

# 超级电容器在光伏发电系统中的应用

刘建斌<sup>1, 2</sup>, 易灵芝<sup>1</sup>, 王根平<sup>2</sup>, 颜志刚<sup>1</sup>, 李明<sup>1</sup>

(1. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 针对光伏发电模块输出电压不稳定问题, 设计一种以超级电容器作为储能元件来改善光伏发电系统电能质量的并联型调节装置。在光伏发电系统正常运行条件下, 该装置可以快速抑制光伏发电模块的电压波动, 使得光伏发电模块只需向负载提供预先设定的单位功率因数的恒定有功功率; 该装置还可以在光伏发电模块发生短时供电中断时充当 UPS 电源, 短时间内向负载提供全部功率。仿真结果表明, 该装置可以有效改善光伏发电模块输出电压, 提高电能质量, 增强负载用电的可靠性。

**关键词:** 超级电容; 储能系统; 光伏发电; DC/DC

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2009)05-0055-05

## Application of Super-Capacitors in Photovoltaic Power System

Liu Jianbin<sup>1, 2</sup>, Yi Lingzhi<sup>1</sup>, Wang Gengping<sup>2</sup>, Yan Zhigang<sup>1</sup>, Li Ming<sup>1</sup>

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;

2. Shenzhen polytechnic, Shenzhen Guangdong 518055, China)

**Abstract:** For photovoltaic(PV)module output voltage instability problems, a shunt power conditioning device which uses super-capacitor as a energy storage component to improve the quality of the PV power generation system is brought forward. In the normal operation condition of the PV power generation system, the device can quickly inhibit PV module voltage fluctuation, which make the PV power generation modules only need to provide pre-configured unit factor constant active power to load. The device can also be used as an UPS power supply to provide load full power in a short period of time when PV module short-term power interruption occurs. Simulation results show that the device not only can effectively improve PV module output voltage and power quality, but also enhance the reliability of the electricity load.

**Keywords :** super-capacitor; system of energy storage; photovoltaic power(PV power); DC/DC

太阳能是理想的可再生能源<sup>[1-2]</sup>, 太阳能光伏发电系统的研究对于缓解能源危机、减少环境污染及温室效应具有重要意义<sup>[3]</sup>。

### 1 光伏发电系统控制模式

光伏发电系统的几种常用控制模式为<sup>[4-10]</sup>: 1) 直接开关控制。在太阳能电池输出端并联蓄电池, 虽简单, 但光伏能量不能及时充分利用, 造成大量浪费, 对

改善光伏阵列输出电压作用不大。2) DC/DC 变换器控制<sup>[5]</sup>。在光伏阵列输出端并联 DC/DC 变换器控制蓄电池, 见图 1。光伏发电系统能较好地收集多余能量, 但蓄电池使用寿命不长, 充放电速度慢, 不能迅速对光伏阵列输出电压变化做出反应, 有一定的延时性。3) DC/AC 变换器控制<sup>[6]</sup>。在交流输出端并接 DC/AC 变换器控制超级电容器组储能器, 见图 2。该模式能改善负载电能质量, 但控制复杂, 难以在实际中广泛应用。

收稿日期: 2009-07-12

基金项目: 教育部全国工程硕士教育课题 (GJW0701), 湖南省教育厅科研基金资助项目 (07C760)

