

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240109

考虑线路阻抗和储能容量的孤岛直流微电网自适应 SOC 均衡

刘鑫蕊¹, 曹翰林¹, 蓝良生², 李新宇¹, 王睿¹, 孙秋野¹

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 广西高校人工智能与信息处理重点实验室, 广西 河池 546300)

摘要: 由于可再生能源的间歇性特点, 储能单元广泛应用于孤岛直流微电网中。为保护储能单元, 防止过度充放, 需要对储能单元的荷电状态(state of charge, SOC)实行均衡控制, 然而各储能单元线路阻抗及容量存在的差异将对 SOC 均衡造成影响。针对这一问题, 提出了一种基于一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略。首先, 通过定义电流比例系数, 建立了各储能单元下垂系数与 SOC 之间的函数关系式, 实现了储能单元自适应 SOC 均衡, 并通过劳斯判据证明了系统的稳定性。其次, 将所提控制策略与其他文献控制方法进行对比, 并且考虑了 4 种不同工况对 SOC 均衡的影响。最后, 通过 Matlab/Simulink 进行了仿真分析, 验证了所提控制策略的有效性。

关键词: 直流微电网; 下垂控制; 一致性算法; SOC 均衡

Adaptive SOC equalization of an islanded DC microgrid considering line impedance and energy storage capacity

LIU Xinrui¹, CAO Hanlin¹, LAN Liangsheng², LI Xinyu¹, WANG Rui¹, SUN Qiuye¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Key Laboratory of AI and Information Processing (Hechi University), Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Hechi 546300, China)

Abstract: Because of the intermittent nature of renewable energy sources, energy storage units are widely used in islanded DC microgrids. To protect the energy storage units and prevent overcharging or deep discharging, it is necessary to implement balanced control of the state of charge (SOC) of the units. However, the differences in line impedance and capacity of each energy storage unit will affect the balance of the SOC. To address this issue, a SOC balancing control strategy for energy storage units based on a consensus algorithm and adaptive droop control is proposed. First, by defining the current proportional coefficients, a functional relationship between the droop coefficients of each energy storage unit and the SOC is established, achieving adaptive SOC balance of the energy storage units. The stability of the system is proved by the Routh criterion. Secondly, the proposed control strategy is compared with other control methods in the literature, and the impact of four different working conditions on SOC balance is considered. Finally, simulation analysis is carried out using Matlab/Simulink, verifying the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62173074).

Key words: DC microgrid; droop control; consensus algorithm; SOC balance

0 引言

微电网系统中存在较多的直流型分布式电源和

储能, 并且由于直流网络不存在相位、谐波和无功问题, 近年来对于直流微电网的研究逐渐升温^[1-5]。另一方面, 储能单元具有削峰填谷、提高电能质量、消纳新能源和作为备用电源等作用, 因此, 为了应对分布式新能源和负荷的双重功率随机波动, 需要配置足够容量的储能单元来稳定直流微电网的功率波动, 保持直流母线电压的稳定^[6-11]。当储能单元在荷电状态(state of charge, SOC)不一致的情况下运行时, 可能会导致储能单元过度充放电, 严重缩短储能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62173074); 国家重点研发计划项目资助(2018YFA0702200); 国家自然科学基金基础重点项目资助(U20A20190、U22B20115、U23B1018); 广西壮族自治区教育厅人工智能与信息处理重点实验室资助(河池学院)(2022GXZDSY011)

系统的使用寿命^[12-13], 因此, 需对各储能单元的输出电流和功率进行分配, 进而实现其 SOC 均衡控制。

目前储能单元的功率分配一般基于下垂控制, 但传统下垂控制方法只是按固定比例分配输出功率, 而没有考虑储能单元的 SOC, 无法实现 SOC 均衡。目前, 许多学者对于储能单元的 SOC 均衡提出了不同的方案。文献[14]通过计算得出主导储能单元并对其跟踪, 提出了一种自适应分级协调控制策略对输出功率进行分配, 使各储能单元 SOC 实现均衡。文献[15]在下垂控制中加入有关 SOC 的幂指数函数对下垂系数进行调整, 设置了主储能单元, 使其他储能单元追随其 SOC 变化, 实现输出功率及 SOC 的均衡。文献[16]针对混合储能系统中储能单元配置和工况的非对称性, 提出一种考虑其工作模式的参数评估方法和分层控制策略, 使系统内输出功率与 SOC 快速均衡。文献[17]将 SOC 纳入下垂系数的权重, 采用改进的双象限 SOC 加权下垂控制策略和分布式优化控制方法来平衡储能单元的能量。然而上述文献均未考虑各储能单元线路阻抗以及容量的差异, 忽略了对 SOC 均衡的影响。文献[18]根据储能单元容量、SOC 及储能单元最佳工作范围, 使各储能单元按比例输出固定功率, 虽然避免了储能单元过度充放电, 但是 SOC 均衡的时间过长。

基于上述研究内容, 在考虑储能单元线路阻抗和容量差异的情况下, 为实现储能单元 SOC 均衡, 本文提出了一种基于一致性算法及自适应下垂控制的能量管理策略。首先, 结合各储能单元实时 SOC, 通过一致性算法, 得出各储能单元实时理想均衡 SOC。其次, 结合各储能单元容量, 得出各储能单元容量系数, 并进一步得出平衡系数。根据得到的理想均衡 SOC 与平衡系数, 再结合各储能单元自身的 SOC 初始值, 可得出各储能单元的电流比例系数。最后根据电流比例系数, 确定自适应下垂控制中随电流比例系数变化的下垂系数, 并得出参考母线电压方程, 最终实现母线电压的稳定和各储能单元 SOC 的均衡。该策略具有以下优势:

1) 提出考虑各储能单元线路阻抗影响的自适应下垂控制, 实现各储能单元 SOC 均衡, 具有更好的实际应用性;

2) 构造容量系数以考虑储能单元容量差异对 SOC 均衡造成的影响;

3) 构造电流比例系数, 使各储能单元根据自身 SOC 调整下垂系数, 实现自适应控制。

1 直流微电网结构与控制方式

本文研究的孤岛直流微电网由光伏系统

(photovoltaic, PV)、燃气轮机(gas turbine, GT)、直流负载和储能单元组成, 多个储能单元之间通过通信网络进行信息传递, 如图 1 所示。

