DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.1.146 **中图分类号**：TM721 **文献标志码**：A

一种无电压观测器的多储能协调运行控制策略

代广贵，何 晋，吴富磊，张博嘉
(云南民族大学电气信息工程学院，昆明 650031)

摘要：针对传统下垂控制依据固定的下垂系数分配负荷功率未考虑线路阻抗的影响与储能单元容量信息，以及系统通信压力大、控制结构复杂等问题，提出1种无电压观测器的多储能协调运行控制策略。首先，所提策略引入含分布式储能单元DESUs(distributed energy storage units)容量与荷电状态SOC(state-of-charge)的收敛函数修正初始下垂系数，且给出调节系数的约束条件，从而促进储能单元的SOC快速均衡；其次，通过引入虚拟额定功率，构造并均衡单位输出功率克服线路阻抗对DESUs负荷分配的影响。通过构造允许的母线电压最大偏差与平均单位功率的乘积得到母线电压补偿量，实现电压调节，其无需通信交换储能单元的节点电压信息与对应电压观测器、PI控制器的设计。最后，通过MATLAB/ Simulink的仿真测试验证了所提策略的有效性。

关键词：直流微电网；分布式储能单元；下垂控制；荷电状态均衡；电压调节

Control Strategy for Coordinated Operation of Multi-energy Storage without Voltage Observers

DAI Guanggui, HE Jin, WU Fulei, ZHANG Bojia
(School of Electrical and Information Engineering, Yunnan Minzu University, Kunming 650031, China)

Abstract: Aimed at the problem that the traditional droop control allocates load power based on a fixed droop coefficient without considering the influence of line impedance or the information about energy storage unit capacity, as well as the problems of high system communication pressure and complex control structure, a control strategy for the coordinated operation of multi-energy storage without voltage observers is proposed. First, the proposed strategy introduces a convergence function including the capacity of distributed energy storage units (DESUs) and state-of-charge (SOC) to correct the initial droop coefficient, and it gives constraints on the adjustment coefficient, thereby promoting the rapid SOC equilibrium of the energy storage unit. Second, by introducing a virtual rated power, the unit output power is configured and balanced to overcome the effect of line impedance on the load sharing of DESUs. Through the construction of a product of maximum allowable bus voltage deviation and average unit power, the bus voltage compensation amount is obtained, so as to realize voltage regulation without the need of communicating and exchanging the node voltage information about the energy storage unit or the design of the corresponding voltage observer and PI controller. Finally, the effectiveness of the proposed strategy was verified by simulation tests using MATLAB/Simulink.

Keywords: DC microgrid; distributed energy storage unit (DESU); droop control; state-of-charge (SOC) equilibrium; voltage regulation

收稿日期：2023-01-30；**修回日期**：2023-06-08；**录用日期**：2023-08-26；**网络首发日期**：2023-10-23
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52061042)；云南教育厅科学研究基金资助项目(2022Y454)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52061042; Scientific Research Foundation of Education Department of Yunnan Province under the grant 2022Y454

微电网是集成分布式发电DG(distributed generation)、储能系统ESS(energy storage system)与负荷的小型电力系统[1]。相较于交流微电网[2]，光伏、储能等是具有直流属性的输出[3]，同数据中心、变

速传动等负荷一样消耗直流电，故直流微电网减少了大量 DC-AC 和 AC-DC 的变换装置[4]，且不存在无功补偿、相位同步和谐波电流等问题[5]，系统效率与电能质量较高，故引起国内外学者广泛关注[6]。在海岛和偏远山区，直流微电网通常以孤岛模式运行[7]，且安装一定容量的 ESS 补偿 DG 与负荷的功率差[8]。为延长 ESS 的使用寿命，需要实现分布式储能单元 DESUs(distributed energy storage units)的荷电状态 SOC(state-of-charge)快速均衡[9]。

下垂控制简单、可靠，且可实现 DG 的即插即用，故被广泛应用于控制 DG 之间的功率分配[10]。但传统下垂控制策略没有考虑储能单元的 SOC 信息，且存在 DG 负荷分配精度与母线电压质量的固有矛盾[11]。对此，文献[12]设置下垂系数反比于 SOC 的 n 次幂，从而促进储能单元 SOC 的均衡；文献[13]提出了 1 种无通信连接的新型下垂控制策略，但随着 SOC 的减小，下垂系数增大，影响母线电压质量与系统的稳定运行；文献[14]提出通过 SOC 调节电压设定点；文献[15]将下垂系数构造为储能单元 SOC 的收敛函数，分别通过 2 个系数来恒定与放大速度因子，促进各 DESUs 的 SOC 收敛至平均值，实现功率均分。实际微电网中，线路阻抗不可忽略，DESUs 的容量存在差异，故上述文献的适用范围有限。文献[16]提出 1 种非线性下垂控制；文献[17]通过微调虚拟电阻克服线路阻抗对负荷分配的影响，但其均未考虑下垂控制引起的母线电压偏差；文献[18]基于含线路阻抗的虚拟额定功率提高负荷分配精度，且对母线电压进行补偿，但需要准确获取线路阻抗的值；文献[19-20]分别构造了状态变量与虚拟额定电流，促进 DESUs 的 SOC 均衡、负荷按容量分配，且通过电压观测器估算平均母线电压以跟随额定值，补偿母线电压。在上述文献所提策略中，每个 DESU 与通信相邻的 DESUs 交换多个信息变量，增加系统通信负担，且多个 PI 控制器、电压观测器使系统的控制结构变得复杂[21]。文献[22]将 DG 的输出功率与电压信息关联为 1 个 λ 因子，从而降低系统通信压力与简化控制结构，但其未考虑 DESUs 的 SOC 均衡过程。

基于上述分析，本文针对孤岛直流微电网的分布式储能单元的协调运行提出 1 种改进的下垂控制策略。首先，所提策略引入含 DESUs 容量与 SOC 的收敛函数修正初始下垂系数，从而促进储能单元的 SOC 快速均衡。其次，通过引入虚拟额定功率，构造并均衡单位输出功率，克服线路阻抗对 DESUs 负荷分配的影响。最后，通过构造允许的母线最大电压偏差与平均单位功率的乘积得到母线电压补偿量，实现电压调节，且给出对应的证明推导过程，无需通信交换储能单元的节点电压信息与对应电压观测器、PI 控制器的设计，减小了系统通信压力，简化了控制结构。