作者简介: 刘建斌 (1985-), 男, 湖南武冈人, 湘潭大学硕士研究生, 主要研究方向为超级电容器及其应用,

E-mail: 343498677@qq.com

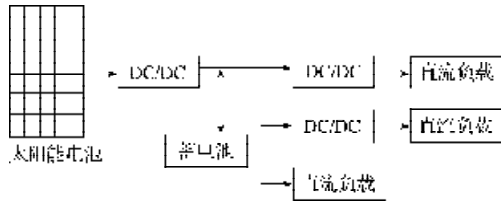


图1 带DC/DC变换器的控制系统

Fig. 1 Control system with DC / DC converter

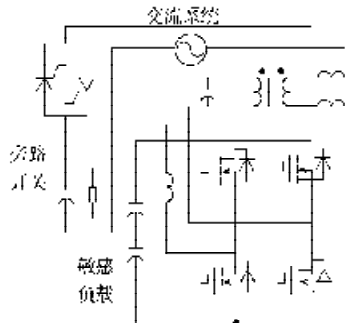


图2 带DC/AC变换器的控制系统

Fig. 2 Control system with DC / AC converter

太阳能电池只能在白天工作，夜间会因为无光而停止，因而会影响电力系统的稳定度，降低系统的利用率。为了充分利用太阳能，及时调节太阳能电池输出端电压，实现能量管理，本文采用DC/DC变换器控制超级电容器组储能器，实现新的太阳能独立光伏发电系统，新的光伏发电系统不仅可以发电，而且还可以补偿电压骤降或突升，并且在微光情况下超级电容器组储能装置还可充当短时UPS电源，该系统无需有源滤波器，故控制系统可简化。电压突升或骤降，多由太阳光照强度引起，有时也可能是负载用电情况变化引起的，新系统可改善直流母线输出电压，进而改善发电质量。

## 2 太阳能独立光伏发电系统

本文采用新的太阳能独立光伏发电系统（图3），该系统主要由太阳能电池（光伏阵列）、电能储存模块及负载模块组成。其中，新系统储能模块采用超级电容器组储能器，输出模块采用DC/AC结构，因为家电基本都是交流电控制的。

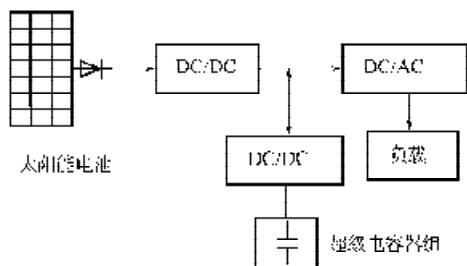


图3 太阳能独立光伏发电系统

Fig. 3 Independent solar photovoltaic power generation system

### 2.1 DC/DC变换器类型选择

DC/DC转换器的传导损耗和开关损耗是主要的损耗来源，因此，以开关的总损耗来评价不同DC/DC转换器是有意义的。

若DC/DC转换器包含k个半导体器件，则开关总损耗S为：

$$S = \sum_{j=1}^k U_j I_j \quad (1)$$

式中：U<sub>j</sub>、I<sub>j</sub>分别为加到器件j的峰值电压和对应电流。

若DC/DC转换器的输出功率为P<sub>L</sub>，则开关利用率μ为

$$\mu = P_L / S \quad (2)$$

不同DC/DC转换器的开关利用率见表1。

表1 不同DC/DC转换器开关利用率比较

Table 1 Utilization comparison of different DC/DC converters' switch

开关类型	DC/DC转换器开关利用率/%	
	μ	μ <sub>max</sub>
升压型	(1+D)/√D	∞
隔离型	(1+D)/(2√(1-D))	50.0
推挽型	√D/(2√2)	35.3
推挽式电流改进型	(1+D)/(2√(1+D))	50.0
升降压型	(1+D)/√D	38.5

注：D为开关导通时间，μ为开关利用率，μ<sub>max</sub>为开关最大利用率。

从表1可以看出，隔离型与推挽式电流改进型开关利用率最大，达到50%，但此时隔离型的D值为0，故隔离型不可取。再者，太阳能电池输出电压经过1个DC/DC转换器，故直流母线电压已经不是很高，不需采用隔离型DC/DC转换器，则新系统的双向DC/DC转换器采用推挽式电流改进型，所设计的独立光伏发电电路拓扑结构如图4所示。

