

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191177

## 直流微电网孤岛运行控制策略研究

董继军<sup>1</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 周雪松<sup>2</sup>, 刘敏<sup>3</sup>, 王应华<sup>1</sup>, 王海蓉<sup>1</sup>

(1. 国网湖北省电力有限公司黄石供电公司, 湖北 黄石 435000; 2. 天津理工大学, 天津 300384;  
3. 天津守中电力科技有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 针对湖北黄石地区楼宇建筑直流微电网孤岛运行场景, 提出一种光伏和储能电池的协调控制策略。基于直流微电网系统的实时状态, 根据直流母线电压数值对微电网的运行模式进行划分, 并设置变流器动作阈值, 微电网内的各变流器根据母线电压所处的区间范围, 执行相应的控制策略, 满足微电网的能量平衡及电压稳定性需求。考虑微电网内部储能电池状态的一致性要求, 针对电池变流器提出一种基于电池荷电状态(State of Charge, SOC)的协调控制策略, 在电池的充放电过程中, 根据不同电池组之间的容量差异进行功率分配, 避免相同的充放电效率导致过充或过放现象。最后通过 Matlab/Simulink 对所提控制策略进行仿真验证分析。

**关键词:** 直流微电网; 孤岛运行; 直流母线电压; 控制策略; 荷电状态; 功率分配

### Research on control strategy of a DC microgrid in isolated operation

DONG Jijun<sup>1</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, ZHOU Xuesong<sup>2</sup>, LIU Min<sup>3</sup>, WANG Yinghua<sup>1</sup>, WANG Hairong<sup>1</sup>

(1. State Grid Huangshi Electric Power Supply Company, Huangshi 435000, China; 2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 3. Tianjin Shouzhong Electric Power Technology Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

**Abstract:** A coordinated control strategy of a photovoltaic and energy storage battery is proposed for the isolated island operation scenario of building a DC microgrid in Huangshi, Hubei Province. Based on the real-time state of the DC microgrid system, the operation mode of the micro grid is divided according to the DC bus voltage value, and the action threshold of the converter is set. Each converter in the micro grid executes the corresponding control strategy according to the range of the bus voltage to meet the energy balance and voltage stability requirements of the micro grid. Considering the consistency of the battery state in the microgrid, a coordinated control strategy based on State Of Charge (SOC) is proposed for the battery converter. In the process of battery charging and discharging, the power rate is distributed according to the capacity difference between different battery groups to avoid overcharge or overdischarge caused by the same charging and discharging efficiency. Finally, Matlab/Simulink is used to verify the control strategy proposed in this paper.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877152).

**Key words:** DC micro-grid; isolated operation; DC bus voltage; control strategy; state of charge; power allocation

## 0 引言

能源紧缺和环境保护等问题推动着分布式可再生能源微电网技术的不断进步。微电网作为一个能够独立产生、消耗、存储及控制电能的运行在中低压网络的小功率发电系统, 主要由分布式电源、储能系统、能量转换装置、监控和保护装置、交直流负荷等单元组成, 与大电网之间通过静态开关可以实现并网运行或者孤岛运行<sup>[1-4]</sup>。

微电网一般分为交流微电网、直流微电网和交流直流混合微电网<sup>[5]</sup>。其中, 直流微电网作为新的能源结网形式成为新的研究热点。结构性能上, 直流微电网与交流微电网相比, 无相位同步、集肤效应、交流损耗、频率稳定性等问题, 更加便于与光伏电池、蓄电池、电动汽车等直流电源或直流负载的连接<sup>[6-7]</sup>。运行控制上, 直流微电网中只存在有功功率的平衡, 无需额外考虑微电网系统的频率、相位、无功功率等问题<sup>[8]</sup>, 不仅降低了微电网的控制复杂程度, 而且提高了供电电能质量<sup>[9]</sup>。

直流微电网在孤岛运行时, 系统结构变得更加

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877152)

