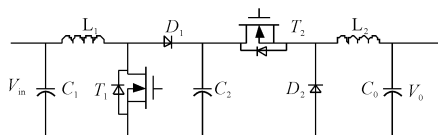
本研究提出一种基于 Boost/Buck 直流集成光伏模块串联系统。该系统通过载波重叠的调制方式调节变换器的开关管,合理设计载波的重叠区域,使得串联系统中的各光伏模块在 Boost, Buck 或 Boost/Buck 模式之间自动切换,能有效减小甚至消除串联集成模块之间的相互影响。同时与传统变换器相比,输出电压与输入电压同极性,且工作效率和传统 Buck、Boost 电路相当。

1 光伏集成 Boost/Buck 变换器工作模式

直流集成光伏模块串联系统及其 Boost/Buck 变换器如图 1 所示。



(a) 直流集成光伏模块串联系统



(b) Boost/Buck 变换器

图 1 直流集成光伏模块串联系统及其 Boost/Buck 变换器

图 1(a)中的 DC/DC 变换器由 Boost 和 Buck 变换器级联而成,如图 1(b),该变换器输出电压和输入电压同极性。在直流集成光伏模块串联系统中,根据各模块输出的功率情况,合理控制各模块集成的 Boost/Buck 变换器,使其工作在升压或者降压模式,以使每个集成模块仍工作在自身的最大功率输出状态,从而在宽范围内实现了系统的最大功率跟踪。

对于 N 个光伏集成模块串联的系统,每个直流模块的输出电压可表示为^[11]:

$$U_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \cdot U_{dc} \quad (1)$$

式中: P_i —单个集成模块的输出功率,当忽略变换器的功率损耗时,近似等于光伏组件的输出功率; U_{dc} —直流母线电压。

式(1)表明每个集成模块的输出电压和其输出功率成正比。

本研究通过控制 Boost/Buck 变换器的输入电压(即光伏模块最大功率点电压)来实现 MPPT,因此需要根据集成模块的输出电压不断调节 Boost/Buck 变换器的电压变比 k 。当光伏模块最大功率点电压高于集成模块的输出电压时,应降低电压变比 k 直至跟踪到最大功率点;当光伏模块最大功率点电压低于集成模块的输出电压时,应升高电压变比 k 直至跟踪到最大功率点。

本研究探讨了当调节 k 使得光伏模块工作在最大功率点时,开关管 T_1 和 T_2 的工作状态。

在图 1(b) 电路中,设 T_1 和 T_2 的导通占空比分别为 d_1 和 d_2 ,则 Boost/Buck 变换器的电压变比(输出电压 V_0 和输入电压 V_{in} 之比)可表示为:

$$k = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{d_2}{1 - d_1} \quad (2)$$

相对于传统的 Boost、Buck 直流变换器,本研究的 Boost/Buck 变换器存在 2 个开关管,其电压变比 k 是 d_1 和 d_2 的二元函数, $d_1 \in (0, 1)$, $d_2 \in (0, 1)$ 。由式(2)可知,对于某一个特定的 k ,存在无数对 (d_1, d_2) 。为了选择合适的 (d_1, d_2) ,可以从开关损耗、电感电流纹波等角度来考虑。

电压比 k 一旦确定,即使对于不同的 (d_1, d_2) ,变换器的输入输出电压、电流也是不变的。

1.1 考虑开关损耗

器件的开关损耗由导通电流、关断电压、开关频率决定。假定开关频率不变,导通电流和关断电压越小,则开关损耗就会越小。由图 1(b) 可知,电感 L_1, L_2 的电流分别由输入和输出电流决定。而对于确定的电压变比 k ,不同的 (d_1, d_2) 输入输出电流相同,两个开关