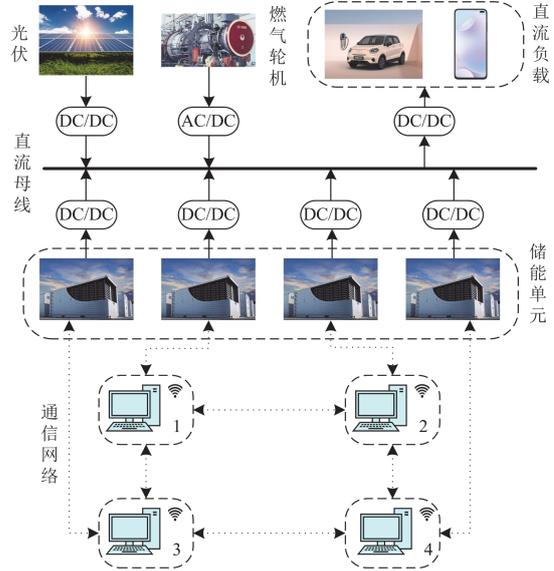


图 1 孤岛直流微电网结构

Fig. 1 Isolated DC microgrid structure

当处于夜晚或阴雨天时, PV 难以保证电能的供应, 若此时储能单元剩余电量也无法提供足够的电能, 将通过 GT 来补充系统所需的电能。当 PV 与储能单元能够提供足够的电能时, 为减少碳排放, 将关闭 GT。因此, 本文构造的孤岛直流微电网系统电流供需关系如图 2 所示。

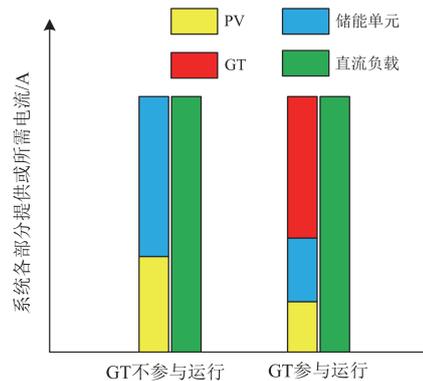


图 2 孤岛直流微电网系统电流供需关系

Fig. 2 Current supply and demand relationship of isolated DC microgrid system

1.1 一致性算法

多智能体一致性算法^[19]依靠图论进行分析, 首先根据多智能体的通信拓扑表示各多智能体之间的关系。一般采用 $G = \langle V, E \rangle$ 表示, 将各独立的智能体视为节点, 其中 V 表示节点的集合, $E \in V \times V$ 表

示节点边的集合。邻接矩阵 $A = (a_{ij})$ 表示各节点间的通信关系, 当节点 i 和 j 有通信时, $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$, 对角线元素均为 0。度矩阵 $D = \text{diag}\{d_{11}, d_{22}, \dots, d_{nn}\}$, 各元素表示各节点与其有通信关系节点的总数和, 拉普拉斯矩阵 $L = D - A$ 。

本文将各储能单元看作智能体, 为实现各储能单元 SOC 的均衡, 可表示为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |S_{oci}(t) - S_{ocj}(t)| = 0 \quad (1)$$

式中, $S_{oci}(t)$ 和 $S_{ocj}(t)$ 分别表示第 i 个和第 j 个储能单元在 t 时刻的 SOC。

各智能体输入变量为

$$u_i(t) = -\sum_{j=1}^n a_{ij} (S_{oci}(t) - S_{ocj}(t)) \quad (2)$$

式中: $u_i(t)$ 为第 i 个储能单元 t 时刻的控制输入变量; n 为智能体总个数。该式也可以写为

$$u_i(t) = -Lx(t) \quad (3)$$

式中, $x(t) = [S_{oc1}(t) \ S_{oc2}(t) \ \dots \ S_{ocn}(t)]^T$ 。

最终, 经过多次迭代, 得到各储能单元 t 时刻实时理想均衡后的 SOC, 记为 $\overline{S_{oc}}(t)$ 。

1.2 下垂控制及储能 SOC 均衡分析

将传统“电压-电流”下垂控制用于孤岛直流微电网储能单元, 表达式为

$$U_{dci}(t) = U^*(t) - k_i(t)I_{dci}(t) \quad (4)$$

式中: $U^*(t)$ 在数学概念上为下垂曲线的纵截距, 此处为 t 时刻待设计的参考电压; $U_{dci}(t)$ 、 $I_{dci}(t)$ 、 $k_i(t)$ 分别为第 i 个储能单元 t 时刻的输出电压、电流和下垂系数。

各储能单元与母线之间存在线路阻抗, 因此孤岛直流微电网储能单元的简化模型如图 3 所示。

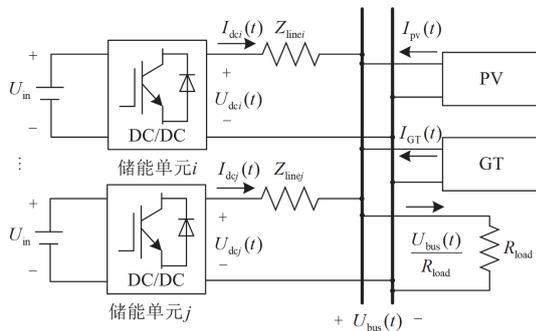


图 3 孤岛直流微电网系统简化模型

Fig. 3 Simplified model of islanded DC microgrid system

根据图 3 可得

$$U_{dci}(t) = U_{bus}(t) + I_{dci}(t)Z_{linei} \quad (5)$$

式中: $U_{bus}(t)$ 为 t 时刻母线电压; Z_{linei} 为第 i 个储能单元的线路阻抗。

根据式(4)和式(5), 可得考虑线路阻抗影响的传统下垂控制下母线电压的表达式为

$$U_{bus}(t) = U^*(t) - I_{dci}(t)(Z_{linei} + k_i(t)) \quad (6)$$

设储能单元最佳工作范围为 $20\% \leq S_{oc} \leq 80\%$ [20], 为了准确获取各储能单元的 SOC, 可选择库仑计数法 [21] 估计 SOC, 如式(7)所示。

$$S_{oci}(t) = S_{oci}(0) - \frac{\eta \int_0^t I_{dci}(t) dt}{C_{Ahi}} \quad (7)$$

式中: $S_{oci}(0)$ 为第 i 个储能单元的初始 SOC; C_{Ahi} 为第 i 个储能单元的容量; η 为储能单元输出电压与蓄电池端电压的比值。

对式(7)进行求导, 可得式(8)。

$$S'_{oci}(t) = -\frac{\eta I_{dci}(t)}{C_{Ahi}} \quad (8)$$

式中, $S'_{oci}(t)$ 表示第 i 个储能单元 t 时刻 SOC 的变化率。

结合式(4)、式(5)和式(8), 可得式(9)。

$$S'_{oci}(t) = -\frac{\eta(U^*(t) - U_{bus}(t))}{C_{Ahi}(Z_{linei} + k_i(t))} \quad (9)$$

根据式(9), 进一步可得出第 i 个和第 j 个储能单元 t 时刻 SOC 的变化率比值为

$$\frac{S'_{oci}(t)}{S'_{ocj}(t)} = \frac{C_{Ahi}(Z_{linej} + k_j(t))}{C_{Ahi}(Z_{linei} + k_i(t))} \quad (10)$$