薄弱，由于自身容量相对有限，并且没有大电网的“后背”支撑，从而使其运行惯性较小，母线电压受系统内部功率波动的影响较大。因此，研究孤岛模式下直流微电网的稳定运行控制策略具有现实意义。

目前国内外已有很多学者对微电网的孤岛运行展开过研究。针对孤岛运行模式下的微电网，文献[10]提出以直流母线电压为控制信号的直流微电网管理策略，讨论了系统中各变换器参与母线电压调节的作用，但是母线电压波动较大时易导致系统失稳。文献[11]对微电网在几种典型运行场景下的控制方式进行研究，仅对正常状态下的模式进行分析，缺少在异常状态下紧急控制策略的讨论。文献[12]针对海岛型的光储直流微电网系统，设计了一种基于电压幅值的控制策略，以直流母线电压的波动幅值为判定基准，设定变流器的响应方式。但该方法忽略了分布式电源与用电负荷的随机性，会频繁进行状态判断。文献[13]提出一种电压和电流分段式协同控制策略，将能量管理划分为四种工作模式，储能电池会根据系统实时情况在充电和放电状态间频繁转换，进而降低电池使用寿命。文献[14]提出一种以直流母线电压作为控制信号的直流独立电网系统能量管理策略，但是该策略忽略了对于电池电量已满或负荷重载状态的讨论。

基于以上分析，本文提出一种根据直流母线电压信号的孤岛微电网协调控制策略，将孤岛运行模式划分成五种运行状态，针对每种状态进行策略制定，实现系统孤岛稳定运行。本文首先对光储直流微电网结构以及内部变流器的控制方式进行了讨论，其次根据母线电压信号提出系统运行控制策略，最后对提出的控制策略进行了仿真分析。

### 1 直流微电网孤岛运行

一般情况下，微电网的孤岛运行模式只发生在大电网停电检修或发生异常故障时。此时，微电网内仅由分布式电源、储能装置、负载三者共同运行。由于自身电源容量的限制、分布式电源出力的不确定性以及缺少电网的实时功率补充，直流微电网的孤岛运行增加了系统内实时功率平衡的难度，需通过发电单元侧、负荷用电侧共同调度维持系统内供需功率的平衡<sup>[15]</sup>。

本文所研究的光储直流微电网结构如图1所示，主要由光伏发电系统、电池储能系统、可切断负荷与重要负荷四部分组成。光储直流微电网孤岛运行是依靠太阳能产生电能、通过储能系统存储或释放

电能给负荷提供电能的独立运行系统。

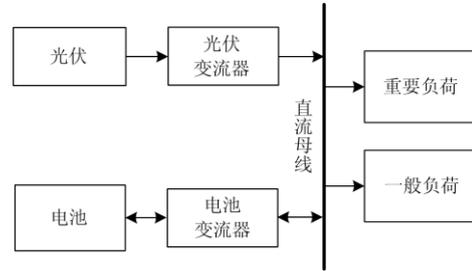


图1 独立直流微电网结构图

Fig. 1 Structure diagram of isolated DC microgrid

#### 1.1 光伏发电系统

光伏电池是一个直流源，输出电压  $U_{pv}$  和输出电流  $I_{pv}$  与太阳光辐射强度、环境温度、受光面积等因素有关<sup>[16]</sup>。光伏阵列的 DC/DC 变流器的存在具有两个功能：一方面换流器起升压作用，它将光伏电池发出的直流电转换直流微电网的额定电压等级；另一方面 DC/DC 变流器对光伏发电单元的输出功率进行控制，按照接收的控制指令工作。光伏变流器拓扑图及其控制框图如图2所示。