管的导通电流可以认为相同。因此只需讨论不同的 (d_1, d_2) 对开关管关断电压的影响。

T_1 的关断电压为:

$$V_{T1} = \frac{V_{in}}{1 - d_1} \quad (3)$$

T_2 的关断电压为:

$$V_{T2} = V_{in} \frac{1 - d_2}{1 - d_1} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得,为了让 T_1, T_2 的关断电压降低, d_1 应尽可能减小, d_2 应尽可能增大。结合式(2)分析,当 $k < 1$ 时, d_1 最小为零, d_2 最大为 k , 即 T_1 一直关断, T_2 处于开关状态, 只有后级 Buck 电路工作, 变换器工作在 Buck 模式。当 $k = 1$ 时, d_1 最小为零, d_2 最大为 1, 此时 T_1 一直关断, T_2 一直导通, 变换器工作在直通状态。当 $k > 1$ 时, d_1 最小为 $1 - 1/k$, d_2 最大为 1, 此时 T_1 处于开关状态, T_2 一直导通, 只有前级 Boost 电路工作, 变换器工作在 Boost 模式。

1.2 考虑电感电流纹波

电感电流纹波会增大线圈铜耗和磁芯损耗, 对于同样直流偏置电流和纹波频率, 纹波幅值越小, 电感损耗就会越小。

电感 L_1 的电流纹波大小可表示如下式:

$$\Delta I_1 = \frac{V_{in} d_1 T_s}{L_1} \quad (5)$$

式中: T_s — 开关周期。

电感 L_2 的电流纹波大小可表示为:

$$\Delta I_2 = \frac{V_0(1 - d_2) T_s}{L_2} \quad (6)$$

由式(5,6)可得,为了让电感 L_1 和 L_2 的电流纹波最小,应使 d_1 尽可能减小, d_2 尽可能增大。与(1)中考虑开关损耗类似,可以得到:当 $k < 1$ 时,变换器应工作在 Buck 模式;当 $k = 1$ 时,变换器应工作在直通状态;当 $k > 1$ 时,变换器应工作在 Boost 模式。

综合以上讨论可知,为了使得开关损耗和电感电流纹波最小,当 $k > 1$ 时,变换器应工作在 Boost 模式;当 $k = 1$ 时,变换器应工作在直通模式;当 $k < 1$ 时,变换器应工作在 Buck 模式。

从而可以看出,光伏集成 Boost/Buck 变换器,工作模式可在 Buck 和 Boost 之间切换,能够在宽范围内实现 MPPT,并且能够实现输出和输入电压同极性,这是相对于传统变换器的一大优点。

2 光伏集成 Boost/Buck 变换器调制方法

图 1 系统中 Boost/Buck 变换器包含两个开关管,为了使变换器能够在 Buck 和 Boost 两种模式之间切换,

借鉴文献[12]的思路,本研究合理设置两路频率、相位相同,且有幅值重叠的三角载波信号,并通过同一调制信号获得两路触发脉冲,简化了调制过程和实现。

载波重叠 PWM 调制方式如图 2 所示。

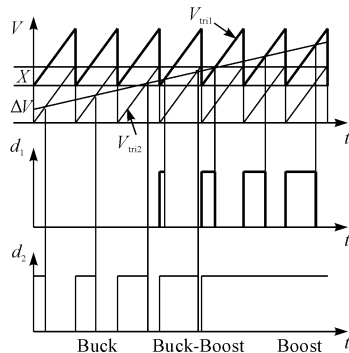


图 2 Boost/Buck 变换器载波重叠 PWM 调制

图 2 中, V_{ri1} 和 V_{ri2} 是频率和相位均相同的两列三角载波信号,该载波信号与控制模块输出信号相调制,从而得到两路频率相同的 PWM 驱动信号。载波 V_{ri1} 的幅值增加偏置 ΔV ,使得 V_{ri1} 和 V_{ri2} 的幅值部分重叠,重叠区域的存在可以使得变换器在模式切换时平滑过渡。当调制波的信号大于载波时,开关管导通;当调制波的信号小于载波时,开关管截止。因此,当调制波的幅值较小时,调制波与三角波 V_{ri2} 比较得到开关管 T_2 的 PWM 驱动信号,此时调制波的幅值小于三角波 V_{ri1} 的最小值,因此开关管 T_1 始终截止,电路工作在 Buck 模式。当调制波的幅值较大时,调制波与三角波 V_{ri1} 比较得到开关管 T_1 的 PWM 驱动信号,此时调制波的幅值大于三角波 V_{ri2} 的最大值,开关管 T_2 始终导通,电路工作在 Boost 模式。当调制波幅值在重叠区域时,开关管 T_1, T_2 都处于开关状态,电路工作在 Boost/Buck 模式。因此,通过改变调制信号的大小,电路可以在 3 种工作模式之间自动切换。

