

DOI: 10.7667/PSPC160228

基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统

郭明亮, 戴朝华, 邓惠文, 刘志祥, 陈维荣

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 传统光伏储能发电系统都是由光伏阵列和储能电池组构成的, 但这种结构易受光伏电池阴影效应及储能电池均衡性问题的影响。基于此, 提出了一种由单体光伏电池和单体储能电池构成的新型光伏储能发电系统。该系统中, 单体光伏电池和与之电压、容量匹配的单体储能电池构成光伏储能模组, 一定数量的模组串联后组成串联支路, 经升压型 DC/DC 电路汇流至直流母线, 多个串联支路并联后向直流负载或经逆变器向交流负载供电。通过监测光伏电池、储能电池的电压电流, 光伏储能模组能够在 5 种工作模式间切换以实现模组内的“自治”控制; 同时, 通过监测 DC/DC 变换器的输入电压, 实现了光伏储能模组投入与切出的支路级控制。以太阳能的利用效率为衡量标准, 提出了一种模组内光伏电池电压, 参数的选择方法。最后, 建立了新型发电系统的仿真模型, 从原理上通过仿真验证了该光伏储能发电系统的可行性和有效性。

关键词: 光伏储能发电系统; 单体光伏电池; 单体储能电池; 阴影效应; 均衡性

A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module

WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, LIU Zhixiang, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Traditional PV/energy storage generating system is composed of photovoltaic array and storage cell, which easily suffers from PV cell's shadow effect and energy storage cell's equalization. Therefore this paper proposes a novel PV/energy storage generating system consist of single PV cell/single energy storage cell. In this generating system, single PV cell and single energy storage cell having the matched voltage and capacity with the former constitute PV/energy storage module. A certain number of modules are connected in series to form a series branch, which is connected to the DC bus by boosting DC/DC converter. Series branches are connected in parallel to supply power to DC load or to AC load via inverter. The PV/energy storage module has 5 operating modes, which are switched autonomously by monitoring PV cell and energy storage cell's voltage and current. The series branch, containing PV/energy module switch-in and switch -off, is controlled by monitoring the input voltage of DC/DC converter. This paper also proposes a method of choosing the PV cell's voltage parameter in the proposed module based on the criteria of utilization efficiency of solar energy. At last, the simulation model of the new generating system is built, which shows the feasibility and effectiveness of the system theoretically.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307144).

Key words: PV/energy storage generating system; single PV cell; single energy storage cell; shadow effect; equalization

0 引言

太阳能是一种储量非常庞大的可再生能源, 具有广阔的应用前景。据英国石油公司统计, 近十年内全球范围内的太阳能消费量增速明显。在国家电网公司的高度重视与大力推动下, 我国的光伏产业发展迅速^[1], 其中“十二五”期间增幅高达 168 倍, 截至 2015 年底, 光伏发电装机容量已突破 4 万 MW, 连续三年全球第一, 到 2020 年, 该数字预计将超过

10 万 MW^[2]。种种现象表明, 光伏发电在未来的发展潜力相当可观。

在光伏发电系统中, 储能十分重要。目前, 储能电池, 尤其是锂电池因其优秀的性能, 成为光伏发电系统中储能装置的首选。但在实际使用中, 为了满足负载对电压和功率的需求, 往往需要将一定数量的单体光伏电池串并联构成光伏阵列和一定数量的储能电池串并联构成储能电池组。大规模光伏电池组容易出现阴影效应造成“失配”及热斑现象^[3], 而大规模储能电池组存在的均衡性问题是阻碍其实际应用的重要因素, 不仅增加了系统

的复杂程度, 其效率也会随着规模的增大而降低。

目前, 为了避免使用储能电池组均衡管理系统, 已有学者提出了一种无均衡管理(NBCM)技术^[4-5], 该技术的基本思想是用单体光伏电池和单体储能电池构成模组, 每个模组内的光伏电池和储能电池能进行单独控制, 从而成功转移了原有储能电池组的均衡管理问题。但是, 文献[4-5]仅考虑了光伏储能模组的控制, 并未考虑多个模组串联后的输出电压对后级升压电路的影响, 也没有介绍如何选取与单体储能电池匹配的单体光伏电池的方法。