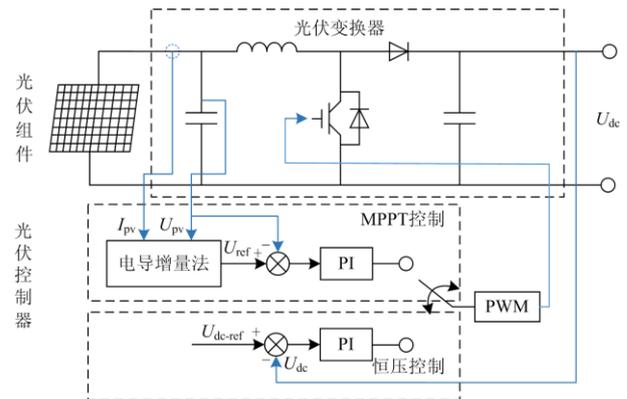


图2 光伏变流器拓扑及控制框图

Fig. 2 Photovoltaic converter topology and control block diagram

##### (1) 最大功率跟踪控制

在直流微电网孤岛运行模式中，光伏发电单元作为唯一的能量输入单元，其输出功率应尽可能保持最大，使系统效率保持最高。因此，光伏发电单元采用最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)。采用瞬间电导和电导增量进行电压的调整，实现最大功率点的快速追踪<sup>[17-18]</sup>。电导增量算法的优点是避免了扰动观察算法调整输出电压的随机性与盲目性，而且与恒定电压跟踪控制算法相比响应速度和精度更优<sup>[19-20]</sup>。

## (2) 恒压控制

在孤岛运行时, 输入能量过多, 会导致直流母线电压不断抬升, 此时光伏发电单元应工作在降功率恒压输出状态。

光伏单元工作运行时, 将测量电压实际工作值  $U_{dc}$  与电压设定值  $U_{dc\_ref}$  进行做差计算, 将差值导入 PI 控制器生成开关器件的占空比, 产生 PWM 脉冲信号作用于开关器件控制其通断, 实现恒压控制。

## 1.2 电池储能系统

受温度、光照强度等环境因素的影响, 分布式光伏发电具有间歇性强、波动性大的特点, 很难提供连续稳定的电能。因此, 当直流微电网运行在孤岛模式时, 储能单元是控制整个微电网系统稳定运行的关键<sup>[21]</sup>。蓄电池属于能量型储能, 能量密度高, 适用于对能量需求较高的场合, 并且其能够提供较长时间的电能支撑<sup>[22-23]</sup>。

本文对微电网中电池的充放电过程采用下垂控制的控制策略, 下垂控制曲线如图 3 所示。

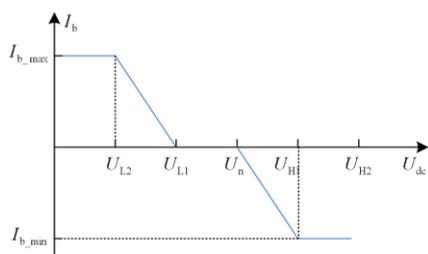


图 3 锂电池下垂控制曲线

Fig. 3 Lithium battery droop control curve

图 3 中:  $I_{b\_max}$  为电池的最大放电电流;  $I_{b\_min}$  的绝对值为电池的最大充电电流, 认定电池充电时电流数值为负;  $U_{H2}$ 、 $U_{H1}$ 、 $U_{L1}$ 、 $U_{L2}$  为控制策略中设定的电压阈值, 设置电池动作临界值, 降低电池的充放电频率, 提高电池使用寿命。电池变流器拓扑及变流器控制框图如图 4 所示。