式中: $S'_{ocj}(t)$ 为第 j 个储能单元 t 时刻 SOC 变化率; $k_j(t)$ 为第 j 个储能单元 t 时刻的下垂系数; Z_{linej} 为第 j 个储能单元的线路阻抗; C_{Ahi} 为第 j 个储能单元的容量。

根据式(10)可知, 不同储能单元的 SOC 变化率比值主要由各储能单元容量、线路阻抗和下垂系数决定。因此, 为解决线路阻抗以及各储能单元容量差异对储能单元 SOC 均衡的影响, 本文提出了一种自适应下垂控制策略, 通过自适应调节下垂系数来实现各储能单元 SOC 的均衡。

2 自适应下垂控制

根据基尔霍夫定律, 由图 3 可以看出, 孤岛直流微电网系统满足式(11)所示电流平衡方程。

$$I_{GT}(t) + I_{pv}(t) + \sum I_{dci}(t) = \frac{U_{bus}(t)}{R_{load}} \quad (11)$$

式中: $I_{pv}(t)$ 和 $I_{GT}(t)$ 分别为 t 时刻 PV 和 GT 的输出

电流; 本文仅考虑电阻性负载, R_{load} 为孤岛直流微电网的直流负载。

t 时刻 PV 的输出功率 $P_{pv}(t)$ 可表示为

$$P_{pv}(t) = I_{pv}(t)U_{bus}(t) \quad (12)$$

结合式(4)和式(5), t 时刻系统母线电压、待设计的参考电压、各储能单元输出电流和下垂系数的关系如图 4 所示。

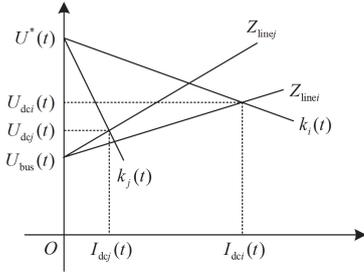


图 4 储能单元各参数关系

Fig. 4 Relationship between parameters of energy storage unit

由图 4 可以看出, 为满足母线电压的稳定, 由于线路阻抗的影响, 第 i 个和第 j 个储能单元的输出电流与输出电压存在差异。线路阻抗 Z_{linei} 一般无法改变, 为实现储能单元 SOC 的均衡, 可通过调整下垂系数来实现。下垂系数可表示为

$$k_i(t) = k_0 + k_{gr}(t) \quad (13)$$

式中: k_0 为初始下垂系数; $k_{gr}(t)$ 为第 i 个储能单元 t 时刻的修正系数。

为了均衡各储能单元 SOC, 以放电状态为例, SOC 高的储能单元应当放电快, SOC 低的储能单元应当放电慢。即 SOC 值越大, 储能单元输出电流越大, 反之亦然。考虑到各储能单元的容量可能不一样, 因此构造容量系数 c_i 为

$$c_i = \frac{C_{Ahi}}{\sum_{i=1}^n C_{Ahi}} \quad (14)$$

结合一致性算法得出的各储能单元 t 时刻实时理想均衡后的 SOC、实时 SOC 以及式(14), 构造电流比例系数如式(15)所示。

$$h_i(t) = \begin{cases} p_i(t) + 100q_i(S_{oc}(t) - \overline{S_{oc}(t)}) & I_{dci}(t) \geq 0 \\ p_i(t) - 100q_i(S_{oc}(t) - \overline{S_{oc}(t)}) & I_{dci}(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $h_i(t)$ 和 $p_i(t)$ 分别为第 i 个储能单元 t 时刻的电流比例系数和平衡系数; q_i 为第 i 个储能单元的调节系数。

电流比例系数反映的是各储能单元输出电流占总输出电流的比例, 因此电流比例系数应满足式(16)所示的关系。

$$h_i(t) = \frac{I_{dci}(t)}{\frac{U_{bus}^*}{R_{load}} - I_{GT}(t) - I_{pv}(t)} \quad (16)$$

式中, U_{bus}^* 为额定母线电压。

第 i 个储能单元 t 时刻的平衡系数定义为

$$p_i(t) = c_i \frac{\frac{U_{bus}^*}{R_{load}} - P_{pv}(t) - I_{GT}(t)U_{bus}(t)}{\frac{U_{bus}^*}{R_{load}}} \quad (17)$$

为防止各储能单元形成环流, 电流比例系数应大于等于零, 即满足 $h_i(t) \geq 0$, 调节系数 q_i 的取值范围为

$$0 \leq q_i \leq \frac{p_i(0)}{100 \left| \overline{S_{oc}(0)} - S_{oci}(0) \right|_{\max}} \quad (18)$$

式中: $p_i(0)$ 为第 i 个储能单元初始平衡系数; $\overline{S_{oc}(0)}$ 为各储能单元初始理想均衡 SOC。

综上, 便可根据各储能单元 t 时刻的 SOC 得出电流比例系数。

结合式(16), 第 i 个和第 j 个储能单元 t 时刻输出电流满足式(19)所示的关系。

$$I_{dcj}(t) = \frac{h_j(t)}{h_i(t)} I_{dci}(t) \quad (19)$$

式中: $I_{dcj}(t)$ 为第 j 个储能单元 t 时刻的输出电流; $h_j(t)$ 为第 j 个储能单元 t 时刻的电流比例系数。

结合式(6), 可得

$$I_{dci}(t)Z_{linei} + k_i(t)I_{dci}(t) = I_{dcj}(t)Z_{linej} + k_j(t)I_{dcj}(t) \quad (20)$$

将式(19)代入式(20)中, 可得

$$k_j(t) = \frac{h_i(t)}{h_j(t)} (k_i(t) + Z_{linei}) - Z_{linej} \quad (21)$$

结合式(6)和式(16), 可得 t 时刻待设计的参考电压 $U^*(t)$ 为

$$I_{dc}^z(t) = \frac{U_{bus}^*}{R_{load}} - I_{GT}(t) - I_{pv}(t) \quad (22)$$

$$U^*(t) = U_{bus}(t) + h_i(t)I_{dc}^z(t)(Z_{linei} + k_i(t)) \quad (23)$$

式中, $I_{dc}^z(t)$ 为 t 时刻总储能单元输出电流。

设置 SOC 最大的储能单元为参考储能单元, 这里假设第一个储能单元为参考储能单元, 令 $k_1(t) = k_0$, 即 $k_{g1}(t) = 0$, 由此可得各储能单元 t 时刻的下垂系数为

$$k_i(t) = \frac{h_1(t)}{h_i(t)} (k_0 + Z_{line1}) - Z_{linei} \quad (24)$$

结合式(13)和式(24), 可得 t 时刻第 i 个储能单

元的修正系数 $k_{gi}(t)$ 为

$$k_{gi}(t) = \frac{h_i(t)}{h_i(t)}(k_0 + Z_{line1}) - Z_{linei} - k_0 \quad (25)$$