1　孤岛直流微电网系统结构与 SOC 均衡分析

1.1　孤岛直流微电网系统结构

孤岛直流微电网的典型系统结构如图 1 所示，其包含如光伏、风机等可再生能源 RES(renewable energy sources)及储能系统与负荷。其中，RES 运行于最大功率点跟踪 MPPT(maximum power point tracking)模式，且通过 Boost 变流器向直流母线输送功率[23]，ESS 由蓄电池通过双向 DC-DC 变流器并行连接组成。且当 RES 输出的功率高于负荷消耗的功率时，ESS 工作于充电模式；反之，则其工作于放电模式。DESUs 的运行控制目标就是实现 SOC 的快速均衡、负荷功率的合理分配，以及维持

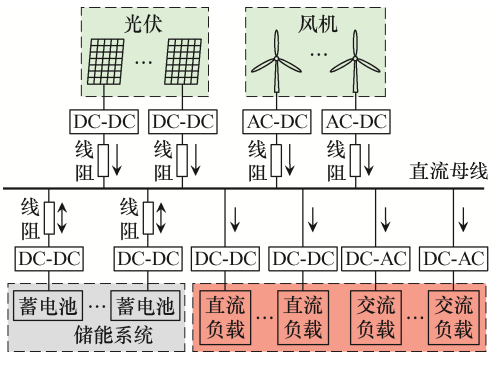


图 1　孤岛直流微电网结构

Fig. 1 Structure of isolated DC microgrid

直流母线电压在额定值附近[24]。

1.2 SOC 的均衡分析

孤岛直流微电网中 DESUs 的负荷功率分配通常采用 *U-P* 下垂控制[15]，其表达式为

$$u_{\mathrm{ref},i}=u_{\mathrm{nom}}-m_iP_i \tag{1}$$

式中：$u_{\mathrm{ref},i}$、m_i和P_i分别为 DESU_i 的参考输出电压、下垂系数和输出功率；u_{nom}为直流母线额定电压。当P_i>0 时，表示 DESU_i放电；反之，DESU_i充电。由于 DESU_i的变流器包含电压外环与电流内环，故可认为$u_{\mathrm{dc}i}=u_{\mathrm{ref},i}$[7]。且$m_i$由 DESU_i对应的变流器最大输出功率$P_{\mathrm{max},i}$与母线电压最大允许偏差Δu_{max}共同确定[25]，其表达式为

$$m_i=\frac{\Delta u_{\mathrm{max}}}{P_{\mathrm{max},i}} \tag{2}$$

为便于分析，现做出 2 组 DESUs 并联于直流母线的简化模型，如图 2 所示。其中：$i_{\mathrm{dc}i}$、$u_{\mathrm{dc}i}$和P_i分别为 DESU_i的输出电流、电压和功率；$i_{\mathrm{dc}j}$、$u_{\mathrm{dc}j}$和P_j分别为 DESU_j的输出电流、电压和功率；r_i和r_j分别为 DESU_i和 DESU_j对应的线路阻抗；R_{L}和u_{bus}分别为负荷等效电阻和直流母线电压。

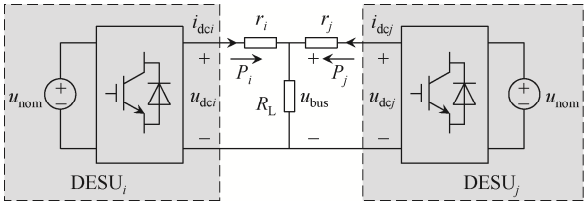


图 2 2 组并联储能单元的简化模型

Fig. 2 Simplified model of two sets of energy storage units connected in parallel

由库仑计数法可对 DESU_i当前时刻的 SOC_i进行估算，其表达式为

$$\mathrm{SOC}_i=\mathrm{SOC}_i(0)-\frac{\eta}{C_{\mathrm{b}i}}\int i_{\mathrm{dc}i}\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$\mathrm{SOC}_i(0)$为 DESU_i初始时刻的 SOC；$C_{\mathrm{b}i}$为 DESU_i的容量；η为 DESU_i对应变流器的输出、输入电压之比。忽略变流器的功率损耗，可得

$$\mathrm{SOC}_i=\mathrm{SOC}_i(0)-\frac{\eta}{C_{\mathrm{b}i}}\int\frac{P_i}{u_{\mathrm{dc}i}}\mathrm{d}t \tag{4}$$

由图 2 可知 DESU_i的输出功率P_i为

$$P_i=\frac{u_{\mathrm{dc}i}(u_{\mathrm{dc}i}-u_{\mathrm{bus}})}{r_i} \tag{5}$$

根据图 2，联立式(1)、式(4)和式(5)可得

$$\frac{\mathrm{SOC}_i^{\cdot}}{\mathrm{SOC}_j^{\cdot}}=\frac{C_{\mathrm{b}j}(r_j+m_ju_{\mathrm{dc}j})}{C_{\mathrm{b}i}(r_i+m_iu_{\mathrm{dc}i})} \tag{6}$$

式中：$\mathrm{SOC}_i^{\cdot}$、$\mathrm{SOC}_j^{\cdot}$分别为 DESU_i、DESU_j的荷电状态变化率。由式(6)可知在荷电状态均衡过程中，各 DESUs 的 SOC 差异主要由容量、线路阻抗和下垂系数决定。当 DESUs 的容量相对固定时，可通过调节下垂系数克服线路阻抗对储能单元负荷分配精度的影响，从而实现 SOC 的快速均衡，且由式(1)可知，下垂系数的引入会造成储能单元输出电压偏离额定值，故需要对母线电压进行补偿。

2 无电压观测器的多储能单元协调运行控制策略

本文所提策略的控制目标为实现 DESUs 的 SOC 快速均衡、负荷功率按容量分配及维持母线电压在额定值附近。

2.1 动态一致性算法

在多智能体系统中，一致性算法是指多智能体通过分布式通信交换信息促进某一目标状态达成一致的协议[27]。为获取所需的荷电状态与单位输出功率的全局平均值信息，本文对文献[28]的一致性算法改写为

$$\begin{cases}x_{\mathrm{avg}i}(k+1)=x_i(0)+\varepsilon\sum\limits_{j\in N_i}D_{ij}(k+1)\\ D_{ij}(k+1)=D_{ij}(k)=a_{ij}[x_{\mathrm{avg}j}(k)-x_{\mathrm{avg}i}(k)]\end{cases} \tag{7}$$