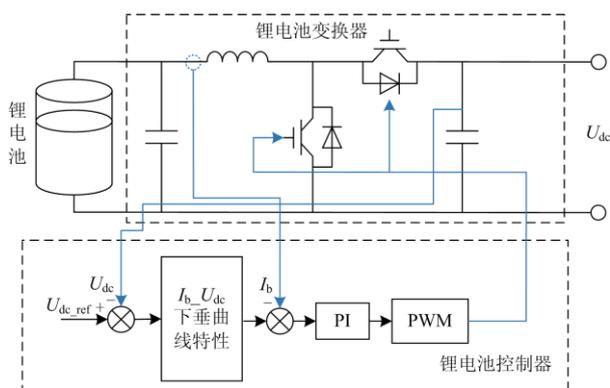


图 4 电池变流器控制框图

Fig. 4 Control block diagram of battery converter

一般情况下, 微电网内部具有多组储能电池, 为了避免某个电池的过度使用, 本文提出依据荷电状态的储能电池充放电功率分配方法。

当多组储能电池并联使用时, 利用下垂控制功率分配与虚拟电阻相关的特点, 在充电时, 具有较高 SOC 的电池设置较高的虚拟电阻, 吸收较少的功率; 在放电时, 具有较高 SOC 的电池设置较低的虚拟电阻, 可释放更多电能。各并联电池虚拟电阻与电池功率关系满足式(1)。

$$R_1 P_1 = R_2 P_2 = L = R_n P_n \quad (1)$$

式中:  $R_n$  为第  $n$  个电池的虚拟电阻;  $P_n$  为第  $n$  个电池的充放电功率。在充电状态下, 电池的虚拟电阻与充电功率关系为

$$R_n = R_{bat} \cdot SOC(t) \quad (2)$$

$$P_1 : P_2 : L : P_n = \frac{1}{SOC_1(t)} : \frac{1}{SOC_2(t)} : L : \frac{1}{SOC_n(t)} \quad (3)$$

式中:  $R_{bat}$  为电池 SOC 达到 100% 时的虚拟电阻;  $SOC_n(t)$  为电池的实时荷电状态。在放电状态下, 电池的虚拟电阻与放电功率关系为

$$R_n = \frac{R_{bat}}{SOC(t)} \quad (4)$$

$$P_1 : P_2 : L : P_n = SOC_1(t) : SOC_2(t) : L : SOC_n(t) \quad (5)$$

放电过程中, 各电池组的放电功率与荷电状态成正比。

## 2 直流微电网孤岛运行控制策略

### 2.1 基本思想

为了最大限度地利用分布式光伏资源, 系统必须能够以最佳的控制策略运行。传统方法是采用一个能够识别系统中每个组件的中央控制器<sup>[24-25]</sup>。但是该方法依赖中央控制器和通信链路的性能, 系统的整体可靠性降低。

母线电压是直流微电网系统稳定运行的重要指标, 母线电压的波动可以反映直流微电网系统源荷功率的不平衡度<sup>[26]</sup>。为了在允许实施控制策略的同时提高系统可靠性, 本文选择分层控制策略, 通过使用直流母线本身作为通信链路来提高系统可靠性。直流母线电压的变化决定网内各变流器的工作模式。分层控制策略的目的是保证直流微电网系统功率平衡, 通过对各模块电力电子换流器进行控制, 改变相应开关的占空比等参数, 实现调节光伏发电量、储能元件充/放电、负荷投切等动作。

## 2.2 系统孤岛运行控制策略

将分布式电源、储能、负载的交换功率通过直流母线进行解耦，可得到直流微电网的直流母线等值电路<sup>[27]</sup>，如图 5 所示。

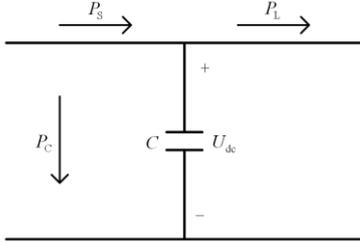


图 5 直流母线等值电路

Fig. 5 DC bus equivalent circuit

其中，等值的直流母线电容的充电功率可由式(6)表示。

$$P_C = U_{dc} C \frac{dU_{dc}}{dt} = P_S - P_L \quad (6)$$

式中： $P_S$ 为分布式电源、电网或储能单元向直流微电网注入的功率； $P_L$ 为负荷、储能或电网从直流微电网吸收的功率； $U_{dc}$ 为直流母线电压； $C$ 为母线等值电容； $P_C$ 为直流母线等值电容的充电功率。