为此, 本文将模组扩展到系统, 提出一种基于光储模组的新颖光伏储能发电系统, 给出了系统拓扑及其控制策略。此外, 结合光伏电池的工程数学模型, 给出了模组内光伏电池的选型方法, 使其与单体储能电池相匹配, 达到太阳能利用效率最大化。最后, 搭建了系统仿真模型, 从原理上验证了该系统及其控制策略的可行性。

1 光伏储能发电系统拓扑结构

传统光伏储能发电系统和本文提出的新型光伏储能发电系统的拓扑结构比较如图 1 所示。图 1(a)中, 光伏电池通过串并联构成光伏阵列, 储能电池单体通过串并联构成储能电池组, 光伏阵列与储能电池组并联, 后经功率变换后向负载供电。储能电池组需要充放电和均衡管理控制器。显然, 传统光伏阵列和储能电池组容易遭受阴影效应和不均衡性的影响^[6]。

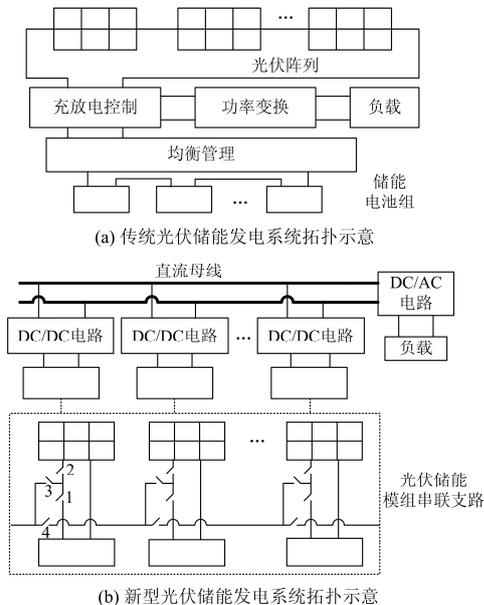


图 1 传统与新型光伏储能发电系统拓扑比较

Fig. 1 Comparison of the traditional and the proposed PV/energy storage generating system

图 1(b)为本文提出的光伏储能发电系统拓扑结构示意图, 从局部到整体共分为模组、支路和系统三个层次。光伏储能模组为其基本单元, 是由单个光伏电池和单个储能电池经 4 个开关连接而成, 每个模组都由一个独立的控制器对开关进行控制, 实现光伏电池和储能电池的独立投切。将一定数量的模组进行串联以得到较高的输出电压, 匹配合适的 DC/DC 电路后实现多个串联支路汇入直流母线; 直流母线可直接向直流负载供电, 或经 DC/AC 电路向交流负载供电。

上述新型光伏储能发电系统的优点在于, 实现了光伏电池和储能电池单体的独立控制, 从而解决了传统光伏阵列的阴影效应和储能电池组的均衡性问题, 同时通过合理的选型, 使模组内储能电池的工作电压与光伏电池的电压参数相匹配, 使得光伏电池近似最大功率输出, 无需传统的储能电池均衡管理和光伏电池最大功率跟踪。

2 光伏储能模组控制方法

如图 1(b)所示, 每一个光伏储能模组都包含单个光伏电池和单个储能电池。模组内设 4 个开关, 模组控制器通过控制这些开关的通断来实现模组的不同工作模式。

模式 1: 储能电池和光伏电池同时向外供电, 此时模组开关 1, 2, 3 均为闭合状态, 模组开关 4 为断开状态。

模式 2: 储能电池退出运行, 光伏电池单独向外供电, 此时模组开关 2, 3 为闭合状态, 模组开关 1, 4 为断开状态。

模式 3: 光伏电池退出运行, 储能电池单独向外供电, 此时模组开关 1, 3 为闭合状态, 模组开关 2, 4 为断开状态。

模式 4: 储能电池和光伏电池均退出运行, 且光伏电池不对储能电池进行充电, 此时模组开关 1, 2, 3 均为断开状态, 模组开关 4 为闭合状态。

模式 5: 储能电池和光伏电池均退出运行, 且光伏电池对储能电池进行充电, 此时模组开关 1, 2, 4 均为闭合状态, 模组开关 3 为断开状态。

假定使用额定电压为 3.7 V 的储能电池, 开机时的控制流程如图 2(a)所示。当系统开机时, 根据模组内光伏电池、储能电池的电压情况确定工作模式。若储能电池未放电截止或充电截止, 且光伏电池的开路电压比储能电池的端电压大 0.2 V 以上, 进入工作模式 1; 若储能电池未放电截止或充电截止, 但光伏电池的开路电压过小, 进入工作模式 3; 若储能电池的端电压小于放电截止电压, 且光伏电

