

DOI:10.11784/tdxbz202104011

## 基于双层电压信号的直流微电网协调控制策略

杨健维, 张 雪, 廖 凯, 郑舜玮

(西南交通大学电气工程学院, 成都 611756)

**摘要:** 针对传统协调方法基于直流电压信号在不同状态运行时会造成电压偏差的问题, 提出一种基于双层电压信号的光储燃直流微电网分层协调控制策略。首先, 考虑直流微电网多源的特点, 研究以光伏和蓄电池为主要供电电源、燃料电池为辅助供电电源的直流微电网结构, 光伏发电单元和蓄电池发电单元构成光储联合发电系统, 消除光伏直接接入母线造成的电压波动。综合考虑微电源发电和负荷需求的优先级, 对直流微电网运行状态按照稳定电压的微电源类型进行划分。其次, 为协调光伏和蓄电池出力, 内层控制基于光伏和蓄电池的输出电压信号自适应变更光伏和蓄电池的控制方式。为协调光储联合发电系统和燃料电池出力, 外层控制基于母线电压信号自适应变更两者的控制方式。此外在外层协调控制中, 光储联合发电系统采用一种基于运行状态驱动的自适应下垂控制方法, 实现并联的各光储联合发电系统运行状态的统一。最后, 基于 Matlab/Simulink 仿真平台搭建光储燃直流微电网模型, 分别验证光储联合发电系统对光伏出力波动的抑制能力和光储燃直流微电网各运行状态的自适应切换的有效性, 并与传统基于单层电压信号的协调控制方法进行对比。仿真结果表明, 该协调控制策略可以保证母线电压稳定在额定值, 实现独立直流微电网稳定运行。

**关键词:** 直流微电网; 协调控制; 双层直流电压信号; 自适应下垂控制; 光储联合发电系统

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2021)12-1289-10

## Coordination Control Scheme Based on Two-Layer Voltage Signal for the Optimal Operation of DC Microgrids

Yang Jianwei, Zhang Xue, Liao Kai, Zheng Shunwei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

**Abstract:** A two-layer coordination control scheme is proposed based on the voltage signal of the photovoltaic (PV)/battery/fuel cell (FC)-based DC microgrid to eliminate the voltage deviation caused by the traditional voltage signal-based method. First, considering the multisource characteristics, the DC microgrid structure is studied using the combination of PV and battery (CPB) as main power supply and the FC as auxiliary power supply, with the CPB being used to handle the stochastic output power of PV. Furthermore, the operating states of the DC microgrid are classified based on the defined priority microgeneration and load demand. Next, the inner control adaptively changes control modes of PV and battery based on the output voltage signal to coordinate the output of PV and battery. Moreover, the outer control adaptively changes control methods based on the bus voltage signal to coordinate the output of CPB and FC. We proposed an adaptive droop control based on operating state driving in the outer control to achieve the unification of the operating states of the parallel CPB. Finally, the studied DC microgrid is built based on the Matlab/Simulink platform, and comparisons with the traditional single-layer voltage signal-based control are analyzed to validate the effectiveness of the proposed method. Simulation results show that the proposed control method can restore the bus voltage to the rated value and achieve stable operation of the studied DC microgrid.

收稿日期: 2021-04-06; 修回日期: 2021-05-15.

作者简介: 杨健维 (1983—), 女, 博士, 副教授.

通信作者: 杨健维, jwyang@swjtu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1766208).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U1766208).

**Keywords:** DC microgrid; coordinated control; two-layer DC voltage signal; adaptive droop control; combination of photovoltaic and battery

微电网是分布式能源、储能设备和负荷有效集成的重要手段,可以运行在并网模式辅助大电网供电或运行在孤岛模式独立供电<sup>[1-3]</sup>. 相较于交流微电网,直流微电网不存在频率、相位等复杂控制,具有功率损耗小、扩展性强等优势<sup>[4]</sup>,因此,直流微电网逐渐受到广泛关注,未来直流微电网可以应用于配电系统、数据中心、通信站、海岛供电等领域<sup>[5-7]</sup>. 目前,直流微电网多为光储直流微电网或风光储直流微电网. 但是太阳能、风能等分布式能源出力具有间歇性和波动性,难以向负荷稳定可靠地供电<sup>[8]</sup>. 而燃料电池(fuel cell, FC)具有清洁、环保、高效的优点<sup>[9]</sup>,可以辅助光伏(photovoltaic, PV)和蓄电池(battery, bat)等单元向负荷长时间稳定供电,所以将燃料电池加入直流微电网可以更好地保障直流微电网安全可靠运行.

直流微电网中包含多种类型的分布式能源、负荷和储能设备,多源多负荷的特点决定了直流微电网的运行状态复杂多变. 为满足不同运行状态需求,关键在于对不同发电单元进行协调控制<sup>[10]</sup>. 目前直流微电网协调控制的主要思路是基于电压<sup>[11-13]</sup>或功率信号<sup>[14-16]</sup>划分运行状态,对不同运行状态采取相应的控制方法,从而实现直流微电网各发电单元的协调控制.

文献[17]根据母线电压波动幅值划分电压等级,进行多模式协调控制,可实现系统稳定运行. 文献[18]根据微电源控制能力和特性,提出系统不同模式下基于电压信息编码的扁平化管理与协调控制方法. 文献[19]针对光储直流微电网,引入运行时的能源支持与消耗(energy supporting and consumption, ESC)优先级,基于一种协调下垂控制调整不同单元之间的功率流,实现了直流微电网的分散协调控制. 但是基于电压信号分层的方式会导致电压在设定范围内波动,无法稳定到额定值. 在实际应用中,直流微电网含有大量的恒功率负荷(constant power load, CPL),因此直流电压偏离额定值有可能导致整个系统崩溃<sup>[20-21]</sup>.

为解决直流母线电压不能稳定至额定值的问题,也有部分学者考虑以功率为改变运行状态的条件,避免电压分层. 文献[22]依据系统净负荷和蓄电池充放电功率阈值划分了功率层,从而实现直流微电网不同运行状态的切换. 文献[23]根据储能系统的功率状态切换分布式电源的控制方式来稳定母线电压和实现负荷功率分配. 但是基于功率信号的方式对系统通信能力要求较高,相较于基于电压分层的方式更容易出

现切换误判,从而危害直流微电网安全运行. 而且当直流微电网中的设备退出或新设备加入后,需要对切换条件进行更新,无法实现即插即用.