由式(6)可知，直流母线电压的波动可以较为准确地反应系统的运行情况。当系统功率盈余时，表征为母线电压抬升；当系统功率不足时，表征为母线电压降落。依据在允许波动范围内直流母线电压的变化，对直流母线电压划分运行状态，如图 6 所示。

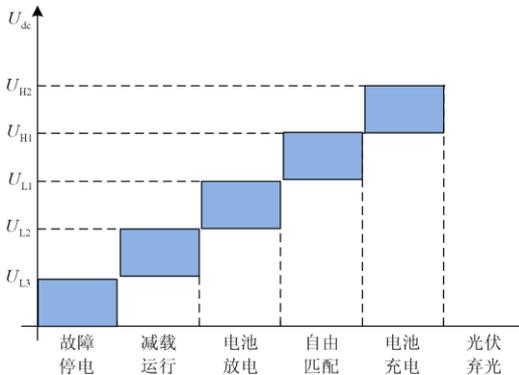


图 6 直流微电网孤岛运行状态划分

Fig. 6 Isolated operating state division of DC micro-grid

图 6 中： $U_{dc}$ 为直流母线的实际电压； $U_{H1}$ 和 $U_{L1}$ 分别为储能电池变流器的起始工作电压； $U_{H2}$ 为光伏变流器恒压控制阈值电压； $U_{L2}$ 为切负荷动作电压； $U_{L3}$ 为系统运行最低电压。设置 5 个动作电压，将母线电压分为 6 个层，分别对应 6 种运行状态，

具体运行状态说明如表 1 所示。

在 6 种工作状态中，当 $U_{L1} \leq U_{dc} \leq U_{H1}$ 时，依靠母线的电容惯性，在一定的电压容许范围内，系统尽可能实现能量的平衡；当 $U_{H1} \leq U_{dc} \leq U_{H2}$ 时，储能变流器开始动作，按照设定的下垂控制曲线进行充电；当 $U_{H2} < U_{dc}$ 时，表明储能变流器以最大功率进行充电或者储能电量已满，光伏变流器转为降功率恒压控制；当 $U_{L1} \leq U_{dc} \leq U_{L2}$ 时，储能变流器开始动作，按照设定的下垂控制曲线进行放电；当 $U_{dc} < U_{L2}$ 时，表明储能变流器以最大功率进行放电或者储能电量用尽，切除一般负荷，以维持系统稳定运行；当 $U_{dc} \leq U_{L3}$ 时，母线电压过低，系统退出运行，发生停电故障。

表 1 直流微电网孤岛运行状态说明

Table 1 Isolated operation status description of DC microgrid

状态	电压范围	说明
光伏弃光	$U_{H2} < U_{dc}$	光伏恒压输出； 电池最大功率充电
电池充电	$U_{H1} \leq U_{dc} \leq U_{H2}$	光伏 MPPT 控制； 电池下垂控制充电
自由匹配	$U_{L1} < U_{dc} < U_{H1}$	光伏 MPPT 控制 自由匹配
电池放电	$U_{L2} \leq U_{dc} \leq U_{L1}$	光伏 MPPT 控制； 电池下垂控制放电
减载运行	$U_{L3} \leq U_{dc} < U_{L2}$	光伏 MPPT 控制； 电池最大功率放电； 切除普通负荷
故障停电	$U_{dc} \leq U_{L3}$	母线电压过低， 系统退出运行

## 3 算例

本文在 Matlab/Simulink 环境下搭建了如图 1 所示的直流微电网仿真模型，并对提出的孤岛运行模式控制策略进行了仿真验证。

系统由三部分组成，包括光伏电池、储能电池、用电负载。本文中的电压偏差临界值选取如下： $U_{H2}$ 为 640 V、 $U_{H1}$ 为 620 V、 $U_n$ 为 600 V、 $U_{L1}$ 为 580 V、 $U_{L2}$ 为 560 V、 $U_{L3}$ 为 540 V；储能电池标称电压 300 V，额定容量 10 Ah，1 号电池初始荷电状态 30%，2 号电池初始荷电状态 60%，电池最大充电电流 10 A，总仿真时长 0.6s。