池的开路电压比储能电池的端电压大 0.2 V 以上, 进入工作模式 5; 其他情况下, 进入工作模式 2。对于 3.7 V 的储能电池, 给定充电截止电压和放电截止电压的典型值分别为 4.2 V 和 3.0 V(该值需要根据实际使用的储能电池的特性来确定)。在运行过程中, 为了防止储能电池的过放、过充以及因光照强度减弱导致光伏电池出现反向电流, 需要将模组在各工作模式之间进行切换, 具体切换方式如图 2(b) 所示, 其中 PV 表示光伏电池, BAT 表示储能电池, 当光伏电池处于切出状态时, 检测的为其开路电压, 用 $U_{PV(oc)}$ 表示, U_{in} 为 DC/DC 变换器的输入电压。

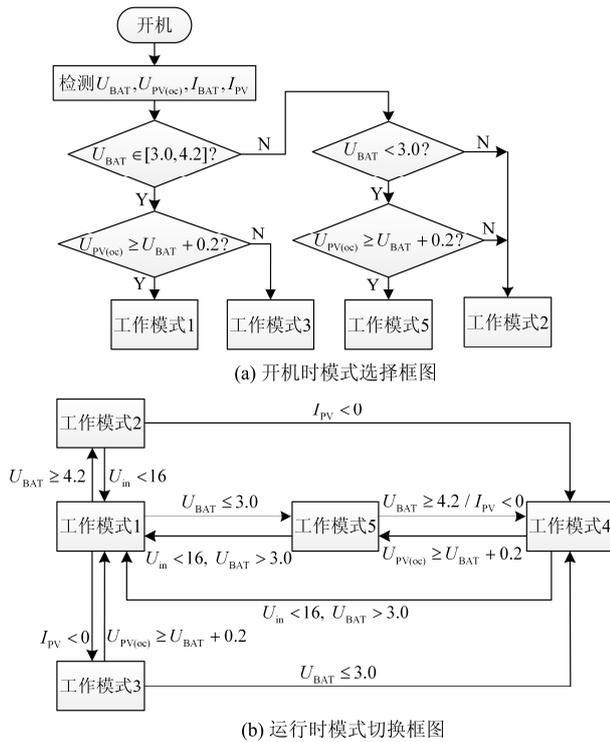


图 2 光储模组控制策略

Fig. 2 Control strategy of PV/energy storage module

3 光伏储能发电系统控制方法

目前中国现行的直流标准电压有 220 V, 110 V, 96 V, 72 V, 48 V, 24 V 等^[8], 为使本文设计的结构具有一定的普适性, 在这些标准直流电压中选择一种作为串联支路经升压型 DC/DC 变换器的输出电压, 对该电压的选择应从负载需求、通用性和设备复杂程度等多方面考虑。

对于升压型 DC/DC 变换器来说, 其输出电压就是整个发电系统的直流母线电压, 同时允许输入电压在小于输出电压的情况下在一定宽度内变化, 所以各电压之间的关系应满足式(1), 其中 U_{bus} 为母线电压, U_o , U_i , U_{min} 和 U_{max} 为 DC/DC 变换器输出

电压和输入电压及其最小值和最大值。

$$\begin{cases} U_o = U_{bus} \\ U_i < U_o \\ U_i \in [U_{min}, U_{max}] \end{cases} \quad (1)$$

DC/DC 变换器的输入侧是由多个模组串联而成的, 假设单个模组的输出电压为 U_m , 那么显然在正常工作时串联支路内投入的模组数量应满足:

$$\frac{U_{min}}{U_m} < n < \frac{U_{max}}{U_m} \quad (2)$$

本设计中选用的直流母线电压为 24 V, 一般来说, 输出电压为 24 V 的升压型 DC/DC 变换器能够在输入电压为 12~22 V 时输出稳定的 24 V 电压。单体蓄电池的额定电压为 3.7 V, 正常工作时的输出电压在 4 V 左右。因此, 经过简单的计算可知, 需要控制串联支路内投入工作的模组数量保持在 3~5 个, 即可保证 DC/DC 变换器正常工作。