式中：$x_i(0)$为初始状态变量，其对应 DESU_i本地测量的荷电状态与单位输出功率；$x_{\mathrm{avg}i}(k)$和$x_{\mathrm{avg}i}(k+1)$分别为 DESU_i第 k 和 k+1 次本地估计的平均状态变量；$D_{ij}(k)$和$D_{ij}(k+1)$分别为 DESU_i、DESU_j第 k 和 k+1 次估计误差的累积项；N_i为与 DESU_i有通信连接的节点集合；a_{ij}和ε分别为连接状态与权重系数。考虑含 N 个 DESUs 节点的系统，式(7)的矢量形式为

$$\boldsymbol{X}_{\text{avg}}(k+1)=\boldsymbol{W}\cdot\boldsymbol{X}_{\text{avg}}(k) \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{X}_{\text{avg}}(k)=[x_{\text{avg1}}(k)\ \ x_{\text{avg2}}(k)\ \cdots\ x_{\text{avg}N}(k)]^{\text{T}}$；$\boldsymbol{W}$为通信拓扑的权重矩阵，其表达式为

$$\boldsymbol{W}=\boldsymbol{I}-\varepsilon\boldsymbol{L} \tag{9}$$

式中：$\boldsymbol{I}$为N阶单位矩阵，$\boldsymbol{I}$=[1 1 … 1]$^{\text{T}}$；$\boldsymbol{L}$为通信拓扑的拉普拉斯矩阵。最终，通过式(7)估计的平均状态变量$\boldsymbol{X}_{\text{avg}}(k)$可收敛一致，且收敛于初始状态变量$\boldsymbol{X}(0)$的平均值[28]，即有

$$\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{X}_{\text{avg}}(k)=\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{W}^{k}\boldsymbol{X}(0)=\left(\frac{1}{N}\boldsymbol{I}\cdot\boldsymbol{I}^{\text{T}}\right)\boldsymbol{X}(0) \tag{10}$$

式中，N维向量$\boldsymbol{X}(0)=[x_1(0)\ \ x_2(0)\ \cdots\ x_N(0)]^{\text{T}}$。

2.2 下垂系数的修正

基于前述章节的分析，本文引入 DESUs 容量与 SOC 的下垂系数，其表达式为

$$m_i^*=\begin{cases}\dfrac{1}{C_{\text{b}i}}m_0\left[\dfrac{\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i}{\alpha|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|+\beta}+1\right] & P_i>0\\ \dfrac{1}{C_{\text{b}i}}m_0\left[\dfrac{\text{SOC}_i-\text{SOC}_{ai}}{\alpha|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|+\beta}+1\right] & P_i<0\end{cases} \tag{11}$$

式中：m_i^*和m_0分别为 DESU$_i$的修正后和初始下垂系数；SOC$_{ai}$为 DESU$_i$本地估计的平均 SOC；α、β为调节系数。

现取两储能单元 DESU$_i$、DESU$_j$，忽略线路阻抗的影响，则$u_{\text{dc}i}=u_{\text{dc}j}$，分析 DESUs 放电过程的 SOC 均衡原理。令中间变量k_i为

$$k_i=\frac{1}{\alpha|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|+\beta} \tag{12}$$

结合式(1)和式(4)可知 DESU$_i$和 DESU$_j$的荷电状态差异为

$$\Delta\text{SOC}_{ij}=\text{SOC}_i-\text{SOC}_j=\text{SOC}_i(0)-\text{SOC}_j(0)+\int\frac{\eta(u_{\text{nom}}-u_{\text{dc}j})}{C_{\text{b}j}m_j^*u_{\text{dc}j}}\text{d}t-\int\frac{\eta(u_{\text{nom}}-u_{\text{dc}i})}{C_{\text{b}i}m_i^*u_{\text{dc}i}}\text{d}t \tag{13}$$

将式(11)和式(12)代入式(13)且求导可得

$$\Delta\text{SOC}'_{ij}=\frac{\eta(u_{\text{nom}}-u_{\text{dc}i})}{u_{\text{dc}i}m_0}\left[\frac{1}{k_j(\text{SOC}_{aj}-\text{SOC}_j)+1}-\frac{1}{k_i(\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i)+1}\right] \tag{14}$$

式中，$\Delta\text{SOC}'_{ij}$为ΔSOC_{ij}对时间的导数。当$\text{SOC}_i(0)>\text{SOC}_j(0)$时，$\Delta\text{SOC}'_{ij}<0$，故随着储能单元放电过程的进行，SOC$_i$与 SOC$_j$将达到一致。由式(13)和式(14)的推导表明，在 DESUs 的放电过程中，SOC 初值较大的 DESU$_i$具有较小的下垂系数m_i^*，其输出功率较大，SOC$_i$下降较快，故随着放电过程的进行，储能单元的 SOC 将实现均衡。且由式(11)和式(12)可以看出，当$|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|$较大，即$\alpha|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|>>\beta$时，DESU$_i$的下垂系数为

$$m_i^*\approx\frac{m_0}{C_{\text{b}i}}\left[\pm\frac{1}{\alpha}+1\right] \tag{15}$$

式中，$\alpha>1$。由式(11)可知，DESU$_i$的下垂系数相对固定，输出功率P_i基本不变。结合式(13)~式(15)的推导，分析 DESU$_i$、DESU$_j$的输出功率P_i、P_j的比值为

$$\frac{P_i}{P_j}=\frac{m_j^*}{m_i^*}\approx\frac{C_{\text{b}i}(1/\alpha+1)}{C_{\text{b}j}(-1/\alpha+1)} \tag{16}$$

对于 DESU$_i$，其输出功率应满足的约束为

$$P_i\approx\frac{C_{\text{b}i}(1/\alpha+1)}{C_{\text{b}j}(-1/\alpha+1)}P_j\leqslant P_{\max-i} \tag{17}$$

进一步推导可知α需要满足的约束条件为

$$\begin{cases}\dfrac{\alpha+1}{\alpha-1}\leqslant\dfrac{C_{\text{b}j}P_{\max-i}}{C_{\text{b}i}P_j}\\ \alpha>1\end{cases} \tag{18}$$

由式(16)~式(18)可知，可通过调节α避免因各储能单元的 SOC 差异较大而导致部分变流器输出功率过大而超限[15]；当$|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|$趋于 0 时，DESU$_i$的下垂系数为

$$m_i^*\approx\frac{m_0}{C_{\text{b}i}}\left[\frac{1}{\beta}(\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i)+1\right] \tag{19}$$

