

综合能源系统储能荷电状态均衡 分布式控制策略

王松岑¹, 南开², 白新雷², 刘铠诚¹, 郭威², 董树锋³

(1. 中国电力科学研究院有限公司 用能研究所, 北京 100192;

2. 国网河北省电力有限公司营销服务中心, 河北 石家庄 050035;

3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:在综合能源系统储能单元的荷电状态(SOC)均衡控制方面,传统方法多采用集中式控制结构。近年来,基于通信的去中心化分布式控制结构成为研究热点。在现有研究基础上,引入多智能体系统架构和动态一致性算法,使系统中各智能体能够协同估计储能的全局SOC均值。针对分布式控制中普遍存在的迭代收敛速度慢、通信频率过高、稳定性欠佳等问题,通过优化一致性算法中的迭代求和参数以加速收敛,并采用事件驱动机制进一步减少不必要的通信开销。最后,基于Matlab构建的综合能源系统数值仿真模型验证了所提方法的有效性。结果表明,该方法在维持原有控制策略效果的同时,显著降低了约50%的通信量。

关键词:SOC均衡;一致性算法;事件驱动;多智能体系统;综合能源系统

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26869

Distributed State of Charge Balancing Strategy of Energy Storage in Integrated Energy System

WANG Songcen¹, NAN Kai², BAI Xinlei², LIU Kaicheng¹, GUO Wei², DONG Shufeng³

(1. Institute of Energy Consumption, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Hebei Marketing Service Center, Shijiazhuang 050035, Hebei, China; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: In integrated energy systems, centralized control has traditionally been used for state of charge (SOC) balancing of storage units. Recently, decentralized distributed control relying on communication has gained research attention. A multi-agent system and a dynamic consensus algorithm was introduced, enabling agents to collaboratively estimate the global average SOC. To address issues like slow convergence, high communication frequency, and insufficient stability in distributed control, consensus parameters was optimized to speed up convergence and an event-driven mechanism was adopted to reduce unnecessary communication. Simulations in Matlab demonstrate that the method maintains control performance while cutting communication load by about 50%.

Key words: state of charge (SOC) balancing; consensus algorithm; event-driven; multi-agent system (MAS); integrated energy system

综合能源系统作为应对化石燃料短缺和环境污染问题而诞生的一种新的微型能源系统,近年来正获得越来越多的关注^[1-2]。但是由于可再生能源出力存在随机性和不确定性的问题,给综合能源系统带来诸多不利影响^[3],因此综合能源系统通常配有相应的储能系统。蓄电池储能装

置(battery energy storage device, BESD)在长期运行中容易出现荷电状态(state of charge, SOC)不均衡,导致部分电池过充或提前退出,影响系统稳定和电池寿命。因此,在平抑频率波动的同时,应引入SOC均衡策略优化功率分配,以提升系统安全性和储能利用率^[4-6]。

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5400-202413216A-1-1-ZN)

作者简介:王松岑(1979—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电工电能新技术,Email:wscen@epm.sgcc.com.cn

通讯作者:董树锋(1982—),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统自动化,Email:zc7605903@163.com

目前,针对综合能源系统中储能SOC的均衡方法可以按照是否存在与各储能单元进行通信的中央控制器而分为集中式控制策略和分布式控制策略。文献[4]提出了一种基于模糊控制的蓄电池SOC均衡方法,同时保持系统输出电压稳定。文献[5]采用改进下垂控制,将电池SOC纳入频率下垂公式中,由此修正储能本地下垂控制参数实现储能充放电功率控制。文献[7]提出了一种基于SOC的多储能单元分级运行控制策略,能够避免储能单元过放或过充,实现了多储能单元的SOC均衡,但是该方法中各储能系统之间不进行通信,可能因为采集到坏数据使控制效果大大降低。文献[8-11]针对相对独立的储能电池组进行研究,主要以储能间相互充放电为手段进行SOC均衡控制。文献[4-5,7-11]采用的都是集中式的控制策略,这类控制策略对控制中心的可靠性提出了极高的要求,单点的故障可能造成整个系统无法正常工作。而且传统的方法大多考虑直流综合能源系统^[12],交流系统中存在频率和相位属性以及三相线路特性,针对直流系统的方法通常无法处理交流系统中存在的无功分配与频率下垂等问题^[13]。