将式(15)代入式(25)中, 可得

$$k_{gi}(t) = \begin{cases} \frac{p_1(t) + 100q_1(S_{oc1}(t) - \bar{S}_{oc}(t))}{p_i(t) + 100q_i(S_{oci}(t) - \bar{S}_{oc}(t))} \times (k_0 + Z_{line1}) - Z_{linei} - k_0 & I_{dci}(t) > 0 \\ \frac{p_1(t) - 100q_1(S_{oc1}(t) - \bar{S}_{oc}(t))}{p_i(t) - 100q_i(S_{oci}(t) - \bar{S}_{oc}(t))} \times (k_0 + Z_{line1}) - Z_{linei} - k_0 & I_{dci}(t) < 0 \end{cases} \quad (26)$$

综上, 便可根据各储能单元的 SOC 来调整修正系数进而自适应调节下垂系数, 以此实现各储能单元的 SOC 均衡。

为了保证母线电压的稳定, 加入 t 时刻的电压补偿 $\Delta U(t)$, 即有

$$\Delta U(t) = U_{bus}^* - U_{bus}(t) \quad (27)$$

因此, t 时刻的参考母线电压 $U_{bus}^{ref}(t)$ 以及第 i 个储能单元参考输出电压 $U_{dci}^{ref}(t)$ 分别为

$$U_{bus}^{ref}(t) = U^*(t) - I_{dci}(t)(k_i(t) + Z_{linei}) + \Delta U(t) \quad (28)$$

$$U_{dci}^{ref}(t) = U^*(t) - I_{dci}(t)k_i(t) + \Delta U(t) \quad (29)$$

基于一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略的流程如图 5 所示。

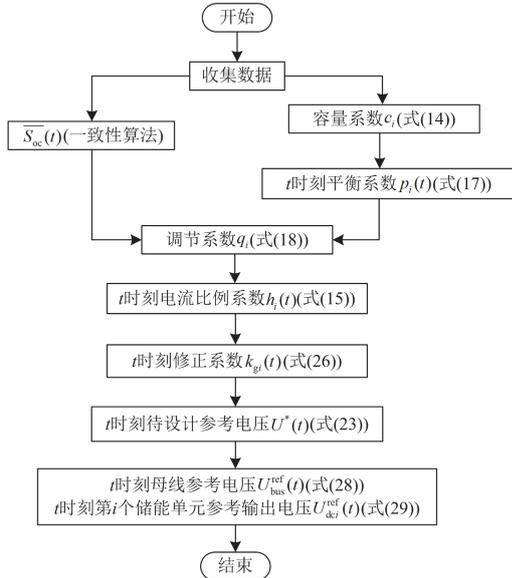


图 5 基于一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略流程图

Fig. 5 Flow chart of the SOC balancing control strategy for energy storage units based on consensus algorithm and adaptive droop control

3 稳定性分析

对本文提出的基于一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略进行稳定性分析。该控制策略流程框图如图 6 所示。

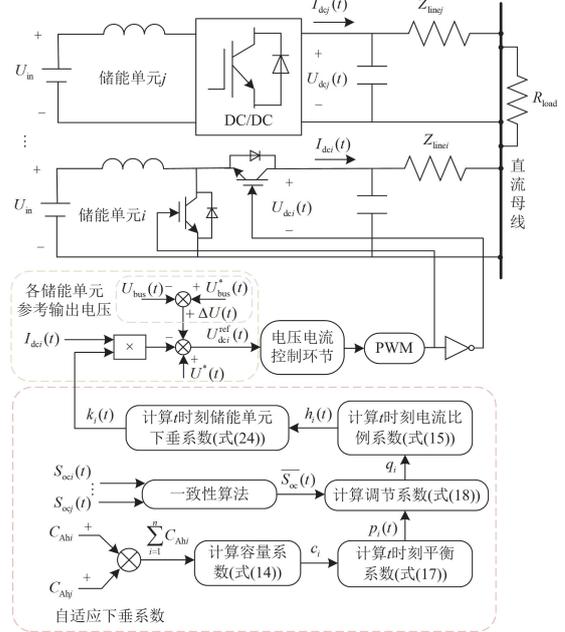


图 6 控制策略流程图

Fig. 6 Control strategy flow diagram

这里以两组储能单元、线路阻抗及负载组成的系统为例, 对所提的控制策略进行稳定性分析, 储能单元控制结构简化图如图 7 所示, 其中输出电压闭环传递函数 $G_c(s)$ 可近似为 1, ω_c 为电流低通滤波环节的截止频率。

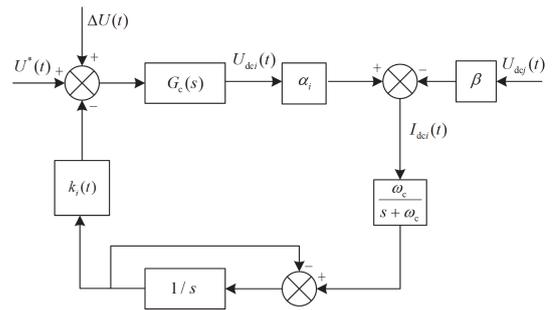


图 7 储能单元控制结构简化图

Fig. 7 Simplified diagram of energy storage unit control structure

$$\alpha_i = \frac{Z_{linej} + R_{load}}{Z_{linei} Z_{linej} + Z_{linei} R_{load} + Z_{linej} R_{load}} \quad (30)$$

$$\alpha_j = \frac{Z_{linei} + R_{load}}{Z_{linei} Z_{linej} + Z_{linei} R_{load} + Z_{linej} R_{load}} \quad (31)$$

$$\beta = \frac{R_{load}}{Z_{linei}Z_{linej} + Z_{linei}R_{load} + Z_{linej}R_{load}} \quad (32)$$

$$U_{dci}(t) = U^*(t) - k_i(t) \frac{\omega_c(\alpha_i U_{dci}(t) - \beta U_{dcj}(t))}{(s+1)(s+\omega_c)} + \Delta U(t) \quad (33)$$

$$U_{dcj}(t) = U^*(t) - k_j(t) \frac{\omega_c(\alpha_j U_{dcj}(t) - \beta U_{dci}(t))}{(s+1)(s+\omega_c)} + \Delta U(t) \quad (34)$$

式中, α_i 、 α_j 和 β 均为系数。

联立式(30)一式(34), 可得系统的特征方程为

$$As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E = 0 \quad (35)$$

其中:

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = 2(1 + \omega_c) \\ C = \omega_c^2 + 4\omega_c + k_j(t)\omega_c\alpha_j + 1 \\ D = 2\omega_c^2 + 2\omega_c + k_j(t)\omega_c\alpha_j(1 + \omega_c) \\ E = \omega_c^2(1 - k_i^2(t)\alpha_i\beta) + k_j(t)\omega_c^2(\alpha_j - k_i(t)\beta^2) \end{cases} \quad (36)$$