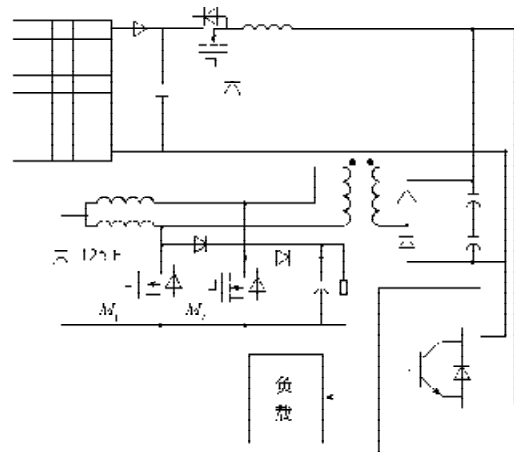


图4 独立光伏发电系统电路拓扑结构图

Fig. 4 Topology diagram of independent PV power generation system circuit

### 2.2 超级电容器组设计

与传统电池相比, 超级电容器具有能量密度大、能量储存量大、充放电时间极短、充电/放电循环使用寿命长、可模块化等优点, 完全能满足电能质量调节要求。在实际应用中, 超级电容器能够快速放电, 等效内阻非常低, 因此适合瞬态补偿电压骤降、短期电压中断或源电压骤升。

采用电压为 2.7 V、容量为 5 000 F 的超级电容器进行仿真, 假定超级电容器组由 40 个单元构成, 则模块额定端电压为 108 V。设计的关键问题是确定超级电容器组的补偿时间, 这可通过需提供的短时能量加以确定, 据分析, 补偿时间选择 5 s 是比较合适的, 因为在放电情况下, 一般大容量超级电容器的电压在 5 s 内会跌落 50% 左右, 其放电产生的能量足以弥补整个电压中断期间负载所需能量。考虑到所模拟的太阳能电池的输出功率为 10 kW, 则所需超级电容器组容量的计算公式为:

$$C = \frac{2tW}{(U_0 - U_f)^2}, \quad (3)$$

式中:  $t$  为中断时间;

$W$  为模拟太阳能电池的输出功率;

$U_0$  为电容额定电压;

$U_f$  为放电终止电压。

将  $t=5\text{ s}$ 、 $U_0=108\text{ V}$ 、 $U_f=54\text{ V}$ 、 $W=10\text{ kW}$  代入式(3) 可得超级电容器组所需电容值约为 35 F, 故只需 1 个超级电容器组就足够了, 此时超级电容器组的参数为 108 V/125 F。

### 2.3 双向变换器工作模式选择

根据太阳能电池和超级电容器组的状态, 以及负载的电压状态(如负载短路)来控制双向变换器能量传输的方向, 使其工作在充电、放电或保护 3 种工作模式, 实现超级电容器组的充放电, 使得超级电容器组和太阳能电池协调工作。

超级电容器组的工作状态可通过检测其端电压  $U_C$  来确定, 当超级电容器组的端电压已低于额定值的 50% 时, 放电结束; 当高于额定电压的 50% 时, 超级电容器组处于正常状态, 既可充电也可放电; 当超级电容器组充满时, 改为恒压浮充, 以补偿超级电容器组的自放电。

太阳能电池的工作状态可通过检测直流母线电压  $U_{PV}$  来确定。当  $U_{PV}$  低于直流母线所要求的最低电压  $(U_{PV})_{\min}$  时, 需要超级电容器组放电补充负载所需能量; 高于最低电压  $(U_{PV})_{\min}$  时, 太阳能电池可向负载提供足够的能量, 多余的能量给超级电容器组充电。

通过对  $U_C$  和  $U_{PV}$  的检测可将系统工作情况划分为 4 个工作区域, 每个区域对应系统的一个工作状态, 见图 5。交流侧电压大幅度下降及接地都包含在 4 个工作

区域内, 根据超级电容器组和太阳能电池的状态, 双向变换器将处于不同的工作模式。

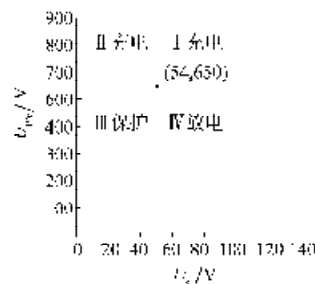


图 5 双向 DC/DC 变换器工作模式  
Fig. 5 Bi-directional DC/DC converter operating modes

当  $U_{PV} < 650\text{ V}$  (光伏电池工作不稳定) 且  $U_C < 54\text{ V}$  时, MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$  均关闭, 此时电路立即进入保护模式, 对应图 5 中工作模式 III;

当  $U_{PV} > 650\text{ V}$  且  $U_C < 54\text{ V}$  时, 电路轮流选通 MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$ , 选通时间低于 0.5 个周期, 此时电路工作在 Buck 工作模式, 对应图 5 中工作模式 II;