近年来,去中心化的分布式控制结构以其更高的可靠性、可扩展性和灵活性获得了研究者的青睐^[14]。文献[12]和文献[15]针对交流系统中频率下垂问题,提出了基于多智能体结构和改进的下垂控制策略,智能体通过一致性迭代给出自身对整体SOC平均值的估计,并以此为标准调节出力,不过方法中没有考虑储能系统可能具有不同额定电量。文献[15]采用了分布式结构,提出了一种基于动态一致性算法的双层SOC均衡控制策略,每个个体估计整体SOC均值并计算与自身SOC的偏差,差值通过PI控制形成虚拟阻抗修正量,进而调节每个储能的出力。文献[16]在下垂控制中引入SOC均衡因子,实现不同额定电量的分布式储能单元(distributed energy storage units, DESUs)的SOC均衡,但是储能没有参与到系统的频率或者电压控制中。此外,文献[16-17]提出了一种分布式控制策略,使用基于交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, AD-MN)的分布式一致性算法来管理电池集,同时考虑不同的不确定性。然而,这些文献没有考虑通信量对控制的影响,控制算法中频繁的数据请求和负载的快速变化可能导致通信量显著增加,从

而导致通信拥塞、通信延迟和丢包,这将导致原始数据不准确,降低SOC计算精度,增加计算迭代次数。文献[18]考虑了不同储能容量的差别,采用改进下垂控制和储能本地信息实现不依赖于通信的SOC均衡。文献[19]采用事件驱动控制结构,结合一致性算法实现孤岛交流系统逆变电源之间的功率分配,实现功率负载率达成一致,有效减少了智能体之间的通信频率,但没有考虑个体之间的容量差异。

本文采用事件驱动控制,在保证SOC均衡效果的同时,有效降低多智能体系统(multi-agent system, MAS)中的通信负担;通过优化一致性参数,加速分布式控制的收敛过程;进一步提出综合考虑储能额定容量与初始SOC的分布式控制策略,实现系统功率平衡与SOC均衡。

1 含储能综合能源系统模型

1.1 考虑SOC的储能模型

经典的SOC估算方法^[20]如下式:

$$SOC = \frac{Q_0 - \int_0^t \eta I(\tau) d\tau}{Q_N} \quad (1)$$

式中: Q_0 为储能的初始电量; Q_N 为储能的额定电量; η 为充放电效率; $I(\tau)$ 为 τ 时刻储能的充放电电流。

在综合能源系统内,两个连续指令之间储能出力可视作不变,可得考虑SOC的离散储能模型如下式:

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \frac{P(t)}{C} \Delta t \quad (2)$$

其中

$$C = \frac{Q_N V}{\eta} \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 为储能在 t 时段的功率,用交流侧功率近似; C 为SOC在 Δt 时段内受单位功率影响产生的变化; Δt 为两次功率变化的时间间隔。