图 7、图 8 中， $U_{dc}$ 、 $P_{pv}$ 、 $P_{load}$ 、 $P_{bat1}$ 、 $P_{bat2}$  分别表示直流母线电压、光伏发电功率、负载用电功率、一号和二号电池充放电功率。针对系统功率盈余和功率不足两种运行工况，分别设定仿真场景一和场景二。

## (1) 场景一

在场景一中, 光伏发电功率大于负荷用电功率, 系统功率盈余, 直流母线电压持续增长, 储能部分先依据荷电状态进行充电, 再转换成以最大功率充电, 储能充满后退出运行; 光伏部分先以 MPPT 控制运行后转为降功率恒压控制; 负载部分正常运行。

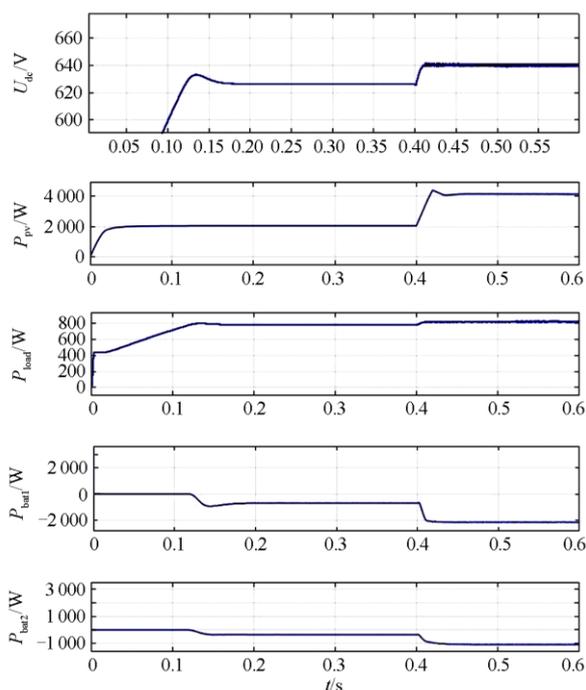


图 7 仿真状态曲线

Fig. 7 Simulation state curve

图 7 中, 0~0.15 s 为孤岛微电网系统的启动过程, 0.15 s 后逐渐开始达到稳定。在 0.15~0.4 s, 光伏的发电功率保持在 2 kW, 负载功率为 800 W, 此时, 根据微电网系统功率盈余情况, 母线电压稳定在 625 V 附近, 并联的两个电池组在对应的母线电压下依据下垂控制曲线进行充电。由于 1 号电池的荷电状态为 2 号电池的一半, 根据前文所述控制的储能变流器控制方式, 1 号电池的充电功率比 2 号电池多出一倍。在 0.4 s 时, 仿真由于外部环境发生改变, 光伏电池的输出功率大幅提高, 在供给负载消耗和两块电池组充电之余仍有功率盈余, 致使直流母线电压持续升高, 超出控制策略中设定的上限  $U_{H2}$ , 为保证微电网系统的稳定性, 光伏变流器由先前的 MPPT 控制切换至恒压控制, 舍弃一部分光能, 降低自身的输出功率, 保持直流母线电压维持在设定的电压上限 640 V 处。

## (2) 场景二

在场景二中, 光伏发电功率小于负荷用电功

率, 系统功率不足, 直流母线电压持续降低, 储能部分先依据荷电状态进行放电, 再转换成以最大功率放电; 光伏部分始终采用 MPPT 控制运行; 负载部分进行切负荷以维持母线电压稳定。