显然, 系数 A 、 B 、 C 、 D 均大于零。以第 i 个储能单元为参考储能单元, 令 $k_i(t)=1$, 根据式(30)一式(32)可知, $0 < \beta < \alpha_j < \alpha_i < 1$, 可得系数 E 也大于 0, 根据劳斯判据计算可知, 系统稳定。

4 仿真分析

本文采用了 4 个储能单元、PV、GT 和直流负载组成孤岛直流微电网系统, 通过 Matlab/Simulink 软件验证本文控制方法的有效性。由于本文仿真时间较短, PV 与储能单元能够为直流负载提供足够的电能, 因此在仿真中 GT 不参与运行。各储能单元参数如表 1 所示。

4.1 线路阻抗误差对系统的影响

线路阻抗的误差一般在 3% 以内^[22], 为检验所提控制策略在线路阻抗测量存在误差时系统的稳定性及所提控制策略的有效性, 进行多组仿真实验分析, 结果如表 2 所示。

其中, $|U_p|$ 为系统母线电压与参考母线电压之差的绝对值, S_p 为储能单元 SOC 最大偏差值。从表 2 可以看出, 在 3% 的误差范围内, 系统电压偏差小于系统允许偏移的最大电压, 储能单元的 SOC 偏差值均小于等于 0.03%, 能实现良好的均衡效果。上述数据表明所提控制策略能够应对线路阻抗存在误差的情况, 实用性强。同时, 文献[23]中采用的控制方法的 SOC 最小偏差值为 0.18%, 本文采用的控制方法使得 SOC 偏差值小于前者, 均衡效果更好。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
额定母线电压 U_{bus}^*/V	800
储能单元 1 线路阻抗 Z_{line1}/Ω	1
储能单元 2 线路阻抗 Z_{line2}/Ω	1.2
储能单元 3 线路阻抗 Z_{line3}/Ω	1.3
储能单元 4 线路阻抗 Z_{line4}/Ω	1.4
直流负载 R_{load}/Ω	40
储能单元容量 C_{Ah}/Ah	1
控制采样时间 t_c/s	5×10^{-6}
储能单元 1 初始 SOC/%	60
储能单元 2 初始 SOC/%	59
储能单元 3 初始 SOC/%	58
储能单元 4 初始 SOC/%	57
初始下垂系数 k_0/Ω	1
允许最大偏差电压 $\Delta U_{bus}/V$	40

表 2 线路阻抗误差分析

Table 2 Analysis of line impedance error

线路阻抗误差/%	$ U_p /V$	$S_p/\%$
3	14.2	0.03
2	9.7	0.03
1	4.8	0.02
0	0.2	0.01
-1	5	0.01
-2	9.8	0.01
-3	14.9	0.01

4.2 调节系数的选取

调节系数的取值应满足式(18)的要求, 各储能单元初始状态如表 1 所示, 以储能单元 1 和储能单元 4 的 SOC 差值 $\Delta S_{1,4}$ 为例, 展现不同调节系数取值下的 SOC 均衡时间, 如图 8 所示。

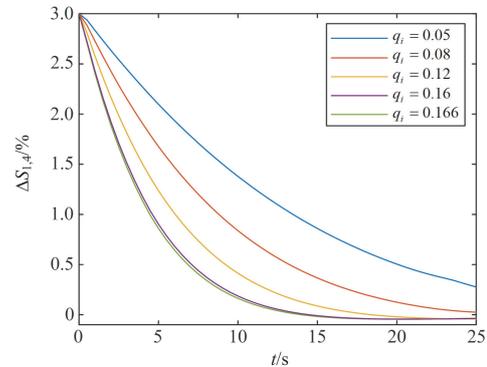


图 8 调节系数取值对 SOC 均衡时间的影响

Fig. 8 Influence of adjustment coefficient values on SOC equilibrium time

此时调节系数的取值范围为 $0 \leq q_i \leq 1/6$ ，从图 8 可以看出，在其他条件不变的情况下，随着调节系数 q_i 的增大，储能单元 SOC 均衡的时间越来越短。当 q_i 趋近于取值范围边界时，均衡时间的减小不再明显。因此，为保证系统的高效运行，在满足取值范围的情况下，调节系数取最大值。

4.3 孤岛直流微电网线路阻抗差异及储能单元容量差异的影响

本文提出的控制方法在线路阻抗和储能单元容量存在差异时依然能够实现储能单元 SOC 的均衡，现对不同文献中的控制方法与本文所提控制策略进行仿真分析。

4.3.1 线路阻抗差异

将各储能单元初始 SOC 设为 60%，初始线路阻抗均为 1Ω 。 $t = 5 \text{ s}$ 时，将储能单元 2、3、4 的线路阻抗由 1Ω 分别提高到 1.2Ω 、 1.3Ω 和 1.4Ω 。孤岛直流微电网系统在本文与文献[16]所提控制方法下，各状态如图 9 所示。

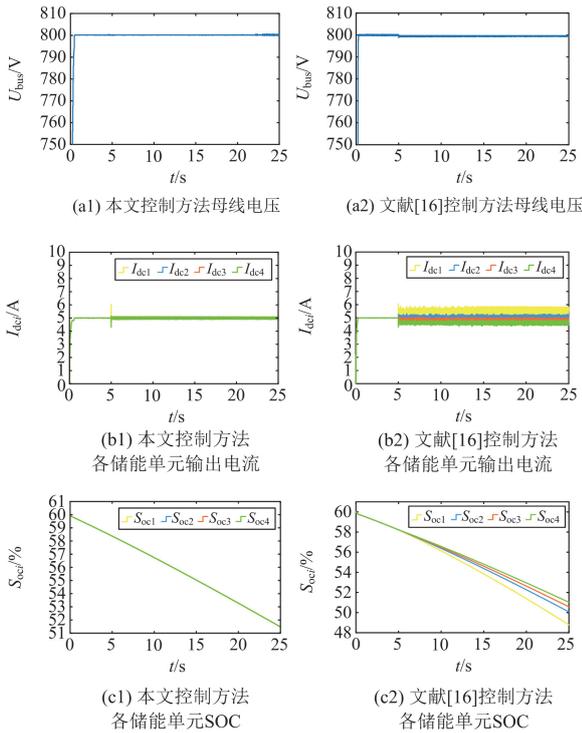


图 9 在线路阻抗不同的情况下，本文与文献[16]控制方法下的系统各状态

Fig. 9 In the case of different line impedance, the system state under the control methods of this paper and reference [16]

从图 9 可以看出，在 $t = 5 \text{ s}$ 之前，两种控制方法都能够维持各储能单元 SOC 的均衡，在 $t = 5 \text{ s}$ 之后，线路阻抗产生差异，本文所提出的控制策略依