基于以上分析,本文提出一种基于双层电压信号的光储燃直流微电网分层协调控制策略. 综合考虑光伏、蓄电池和燃料电池的特点,提出一种以光储联合发电(combination of photovoltaic and battery, CPB)系统为主要电源,燃料电池为辅助电源的光储燃直流微电网结构. 针对传统电压分层协调控制电压偏差的问题,提出一种基于双层电压信号的协调控制策略,内层通过协调光伏和蓄电池出力实现新能源的高效利用,外层通过协调 CPB 和燃料电池发电单元出力抑制母线电压波动,从而保证直流微电网的稳定运行. 此外,为均衡 CPB 间的出力,设计一种基于 CPB 不同运行状态的自适应下垂控制方法,实现直流微电网的优化运行. 通过仿真验证了提出的协调控制策略的有效性.

## 1 光储燃直流微电网架构

如图 1 所示,本文所设计的光储燃直流微电网系统由  $n$  组 CPB、 $m$  组燃料电池、直流负荷以及相应的电力电子设备组成.

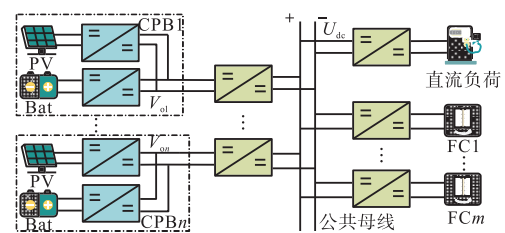


图 1 光储燃直流微电网结构

Fig.1 Structure of DC microgrid with optical storage and combustion.

直流微电网中的 CPB 和蓄电池经过 DC/DC 变换器接入直流母线. 其中, CPB 作为直流微电网的主要电源,由光伏阵列、蓄电池组以及相应的电力电子设备组成. 正常情况下,直流负荷由主要电源供电,当主要电源不能负担直流负荷时,由燃料电池辅助供电.

## 2 光储燃直流微电网运行场景划分

母线电压是衡量直流微电网功率平衡和系统稳

定的重要指标,当可再生能源或负荷波动时,功率的不平衡会影响母线电压稳定,直流母线电压和系统功率的关系为

$$P_C = P_{PV} + P_{Bat} + P_{FC} - P_{load} \quad (1)$$

$$U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} (P_{PV} + P_{Bat} + P_{FC} - P_{load}) \quad (2)$$

式中:  $P_C$  为直流母线电容充电功率;  $C_{dc}$  为直流母线等效电容;  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $P_{Bat}$  为蓄电池的充放电功率;  $P_{FC}$  为燃料电池的输出功率;  $P_{PV}$  为光伏发出的功率;  $P_{load}$  为直流母线上的负荷功率.

由式(2)可知,直流母线电压可以反映系统的功率变化,合理分配直流微电网各发电单元出力,可以实现系统功率平衡从而稳定系统母线电压.

为了提高系统的效率和可靠性,综合考虑微电源发电和负荷需求的优先级.对于发电端,直流微电网主要是通过光伏向负荷供电,应充分利用太阳能发电,光伏优先级别最高,其次是储存光伏功率的蓄电池,燃料电池的优先级别最低.对于需求端,直流微电网应优先向负荷供电,当负荷需求满足后,剩余能量提供给蓄电池.为避免燃料电池向蓄电池充电,CPB 的出力优先级高于燃料电池.

基于上述优先级原则,按照稳定外层电压的发电单元类型将光储燃直流微电网划分为 2 个运行状态(operation state, OS),本文记为 OS<sub>1</sub>和 OS<sub>2</sub>,分别对应 CPB 稳定电压和燃料电池稳定电压两种运行状态.此外,根据稳定内层电压的发电单元类型将 CPB 划分为 5 个 OS,分别对应光伏恒压下垂控制发电、蓄电池恒压下垂控制充电、蓄电池控制死区、蓄电池恒压下垂控制放电以及光伏和蓄电池满功率出力.

对不同的运行状态设计相应的电压工作区域,当源荷功率变化或部分发电单元加入、退出直流微电网运行而引起电压变化时,系统自动改变运行状态,实现微电网的功率平衡,具体的电压等级和运行状态如图 2 所示.

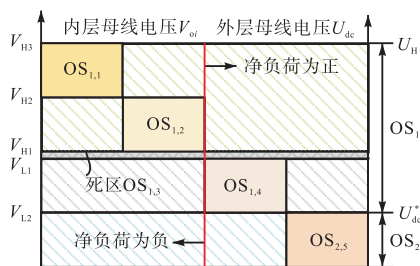


图 2 电压等级和运行状态  
Fig.2 Voltage level and operation status

图中,  $V_{oi}$  为第  $i$  个 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 个 CPB 的内

层母线电压,  $V_{L2}$ 、 $V_{L1}$ 、 $V_{H1}$ 、 $V_{H2}$ 、 $V_{H3}$  分别为内层母线电压的电压等级,  $U_{dc}$  为外层母线电压即公共母线电压,  $U_H$  和  $U_{dc}^*$  分别为外层母线电压的电压等级,  $U_{dc}^*$  为直流母线电压额定值. 图 2 中的净负荷  $\Delta P$  定义为

$$\Delta P = P_{load} - P_{PV} \quad (3)$$

### 3 光储燃直流微电网协调运行控制策略

#### 3.1 全局控制架构

在直流微电网中,母线电压可以作为公共信息,实现各发电单元之间的交流.基于此,本文提出一种光储燃直流微电网协调控制策略,分为内层协调控制和外层协调控制,实现光伏、蓄电池和燃料电池的出力协调,整体控制架构如图 3 所示.