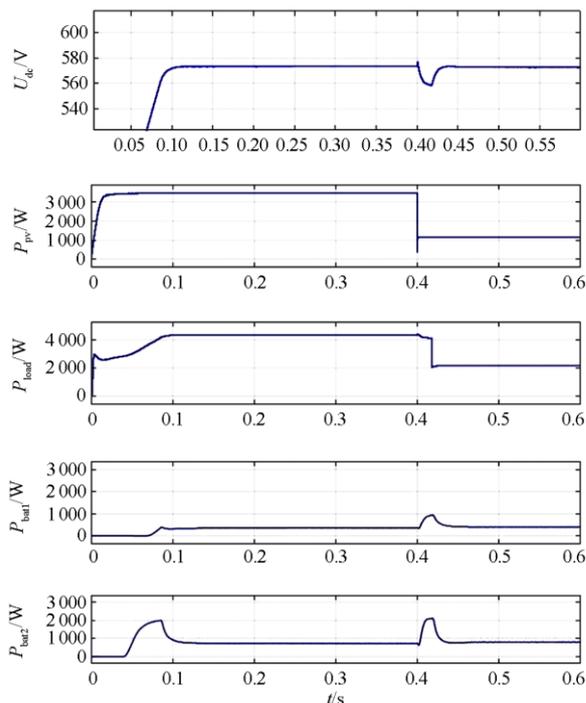


图 8 仿真状态曲线

Fig. 8 Simulation state curve

图 8 中, 0~0.1 s 为孤岛微电网系统的启动过程, 0.1 s 后逐渐开始达到稳定。在 0.1~0.4 s, 光伏的发电功率保持在 3.5 kW, 负载功率为 4.3 kW, 此时, 根据微电网系统功率缺额情况, 母线电压稳定在 573 V 附近, 并联的两个电池组在对应的母线电压下依据下垂控制曲线进行放电, 补充微电网系统内部的功率缺额。同理, 由于 1 号电池的荷电状态为 2 号电池的一半, 根据前文所述控制的储能变流器控制方式, 初始状态下, 1 号电池的放电功率也为 2 号电池输出功率的一半。最终使得两者的 SOC 值趋于相同。在 0.4 s 时, 由于光伏输出功率降低至 1.1 kW, 此时负载消耗功率为 4.3 kW, 电池按照最大的放电功率也已不能满足负载所需, 使得母线电压下降。根据所指定的控制策略当母线电压跌落至 560 V 时, 执行切负荷动作, 将一般负载切掉停止供电, 仅保留重要负载的持续供电。当切掉负荷后, 负载消耗功率为 2.1 kW, 光伏与电池可持续为负载提供能量, 整体微电网恢复至正常运行状态, 母线电压逐渐回升, 储能电池根据母线电压数值进行相应的下垂放电响应。

两个仿真算例对独立型直流微电网的运行状态进行了分析。以微电网内部的母线电压信号作为通信手段,根据实时母线电压数值对微电网的运行状态进行层级划分,可满足微电网在不同场景下的稳定性需求。

#### 4 结论

本文针对含有光伏与蓄电池的独立型直流微电网展开研究,提出了一种将母线电压信号作为通信手段的运行控制策略,并且考虑微电网内部多组储能电池的状态一致性需求,提出一种基于 SOC 的充放电调控策略。文章对孤岛模式下的典型运行场景进行仿真分析,对控制策略的有效性进行验证。