然可以实现各储能单元 SOC 的均衡。然而文献[16]所提出的方法使得各储能单元 SOC 差距逐渐增大，25 s 时最大 SOC 偏差已达 1.3275%，远大于本文控制方法下的偏差值。

4.3.2 储能单元容量差异

令储能单元 1、2、3 和 4 容量分别为 1 Ah、1.2 Ah、1.4 Ah 和 1.6 Ah。孤岛直流微电网系统在本文与文献[17]控制方法下各状态如图 10 所示。

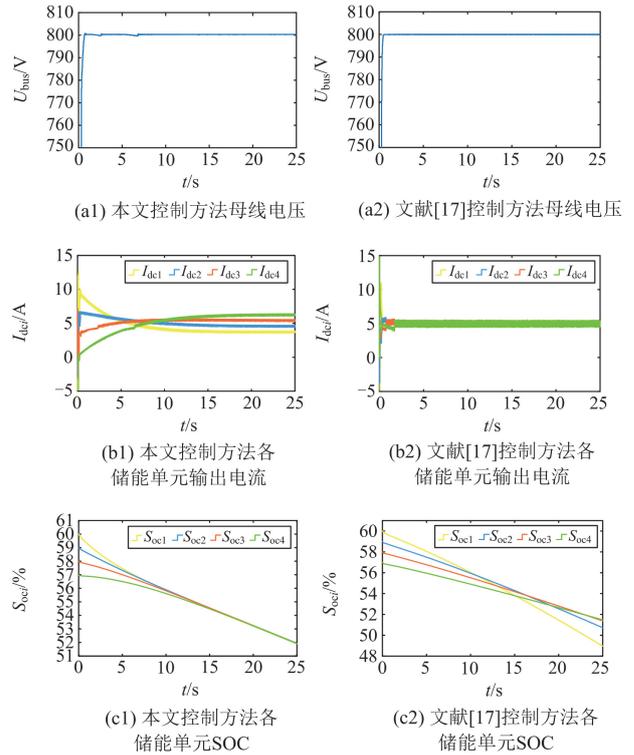


图 10 在储能单元容量不同的情况下，本文与文献[17]控制方法下的系统各状态

Fig. 10 When the capacity of energy storage unit is different, the system state under the control methods of this paper and reference [17]

从图 10 可以看出，在文献[17]的控制方法下，系统电压虽能稳定，并保证电流的均匀分配，但是无法实现储能单元 SOC 的均衡。在 25 s 时，文献[17]控制方法最大 SOC 偏差达到 1.6825%，本文所提出的控制方法最大 SOC 偏差仅 0.0225%，远小于前者。因此，当储能单元容量存在差异时，本文所提出的控制方法依然能够实现储能单元 SOC 的均衡。

孤岛直流微电网系统在本文与文献[18]控制方法下各状态如图 11 所示。

为防止储能单元过度充放，SOC 均衡后，系统可监测一个储能单元的 SOC 即可，如果均衡时间过长，将增加系统监测装置的使用，增加系统成本。

从图 11 中可以看出, 文献[18]虽然考虑了储能单元容量差异的影响, 根据储能单元容量的比例以及各储能单元最佳工作范围分配输出电流, 但是此方法 SOC 均衡时间过长, 在 25 s 时 SOC 偏差依然较大, 本文所提控制方法在 15 s 左右时已完成均衡。相比之下, 本文所提控制方法均衡速度更快, 可以节省系统的成本。

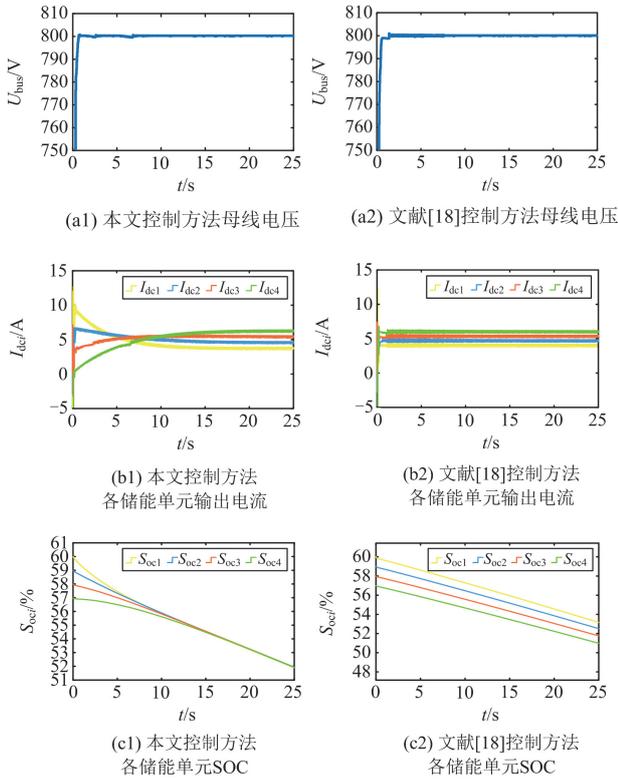


图 11 在储能单元容量不同的情况下, 本文与文献[18]控制方法下的系统各状态

Fig. 11 When the capacity of energy storage unit is different, the system state under the control methods of this paper and reference [18]

通过上述对比仿真实验, 本文所提出的控制方法在实际应用时更具有优势。

同时, 采用 4 组不同的储能单元容量之比进行分析, 如表 3 所示。不同容量之比的情况下, 其他参数设置如表 1 所示。各储能单元 SOC 均衡后的输出电流及 SOC 偏移值如表 4 所示。

从表 4 可以看出, 为实现各储能单元的 SOC 均衡, 由于储能单元容量的差异, 均衡后的各储能单元的输出电流随着容量的变化而变化, 输出电流之比也近似等于储能单元容量之比。各储能单元的 SOC 偏差值均小于 0.07%, 展现出了本文所提控制策略在应对储能单元容量差异时的普适性。

表 3 4 组储能单元容量情况

Table 3 Capacity of 4 groups of energy storage units

组别	储能单元 1	储能单元 2	储能单元 3	储能单元 4
	容量	容量	容量	容量
1	1	1.2	1.4	1.6
2	1.4	1.6	1.2	1
3	1.6	1.4	1	1.2
4	1.2	1	1.6	1.4

表 4 4 组储能单元 SOC 均衡后输出电流及 SOC 偏移值

Table 4 Output current and SOC offset value after SOC equalization of four groups of energy storage units

组别	储能单元 1	储能单元 2	储能单元 3	储能单元 4	$S_p/\%$
	输出电流	输出电流	输出电流	输出电流	
	I_{dc1}/A	I_{dc2}/A	I_{dc3}/A	I_{dc4}/A	
1	3.688	4.606	5.414	6.293	0.04
2	5.509	6.114	4.66	3.716	0.06
3	6.319	5.388	3.734	4.557	0.07
4	4.571	3.739	6.248	5.44	0.06