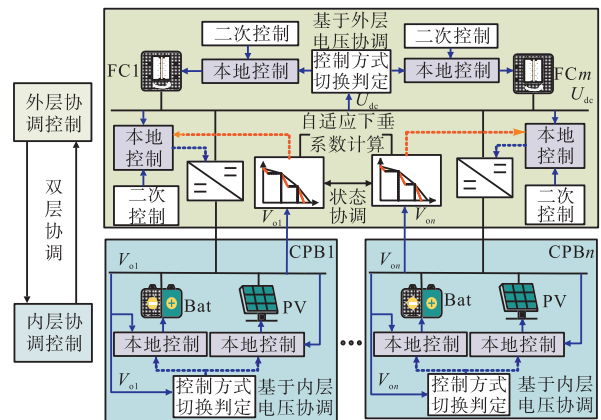


图 3 整体控制架构  
Fig.3 Overall control structure

在内层协调控制中,按照出力优先级和各单元的工作特性,设定光伏和蓄电池的电压运行区间,当电压超过当前电压区间的下限值或上限值时,各发电单元自行转变控制方式从而改变 CPB 的运行状态;在外层协调控制中,燃料电池发电单元和 CPB 根据出力优先级原则划分相应的电压运行区间,并根据外层母线电压幅值变换相应的控制方法实现直流微电网运行状态的改变以实现新的功率平衡.基于电压的协调控制方式发电单元可以依据电压区间实现控制方式的改变,无需模式判别.此外,为保证并联 CPB 运行状态接近,本文提出一种基于运行状态的自适应下垂系数计算方法,实现并联 CPB 的出力协调.

根据上述协调控制策略,以 FC1 和 CPBn 为例,光储燃直流微电网中各发电单元具体控制结构如图 4 所示.在 CPBn 中,光伏发电单元具有最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)和下垂控制两种控制方式,并根据内层母线电压  $V_{on}$  实现两种

控制方式的切换; 蓄电池发电单元采用下垂控制稳定电压, 可以根据  $V_{on}$  的大小在下垂控制、满功率输出以及不工作之间进行切换. CPB 和燃料电池通过 DC/DC 变换器连接至公共母线, 前者的控制方式为

自适应下垂控制, 可以根据 CPB 的运行情况相应改变下垂系数, 后者作为备用电源, 采用下垂控制在光伏和蓄电池发电不足时稳定电压.

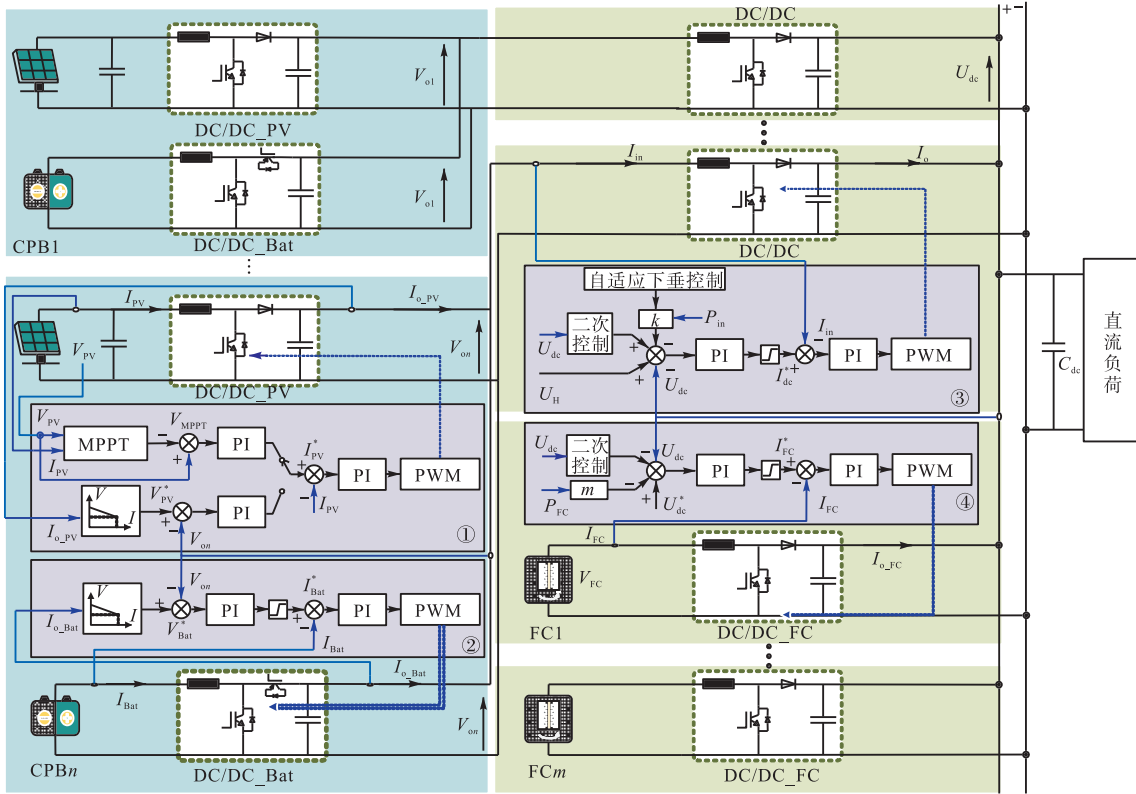


图 4 直流微电网拓扑结构及具体控制结构  
Fig.4 Topology and control structure of DC microgrid

### 3.2 基于内层电压信号的协调控制

为了充分利用新能源并提高发电效率, 光伏发电单元应当主要运行在 MPPT 状态<sup>[23]</sup>, 由蓄电池通过下垂控制稳定母线电压. 但是由于实际蓄电池容量的限制, 当光伏或负荷波动, 系统净负荷  $\Delta P$  为负且大于蓄电池的承受极限时, 光伏发电单元应当采用电压控制, 减小功率输出以维持系统的功率平衡. 因此, CPB<sub>i</sub> 的 5 种 OS 设定如下.

(1) OS<sub>1,1</sub>: 光伏功率严重过剩, 光伏发电单元通过下垂控制稳定电压, 蓄电池运行在最大功率充电状态. OS<sub>1,1</sub> 的数学描述为

$$OS_{1,1} = (\Delta P < 0) \cap (|\Delta P| > P_{\max\_Bat\_c}) \cap (V_{H2} < V_o < V_{H3}) \quad (4)$$

式中  $P_{\max\_Bat\_c}$  为蓄电池最大充电功率.