上节中光伏储能模组的控制方法中已经说明了模组能够自行进行工作模式的切换, 当模组从工作模式 1、2、3 切换至工作模式 4 和 5 时, 其实整个模组已经退出运行了, 但尚未说明退出运行的模组投入运行的判定条件。由于 DC/DC 变换器的输入电压有一个下限值, 当小于这个值时 DC/DC 变换器会因欠压保护而待机运行, 为了尽可能保证 DC/DC 变换器不会因输入电压过低而待机, 可以设置一个阈值, 当 DC/DC 变换器的输入电压小于该值时, 在串联支路内寻找未投入(处于工作模式 4、5)但可投入的模组, 令其投入工作, 这样可以尽可能地避免 DC/DC 变换器因下一个退出运行的模组而待机, 该阈值可以设置为 16 V。对于工作模式 4、5, 可投入的标准为储能电池的电压大于 3.0 V, 即储能电池未放电截止, 该控制方法在图 2(b) 中有所体现。当 DC/DC 变换器的输入电压小于 12 V 时, DC/DC 变换器切换至待机状态, 即整个串联支路都已切出, 所有的模组只能工作在工作模式 4、5 下, 直到串联支路符合正常工作的条件, 该条件为: 串联支路内未放电截止的储能电池数量大于 3 个。

上文中已经说明了正常工作时串联支路内投入工作的模组数量上限为 5, 虽然由 5 个模组组成串联支路能够达到输出要求, 但为了提高系统的可靠性, 可以在串联支路内串入多于 5 个的模组。对于这样的情况, 为了保证 DC/DC 变换器的输入电压不大于输出电压, 应保证投入工作的模组数量不高于 5 个, 即当 DC/DC 变换器的输入电压大于一个阈值时, 应限制模组的投入, 该阈值可以设置为 20 V。以上整个串联支路的控制流程图如图 3 所示。

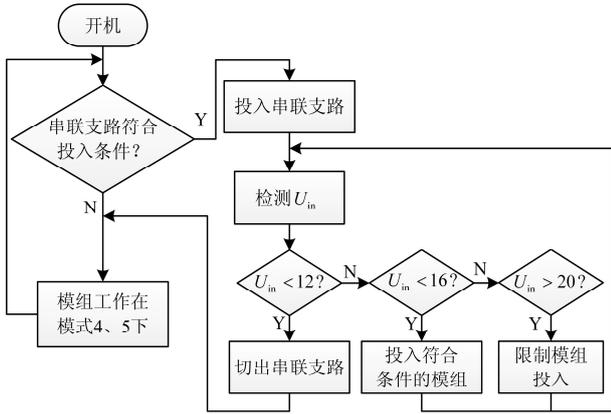


图3 串联支路控制策略

Fig. 3 Control strategy of series branch

对系统级的控制应该考虑的是逆变器的输入电压, 与 DC/DC 变换器类似, 若逆变器的输入电压不符合要求, 交流侧的电能质量将无法得到保证。一般来说逆变器的输入电压不得低于标称值的 80%, 此处设当直流母线电压低于 22 V 时, 使整个系统停机。

4 光伏电池选型方法

光伏电池是一种非线性直流电源, 在某一确定的工作条件下有且只有一个最大功率点^[7]。一般认为, 在某一工作条件下, 光伏电池的开路电压约为最大功率点电压的 1.2 倍, 短路电流约为最大功率点电流的 1.08 倍。对于本文提到的光伏储能模组, 在光伏电池和储能电池同时投入的情况下, 光伏电池的输出电压被储能电池的工作电压所箝位, 因此, 对光伏电池的参数进行合理的选择是高效利用太阳能的基础。