由式(19)可知，$0<\beta<1$时可等效放大各储能单元下垂系数的差异，从而获得较快的 SOC 均衡速度，考虑式(15)和式(19)储能单元的 SOC 均衡过程，β需满足的约束条件为

$$\begin{cases}|\text{SOC}_{ai}-\text{SOC}_i|<\beta<\lambda\\ \lambda=\min(1,0.1\alpha)\end{cases} \tag{20}$$

2.3 DESUs 输出功率的精确分配

为克服 DESUs 的负荷功率分配精度易受线路阻抗影响的问题，本文引入 DESU_i 的虚拟额定功率 $P_{\mathrm{vr},i}$ [26]与单位输出功率 $P_{\mathrm{pu},i}$，分别表示为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{vr},i}=\dfrac{\Delta u_{\max}}{m_i^*} \\ P_{\mathrm{pu},i}=\dfrac{P_i}{P_{\mathrm{vr},i}} \end{cases} \tag{21}$$

为实现 DESU_i 负荷功率的精确分配，由式(21)可设计补偿项 $\Delta u_{\mathrm{P}i}$ 为

$$\Delta u_{\mathrm{P}i}=k_{ii}\int(P_{\mathrm{apu},i}-P_{\mathrm{pu},i})\mathrm{d}t \tag{22}$$

式中：k_{ii} 为积分系数；$P_{\mathrm{apu},i}$ 为 DESU_i 通过式(7)构造的功率观测器得出的平均单位输出功率。

通过引入的 $P_{\mathrm{vr},i}$ 与 $P_{\mathrm{pu},i}$，以及设计的功率分配补偿项 $\Delta u_{\mathrm{P}i}$，可知系统稳态时的关系为

$$\frac{P_1 m_1^*}{\Delta u_{\max}}=\frac{P_2 m_2^*}{\Delta u_{\max}}=\cdots=\frac{P_i m_i^*}{\Delta u_{\max}}=\cdots\frac{P_N m_N^*}{\Delta u_{\max}} \tag{23}$$

式(23)进一步证明了式(13)~式(16)的推导，且当 SOC 收敛时，各 DESUs 实现负荷按容量分配，具体为

$$\frac{P_1}{C_{\mathrm{b}1}}=\frac{P_2}{C_{\mathrm{b}2}}=\cdots=\frac{P_i}{C_{\mathrm{b}i}}=\cdots=\frac{P_N}{C_{\mathrm{b}N}} \tag{24}$$

2.4 无电压观测器的母线电压补偿

为补偿由下垂系数、线路阻抗引起的母线电压跌落，1 种常见的方法[7,19,20,24]为通过一致性算法构造 DESU_i 的电压观测器，从而本地估算出 N 个 DESUs 节点系统的平均母线电压 $u_{\mathrm{a}i}$ [29]，将其与电压额定值做比较，且将误差输入到 PI 控制器，从而得出 DESU_i 的母线电压补偿项 $\Delta u_{\mathrm{u}i}$。同时，由功率观测器本地估计平均单位输出功率 $P_{\mathrm{pu},i}$，且将其与单位输出功率 $P_{\mathrm{pu},i}$ 的差值输入积分器 $\dfrac{k_{ii}}{s}$，从而得出功率分配补偿项 $\Delta u_{\mathrm{P}i}$ 促进 DESUs 的功率合理分配与 SOC 均衡。基于电压观测器的 DESU_i 的母线电压补偿结构如图 3 所示。

为简化系统控制结构，减小通信压力，本文对 DESU_i 的母线电压补偿项 $\Delta u_{\mathrm{u}i}$ 进行设计，其表达式为

$$\Delta u_{\mathrm{u}i}=\Delta u_{\max}P_{\mathrm{apu},i} \tag{25}$$

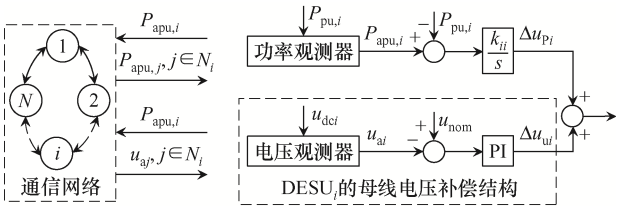


图 3 基于电压观测器的 DESU_i 的母线电压补偿结构

Fig. 3 Bus voltage compensation structure of DESU_i based on voltage observer

联立式(1)、式(11)和式(25)可得

$$u_{\mathrm{dc}i}=u_{\mathrm{nom}}-m_i^*P_i+\Delta u_{\mathrm{u}i} \tag{26}$$

将式(21)代入式(26)且进行推导可得

$$u_{\mathrm{dc}i}=u_{\mathrm{nom}}-\frac{\Delta u_{\max}}{P_{\mathrm{vr},i}}P_i+\Delta u_{\max}P_{\mathrm{apu},i}=u_{\mathrm{nom}}-\Delta u_{\max}P_{\mathrm{pu},i}+\Delta u_{\max}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{pu},i} \tag{27}$$

对式(27)两侧求平均值可得

$$u_{\mathrm{a}i}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}u_{\mathrm{dc}i}=u_{\mathrm{nom}}-\Delta u_{\max}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{pu},i}+\Delta u_{\max}\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}P_{\mathrm{pu},i} \tag{28}$$

式中，$u_{\mathrm{a}i}$ 为平均母线电压，且由式(28)可知系统稳态时 $u_{\mathrm{a}i}=u_{\mathrm{nom}}$，即实现 DESUs 的平均母线电压稳定在额定值。结合式(7)、式(22)和式(25)可知，本文所提无电压观测器的 DESU_i 的母线电压补偿结构如图 4 所示。

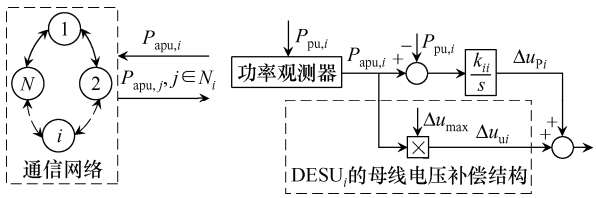


图 4 无电压观测器的 DESU_i 的母线电压补偿结构

Fig. 4 Bus voltage compensation structure of DESU_i without voltage observers

对比图 3 和图 4 可知，本文所提无电压观测器的 DESU_i 的母线电压补偿结构减少了 $u_{\mathrm{a}i}$ 与 $u_{\mathrm{a}j}(j\in N_i)$ 的信息传输，无需基于一致性算法构建电压观测器，减少了 PI 控制器的使用，简化了系统控制结构且减小了通信压力。