(2) OS<sub>1,2</sub>: 光伏发电足以负担系统负荷需求, 光伏发电单元运作 MPPT 状态, 蓄电池通过下垂控制稳定电压, 并吸收多余的光伏能量. OS<sub>1,2</sub> 的数学描

述为

$$OS_{1,2} = (\Delta P < 0) \cap |\Delta P| < (P_{\max\_Bat\_c}) \cap (V_{H1} < V_o < V_{H2}) \quad (5)$$

(3) OS<sub>1,3</sub>: 光伏发电和系统负荷需求平衡, 光伏发电单元运作于 MPPT 状态, 蓄电池不工作即处于控制死区. 考虑到光伏输出具有波动性, 因此设置死区 OS<sub>1,3</sub> 防止蓄电池频繁充放电, 本文死区区间设置为 (0.995 ~ 1.005) p.u.. OS<sub>1,3</sub> 的数学描述为

$$OS_{1,3} = (|\Delta P| < \epsilon) \cap (V_{L1} < V_o < V_{H1}) \quad (6)$$

(4) OS<sub>1,4</sub>: 光伏发电不足, 光伏发电单元运行在 MPPT 状态, 蓄电池通过下垂控制稳定电压, 并向负荷供电. OS<sub>1,4</sub> 的数学描述为

$$OS_{1,4} = (\Delta P > 0) \cap (|\Delta P| < P_{\max\_Bat\_f}) \cap (V_{L1} < V_o < V_{L2}) \quad (7)$$

式中  $P_{\max\_Bat\_f}$  为蓄电池最大放电功率.

(5) OS<sub>2,5</sub>: 光伏和蓄电池均不能负担负荷, 光伏

发电单元运作在 MPPT 状态, 蓄电池运行在最大功率放电状态.  $OS_{2,5}$  的数学描述为

$$OS_{2,5} = (\Delta P > 0) \cap (|\Delta P| > P_{\max\_Bat\_f}) \cap (V_o < V_{L2}) \quad (8)$$

光伏发电单元和蓄电池发电单元的具体控制框图如图 4 中的①、②所示.

### 3.3 基于外层电压信号的协调控制

光储系统依赖光伏供电, 一旦光伏发电单元故障, 蓄电池的供电时间有限. 因此, 为了提高系统的供电可靠性, 利用燃料电池作为辅助电源在光储出现故障或用电高峰期时向负荷供电. 光储燃直流微电网外层分为 2 种 OS, 设定如下.

(1)  $OS_1$ : CPB 作为主要电源向负荷供电, 采用下垂控制稳定公共母线电压, 燃料电池不工作,  $OS_1$  的数学描述为

$$OS_1 = (|\Delta P| < P_{\max\_CPB}) \cap (U_{dc}^* < U_{dc} < U_{H1}) \quad (9)$$

式中  $P_{\max\_CPB}$  为 CPB 的最大输出功率.

(2)  $OS_2$ : 当负荷需求大于 CPB 时, 燃料电池采用下垂控制放电稳定电压,  $OS_2$  的数学描述为

$$OS_2 = (\Delta P > 0) \cap (|\Delta P| > P_{\max\_CPB}) \cap (U_{dc} < U_{dc}^*) \quad (10)$$

CPB 和燃料电池发电单元的具体控制方式如图 4 中的③和④所示.

#### 3.3.1 基于自适应下垂控制的功率分配方法

CPB 通过 Boost 变换器接入公共直流母线, 各变换器依据下垂系数分配输出功率, 考虑到 CPB 多状态运行, 本文基于 CPB 的 5 种运行状态自适应调整下垂系数.

图 4 中下垂控制的下垂特性为

$$U_H - U = k_0(1 + \Delta k)V_o I_o = k_0(1 + \Delta k)P_{in} \quad (11)$$

其中,  $k_0$  定义为

$$k_0 = \frac{U_H - U_{dc}^*}{P_{\max}} \quad (12)$$

式中:  $U_H$ 、 $U_{dc}^*$  分别为电压上限和电压下限;  $P_{\max}$  为 CPB 的最大输入功率;  $V_o$ 、 $I_o$ 、 $P_{in}$  分别为变换器的输入电压、输入电流、输入功率;  $\Delta k$ 、 $k_0$  分别为下垂系数补偿值和初始下垂系数.

以两组 CPB 并联为例分析下垂系数自适应调整原则, 若两组系统始终运行在同一状态, 则两者的下垂系数同步变化, 功率分配比例不变. 但是当两组系统运行在不同状态, 电压较高的单元应增大下垂系数, 提高该发电单元的输出功率占比, 实现功率二次

分配.

图 5 为基于运行状态的自适应下垂控制曲线, 由图 5 可知, CPB1 运行于  $OS_{1,2}$ , CPB2 运行于  $OS_{1,4}$ , 若以预先设定好的下垂系数, 即  $k_1$  和  $k_2$  对 CPB1 和 CPB2 的功率进行分配, 分配结果为  $P_1$ 、 $P_2$ , 两个 CPB 的电压相差较大且位于不同的运行状态区间. 因此, 可以通过调整不同 CPB 的下垂系数之比, 重新对 CPB 的输出功率进行分配, 调整后的下垂系数为  $k'_1$  和  $k'_2$ , CPB1 的输出功率由  $P_1$  增加至  $P'_1$ , CPB 的输出由  $P_2$  减小至  $P'_2$ . 此时, CPB1 和 CPB2 的电压更接近, 且均运行于  $OS_{1,2}$ , 功率输出更合理. 相较于固定下垂系数的控制方法, 基于电压值的自适应下垂控制更适用于复杂运行工况的直流微电网.