参数 C 正比于储能的额定电量和直流侧电压 V ,每个储能取值不同,可近似认为不随时间的改变而改变。

蓄电池通常通过储能变流器接入综合能源系统,现有常见的两种储能变流器控制方式为:PQ控制策略和V/f控制策略^[21]。

储能PQ控制的系统流程如图1所示,在PQ控制策略下,系统通过功率控制环和电流内环控

制实现对给定的功率 P_{ref} 和 Q_{ref} 的追踪控制,此时的逆变电源可以视作一个恒功率电源。

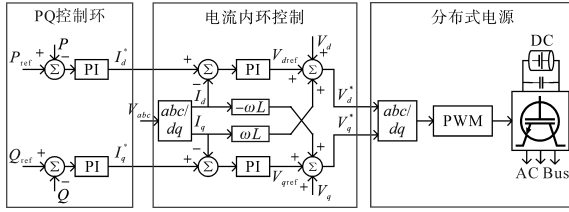


图1 PQ控制流程图

Fig.1 PQ control flowchart

本文将每个储能系统视作 MAS 中的一个智能体,具有和相邻智能体进行通信的能力,并且采用 PQ 控制,可以按照给定的功率指令运行,正常工作时视作恒功率源。

1.2 分布式电源与负荷模型

在综合能源系统中,光伏发电是一种主要的分布式发电形式,本文考虑分布式电源中仅包含光伏的情况。为了最大化对光照的利用率,光伏发电系统通常采用最大功率点追踪控制(maximum power point tracking, MPPT)^[22]。图2为常见的两级式逆变并网系统结构,第一级 DC/DC 变换通常采用 Boost 电路实现升压和 MPPT 控制,第二级为 DC/AC 变换,采用恒功率控制。在这种控制方式下,光伏发电系统通常作为综合能源系统中的恒功率源,其出力仅由光照强度和温度等外界条件决定,具有很高的随机性。

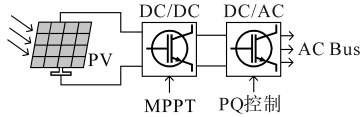


图2 光伏两级式并网结构

Fig.2 Double stage grid-connected PV system

综合能源系统内的负荷也具备一定的随机性,某些情况下当负荷升高而光伏出力不足以满足负荷需求时,综合能源系统母线的频率就会下降,此时需要系统内的储能及时增大出力将系统频率稳定并控制在允许范围内。

2 储能 SOC 均衡控制策略

2.1 智能体建模与通信拓扑描述

在综合能源系统中,每个储能单元可视为具备本地计算和通信能力的智能体。为实现 SOC 均衡控制,每个智能体需记录如下信息:自身编号、当前 SOC 值、对整体 SOC 均值的估计值、估值的增量以及相邻智能体的上述信息。

当前 SOC 通过本地采样获得,对整体 SOC 的

估计则通过邻居间通信实现。每个智能体在迭代过程中独立估算整体 SOC 均值,并据此计算本时刻应承担的输出功率,实现系统功率平衡与 SOC 一致。

为描述智能体之间的信息交互结构,引入图论建模通信拓扑。通信网络表示为无向图 $G=\{N, E\}$ 。其中, $N=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示通信网络中所有智能体的集合, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 表示通信网络中所有通信连接构成的集合,群组通信连接为两个智能体的无序集合。若 $\{v_i, v_j\} \in E$, 则称智能体 i 和智能体 j 之间存在通信关系,记智能体 i 的所有邻接智能体集合为 $N_i=\{v_j|\{v_i, v_j\} \in E; j=1, \dots, n\}$ 。

图3展示了一个由6个储能单元构成的系统拓扑结构,以及各智能体的通信连接与本地存储信息。图中, P_{DG} 为分布式电源出力总和, P_L 为系统总负荷, P_i 为第 i 个储能单元的输出功率,通信关系由关联矩阵 A 和度矩阵 D 表示。当两个智能体之间通信时,互相发送自身的估值信息并更新本地记录,从而支撑一致性迭代过程。

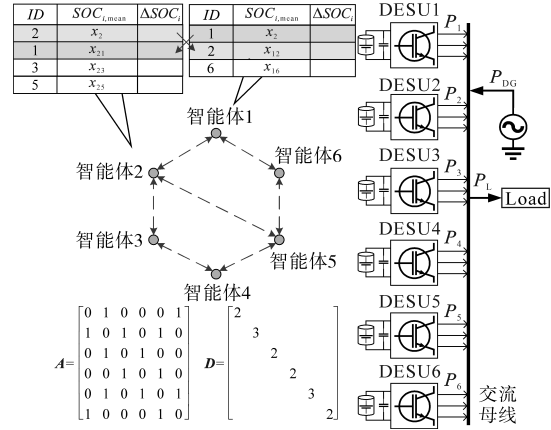


图3 系统拓扑和智能体通信关系示意图

Fig.3 System topology and communication connection of agents

通信关系可用邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 表示,若 $\{v_i, v_j\} \in E$, 则 $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。 $D=\text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ 表示图的度矩阵,其中, d_i 是与节点 i 相连的边的数量。则 G 的 Laplace 矩阵为 $L=D-A$ 。矩阵 L 是一个能够反映图的连通关系的半正定矩阵, L 特征向量中 0 的个数表示图 G 中连通分量的个数,其次小的特征值表示通信网络连接的紧密程度。本文假设综合能源系统的储能之间构成的通信网络是连通的,即 L 特征向量仅包含一个 0。