当  $U_{PV} < 650\text{ V}$  且  $U_C > 54\text{ V}$  时, 电路轮流选通 MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$ , 选通时间高于 0.5 个周期, 此时电路选通 Boost 工作模式, 对应图 5 中工作模式 IV;

当  $U_{PV} > 650\text{ V}$  且  $U_C > 54\text{ V}$  时, 电路轮流选通 MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$ , 选通时间低于 0.5 个周期, 此时电路选通 Buck 工作模式, 对应图 5 中工作模式 I;

当压降传感器测得电压小幅度下降时, 电路轮流选通 MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$ , 选通时间高于 0.5 个周期, 此时电路选通 Boost 工作模式, 对应图 5 中工作模式 III;

当压降传感器测得电压跌破门槛电压时, MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$  均关闭, 此时电路立即进入保护模式, 对应图 5 中工作模式 III。

根据图 5 判断系统所处的工作模式, 给双向变换器发送相应的选通/关断信号, 使双向变换器工作在合适的状态, 实现系统的能量管理, 双向 DC/DC 变换器的控制框图见图 6。

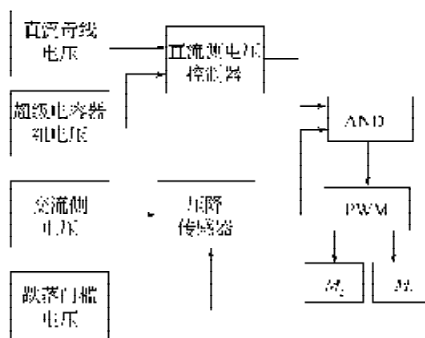


图 6 DC/DC 控制框图  
Fig. 6 Block diagram of DC/DC control

### 3 仿真结果

图7为新光伏发电系统的仿真模型,主要由太阳能电池模型、降压DC/DC控制器、储能模块、输出负载模块4部分构成。其中,太阳能电池模型的参数设

定为 $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $U=1\ 000\ \text{V}$ ,  $I=10\ \text{A}$ ,能提供10 kW的能量输出,负载为1台10 kW的永磁电动机,双向DC/DC控制器的 $M_1$ 和 $M_2$ 开关及DC/AC控制器的PWM信号均由图中名为Control的S函数控制生成。