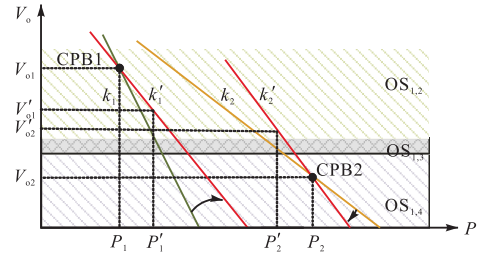


图 5 基于运行状态的自适应下垂控制曲线  
Fig.5 Adaptive droop control curves based on running state

在直流微电网中, 电压信号中包含着功率信息, 根据电压幅值对下垂系数进行更改, 可以实现功率的优化分配. 具体的  $\Delta k$  计算方法为

$$\Delta k = \begin{cases} 1 & V_o \in (V_{H2}, V_{H3}] \\ |V_o - V_{H1}| / (V_{H2} - V_{H1}) & V_o \in (V_{H1}, V_{H2}] \\ 0 & V_o \in (V_{L1}, V_{H1}] \\ |V_o - V_{L1}| / (V_{L1} - V_{L2}) & V_o \in (V_{L2}, V_{L1}] \\ -1 & V_o \in (0, V_{L2}] \end{cases} \quad (13)$$

#### 3.3.2 电压补偿控制

下垂控制属于有差调节, 电压会偏离额定值. 为了提高直流微电网的电能质量, 本文通过平移下垂曲线, 对直流微电网进行电压二次控制. 经过二次控制后变换器输出电压的参考值  $U_{ref}$  为

$$U_{ref} = U_{dc}^* + \Delta U_{dc}^* - kP_{in} \quad (14)$$

其中, 下垂曲线的平移量  $\Delta U_{dc}^*$  为

$$\Delta U_{dc}^* = \left( k_p + \frac{k_1}{s} \right) (U_{dc}^* - U_{dc}) \quad (15)$$

式中  $k_p$ 、 $k_1$  为二次控制参数.

综上, 基于信号电压的协调控制策略可以实现直流微电网的分散控制, 无需发电单元之间的通信; 采

用内外层协调控制结合的方式可以将需要划分的电压区间变少,减小电压波动;采用基于运行状态驱动的自适应下垂控制可以实现并联 CPB 的功率优化分配,从而保障多电源类型的直流微电网稳定运行。

### 4 仿真验证

为了验证所提出的直流微电网协调控制策略的有效性,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建直流微电网系统仿真模型,并设置了负荷功率波动、光伏功率波动、传统下垂控制和自适应下垂控制对比分析以及基于单层电压信号的协调控制和本文协调控制的对比分析 4 个仿真场景仿真。仿真结构如图 6 所示,图中包含两个 CPB 和两个燃料电池,每个 CPB 又分别由一组光伏和一组蓄电池组成。

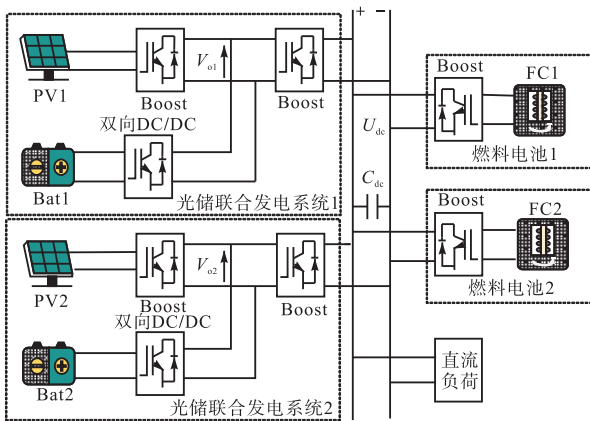


图 6 仿真结构

Fig.6 Simulation structure

CPB 各 OS 的阈值电压  $V_{oi}$  ( $i = 1, 2$ ) 分别为  $1.050V_{oi}$ 、 $1.025V_{oi}$ 、 $1.005V_{oi}$ 、 $0.995V_{oi}$ 、 $0.975V_{oi}$ , 变换器开关频率为 10 kHz, 具体参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

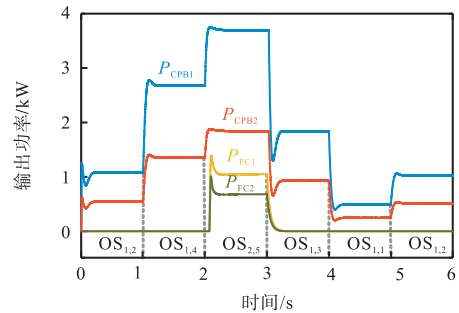
参数	含义	数值
$C_{dc}/mF$	直流母线电容	6.600
$P_{max\_Bat1\_c}/kW$	Bat1 最大充电功率	1.000
$P_{max\_Bat2\_c}/kW$	Bat2 最大充电功率	0.500
$P_{max\_Bat1\_g}/kW$	Bat1 最大放电功率	2.000
$P_{max\_Bat2\_g}/kW$	Bat2 最大放电功率	1.000
$P_{max\_PV1}/kW$	PV1 最大工作点功率	1.824
$P_{max\_PV2}/kW$	PV2 最大工作点功率	0.912
$P_{max\_FC1}/kW$	FC1 最大输出功率	3.000
$P_{max\_FC2}/kW$	FC2 最大输出功率	2.000

#### 4.1 负荷功率波动

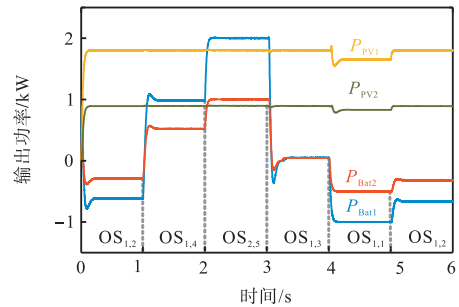
为验证所提出的策略中各运行状态及其转换的有效性,模拟负荷波动。仿真情景设置为:初始负荷

为 1.60 kW, 1 s 时负荷增长至 4.00 kW, 2 s 时负荷增长至 7.33 kW, 3 s 时负荷减少至 2.74 kW, 4 s 时负荷减少至 0.72 kW, 5 s 时负荷增加至 1.52 kW, 仿真结果如图 7 所示。