考虑光伏电池工程数学模型^[9-10]为

$$\begin{cases} I_{PV} = I_{sc_new} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U_{PV}}{C_2 U_{oc_new}}\right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp_new}}{I_{sc_new}} \right) \exp\left(\frac{-U_{mp_new}}{C_2 U_{oc_new}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{U_{mp_new}}{U_{oc_new}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_{mp_new}}{I_{sc_new}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{PV} , I_{PV} 分别为光伏电池的输出电压、电流; U_{oc_new} , I_{sc_new} , U_{mp_new} , I_{mp_new} 分别为某一工作条件下光伏电池的开路电压、短路电流以及最大功率点电压和电流; C_1 , C_2 为系数。 U_{oc_new} , I_{sc_new} , U_{mp_new} , I_{mp_new} , C_1 , C_2 的计算方法为

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{STC} \\ \Delta S = \frac{S}{S_{STC}} - 1 \\ U_{oc_new} = U_{oc} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \\ I_{sc_new} = \frac{I_{sc} S}{S_{STC}} (1 + a\Delta T) \\ U_{mp_new} = U_{mp} (1 - c\Delta T) \ln(e + b\Delta S) \\ I_{mp_new} = \frac{I_{mp} S}{S_{STC}} (1 + a\Delta T) \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{oc} , I_{sc} , U_{mp} , I_{mp} 分别为标准测试条件下光伏电池的开路电压、短路电流以及最大功率点电压和电流; STC 表示标准测试条件, 具体条件为光照强度 1000 W/m^2 , 温度 25°C ; a , b , c 为系数, 典型值为 $a=0.0025/^\circ\text{C}$, $b=0.0005/(\text{W/m}^2)$, $c=0.00288/^\circ\text{C}$ 。

如果系统设计得当, 锂电池荷电状态能够长期在小范围内波动, 可以认为锂电池在正常工作时的电压较为稳定。如上文所述, 光伏电池的输出电压被锂电池的电压所箝位, 因此锂电池电压关系到太阳能的利用效率。经计算, 一天内太阳能的利用效率如式(5)所示, 式中除 U_{BAT} 被视为常数, 外其余均为瞬时值。从式(3)中可知, I_{PV} 与 I_{sc_new} 成正比, 而 I_{sc_new} 和 I_{mp_new} 存在一定的比例关系, 显然 η 与光伏电池的电流参数没有关系, 仅是关于 U_{BAT} 和光伏电池的电压参数(U_{mp} 或 U_{oc})的函数。

$$\eta = \frac{\int_0^T U_{PV}(t) I_{PV}(t) dt}{\int_0^T U_{mp_new}(t) I_{mp_new}(t) dt} = \frac{\int_0^T U_{BAT} I_{PV}(t) dt}{\int_0^T U_{mp_new}(t) I_{mp_new}(t) dt} = f(U_{BAT}, U_{mp}) \quad (5)$$

5 算例及仿真结果

对于 3.7 V 的锂电池来说, 其正常工作时的电压较为稳定, 约为 3.9~4.0 V。假定 $U_{BAT}=4.0 \text{ V}$, 代入式(3), 并给定典型日的光照强度、温度变化曲线。在 4.0 V 和 4.5 V 之间每隔 0.02 V 取一个电压作为光伏电池的 U_{mp} 进行仿真计算, 得到太阳能利用效率与光伏电池 U_{mp} 之间的关系如图 4 所示。可以看出, 太阳能利用效率的最大值出现在 $U_{mp} \approx 4.25 \text{ V}$ 。在实际使用中, 光伏电池的工艺可能无法达到这么精确地控制光伏电池的 U_{mp} , 但将 U_{mp} 控制在 4.2~4.3 V 均能保证太阳能得到充分的利用。