#### 参考文献

- [1] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(4): 78-94.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the microgrid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [3] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.  
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [4] DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Operation of a multiagent system for microgrid control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1447-1455.
- [5] 余贻鑫. 智能电网实施的紧迫性和长期性[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 1-5.  
YU Yixin. Urgency and long term of smart grid implementation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 1-5.
- [6] ZHU J P, ZHOU J P, ZHANG H. Research progress of AC, DC and their hybrid micro-grids[C] // 2014 IEEE International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), July 11-13, 2014, Shanghai, China.
- [7] KAUSHIK R A, PINDORIYA N M. A hybrid AC-DC microgrid: opportunities & key issues in implementation[C] // 2014 International Conference Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE), March 6-8, 2014, Coimbatore, India.
- [8] 周小平, 陈燕东, 周乐明, 等. 一种微网群架构及其自主协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 123-134.  
ZHOU Xiaoping, CHEN Yandong, ZHOU Leming, et al. A microgrid cluster structure and its autonomous coordination control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 123-134.
- [9] DRAGICEVIC T, VASQUEZ J C, GUERRERO J M, et al. Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: a step toward a new generation of power distribution networks[J]. Electrification Magazine IEEE, 2014, 2(1): 54-65.
- [10] SCHONBERGER J, DUKE R, ROUND S D. DC-bus signaling: a distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1453-1460.
- [11] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 17-23.  
YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 17-23.
- [12] 毕大强, 范柱烽, 解东光, 等. 海岛光储直流微电网自治控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 886-891.  
BI Daqiang, FAN Zhufeng, XIE Dongguang, et al. Autonomous control strategy of island optical storage DC microgrid[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 886-891.
- [13] 周建萍, 朱建萍, 崔屹, 等. 光储独立直流微电网的协同控制策略研究[J]. 电源技术, 2016, 40(12): 2400-2404.  
ZHOU Jianping, ZHU Jianping, CUI Yi, et al. Study on cooperative control strategy of optical storage independent DC microgrid[J]. Power Supply Technology, 2016, 40(12): 2400-2404.
- [14] BRYAN J, DUKE R, ROUND S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 6-10, 2004, Denver, CO, USA.
- [15] 任壹屹. 孤岛型直流微网控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2018.  
REN Yaoyi. Study on control strategy of isolated DC microgrid[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
- [16] 李奇. 基于 ART2wNF 神经网络和 K-means 算法的光伏发电输出功率短期预测[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.  
LI Qi. Based on the ART2wNF neural network and

- K-means algorithm of short-term forecasting for power output of photovoltaic generation[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2014.
- [17] 孙章, 王军, 李全, 等. 一种改进的光伏 MPPT 算法研究[C] // 直流输电与电力电子专委会学术年会, 2012. SUN Zhang, WANG Jun, LI Quan, et al. An improved photovoltaic MPPT algorithm[C] // DC Power and Power Electronics Committee Annual Conference, 2012.
- [18] 张雷. 分布式光伏储能系统并网研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016. ZHANG Lei. Research on the distributed PV with energy storage system connect to distributed network[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2016.
- [19] 高领军. 小功率非隔离型光伏并网逆变器的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012. GAO Lingjun. Research on low power non-isolated photovoltaic grid-connected inverter[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [20] SALMAN S, AI X, WU Z. Design of a P-&O algorithm based MPPT charge controller for a stand-alone 200 W PV system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 259-266. DOI: 10.1186/s41601-018-0099-8.
- [21] 刘健, 魏昊焜, 张志华, 等. 未来配电网的主要形态—基于储能的低压直流微电网[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 11-16. LIU Jian, WEI Haokun, ZHANG Zhihua, et al. Future architecture of power distribution network—low-voltage direct current micro-grids based on energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 11-16.
- [22] 王成山, 武震, 李鹏. 分布式电能存储技术的应用前景与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 1-8, 73. WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Prospects and challenges of distributed electricity storage technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 1-8, 73.
- [23] 武震. 分布式储能系统关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2014. WU Zhen. Research on key technologies of distributed energy storage system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [24] DALBON W, ROSCIA M, ZANINELLI D. Hybrid photovoltaic system control for enhancing sustainable energy[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 21-25, 2002, Chicago, IL, USA.
- [25] CHADID R. Unit sizing and control of hybrid wind-solar power system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(1): 79-85.
- [26] CHEN D, XU L. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897-1905.
- [27] ZHAO Z, HU J, CHEN H. Bus voltage control strategy for low voltage DC microgrid based on AC power grid and battery[C] // 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), 2017.

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-11-12

作者简介:

董继军(1972—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网规划及设计; E-mail: DONGjijunHuangshi@163.com

陈浩(1965—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析; E-mail: 13807236920@139.com

周雪松(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统控制。E-mail: zxsmyj@126.com

(编辑 张爱琴)