综上，本文所提控制策略的整体表达式为

$$u_{\mathrm{ref},i}=u_{\mathrm{nom}}-m_i^{*}P_i+\Delta u_{\mathrm{P}i}+\Delta u_{\mathrm{u}i} \tag{29}$$

所提无电压观测器的多储能协调运行控制策略的整体控制框图如图 5 所示，图中，i_{Li} 为变流器的电感电流；S_1 和 S_2 为功率开关管的 PWM 信号。

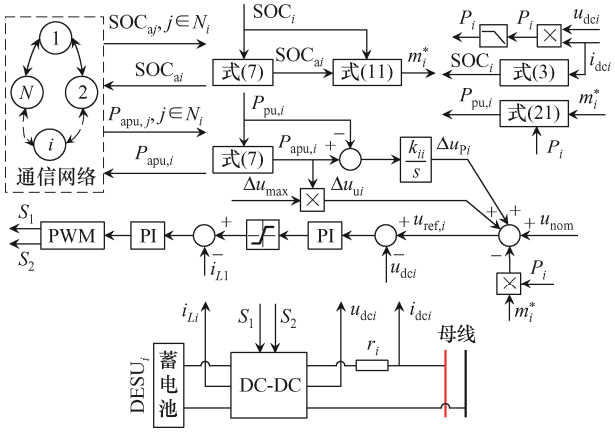


图 5　所提策略的整体控制框图

Fig. 5 Overall control block diagram of proposed strategy

3　仿真验证

为验证所提无电压观测器的多储能协调运行控制策略可实现储能单元 SOC 的快速均衡、负荷功率按容量分配及维持母线电压在额定值附近的控制目标，本节采用 MATLAB/Simulink 搭建了含 1 组光伏发电单元、3 组储能单元(DESU_1、DESU_2、DESU_3)和可变电阻负荷 R_{L} 的孤岛直流微电网仿真模型。其中，光伏发电单元工作于 MPPT 模式[20]，可被视作电流源[25]，根据仿真工况要求设置可变电阻的值模拟负荷变化，具体仿真参数见表 1。

3.1　工况 1：负荷变化

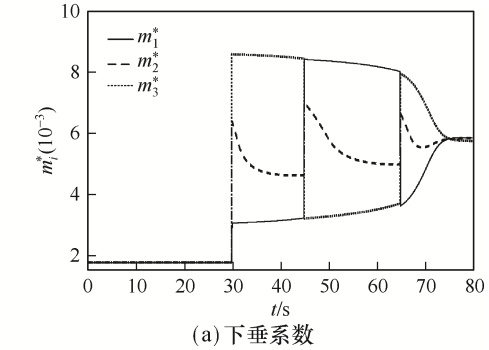
考虑 DESU_1、DESU_2、DESU_3 同容量，且均为 0.3 A·h，3 组 DESUs 的初始 SOC 分别为 80%、70%、60%，负荷电阻 R_{L}=30 Ω，光伏输出功率 P_{s}=6.51 kW。在 3 组 DESUs 的下垂系数修正与负荷功率分配补偿环相同的情况下，考虑是否基于电压观测器的 DESUs 的母线电压补偿结构。本工况具体的仿真阶段为：t=0，传统下垂控制启动；t=15 s，DESUs 的负荷功率分配补偿环启动；t=30 s，下垂系数修正与母线电压补偿环同时启动；t=45 s，R_{L} 由 30 Ω 突变为 500 Ω；t=65 s，R_{L} 由 500 Ω 突变回 30 Ω，仿真时间为 80 s。本工况的仿真结果如图 6 所示。

表 1　仿真参数

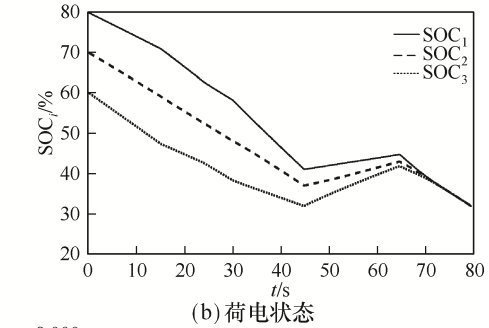
Tab. 1 Simulation parameters

参数	数值
蓄电池端电压 U_{bi}(i=1,2,3)/V	400
变流器电容 C/mF	1.5
变流器电感 L/mH	9.8
变流器最大输出功率 $P_{\mathrm{max},i}$(i=1,2,3) /kW	20
初始下垂系数 m_0/(V/W)	175×10^{-5}
母线电压额定值 u_{nom}/V	700
允许母线电压最大偏差 $\pm\Delta u_{\max}$ /V	±35
光伏单元最大输出功率 $P_{\max}$/kW	12
线路电阻 r_i(i=1,2,3)/Ω	1.1,0.7,0.4
开关频率 f_{S} /kHz	12
低通滤波器截止频率 f_{c} /(rad·s^{-1})	125
积分系数 k_{ii}	70
调节系数 α、β	2, 0.01

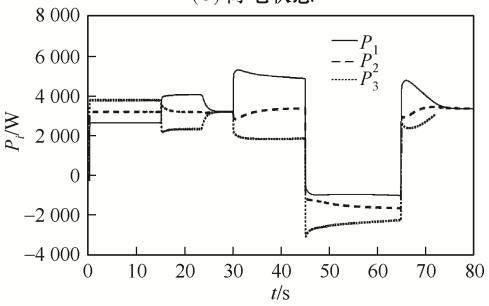
由图 6(a)~(c)可知，前 15 s 基于传统下垂控制，因为储能单元对应的线路阻抗 $r_1>r_2>r_3$，故输出功率满足 $P_1<P_2<P_3$，则荷电状态 SOC_3 下降最快。在 t=15 s 时，启动 DESUs 的负荷功率分配补偿环后，其输出功率逐渐收敛一致，此时 3 组储能单元的 SOC 变化率相等，且由图 6(d)和(e)可知，平均母线电压均为 694.5 V。在 t=30 s 时，启动 DESUs 的下垂系数修正后，因为 $\mathrm{SOC}_1>\mathrm{SOC}_2>\mathrm{SOC}_3$，由式(11)可知 $m_1^{*}<m_2^{*}<m_3^{*}$，故输出功率 P_1 最大，SOC_1 下降最快。当 t=45 s 时，负荷突变导致储能单元充放电状态转变后，m_1^{*} 最大，DESU_1 吸收功率最少，其荷电状态上升较慢。3 组储能单元的 SOC 趋于均衡，其负荷功率逐渐均分。对比图 6(d)和(e)可知，当 t=30 s 时，启动 DESUs 的母线电压补偿环后，平均母线电压均被稳定在额定值 700 V，在无需通信链路交换本地节点电压，基于一致性算法构造电压观测器，以及进行相应的 PI 参数整定下，本文所提的无电压观测器的母线电压补偿控制可实现平均母线电压稳定在额定值处。