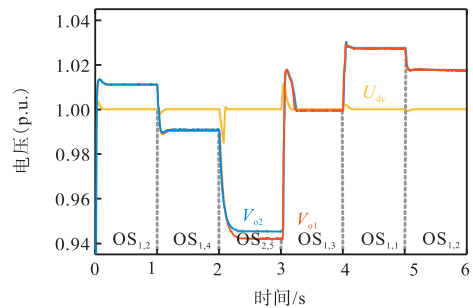
由图 7 可以看出,在 0~1 s 期间直流微电网运行在  $OS_{1,2}$ , PV1、PV2 出力达到了最大功率点,其工作在 MPPT 状态,由 Bat1、Bat2 放电即可稳定母线电压,因此此时 FC1、FC2 不工作;在 1~2 s 期间直流微电网运行在  $OS_{1,4}$ , PV1、PV2 保持依然在 MPPT 状态,负荷功率减小,此时 Bat1、Bat2 由放电转换到充电并稳定母线电压,而 FC1、FC2 不工作;在 2~3 s 期间,直流微电网运行在  $OS_{2,5}$ , Bat1、Bat2 达到最大放电状态,此时需要借助 FC1、FC2 出力才能稳定母线电压;在 3~4 s 期间,直流微电网运行在  $OS_{1,3}$ , PV1、PV2 保持在 MPPT 状态,而 Bat1、Bat2



(a) CPB 和 FC 输出功率



(b) PV 和 Bat 输出功率



(c) 内层和外层母线电压

图 7 负荷变化时直流微电网运行仿真结果

Fig.7 Simulation results of DC microgrid operation with load variations

和 FC1、FC2 都不工作；在 4~5 s 期间，直流微电网运行在  $OS_{1,1}$ ，为了保持母线电压稳定，PV1、PV2 转换为下垂控制稳定电压，而 Bat1、Bat2 以最大功率充电，FC1、FC2 不工作；在 5~6 s 期间，直流微电网重新运行在  $OS_{1,2}$ 。

综上所述，所提运行策略能够使直流微电网内的各微电源根据负荷变化自行改变其的运行状态，以达到稳定母线电压的目的。

#### 4.2 光伏功率波动

为验证所提出的策略能降低光伏出力波动对带负荷母线电压的影响，模拟光伏在小波动和大波动两种波动。仿真结果如图 8 和图 9 所示。

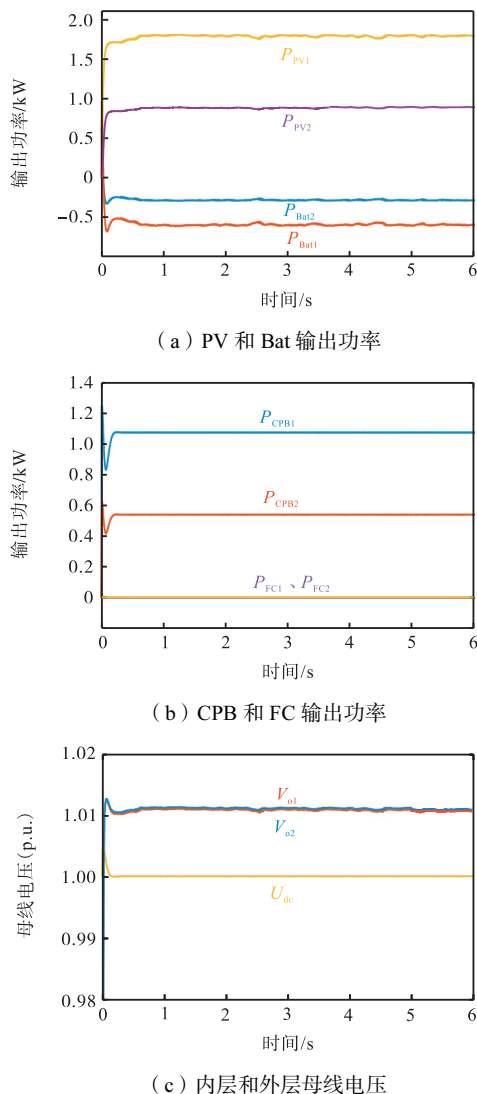


图 8 光伏波动小时直流微电网运行仿真结果

Fig.8 Simulation results of DC microgrid operation under photovoltaic fluctuations

##### 1) 光伏出力波动小

图 8 为光伏在小范围波动的仿真结果。由图 8 可以看出，以光伏最大工作点功率为满功率 100%，PV1

的输出功率波动在 95.4%~98.1%，PV2 的输出功率波动在 94.6%~97.5%，光伏波动范围小于 5%；以蓄电池最大工作点功率为满功率 100%，Bat1 的充电功率波动在 50.1%~62.0%，Bat2 的充电功率波动在 53.1%~60.1%；CPB1 的输出功率稳定在 1.072 kW，电压波动 0.07%，CPB2 的输出功率稳定在 0.54 kW，电压波动 0.06%；由此可见，CPB 的输出功率和电压平滑，光伏出力在小范围波动时对输出母线电压影响小。

##### 2) 光伏出力波动大

图 9 为光伏在大范围波动的仿真结果。由图 9 可以看出，以光伏最大工作点功率为满功率 100%，PV1 的输出功率波动在 72.1%~97.8%，PV2 的输出功率波动在 69.7%~96.6%，光伏波动范围超过 20%；以蓄电池最大工作点功率为满功率 100%，Bat1 的充

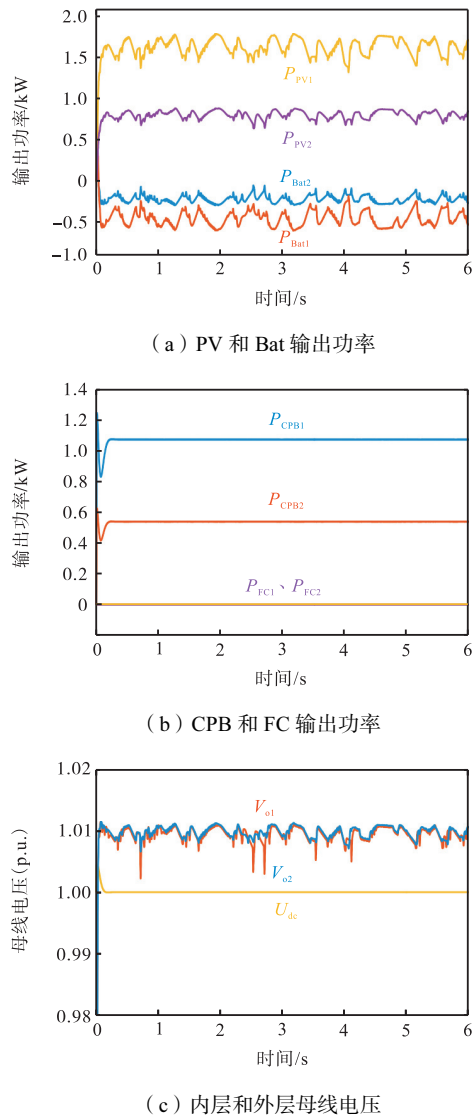


图 9 光伏波动大时直流微电网运行仿真结果

Fig.9 Simulation results of DC microgrid operation with large PV fluctuations

电功率波动在 10.4%~58.9%, Bat2 的充电功率波动在 17.9%~60.2%; CPB1 的输出功率稳定在 1.072 kW, 电压波动 0.89%, CPB2 的输出功率稳定在 0.54 kW, 电压波动 0.42%; 由此可见, CPB 的输出功率和电压平滑, 光伏出力在大范围波动时对输出母线电压影响较小。