为了使光伏储能发电系统适应一个普通家庭用电系统, 设计参数使其满足日消耗电能 $10 \text{ kW}\cdot\text{h}$,

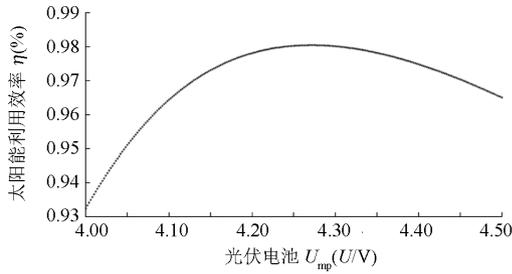


图 4 η 与 U_{mp} 之间的关系

Fig. 4 Relation between η and U_{mp}

峰值功率 $2\text{ kW}^{[11]}$ 。根据上节中的计算结果, 可选择光伏电池 $U_{mp}=4.25\text{ V}$, $U_{oc}=5.1\text{ V}$, 设单个光伏电池的容量为 10 W_p , 则 $I_{mp}=2.4\text{ A}$, $I_{oc}=2.6\text{ A}$ 。储能电池选用 $3.7\text{ V}/60\text{ Ah}$ 的聚合物锂电池。5 个光伏储能模组组成一个串联支路, 串联支路通过 DC/DC 升压电路与 24 V 直流母线连接, 整个系统包含 60 个独立升压的串联支路, 总的光伏电池容量为 3 kW_p , 储能池容量为 18 000 Ah 。在 Matlab/Simulink 环境下搭建模组的仿真模型, 控制策略使用 S-Function 实现, 其中模组的仿真模型如图 5 所示。

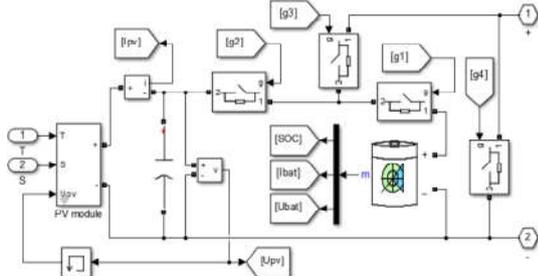


图 5 光伏储能模组仿真模型

Fig. 5 Simulation model of PV/energy storage module

给定一天内的温度、光照强度变化曲线及负荷曲线(本仿真不涉及后级 DC/AC 电路)进行仿真, 仿真结果如图 6 所示, 其中图 6(a)为温度变化曲线、光照强度变化曲线、直流电压波形、负荷曲线、实际输出功率曲线, 图 6(b)为其中一个模组的光伏电池电压曲线、光伏电池电流波形、锂电池荷电状态变化曲线、锂电池电压波形、锂电池电流波形。光伏电池两次电压变化分别是光伏电池开路电压满足 $U_{oc_new} > U_{BAT} + 0.2\text{ V}$ 时的投入情况, 以及光伏电池输出电流下降到 0 时的切出情况。

从图中可看出, 该光伏储能发电系统的输出功率可以很好地跟随负荷曲线, 同时直流母线电压可以保持在 24 V 左右; 对于模组内, 模组控制器能遵循控制策略对光伏电池、储能池进行投切, 在系统设置合适的情况, 在一个正常工作日前后储能池的荷电状态基本保持不变, 以保证在无光照时持续为系统提供电能。

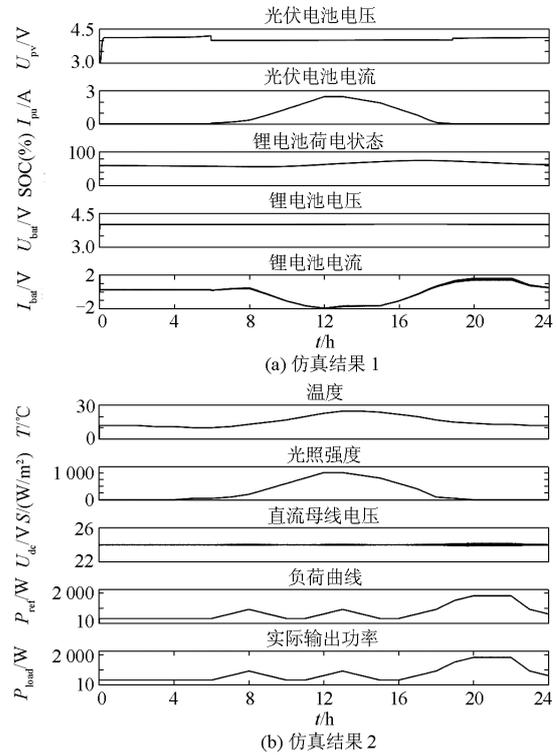


图 6 光伏储能发电系统仿真结果

Fig. 6 Simulation result of the PV/energy storage generating system

为验证模组工作模式切换的性能, 将其中一模组内的锂电池的初始荷电状态设置较大进行仿真, 该模组内的光伏电池在 0.1 s 时受到遮蔽, 在 0.2 s 时恢复光照, 在 0.8 s 时再次受到遮蔽, 在 0.2 s 和 0.8 s 之间, 锂电池充电截止。各开关的动作情况及所对应的工作模式如图 7 所示。从结果中能看到, 模组内的光伏电池、锂电池能够实现“自治”控制, 根据不同工作情况在各个工作模式之间切换。