当调制波幅值在重叠区域时,电路工作在 Boost/Buck 模式, T_1, T_2 都处于开关状态,很显然,相对于 Buck 模式和 Boost 模式,Boost/Buck 模式的损耗更大。为了提高工作效率,载波重叠区域 X 应尽可能小。另一方面,若 $X < 0$,即两路载波不重叠时,调制信号在过渡区间对电压变比不起作用,因此要使得变换器在不同工作模式之间平滑切换,两路载波 V_{ri1} 和 V_{ri2} 的重叠区域 X 不能无限小,即存在一个最小值。

假设两路载波的幅值都为 1,开关管开通延时对应的占空比为 d_{s1} ,关断延时对应的占空比为 d_{s2} ,则最小重叠区域为:

$$\Delta = d_{s1} + d_{s2} \quad (7)$$

若取开关管的导通延时和关断延时为 0.5 μs ,则对于 20 kHz 的开关频率,载波幅值为 1 时,载波重叠区域的大小最小应为 0.02。当重叠区域 $X > \Delta$ 时,调制信

号 d_{ctrl} 和增益呈现出单调的单调的单值对应关系。调制信号 d_{ctrl} 与开关管实际动作占空比 d_1 、 d_2 的函数关系式:

$$d_{boost} = \begin{cases} 0 & d_{ctrl} < 1 - X \\ d_{ctrl} - 1 + X & 1 - X \leq d_{ctrl} < 2 - X - d_{d2} \\ 1 & d_{ctrl} \geq 2 - X - d_{d2} \end{cases} \quad (8)$$

$$d_1 = \begin{cases} 0 & d_{boost} < d_{z1} \\ \frac{d_{boost} - d_{z1}}{1 - d_{z1} - d_{z2}} & d_{z1} \leq d_{boost} < 1 - d_{z2} \\ 1 & d_{boost} \geq 1 - d_{z2} \end{cases} \quad (9)$$

$$d_2 = \begin{cases} 0 & d_{ctrl} < d_{z1} \\ \frac{d_{ctrl} - d_{z1}}{1 - d_{z1} - d_{z2}} & d_{z1} \leq d_{ctrl} < 1 - d_{z2} \\ 1 & d_{ctrl} \geq 1 - d_{z2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $d_{ctrl} \in [0, 2 - d_{z1} - 2d_{z2}]$; d_{boost} — 开关管 T_1 控制信号的占空比; d_1, d_2 — 开关管 T_1 和 T_2 实际动作的占空比。

当 $d_{z1} = d_{z2} = 0.01$, X 分别为 -0.1 和 0.1 时, 调制信号 d_{ctrl} 和实际电压增益 k 的关系曲线如图 3 所示。

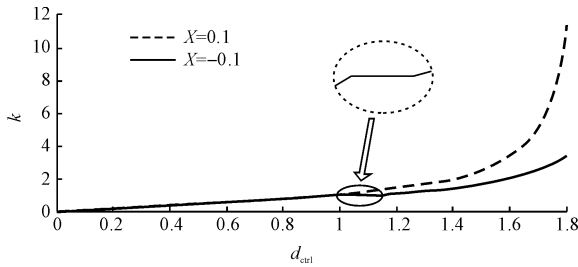


图 3 调制信号 d_{ctrl} 和实际电压增益 k 的关系曲线

比较可得, 当 $X < \Delta$ 时, 曲线会有一个平台; 当 $X \geq \Delta$ 时, 曲线呈现出单调递增特性, 在重叠区域平滑过渡。曲线出现平台表明调制信号失去对电压的控制, 这增加了系统控制的难度。因此, X 的取值应当大于 Δ 。

3 实验结果及分析

为了验证上述理论分析的正确性, 本研究搭建了基于 Boost/Buck 电路光伏集成串联系统的软硬件实验平台, 参数如下: $L_1 = 1 \text{ mH}$, $L_2 = 1 \text{ mH}$, $C_1 = 100 \text{ }\mu\text{F}$, $C_2 = 470 \text{ }\mu\text{F}$, $C_0 = 470 \text{ }\mu\text{F}$, 开关频率 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 。利用 Agilent 光伏模拟器 E 4 360 代替光伏模块, 负载采用 Agilent 直流电子负载 6 063 B, 控制芯片采用 DSPT-MS320F28 335。