综上, CPB 可以较好地抑制光伏出力波动对母线电压的影响, 从而保障直流微电网的安全运行。

### 4.3 自适应下垂控制与传统下垂控制方法对比分析

为验证基于状态的自适应下垂控制的有效性, 仿真情景设置: CPB1 和 CPB2 容量为 2:1, 一开始直流微电网运行在  $OS_{1,2}$ , 蓄电池充电稳定电压, 1s 时退出 CPB1 中 PV1, 仿真结果如图 10 所示。

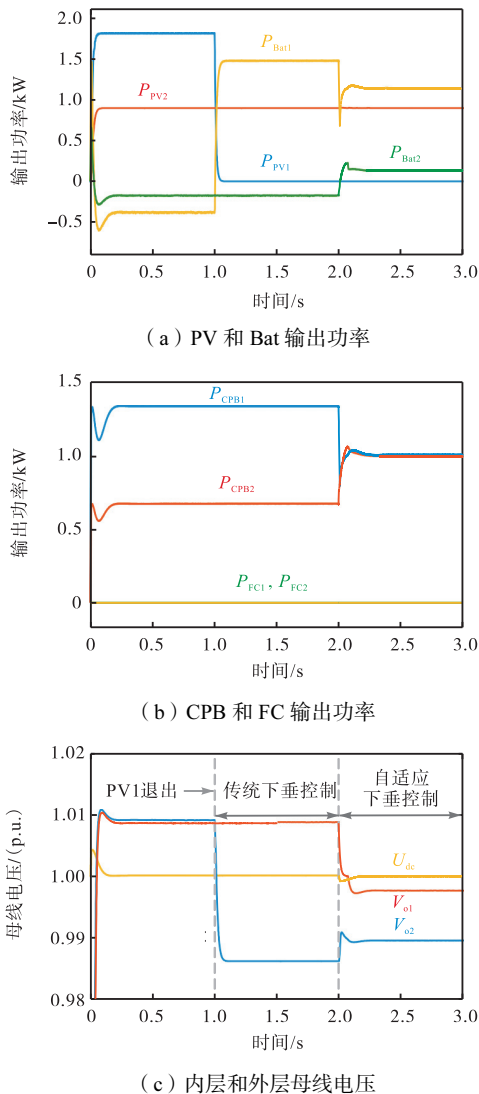


图 10 自适应下垂控制与传统下垂控制仿真结果对比

Fig.10 Comparison of simulation results between adaptive droop and traditional droop control

由图 10 可以看出, 在 0~1s 时 CPB1 和 CPB2 均运行在  $OS_{1,2}$ , 蓄电池 1 和蓄电池 2 充电, CPB1 和

CPB2 输出功率比例为 2:1. 1s 时, PV1 退出运行, CPB1 运行在  $OS_{1,4}$ , CPB2 仍运行在  $OS_{1,2}$ . CPB1 和 CPB2 的容量之比不再是 2:1, 此时采用传统固定下垂系数的控制方法, CPB2 输出保持不变, Bat1 由充电模式转向放电模式, 增大输出以保证 CPB1 和 CPB2 的输出功率为 2:1. 在 2s 时采用基于运行状态的自适应下垂控制方法, CPB1 和 CPB2 均运行在  $OS_{1,4}$ , 且由两系统的输出功率接近 1:1, 蓄电池 1 和蓄电池 2 均运行在放电状态。

以上仿真结果表明, 当直流微电网发生突发状况、设备退出或加入直流微电网时, 各发电单元发电容量发生变化, 若还按照原先设定好的下垂系数进行功率分配, 会导致不均衡发电; 采用自适应下垂控制, 可以根据 CPB 的运行状态以及电压偏离设定值的程度, 改变下垂系数, 从而实现功率更合理的分配, 保证不同发电单元的状态更接近。

### 4.4 与传统基于单层电压信号控制方法对比分析

为验证本文所提出策略的有效性, 对传统基单层电压的控制方法进行仿真, 仿真参数设置与第 4.1 节中相同, 仿真结果如图 11 所示。

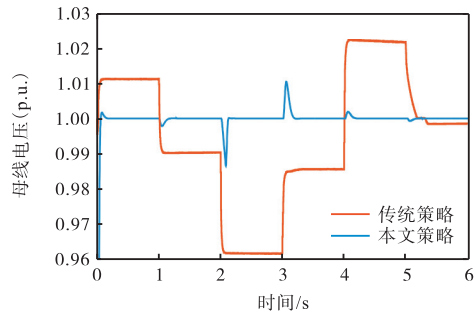


图 11 所提策略与传统策略仿真对比结果

Fig.11 Comparison of simulation results between the proposed strategy and the traditional strategy

由图 11 可以看出, 在当前设定的负荷波动情况下, 传统基于单层电压信号的协调控制策略电压在 0.962~1.022 p.u.波动, 波动范围为 6.0%; 本文提出的基于双层电压信号的协调控制策略电压在 0.986~1.011 p.u.波动, 波动范围为 2.5%, 比传统方法的电压波动范围小了 1 倍; 此外, 传统策略的公共母线电压在不同区间变化, 基于双层电压信号的方法公共母线电压除运行状态变化时有波动, 其余时刻均稳定在额定值, 提高了电能质量。

由此可以得出, 传统策略电压波动较大, 而本文提出的方案能够将电压稳定在额定值附近的同时不影响直流微电网运行状态的更改, 从而提高电能质量, 保障直流微电网的安全稳定运行。