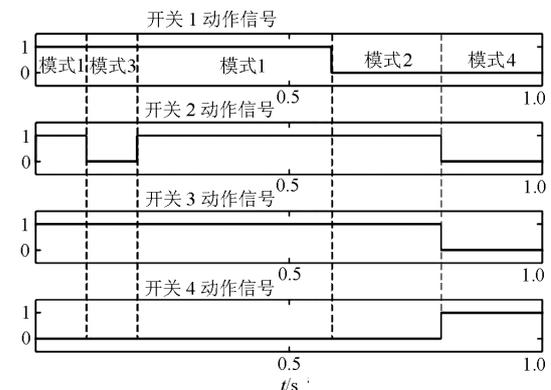


图 7 光伏锂电模组开关动作情况

Fig. 7 Switch condition of PV/energy storage module

6 结论

针对传统光伏储能发电系统容易遭受光伏阵列阴影效应和储能电池组均衡性问题, 提出了一种基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统, 通过模组内单体光伏电池和单体储能电池的独立投切和串联支路内模组的投切控制, 解决了传统光伏储能发电系统遇到的问题, 同时给出了单体光伏电池和单体储能电池间的匹配设计方法, 有利于提高系统的运行效率。仿真分析表明, 新型光伏储能发电系统能够提供负载所需要的电能, 且能够在阴影和储能电池不均衡的情况下持续为系统供电, 从原理上验证了所提出的系统及其控制策略的可行性, 具有一定的理论意义和参考价值。下一步将研制实验样机, 开展实验测试, 为此新型光储能发电系统的推广应用奠定基础。

参考文献

- [1] 方景辉, 温镇. 分布式光伏就地自适应电压控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 49-55.
FANG Jinghui, WEN Zhen. Research on local adaptive voltage control strategy based on distributed PV[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 49-55.
- [2] 李琼慧. “十三五”新能源及电网发展展望[J]. 电气时代, 2016(1): 42-46.
LI Qionghui. Prospect of renewable energy and power system for the 13th Five Year Plan[J]. Electric Age, 2016(1): 42-46.
- [3] 王以笑, 崔丽艳, 雷振锋, 等. 分布式光伏电站区域智能调控系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 118-122.
WANG Yixiao, CUI Liyan, LEI Zhenfeng, et al. Research on the regional intelligent regulating system of distributed PV station[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 118-122.
- [4] 彭飞, 刘志祥, 陈维荣. 新型光伏储能无均衡管理储能发电系统[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(5): 920-927.
PENG Fei, LIU Zhixiang, CHEN Weirong. Novel PV/Li-Ion energy storage system based on non-balancing cell management[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(5): 920-927.
- [5] 刘志祥, 王诚, 毛宗强. 太阳能蓄电系统及太阳能供电系统: 中国, CN 102545291 A[P]. 2012-07-04.
LIU Zhixiang, WANG Cheng, MAO Zongqiang. Solar power battery system and solar power supply system: China, CN 102545291 A[P]. 2012-07-04.
- [6] 徐顺刚. 分布式供电系统中储能电池均衡管理及逆变控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
XU Shungang. Research on battery equalization management and inverter control technologies of distributed power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [7] 徐青山. 分布式发电与微电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [8] GB/T156-2007 标准电压[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB/T156-2007 standard voltages[S]. Beijing: China Standards Press, 2007.
- [9] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等效[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 1-8.
YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 1-8.
- [10] 傅望, 周林, 郭珂, 等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-216.
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216.
- [11] 曹莹. 家用太阳能光伏发电系统设计[J]. 机电工程, 2011, 28(1): 115-117.
CAO Ying. Design of the home use photovoltaic generation system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2011, 28(1): 115-117.

收稿日期: 2016-02-25; 修回日期: 2016-05-16

作者简介:

郭明亮(1992-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏发电技术; E-mail: leckie@my.swjtu.edu.cn

戴朝华(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电技术。E-mail: daichaohua@swjtu.edu.cn

(编辑 姜新丽)