4.4 孤岛直流微电网不同工况下一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略

4.4.1 直流负载变化

本节考虑直流负载变化对系统 SOC 均衡的影响, 系统各状态如图 12 所示。

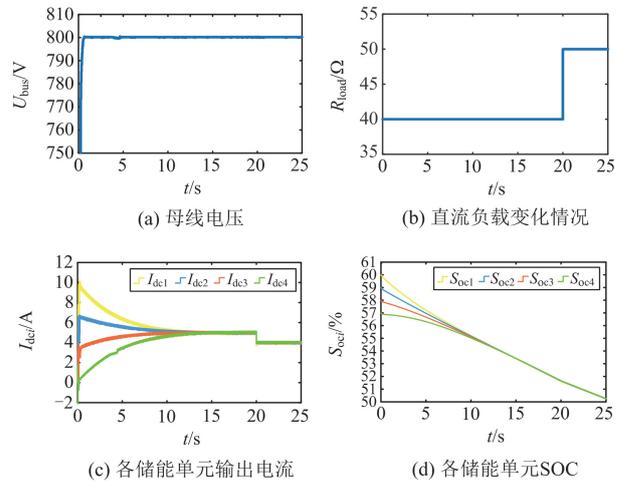


图 12 负载变化下的系统状态

Fig. 12 System state under load changes

从图 12 可以看出, 在母线电压达到稳定后, 各储能单元输出电流逐渐均衡, 在大约 $t=18$ s 时, 输出电流达到均衡, 同时各储能单元 SOC 也达到均衡。在 $t=20$ s 时, 负载由 40Ω 升高为 50Ω , 输出电流和各储能单元 SOC 继续保持均衡, 但是电流减小, 各储能单元放电速度变慢, 母线电压在 $t=20$ s

时会有一个短暂的增幅后迅速回落，总体保持在稳定范围之内。因此本文提出的控制策略在直流负载变化时，依然具有良好的稳定性和有效性。

4.4.2 光照强度变化

为模拟光照强度随时间变化对系统储能单元 SOC 均衡的影响，孤岛直流微电网系统内 PV 的输出功率如图 13(b)所示。在光照强度变化下，系统各状态如图 13(a)、图 13(c)和图 13(d)所示。

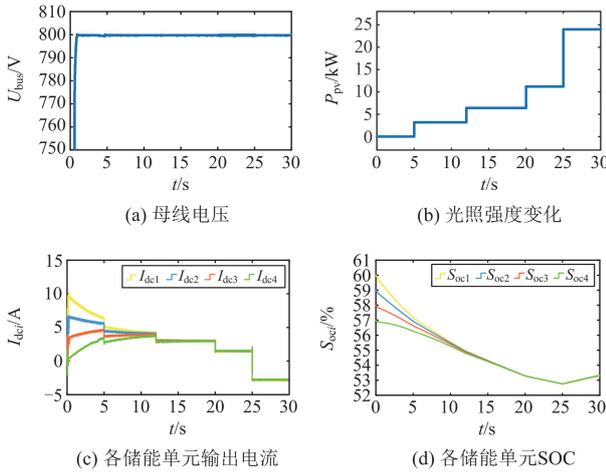


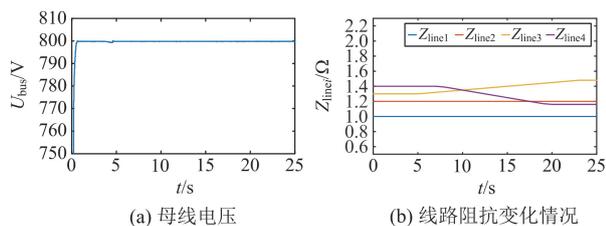
图 13 光照强度变化下的系统状态

Fig. 13 System state under changes in light intensity

从图 13 可以看出，初始 PV 输出功率 $P_{pv} = 0$ ，当 $t = 5$ s 时，提高 PV 输出功率至 3.2 kW，各储能单元输出电流减小，放电速度减缓。当 $t = 12$ s 时，提高 PV 输出功率至 6.4 kW，各储能单元输出电流继续减小，此时各储能单元 SOC 已经趋近于均衡。当 $t = 20$ s 时，提高 PV 输出功率至 11.2 kW，此时各储能单元 SOC 已经平衡，输出电流相同。当 $t = 25$ s 时，PV 输出功率提高至 24 kW，PV 输出足够供给负载，剩余电能为各储能单元充电，母线电压始终保持在稳定范围内。可见，所提出的控制策略在光照强度变化时，依然具有良好的稳定性和有效性。

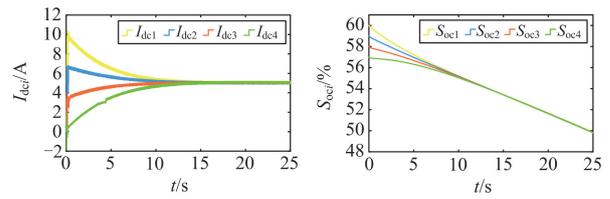
4.4.3 线路阻抗变化

为了更好地反映本文所提控制策略的实际应用性，模拟实际中可能存在的温度、老化等因素对线路阻抗的影响，如图 14(b)所示，系统各状态如图 14(a)、图 14(c)和图 14(d)所示。



(a) 母线电压

(b) 线路阻抗变化情况



(c) 各储能单元输出电流

(d) 各储能单元 SOC

图 14 线路阻抗变化下的系统状态

Fig. 14 System state under changes in line impedance

从图 14 可以看出，从 $t = 5$ s 开始， Z_{line3} 的值逐渐从 1.3Ω 增至 1.48Ω 。从 $t = 7$ s 开始， Z_{line4} 的值逐渐从 1.4Ω 减至 1.16Ω 。系统大约在 15 s 实现 SOC 均衡，在线路阻抗变化后，母线电压略微波动后迅速恢复稳定。各储能单元输出电流在线路阻抗变化时并未发生明显波动，因此，在线路阻抗变化时，本文提出的控制方法依然能够实现各储能单元 SOC 均衡，具有良好的实际应用性。

4.4.4 有储能单元提前退出运行

为了防止储能过度充放电，必须将 SOC 值超出最佳工作范围的储能单元退出运行。假设各储能单元的初始 SOC 值为 27%、26%、25%和 20.2%，其他参数如表 1 所示。刚开始 4 个储能单元同时供电，在 SOC 均衡过程中，储能单元 4 的 SOC 降到 20%，退出运行，由其他 3 个储能单元继续供电。系统各状态如图 15 所示。