本研究首先验证系统的宽范围最大功率跟踪工作特性。将光伏模拟器模块与 Boost/Buck 电路相连构成一个直流集成光伏模块, 负载连接电子负载。设置光伏模拟器的 IV 曲线参数为: $(V_{mpp}, I_{mpp}, V_{oc}, I_{sc}) = (40, 2, 50, 2.5)$, V_{mpp}, I_{mpp} 分别表示最大功率点电压和电流, V_{oc}, I_{sc} 分别表示光伏模块的开路电压和短路电

流, 电压、电流单位分别为 V 和 A, 以下同。

将电子负载设置为电压模式, 实验过程中调节电压, 使得 Boost/Buck 输出电压在 60 V 和 20 V 之间跳变。测得光伏模拟器输出电压电流功率和负载电压波形如图 4 所示。

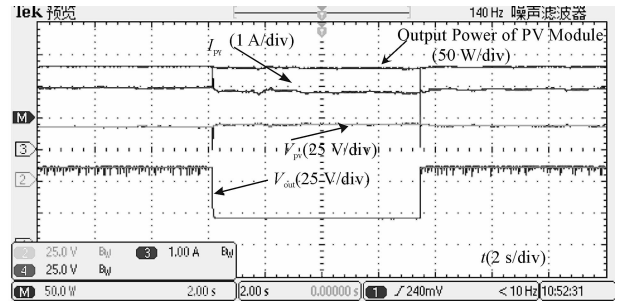
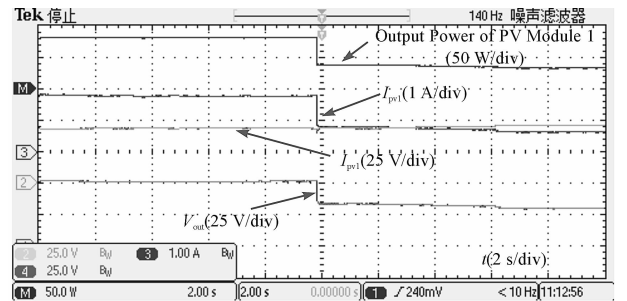


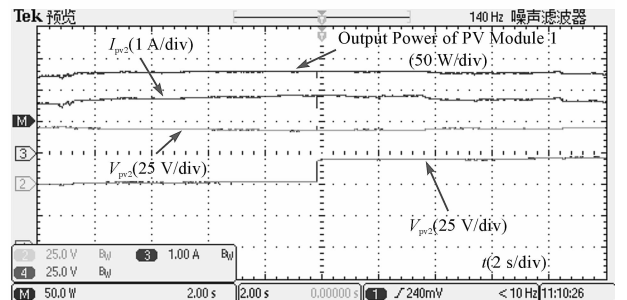
图 4 光伏模拟器输出电压、电流、功率和变换器输出电压波形

图 4 中, 输出电压 V_{out} 由 60 V 变成 20 V, 再变回 60 V。整个过程中, 光伏模块的输出电压 V_{pv} 、输出电流 I_{pv} 基本没有变化, 变换器始终工作在 MPPT, 输出功率不变, 验证了光伏集成 Boost/Buck 模块能够在较宽的工作范围有效地跟踪最大功率输出。

为了验证基于 Boost/Buck 直流集成光伏模块串联系统在不均衡条件下的工作性能, 两个光伏模拟器模块分别与各自的 Boost/Buck 电路相连, Boost/Buck 电路输出端串联后接电子负载。两个光伏模拟器的 IV 曲线初始参数设置为 $(V_{mpp}, I_{mpp}, V_{oc}, I_{sc}) = (40, 2, 50, 2.5)$, 电子负载设置成恒压 100 V。实验过程中将第一个光伏模拟器的参数突变为 $(V_{mpp}, I_{mpp}, V_{oc}, I_{sc}) = (40, 1, 50, 1.5)$, 测得光伏模块的电压、电流、功率和变换器输出电压的波形如图 5 所示。