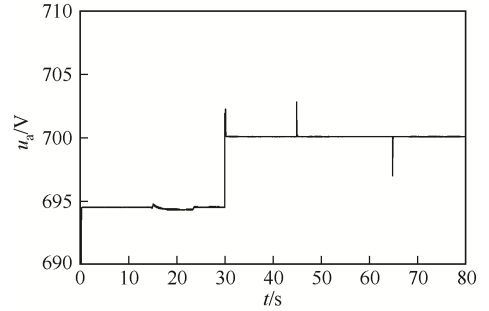
(a) 下垂系数



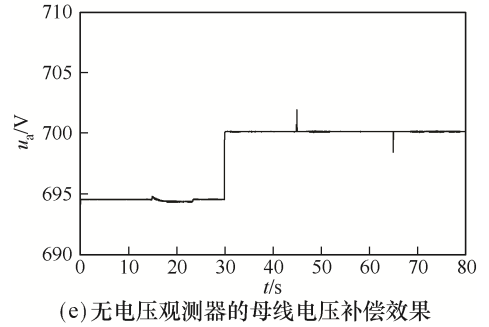
(b) 荷电状态



(c) DESUs的输出功率



(d) 基于电压观测器的母线电压补偿效果



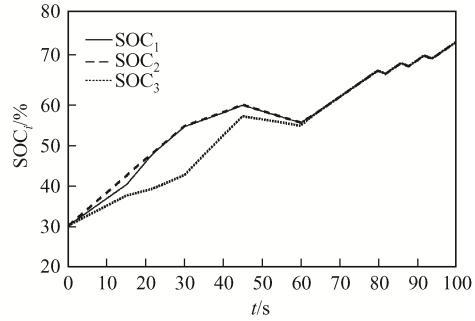
(e) 无电压观测器的母线电压补偿效果

图 6 工况 1 的仿真结果

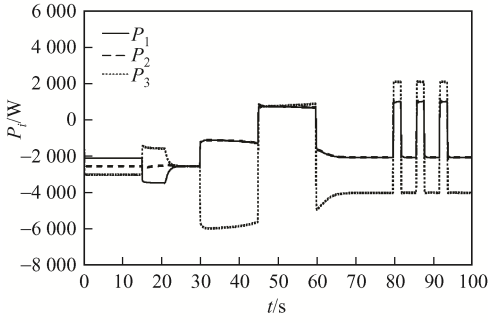
Fig. 6 Simulation results under working condition 1

3.2 工况 2：光伏输出功率波动与负荷频繁投切测试

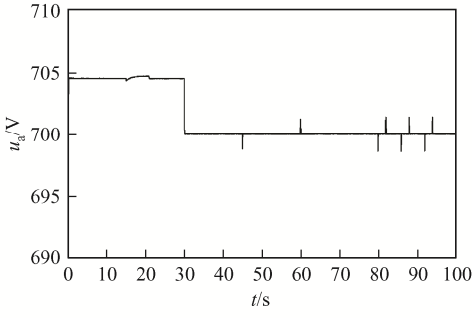
本工况考虑 DESU$_1$、DESU$_2$、DESU$_3$ 不同容量，选取 3 组储能单元的容量分别为 0.2、0.2 和 0.4 A·h，初始 SOC 均为 30%，负荷 R_L=160 Ω，光伏输出功率 P_s=10.95 kW。本工况具体的仿真阶段为：t=0 时，传统下垂控制启动；t=15 s 时，DESUs 负荷功率分配补偿环启动；t=30 s 时，下垂系数修正与无电压观测器的母线电压补偿环同时启动；t=45 s时，光伏输出功率P_s由10.95 kW降低为840.6 W；t=60 s时，光伏输出功率 P_s 由 840.6 W 上升为 10.95 kW；t= 80、86 和 92 s 时，母线并联投入 38 Ω 负荷；t=82、88 和 94 s 时，切除 38 Ω 负荷，仿真时间为 100 s。本工况具体的仿真结果如图 7 所示。



(a) 荷电状态



(b) DESUs的输出功率



(c) 平均母线电压

图 7 工况 2 的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under working condition 2

由图 7(a)~(c)可知，系统前 15 s 基于式(1)的传统固定下垂系数的控制，平均母线电压为 704.5 V，因为 $r_1 > r_2 > r_3$，$DESU_1$ 的吸收功率最少，又因为 $C_{b1} = C_{b2} = 0.5C_{b3}$，故 $DESU_2$ 的 SOC 上升最快；t=15 s 时，DESUs 负荷功率分配补偿环启动，3 组 DESUs 的负荷功率逐渐均分；t= 30 s 时，DESUs 的下垂系数修正与无电压观测器的母线电压补偿环同时启动，下垂系数依据储能单元的 SOC 与容量而自适应变化，平均母线电压稳定在额定值 700 V，因为 SOC_1 接近 SOC_2，且大于 SOC_3，由式(11)可知，$DESU_3$ 的下垂系数最小，对应吸收功率最大，SOC_3 上升最快；t=45 s 时，3 组 DESUs 的充放电状态切换，其荷电状态仍趋于均衡；t= 67 s 时，3 组储能单元的输出功率分别为 P_1=−2.085 kW、P_2=−2.081 kW、P_3=−4.114 kW，其近似容量比为 1:1:2；t=80 s 时，虽发生负荷的频繁投切，但储能单元的 SOC 均衡状态不变，且负荷按容量成比例地分配，平均母线电压虽有 1.2 V 的波动，但其能快速恢复到额定值。