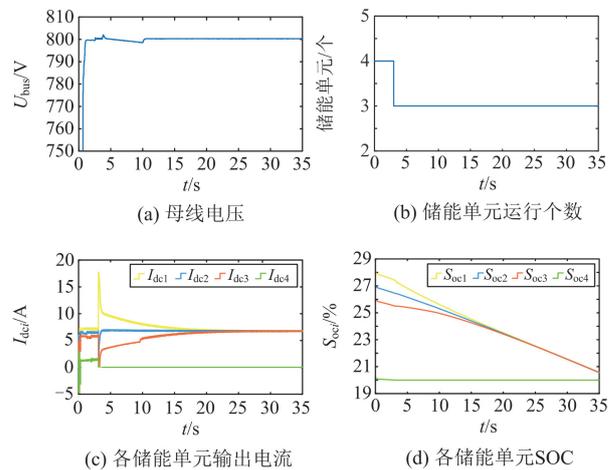


图 15 有储能单元提前退出的系统状态

Fig. 15 System state with early exit of energy storage units

从图 15 可以看出，当母线电压达到稳定后，约在 $t = 3$ s 时，储能单元 4 退出运行，母线电压先上升后下降，最后恢复至母线参考电压附近，整体保持稳定。剩余 3 个储能单元与 PV 继续供电，输出电流大小逐渐趋于一致，SOC 逐渐均衡。因此，本

文提出的控制方法在有储能单元退出运行时依然能够保证系统稳定运行, 并实现储能单元 SOC 的均衡。

5 结论

本文考虑各储能单元线路阻抗与容量差异的影响, 提出了一种基于一致性算法及自适应下垂控制的储能单元 SOC 均衡控制策略。通过与其他文献中的控制方法相比, 本文所提出的控制方法在线路阻抗、储能单元容量存在差异以及不同的工况下, 依然可以实现各储能单元 SOC 的均衡, 并保证孤岛直流微电网系统母线电压的稳定。各储能单元 SOC 均衡后的最大偏差低于 0.1%, 取得了良好的均衡效果。系统母线电压和各储能单元的最大偏差均小于 5%, 系统能够可靠并稳定运行。

综上所述, 本文针对各储能单元线路阻抗与容量差异提出的控制方法能够实现各储能单元 SOC 的均衡, 验证了该控制方法的可靠性。同时, 不同工况下该控制方法也能够实现储能单元 SOC 的均衡, 验证了该方法的稳定性与普适性。

参考文献

- [1] 宁显华, 潘欢, 李峰, 等. 基于线路电阻观测值的直流微电网改进下垂控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 42-51.
LING Xianhua, PAN Huan, LI Feng, et al. An improved droop control strategy for a DC microgrid based on line resistance observations[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 42-51.
- [2] 代广贵, 何晋, 张博嘉. 考虑不同容量的储能 SOC 均衡与功率分配策略[J]. 电力建设, 2023, 44(6): 12-22.
DAI Guanggui, HE Jin, ZHANG Bojia. SOC balancing and power distribution strategies considering different capacities of energy storage[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(6): 12-22.
- [3] 张纯江, 暴云飞, 孟宪慧, 等. 直流微网储能 DC/DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 12-20.
ZHANG Chunjiang, BAO Yunfei, MENG Xianhui, et al. Adaptive virtual DC machine control for a DC microgrid energy storage DC/DC converter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 12-20.
- [4] 张琳, 谢洪途, 赵路路, 等. 混合能源直流微电网能源优化管控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 141-151.
ZHANG Lin, XIE Hongtu, ZHAO Lulu, et al. Energy optimization and control strategy for a hybrid energy DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 141-151.
- [5] 黄崇鑫, 陈振宇, 邓松. 含储能双母线直流微电网电压和功率协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 141-149.
HUANG Chongxin, CHEN Zhenyu, DENG Song. Voltage-power coordinated control of a dual-bus DC microgrid with energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 141-149.
- [6] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 15-24.
LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 15-24.
- [7] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [8] LI J, XIONG R, YANG Q, et al. Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system[J]. Applied Energy, 2017, 201(7): 257-269.
- [9] TRINH P H, CHUNG I Y. Optimal control strategy for distributed energy resources in a DC microgrid for energy cost reduction and voltage regulation[J]. Energies, 2021, 14(4): 992-994.
- [10] MORSTYN T, SAVKIN A V, HREDZAK B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4735-4743.
- [11] 汤匀, 岳芳, 王莉晓, 等. 全球新型储能技术发展态势分析[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(2): 228-240.
TANG Yun, YUE Fang, WANG Lixiao, et al. International development trend analysis of new energy storage technologies[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(2): 228-240.
- [12] ZHI N, DING K, DU L, et al. An SOC-based virtual DC machine control for distributed storage systems in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1411-1420.
- [13] HOU N, LI Y. Communication-free power management strategy for the multiple DAB-based energy storage system in islanded DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4828-4838.

- [14] 米阳, 纪宏澎, 何星璐, 等. 多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1980-1989, 2213.
MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1980-1989, 2213.
- [15] 张良, 闫凯宏, 冷祥彪, 等. 基于 SOC 下垂控制的独立直流微电网协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 87-97.
ZHANG Liang, YAN Kaihong, LENG Xiangbiao, et al. Research on coordinated control strategy of an autonomous DC microgrid based on SOC droop control[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 87-97.
- [16] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 61-69.
LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 61-69.
- [17] HUANG B, ZHENG S, WANG R, et al. Distributed optimal control of DC microgrid considering balance of charge state[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(3): 2162-2174.
- [18] BHOSALE R T, GUPTA R, AGARWAL V. A novel control strategy to achieve SOC balancing for batteries in a DC microgrid without droop control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4): 4196-4206.
- [19] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [20] 贺悝, 谭庄熙, 李欣然, 等. 考虑荷电状态一致性的分布式储能电站一次调频控制策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 870-880.
HE Li, TAN Zhuangxi, LI Xinran, et al. Control strategy of primary frequency regulation for distributed energy storage stations considering SOC consensus[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 870-880.
- [21] LIN X, ZAMORA R, BAGULEY C A. A fully filter-based decentralized control with state of charge balancing strategy for battery energy storage systems in autonomous DC microgrid applications[J]. IEEE Access, 2021, 9: 15028-15040.
- [22] 方天宇. 双回路接地距离保护的分析和整定[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 43-45.
FANG Tianyu. Analysis and setting of ground distance relays on double circuit transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 43-45.
- [23] 陈勃旭, 崔炜, 陈宇, 等. 分布储能直流微电网中多储能荷电均衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 111-120.
CHEN Boxu, CUI Wei, CHEN Yu, et al. Charge balance control strategy for multiple energy storage in a distributed energy storage DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 111-120.

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-06-28

作者简介:

刘鑫蕊(1981—), 女, 博士, 教授, 研究方向为电网信息物理系统、配电网故障分析及自愈控制、综合能源系统优化控制等; E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn

曹翰林(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流微电网分布式储能单元控制; E-mail: 1119059937@qq.com

蓝良生(1972—), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 研究方向为微电网控制、配电网故障处理等。E-mail: 3030155881@qq.com

(编辑 魏小丽)