(a) 模块 1 输出电压、电流、功率和变换器输出电压波形



(b) 模块 2 输出电压、电流、功率和变换器输出电压波形

图 5 光伏模块输出电压、电流、功率和变换器输出电压波形

从图 5(a)可以看出,光伏模块 1 的最大功率点的电流突降为 1 A 后,光伏模块 1 的输出电流突变为约 1 A,输出电压不变,输出功率约为 40 W,可见此时模块 1 工作在最大功率点,其直流变换器的输出电压降为约 35 V。同时在图 5(b)中,光伏模块 2 的输出电压、电流、功率均不变,始终工作在最大功率点,说明模块 1 的光伏特性变化对模块 2 的 MPPT 并无影响,此时直流变换器的输出电压升高为约 70 V。比较图 5 的(a)和(b),直流集成模块的输出电压比约为 1:2,而光伏模块的输出功率比约为 40 W:80 W=1:2,输出电压和输出功率呈正比,与理论分析一致。

实验说明,基于 Boost/Buck 直流集成光伏模块串联系统在各模块功率均衡和不均衡情况下都能够实现各自光伏模块的 MPPT,不需要额外的能量均衡电路,即能减小甚至消除串联集成光伏模块之间的影响。

4 结束语

本研究探讨了基于 Boost/Buck 直流集成光伏模块串联系统,按照开关损耗和电感电流纹波最小的原则确定了系统直流变换器的工作模式和基于载波重叠的调制方法,通过合理设置载波重叠区域,实现了系统的 Boost、Buck 和 Boost/Buck 切换的工作模式。

实验验证了由 Boost/Buck 变换器集成的光伏系统具有宽范围的最大功率跟踪特性,基于 Boost/Buck 直流集成光伏模块串联系统在各模块功率不均衡条件下,每个模块都可以按照各自光伏输入侧的不同工况,控制变换器工作在 Boost 或 Buck 模式,从而保证各模块工作在各自的最大功率点,自动消除串联各模块功率不均衡的影响,而不需要额外的功率均衡电路,是一种较好的串联直流集成光伏模块的电路拓扑。

参考文献(References):

[1] ADINOLFI G, FEMIA N, PETRONE G. Design of dc/dc converters for DMPPT PV applications based on the concept of energetic efficiency[J]. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2010, 132(2):3041-3045.

[2] 王力成,文东山,周 斌,等. 配电网中光伏功率主动消减策略研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(6):863-869.

[3] 王晓坤,李玉玲. 基于交错并联 boost 电路的集中式光伏发电系统[J]. *机电工程*, 2013, 30(8):1005-1010.

[4] 刘邦银,梁超辉,段善旭. 直流模块式建筑集成光伏系统的拓扑研究[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(20):99-104.

[5] BRATCU A I, MUNTEANU I, BACHA S, et al. Cascaded DC-DC converter photovoltaic systems: power optimization issues[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(2):403-411.

[6] 李 娟,杨 晨,谢少军. 一种用于光伏直流模块的高升压比直流变换器[J]. *电力电子技术*, 2013, 47(3):51-53.

[7] 孙孝峰,申彦峰,朱云娥. 一种 Boost 型宽电压范围输入 LLC 谐振变换器[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(15):3895-3903.

[8] 鲍官军,张林威,蔡世波. 光伏面板积灰及除尘清洁技术研究综述[J]. *机电工程*, 2013, 30(8):899-904.

[9] KADRI, R, GAUBERT J. P, CHAMPENOIS G. Non-dissipative string current diverter for solving the cascaded DC-DC converter connection problem in photovoltaic power generation system [J]. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2011, 27(3):1249-1258.

[10] 杨 晨,谢少军,毛 玲,等. 基于双管 Buck-Boost 变换器的直流微电网光伏接口控制分析[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(13):45-50.

[11] WALKER G R, SEMIA P C. Cascaded DC-DC converter connection of photovoltaic Modules [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(4):1130-1139.

[12] LEE Y J, KHALIGH A, EMADI A. A Compensation technique for smooth transitions in a noninverting buck-boost converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(4):1002-1015.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

陈予吒,李玉玲,王管建. 基于 Boost/Buck 的直流集成光伏模块串联系统[J]. *机电工程*, 2016, 33(10):1248-1252.

CHEN Yu-zha, LI Yu-ling, WANG Guan-jian. DC modularized PV modules serial-connected system based on Boost/Buck[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(10):1248-1252.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>