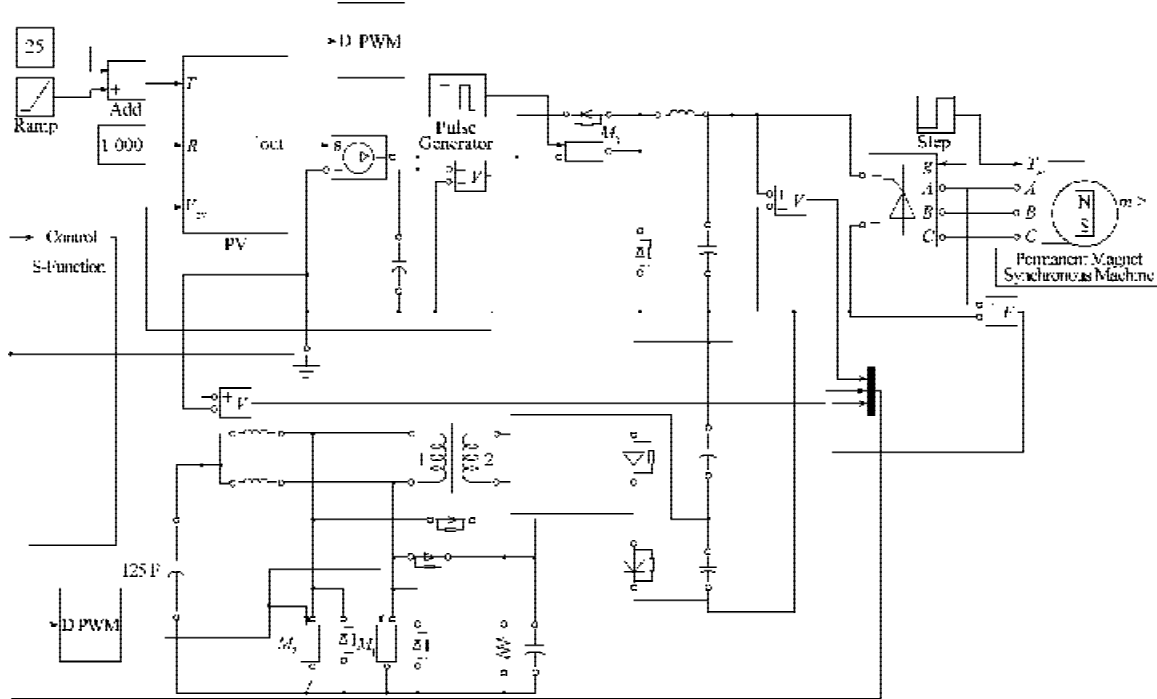


图7 新的光伏发电系统的仿真模型

Fig. 7 The new simulation model of PV system

第1次仿真条件为:10 kW永磁电动机负荷遭受了48%单相降压,没有接入带超级电容器组的双向DC/DC控制器。此时获得的直流母线电压波形如图8所示,从图中可看出直流母线电压在0.1~0.2 s期间有高达30 V的电压波动。

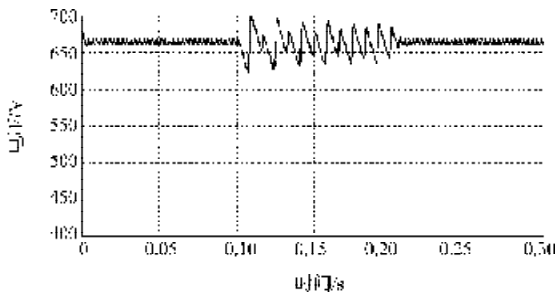


图8 直流母线电压波形

Fig. 8 Voltage waveform of DC bus

第2次仿真条件与第1次相同,但接入带超级电容器组的双向DC/DC控制器。此时仿真得到图9所示直流母线电压波形,从图中可看出,在0.1~0.2 s期间,直流母线电压比较平稳,没有出现大的波动,这证明了双向DC/DC控制的超级电容器组对输出负载波动具有较好的补偿作用。

第3次模拟太阳能电池输出电压的瞬时跌落情况,其持续时间为100 ms。在没有接入带超级电容器组的

双向DC/DC控制器时,仿真获得的直流母线电压波形如图10所示,从图中可观察到,没有超级电容器组供给能量时,直流电压瞬时跌落50%以上,这在实际应用中将会造成严重的电力事故。

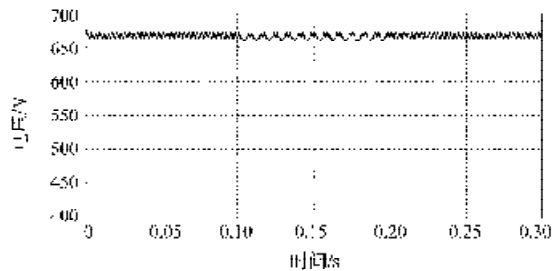


图9 直流母线电压波形

Fig. 9 Voltage waveform of DC bus

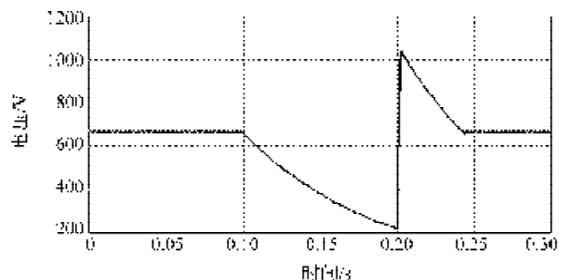


图10 直流母线电压波形

Fig. 10 Voltage waveform of DC bus

第4次仿真条件与第3次相同,但接入了带超级电容器组的双向DC/DC控制器,仿真获得的直流母线电压波形如图11所示。双向DC/DC控制器工作在模式III,电路轮流选通MOSFET  $M_1$ 、 $M_2$ ,选通时间大于0.5个周期,超级电容器组向负载提供能量,保证直流母线电压的波动在可控范围之内,这证明了双向DC/DC控制的超级电容器组可短时充当UPS电源。