2.2 多智能体 SOC 均衡控制系统模型

考虑一个基于通信的 MAS, 设该 MAS 包含 n 个智能体,智能体 i 的状态由 x_i 表示。假定其状态

方程由下式描述:

$$\dot{x}_i = u_i \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

式中: u_i 为智能体 i 的输入控制信号。

智能体之间通信至整体状态达到一致,根据一致性算法^[22]可以将控制信号表示为

$$u_i = - \sum_{j \in N_i} (x_i - x_j) \quad (5)$$

为保证离散一致性算法迭代的收敛性,引入系数 α ^[23],得到离散一致性算法的状态更新公式:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha u_i \quad (6)$$

2.3 收敛性分析

在2.1节图3所描述的综合能源系统中,选取智能体状态变量 $x_i = SOC_{i,mean}$ 。用矩阵形式表示一致性迭代式(5)得到下式:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{L}\mathbf{x} \quad (7)$$

将一致性迭代公式以矩阵形式描述,并记作

$$\mathbf{W} = \mathbf{I} - \alpha \mathbf{L} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为单位对角阵。

系统状态以下式更新:

$$\mathbf{x}(t+1) = \mathbf{W}\mathbf{x}(t) \quad (9)$$

定理1^[24]:在式(9)所描述的迭代公式下,当且仅当矩阵 $\mathbf{W}$ 满足下面3个条件时:1) $\beta^T \mathbf{W} = \beta^T$; 2) $\mathbf{W}\beta = \beta$; 3) $\rho(\mathbf{W} - \frac{1}{n} \beta \beta^T) < 1$ 。

各智能体状态量 x_i 最终通过迭代收敛为初始状态量 $x_i(0)$ 的平均值。其中: β 为单位列向量; $\rho(\cdot)$ 为矩阵谱半径。

MAS中的通信网络是连通的,且储能间双向通信,故Laplace矩阵 $\mathbf{L}$ 满足下式:

$$\beta^T \mathbf{L} = \mathbf{0}^T \quad (10)$$

$$\mathbf{L}\beta = \mathbf{0} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{0}$ 为零列向量。因此不难证明定理1中条件1)和条件2)均得到满足。

而矩阵 $\mathbf{W} - (1/n) \beta \beta^T$ 的谱半径可写成下式:

$$\rho(\mathbf{W} - \frac{1}{n} \beta \beta^T) = \max \{ \lambda_2(\mathbf{W}), -\lambda_n(\mathbf{W}) \} \quad (12)$$

由式(8)可知,矩阵 $\mathbf{W}$ 和矩阵 $\mathbf{L}$ 的特征值关系满足下式:

$$\lambda_k(\mathbf{W}) = 1 - \alpha \lambda_{n-k+1}(\mathbf{L}) \quad (13)$$

式中: $\lambda_k(\cdot)$ 为矩阵第 k 大的特征值。

将式(13)代入式(12)可得下式:

$$\begin{aligned} \rho(\mathbf{W} - \frac{1}{n} \beta \beta^T) &= \max \{ 1 - \alpha \lambda_{n-1}(\mathbf{L}), \alpha \lambda_1(\mathbf{L}) - 1 \} \end{aligned} \quad (14)$$

为满足谱半径约束,只需选择 α 使其满足:

$$0 < \alpha < 2/\lambda_n.$$

在MAS架构下,每轮控制周期开始时,智能体将自身SOC作为初始估计值 $x_i(0)$ 并将其传递给邻居。智能体通过下式计算SOC增量:

$$x_i(k+1) = x_i(k) - \alpha \sum_{j \in N_i} (x_i - x_j) \quad (15)$$

式中: k 为在一个指令周期内进行的迭代次数。

收敛后,估值趋于初始SOC均值。当SOC估算值收敛时,智能体计算功率参考值,并基于系统总功率需求和频率控制调节,最终生成控制信号。

3 通信量分析和控制策略优化

3.1 迭代次数和通信统计

MAS控制模型中,系统通过邻居间通信实现SOC均值估计,每当状态更新均需广播,导致通信量与迭代次数直接相关。为减少冗余通信,可引入如下终止条件判断:

$$|\alpha u_i| \geq \varepsilon |x_i| \quad (16)$$

式中: ε 为表示精度的正实数。

当估计值间误差低于阈值时,智能体保持状态不变,不再通信。由2.2节可知,步长 α 的取值也会显著影响收敛速度,进而影响通信次数。

为定量评估通信效率,定义通信效率指标:

$$\sigma = \frac{N_{com}}{2|E|(K_{max} + 1)T} \quad (17)$$

式中: T 为指令周期总数; N_{com} 为 T 个指令周期时间内系统总的通信次数; $|E|$ 为通信网络中边的个数; K_{max} 为MAS中单个智能体在一个指令周期内允许的最大迭代次数。

3.2 参数优化选取

在一致性迭代中,合理设置步长 α 可加快收敛、降低通信负担。依据定理1与式(9)约束,优化目标转化为

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{W}^t = \frac{1}{n} \beta \beta^T \quad (18)$$

因此,通过选取优化变量 $\mathbf{W}$ 最小化 $\|\mathbf{W}^t - \frac{1}{n} \beta \beta^T\|$ 的值实现快速一致性收敛。根据定理1的条件可以得到:

$$\mathbf{W}^t - \frac{1}{n} \beta \beta^T = \mathbf{W} - \frac{1}{n} \beta \beta^T \quad (19)$$

优化问题转为最小化 $\|\mathbf{W} - \frac{1}{n} \beta \beta^T\|$, 可以获得其

全局最优解^[24],由 $W=I-\alpha L$ 得到最优 α 的值:

$$\alpha = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{n-1}(L)} \quad (20)$$

3.3 基于事件驱动的迭代机制

在传统储能 SOC 均衡分布式控制策略中,往往需要智能体之间进行大量通信。基于储能本地记录的相邻智能体信息和自身 SOC 估计值提出一种事件驱动条件,并作为状态达成一致的判据,当触发条件后储能更新状态,否则保持上一次触发时的状态,可以进一步降低所需的通信量。

记智能体 i 从其相邻智能体处所记录的智能体 i 的 SOC 均值为 $x_i(t_k^i)$ 。对智能体 i 当前状态 $SOC_{i,\text{mean}}$ 而言,如果状态更新,则更新后的结果为 $x_i(t)$,记 $e_i(t) = x_i(t_k^i) - x_i(t)$ 。那么代入下式有:

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{L}\mathbf{x}(t_k^i) = -\mathbf{L}(\mathbf{x} + \mathbf{e}) \quad (21)$$

定义

$$\mathbf{z} = \mathbf{L}\mathbf{x} \quad (22)$$

对于式(5)和式(7)所描述的控制系统,设其 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{L}\mathbf{x} \quad (23)$$

由式(21)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \mathbf{x}^T \mathbf{L}\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{x}^T \mathbf{L}(\mathbf{L}\mathbf{x} + \mathbf{L}\mathbf{e}) \\ &= -\mathbf{z}^T \mathbf{z} - \mathbf{z}^T \mathbf{L}\mathbf{e} \end{aligned} \quad (24)$$

将向量表达式写成实数的形式得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\mathbf{z}^T \mathbf{z} - \mathbf{z}^T \mathbf{L}\mathbf{e} \\ &= -\sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n n z_i e_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} z_i e_j \end{aligned} \quad (25)$$

引入正常数 a 并对式(25)中最后的求和部分的 $z_i e_j$ 进行放缩,得到:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n n z_i e_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} z_i e_j \\ &\leq -\sum_{i=1}^n z_i^2 + \sum_{i=1}^n a n z_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2a} n e_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \frac{1}{2a} e_j^2 \end{aligned} \quad (26)$$

由于本文所研究的通信模型里,所有通信均是双向的,因此若 $j \in N_i$ 则必有 $i \in N_j$ 。从而得到:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j \in N_i} \frac{1}{2a} e_j^2 = \sum_{i=1}^n \frac{n}{2a} e_i^2 \quad (27)$$

将式(27)代入式(26)可得:

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n (1 - an) z_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{a} n e_i^2 \quad (28)$$