## 5 结 论

为了解决传统协调控制策略电压偏差和功率分配精度问题, 本文针对光储燃直流微电网, 根据光伏、蓄电池和燃料电池的工作特点, 采用了一种以光伏蓄电池为主要电源、以燃料电池为辅助电源的光储燃直流微电网结构, 并在此基础上提出了基于双层电压信号的分层协调控制策略, 该策略利用内外层母线分别协调光储和光储燃出力, 并利用二次控制消除电压偏差, 将公共母线电压稳定至额定值。最后, 对本文提出的控制策略进行仿真验证, 并与传统基于单层母线电压的策略进行比较, 结论如下。

(1) 采用的 CPB 结构避免了光伏直接接入母线导致的电压波动。另外, 采用燃料电池辅助 CPB 发电, 在极端天气情况下, 可以保证直流微电网的稳定运行, 提高了直流微电网的可靠性。

(2) 所提策略通过两层电压母线对 3 种电源进行协调控制, 可以保证公共母线电压稳定在额定值, 提高了电压电能质量, 利于直流微电网并网或带恒功率负荷。

(3) 所提的自适应下垂控制方法可以在突发情况时, 自适应变更下垂系数, 实现各发电单元的功率二次分配, 能够实现不同发电单元运行状态的统一, 保障不同发电系统之间的协调优化运行。

本文所提的光储燃结构目前仅针对单直流微电网, 今后将该协调策略应用在直流微电网群的控制, 基于微电网群的多电压信号对直流微电网群进行协调控制, 从而实现直流微电网群的优化运行。

### 参考文献:

- [1] Nejabatkhah F, Li Y W. Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7072-7089.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.  
Wang Chengshan, Wu Zhen, Li Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12(in Chinese).
- [3] 李永丽, 陈晓龙, 刘明, 等. 微电网保护与控制系统的设计与实现[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015, 48(6): 473-480.  
Li Yongli, Chen Xiaolong, Liu Ming, et al. Design and implementation of the protection and control system of microgrid[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2015, 48(6): 473-480(in Chinese).
- [4] 郭力, 张绍辉, 李霞林, 等. 考虑电网分时电价的直流微电网分层协调控制[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1992-2000.  
Guo Li, Zhang Shaohui, Li Xialin, et al. Hierarchical coordination control for DC microgrid considering time-of-use price[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1992-2000(in Chinese).
- [5] Xiao J, Wang P, Setyawan L, et al. Multi-level energy management system for real-time scheduling of DC microgrids with multiple slack terminals[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016, 31(1): 1-9.
- [6] 余贻鑫. 面向 21 世纪智能电网[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2020, 53(6): 551-556.  
Yu Yixin. A brief description of the basics of the smart grid[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2020, 53(6): 551-556(in Chinese).
- [7] 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 DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 886-891(in Chinese).
- [8] Iqbal F, Siddiqui A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid—A case study[J]. Protection & Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-12.
- [9] 韩莹. 独立型燃料电池直流微电网能量管理及其应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
Han Ying. Research on Energy Management and Application for Stand-Alone Fuel Cell DC Microgrid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [10] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5553-5562.  
Zhang Xue, Pei Wei, Deng Wei, et al. Energy management and coordinated control method for multi-source/multi-load DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5553-5562(in Chinese).
- [11] 王盼宝, 王卫, 孟尼娜, 等. 直流微电网离网与并网运行统一控制策略[J]. 中国电机工程学报,

- 2015, 35(17): 4388-4396.
- Wang Panbao, Wang Wei, Meng Nina, et al. Unified control strategy of islanding and grid-connected operations for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4388-4396(in Chinese).
- [12] Gu Y, Xiang X, Li W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [13] Diaz N L, Dragičević T, Vasquez J. C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—A new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2476-2485.
- [14] 杨小龙, 程启明, 褚思远, 等. 孤岛模式下光储直流微电网变功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 67-74, 81.
- Yang Xiaolong, Cheng Qiming, Chu Siyuan, et al. Variable power control of photovoltaic-battery DC microgrid in islanding mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 67-74, 81(in Chinese).
- [15] Kanwal S, Khan B, Ali S M. Machine learning based weighted scheduling scheme for active power control of hybrid microgrid[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 125: 106461.
- [16] 孟明, 贺海博. 直流微网系统的多模态运行控制[J]. 现代电力, 2016, 33(2): 6-12.
- Meng Ming, He Haibo. Multi-mode operation control of DC microgrid system[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 6-12(in Chinese).
- [17] 张继红, 赵锐, 高雷, 等. 直流微网母线电压稳定控制策略[J/OL]. 电网技术, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20210101.1431.002.html>, 2021-01-01.
- Zhang Jihong, Zhao Rui, Gao Lei, et al. DC bus voltage stability control strategy for DC microgrid [J/OL]. Power System Technology, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.TM.20210101.1431.002.html>, 2021-01-01(in Chinese).
- [18] 刘海涛, 熊雄, 季宇, 等. 直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增1): 37-46.
- Liu Haitao, Xiong Xiong, Ji Yu, et al. Research on power flat management and coordinated control strategy under different operation modes for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Suppl 1): 37-46(in Chinese).
- [19] Azizi A, Peyghami S, Mokhtari H, et al. Autonomous and decentralized load sharing and energy management approach for DC microgrids[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 177: 106009.1-106009.11.
- [20] Pierre M, Babak N M, Pierfederici S. General active global stabilization of multiloads DC-power networks[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 27(4): 1788-1798.
- [21] Liu X B, Zhou Y J, Zhang W, et al. Stability criteria for constant power loads with multistage LC filters[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(5): 2042-2049.
- [22] 孟明, 陈世超, 卢玉舟, 等. 基于功率分层的直流微电网协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 30-37.
- Meng Ming, Chen Shichao, Lu Yuzhou, et al. Coordinated control based on power hierarchy for DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 30-37(in Chinese).
- [23] 米阳, 吴彦伟, 朱银珠, 等. 含负荷功率自动分配的独立直流微电网协调控制[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 440-447.
- Mi Yang, Wu Yanwei, Zhu Yinzhu, et al. Coordinated control for autonomous DC microgrid with dynamic load power sharing[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 440-447(in Chinese).

(责任编辑: 孙立华)