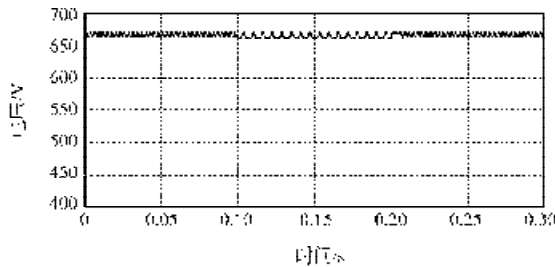


图11 直流母线电压波形

Fig. 11 Voltage waveform of DC bus

## 4 结论

配置有超级电容器组储能的新型独立光伏发电系统,结构简单,易于控制,能很好地解决诸如电压波动与闪变、三相不平衡、电压暂升、暂降等电能质量问题。双向变换器的一端与直流母线并联,而直流母线电压相对比较稳定,控制超级电容器组的充放电电流,可延长超级电容器组的使用寿命,通过优化设计选择双向变换器的工作模式实现系统的能量管理,确保太阳能电池和超级电容器组协调工作。仿真研究表明,该系统能改善负荷品质,提高电能质量,可应用于实际的光伏发电系统。

### 参考文献:

[1] 朱世宏, 温馨, 杨文君. 后石油时代我国可再生能源发展对策[J]. 西南石油大学学报: 社会科学版, 2009, 2(1): 1-5.  
Zhu Shihong, Wen Xin, Yang Wenjun. China's Development Counter-Measures for Renewable Energy in the Post-Oil Time[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Social Sciences Edition, 2009, 2(1): 1-5.

[2] 狄丹. 太阳能光伏发电是理想的可再生能源[J]. 华中电力, 2008, 21(5): 59-62.  
Di Dan. Photo-Voltaic Power is One of the Best Renewable Energies[J]. Central China Electric Power, 2008, 21(5):

59-62.

[3] 钱照明, 张军明, 吕征宇, 等. 我国电力电子与电力传动面临的挑战与机遇[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 10-22.  
Qian Zhaoming, Zhang Junming, Lv Zhengyu, et al. Challenge and Opportunity for Power Electronics and Electrical Drive in China[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 10-22.

[4] Woodley N H, Morgan L, Sundaram A. Experience with An Inverter-Based Dynamic Voltage Restorer[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1999, 14(13): 1181-1185.

[5] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 28(1): 97-103.  
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Control Strategy for Bi-Directional DC/DC Converter of A Novel Stand-Alone Photovoltaic Power System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 28(1): 97-103.

[6] Wang Genping, Yi Lingzhi, Zou Xiao, et al. The Design of Constant Frequency Hysteresis Current Controller with Voltage Space Vector in PV Grid-Connected Inverter[EB/OL]. [2008-12-09]. [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=4699155](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4699155).

[7] Von Jouanne A, Enjeti P, Banerjee B. Assessment of Ride-Through Alternatives for Adjustable Speed Drives[EB/OL]. [2009-05-16]. <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fstamp%2Fstamp.jsp%3Ftp%3D%26isnumber%3D%26arnumber%3D730345&authDecision=-203>.

[8] 邹晓, 易灵芝, 张明和, 等. 光伏并网逆变器的定频滞环电流控制新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 58-62.  
Zou Xiao, Yi Lingzhi, Zhang Minghe, et al. Constant-Frequency Hysteresis Current Control of PV Grid-Connected Inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(4): 58-62.

[9] Philip P Barker, James M Bing. Advances in Solar Photovoltaic Technology: An Applications Perspective[EB/OL]. [2009-05-16]. <http://www.newenergyoptions.com/14.pdf>.

[10] 唐西胜, 齐智平. 独立光伏系统中超级电容器蓄电池有源混合储能方案的研究[J]. 电工电能新技术, 2006, 25(3): 37-41.  
Tang Xisheng, Qi Zhiping. Study on An Actively Controlled Battery/Ultracapacitor Hybrid in Stand-Alone PV System[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(3): 37-41.

(责任编辑: 李玉珍)