当 $\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^n (1 - an) z_i^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{a} n e_i^2 \leq 0$ 时系统处于稳定状态,对于每个智能体而言,能够使得上式满足的充分条件为

$$-(1 - an) z_i^2 + \frac{1}{a} n e_i^2 \leq 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (29)$$

亦即

$$e_i^2 \leq \frac{\sigma_i a (1 - an)}{n} z_i^2 \quad (30)$$

其中,参数 $\sigma_i \in (0, 1)$,不等式引入的系数 $a \in (0, 1/n)$,通常取 $a = 1/(2n)$ 使系数达到最大。式(30)即常见的多智能体系统一致性控制的事件驱动条件^[23]:当式(30)成立时,系统处于 Lyapunov 意义下的稳定;当式(30)不成立时,更新智能体状态后有 $e_i = 0$,系统仍然满足稳定性判据 $\dot{V} \leq 0$ 。

需要注意的是,原始 z_i 的表达式并不能很好地表示智能体 i 与相邻智能体状态之间的差异,因为此差值可能为正或负,相加导致状态差异被抵消, z_i 值的计算结果偏低,导致事件触发条件阈值偏低,被轻易触发,增加了不必要的通信。因此本文在策略中以下式计算 z_i 值:

$$z_i = \sum_{j \in N_i} |x_i(t) - x_j(t)| \quad (31)$$

本文提出的控制策略中,只有当满足式(31)和事件触发条件时,智能体才更新并通信;否则状态保持。该机制确保仅使用当前已更新的数据,避免部分状态因未触发而偏离估值。

3.4 SOC 均衡策略流程

结合一致性算法、步长优化与事件驱动机制,构建完整的 SOC 均衡控制流程如图4所示。本文所述的 SOC 均衡策略的控制流程为

- 1) 系统初始化,各智能体之间确定计算参数是否一致,检查通信网络的状况;
- 2) 储能系统检测频率波动后,采集当前 SOC 并交换信息;
- 3) 每个智能体根据式(5)、式(6)进行迭代,满足式(16)与式(30)时更新并通信;
- 4) 若状态更新,则广播至邻居;否则保持当前值;
- 5) 在所有需要通信的智能体完成通信后,返回步骤3),直至达到最大迭代次数或满足收敛条件;
- 6) 计算整体 SOC 均值;
- 7) 控制指令输入至 PQ 控制器,实现 SOC 调节。

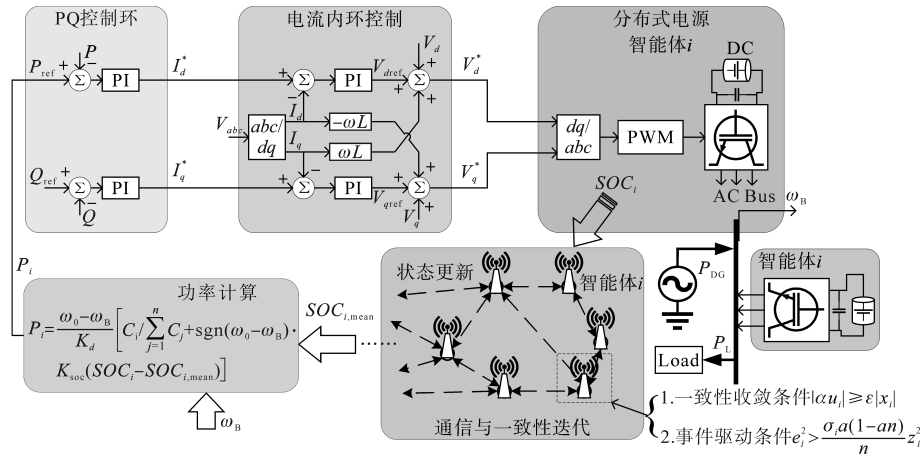


图4 基于一致性算法的SOC均衡策略

Fig.4 SOC balancing strategy based on consensus algorithm

在上述控制流程中除了智能体与邻居进行通信得到的 $SOC_{i,mean}$ 之外,其余需要的数据均来自本地,不需要中央控制器进行调节,实现了分布式控制,并且在满足分布式电源和负载功率约束的条件下实现了储能SOC均衡。