3.3 工况 3：与改进下垂控制策略的对比

本工况考虑 3 组 DESUs 的容量均为 0.3 A·h，且初始 SOC 分别为 80%、70%和 60%。光伏输出功率 P_s=5.91 kW，负荷 R_L=40 Ω，就文献[26]与本文所提策略进行对比分析。其中，文献[26]引入含 DESUs 容量与 SOC 的指数函数对初始下垂系数进行修正，并通过虚拟额定功率实现 DESUs 精确的负荷分配，通过通信链路获取系统 DESUs 的节点电压信息，计算平均母线电压，通过 PI 控制器得到电压调节补偿量，实现母线电压的恢复。本工况的具体仿真阶段为：t=0 时，文献[26]与本文所提策略同时启动；t=30 s 时，R_L 由 40 Ω 突变为 300 Ω；t=50 s 时，R_L 由 300 Ω 突变为 40 Ω；t=70 s 时，R_L 由 40 Ω 突变为 300 Ω，仿真时间为 90 s。本工况下文献[26]与本文所提策略的仿真结果如图 8 所示。

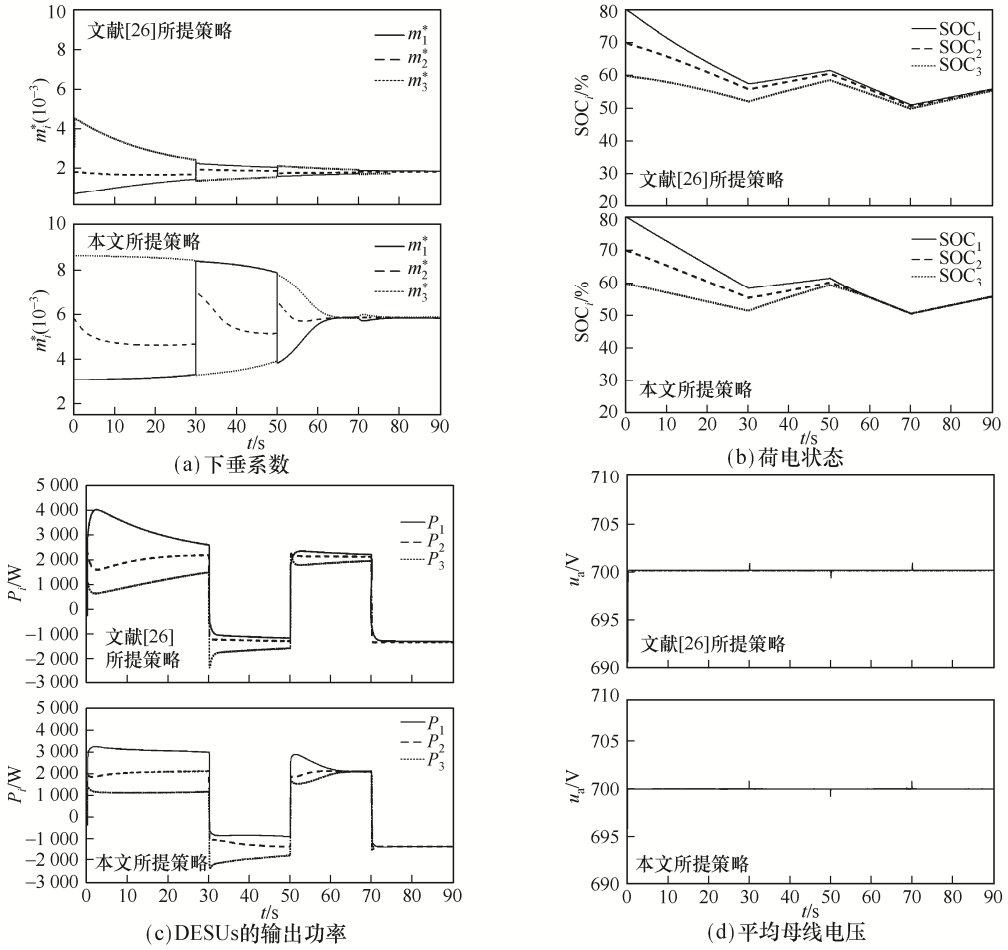


图 8　工况 3 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results under working condition 3

由图 8(a)~(c)可知，因为初始时刻 $DESU_1$ 与 $DESU_3$ 的 SOC 差异较大，文献[26]所提策略的下垂系数 m_3^* 与 m_1^* 的比值较大，故输出功率 P_1 与 P_3 差异较大，SOC 均衡速度较快，但当负荷较重时，其增加了输出功率超过变流器限值的风险[15]。随着储能单元 SOC 差异的减小，DESUs 下垂系数的比值也减小，故 SOC 均衡速度下降。t=30 s 之前，本文所提策略的下垂系数 m_3^* 与 m_1^* 的比值基本不变，输出功率相对恒定；$30\text{ s}<t<50\text{ s}$ 时，m_3^* 与 m_1^* 的比值相对文献[26]所提策略较大，故 SOC 均衡速度较快；$50\text{ s}<t<70\text{ s}$ 时，尽管 SOC 差异较小，但 β 等效放大下垂系数之间的差异，储能单元保持较快的SOC 均衡速度，以上对比分析可验证式(15)、式(16)和式(19)的推导；t=65 s 时，SOC 趋于均衡，且 3 组储能单元的输出功率分别为 P_1=2.114 kW、P_2=2.101 kW 和 P_3=2.097 kW，其近似容量比为 1:1:1。由图 8(c)可知，文献[26]所提策略与本文所提的无电压观测器的母线电压补偿控制均可使平均母线电压稳定在额定值。

4 结论

本文针对孤岛直流微电网中分布式储能单元的 SOC 不均衡，负荷功率分配不合理，以及母线电压不稳定问题，提出 1 种无电压观测器的多储能协调运行控制策略。

首先，所提策略引入含 DESUs 容量与 SOC 的收敛函数修正初始下垂系数，从而促进储能单元的 SOC 快速均衡；其次，通过引入虚拟额定功率，构造并均衡单位输出功率，克服线路阻抗对 DESUs 负荷分配的影响；最后，通过构造允许的母线最大电压偏差与平均单位功率的乘积得到母线电压补偿量，从而实现电压调节。通过与基于电压观测器的母线电压补偿控制的对比试验分析可得，本文所提策略无需通信交换储能单元的节点电压信息与对应电压观测器、PI 控制器的设计，实现稳定母线电压在额定值附近，其减小系统通信压力与简化控制结构；通过与传统改进下垂控制的对比试验分析可得，所提策略可实现 SOC 的快速收敛一致，减小储能单元因初始 SOC 差异较大而导致输出功率超限的风险，并实现储能单元负荷功率的合理分配。

参考文献：

[1] Nahata P, Turan M S, Ferrari-Trecate G. Consensus-based current sharing and voltage balancing in DC microgrids with exponential loads [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(4): 1668-1680.