4 仿真验证

本节通过 Matlab 建立数值仿真系统对控制策略进行验证。

4.1 算例1:小容量综合能源系统SOC均衡

文献[25]中提出了一种基于多智能体系统的SOC均衡策略,其采用了PI控制和下垂控制结构调节储能功率,并搭建了一个包含3储能的综合能源系统数值仿真模型作为策略验证的平台。本文按照文献中的参数搭建了数值仿真系统,如图5所示,其中3个智能体以图的最小生成树形成双向的通信网络,总共2条通信连接。

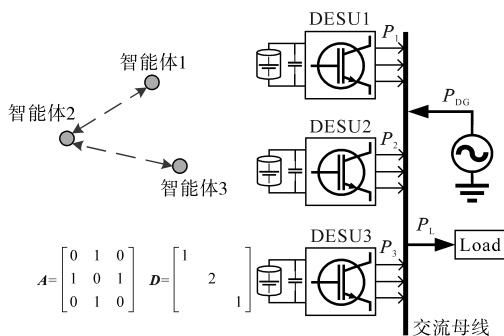


图5 系统拓扑和智能体通信关系示意图

Fig.5 System topology and communication connection of agents

表1为综合能源系统、储能和控制算法参数。根据通信网络, α 不难由式(20)计算得到:

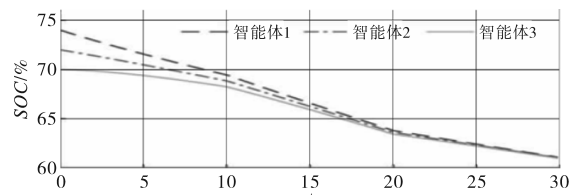
$$\alpha = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{n-1}(L)} = \frac{1}{2} \quad (32)$$

表1 综合能源系统1参数

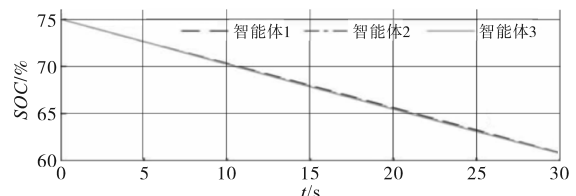
Tab.1 Parameter of IES 1

参数名称	符号	数值
电池1容量	C_{1_bt}	50 Ah
电池2容量	C_{2_bt}	25 Ah
电池3容量	C_{3_bt}	25 Ah
SOC初始值	SOC_i	[74% 72% 70%]
SOC修正系数	K_{SOC}	$3.5e-2$
最大迭代次数	k_{max}	20
收敛精度	ε	$5e-3$
一致性迭代系数	α	0.5

仿真时间为30 s,储能指令周期为1 ms。按文献[25]所提算法执行后得到的各智能体SOC变化曲线如图6所示,按本文算法执行后得到的各智能体SOC变化曲线如图7所示,各智能体功率变化曲线、总功率与综合能源系统功率缺额、仿真过程中储能SOC方差的变化曲线如图8~图10所示。



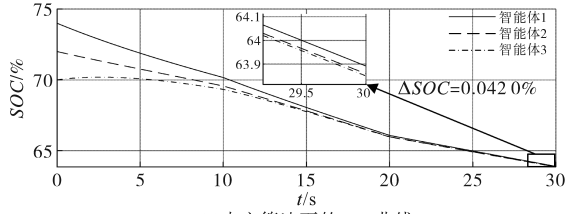
(a)文献[25]算法下的SOC曲线



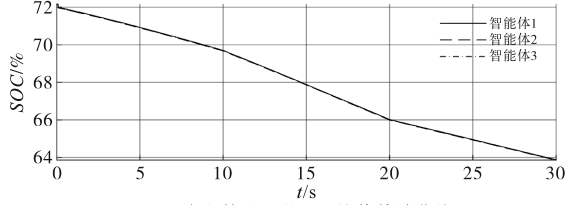
(b)文献[25]算法下的SOC均值估计曲线

图6 文献[25]算法下智能体SOC曲线

Fig.6 SOC cones of agents under the algorithm in reference[25]