[2] 董旭, 徐永海, 马宁, 等. 基于自适应特性的直流微电网双因子下垂控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 193-202.
Dong Xu, Xu Yonghai, Ma Ning, et al. Dual-factor droop control strategy for DC microgrid based on adaptive characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 193-202. (in Chinese)

[3] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.
Zhu Shanshan, Wang Fei, Guo Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344. (in Chinese)

[4] Baharizadeh M, Golsorkhi M S, Shahparasti M, et al. A two-layer control scheme based on P-V droop characteristic for accurate power sharing and voltage regulation in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2776-2787.

[5] Xing Lantao, Mishra Y, Guo Fanghong, et al. Distributed secondary control for current sharing and voltage restoration in DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2487-2497.

[6] 李云凤, 雷勇, 王进武, 等. 基于双重下垂控制的多储能直流微电网能量管理策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 5161-5170.
Li Yunfeng, Lei Yong, Wang Jinwu, et al. Energy management strategy for microgrid of multi-energy storage based on dual droop control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5161-5170. (in Chinese)

[7] 林嘉伟, 王志新, 张永. 独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 139-146.

Lin Jiawei, Wang Zhixin, Zhang Yong. Energy control strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 139-146. (in Chinese)

[8] Zhang Runfan, Hredzak B. Distributed finite-time multiagent control for DC microgrids with time delays [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2692-2701.

[9] Zhou Meina, Wang Wen, Lu Pan, et al. State-of-charge balancing and power sharing control method of energy storage system in DC microgrid [C]// 2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS). Shanghai, China, 2021: 1-5.

[10] 毛荀, 占勇, 刘敏, 等. 基于先导节点选取下优化下垂控制的孤岛运行微电网负荷功率分配方法[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 126-132.
Mao Xun, Zhan Yong, Liu Min, et al. Load power distribution method for islanding microgrid under optimal droop control based on selection of pilot nodes [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 126-132. (in Chinese)

[11] Xing Lantao, Xu Qianwen, Guo Fanghong, et al. Distributed secondary control for DC microgrid with event-triggered signal transmissions [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1801-1810.

[12] Lu Xiaonan, Sun Kai, Guerrero J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804-2815.

[13] Su Jialei, Li Kang, Li Yongfei, et al. A novel state-of-charge-based droop control for battery energy storage systems to support coordinated operation of DC microgrids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 312-324.

[14] Li Chendan, Dragicevic T, Diaz N L, et al. Voltage scheduling droop control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids [C]// 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Cavtat, Croatia, 2014: 1310-1314.

[15] 柴秀慧, 张纯江, 柴建国, 等. 改进互联通信荷电状态下垂控制及功率均衡优化[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3365-3374.
Chai Xiuhui, Zhang Chunjiang, Chai Jianguo, et al. Improved interconnected communication state of charge droop control and power balance optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3365-3374. (in Chinese)

[16] Madadi M, Bhattacharya S. Adaptive nonlinear droop control with dynamic state-of-charge balancing capability for batteries in DC microgrids [C]// 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Phoenix, AZ, USA, 2021: 55-61.

[17] Mi Yang, Deng Jin, Chang Junfei, et al. State of charge balancing strategy for energy storage system in islanded DC microgrid based on micro-tuning virtual resistance [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 107921.

[18] Mi Yang, Guo Jiahang, Fu Yang, et al. Accurate power allocation of multienergy storage island DC microgrid based on virtual power rating [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 261-270.

[19] Zeng Yuji, Zhang Qinjin, Liu Yancheng, et al. An improved distributed secondary control strategy for battery storage system in DC shipboard microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 4062-4075.

[20] 米阳, 陈鑫, 季亮, 等. 基于虚拟额定电流的直流微电网分布式储能单元精确电流分配研究[J]. 电网技术, 2020, 44(3): 823-835.
Mi Yang, Chen Xin, Ji Liang, et al. Accurate current sharing of distributed energy storage units in DC microgrid based on virtual rated current [J]. Power System Technology, 2020, 44(3): 823-835. (in Chinese)

[21] Zhou Jianyu, Shi Mengxuan, Chen Xia, et al. A cascaded distributed control framework in DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 205-214.

[22] Silva W W A G, Oliveira T R, Donoso-Garcia P F. An improved voltage-shifting strategy to attain concomitant accurate power sharing and voltage restoration in droop-controlled DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(2): 2396-2406.

[23] Chen Xia, Shi Mengxuan, Zhou Jianyu, et al. Distributed cooperative control of multiple hybrid energy storage

systems in a DC microgrid using consensus protocol [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1968-1979.

[24] Zhang Qinjin, Yu Heyang, Liu Yancheng, et al. Consensus-based state of charge dynamic equilibrium strategy in isolated DC microgrid with bus voltage regulation [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 54: 102830.

[25] Hoang K D, Lee H H. Accurate power sharing with balanced battery state of charge in distributed DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 1883-1893.

[26] Hoang K D, Lee H H. State of charge balancing of distributed batteries with different capacities in DC microgrid [C]// IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Singapore, 2020: 3703-3707.

[27] Kia S S, Van Scoy B, Cortes J, et al. Tutorial on dynamic average consensus: The problem, its applications, and the algorithms [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2019, 39(3): 40-72.

[28] Meng Lexuan, Dragicevic T, Guerrero J M, et al. Dynamic consensus algorithm based distributed global efficiency optimization of a droop controlled DC microgrid [C]// 2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Cavtat, Croatia, 2014: 1276-1283.

[29] 杨丘帆, 黄煜彬, 石梦璇, 等. 基于一致性算法的直流微电网多组光储单元分布式控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3919-3928.
Yang Qiufan, Huang Yubin, Shi Mengxuan, et al. Consensus based distributed control for multiple PV-battery storage units in DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3919-3928. (in Chinese)



代广贵

作者简介：

代广贵(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：直流微电网多储能的协调运行控制与保护。E-mail：2768492955@qq.com。

何晋(1965—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：分布式电源接入主电网的控制与保护。E-mail：hjmwh@sina.com。

吴富磊(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：主动配电网重构。E-mail：1347538324@qq.com。

张博嘉(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：分布式电源接入电网的低压穿越控制。E-mail：2103248120@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)