(a)本文算法下的SOC曲线



(b)本文算法下的SOC均值估计曲线

图7 本文算法下智能体SOC曲线

Fig.7 SOC curves of agents under the algorithm proposed in this paper

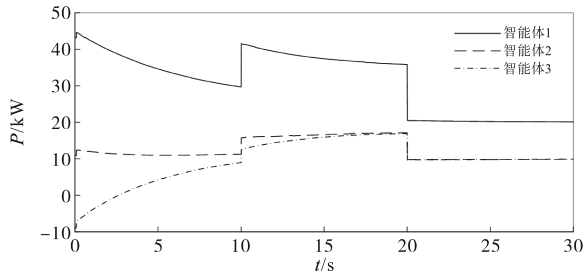


图8 算例1各智能体功率变化曲线

Fig.8 Power curves of agents in example 1

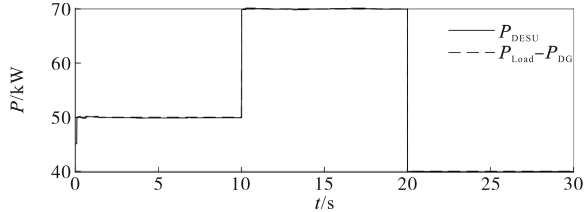


图9 算例1总功率和储能功率曲线

Fig.9 Curves of total power and power storage in example 1

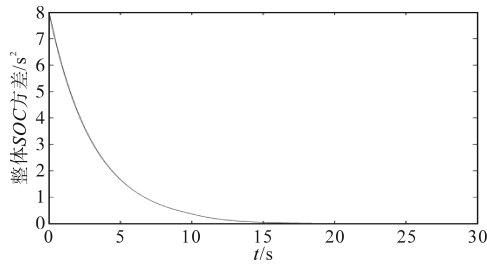


图10 算例1智能体SOC方差曲线

Fig.10 SOC variance of agents in example 1

图7a所示本文策略在30 s时使各电池SOC之间最大差值降低为0.042 0%,而在文献[25]中的控制方法下,系统在30 s时各电池SOC之间差值为0.4%,本文策略实现SOC均衡的效果较好。图7b展示了各智能体对SOC均值的估计值变化情况,各智能体在每个指令周期里都能准确获取整体SOC的均值并且保持一致。

图8显示了各储能功率变化情况,图9为储能总功率、负载与分布式电源出力的差值变化曲线,可见本文算法通过各智能体对整体SOC的准确估计和提出的功率计算公式,满足了综合能源系统功率平衡要求。图10展示了30 s各储能实际SOC方差的变化曲线,SOC方差在本文控制策略下近似以指数速度下降。

4.2 算例2:大容量光储系统功率平衡

4.2.1 大容量光储系统参数

为了进一步验证算法在复杂多变的系统环境中的有效性,特别是在负载功率和分布式电源出力频繁变化时验证SOC均衡效果,在Matlab环境中建立图3所示的包含6储能系统的孤岛系统模型和通信网络拓扑。综合能源系统参数和控制参数如表2所示,这里储能额定电量 C_i 由式(3)表示,是综合了储能本身额定电量、充放电效率、直流端电压得到的参数。

表2 综合能源系统2参数

Tab.2 Parameter of IES 2

参数名称	符号	数值
频率下垂系数	K_d	$1e-4 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}/\text{W}$
储能额定电量	C_i	[200 200 200 140 120 100]
SOC初始值	SOC_i	[50% 50% 25% 40% 70% 75%]
SOC修正系数	K_{SOC}	$3.5e-2$
最大迭代次数	k_{max}	20
收敛精度	ε	$5e-3$
事件驱动系数	σ_i	[$0.5e-3$ $0.5e-3$ $0.5e-3$ $0.5e-3$ $0.5e-3$ $0.5e-3$]
不等式引入参数	α	1/12

4.2.2 一致性参数对通信量的影响

由图3可知通信拓扑图的Laplace矩阵为

$$L = D - A = \begin{bmatrix} 2 & -1 & & & & -1 \\ -1 & 3 & -1 & & & -1 \\ & 1 & 2 & -1 & & \\ & & -1 & 2 & -1 & \\ & -1 & & -1 & 3 & -1 \\ -1 & & & & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

计算其最大和最小的正特征值,得到:

$$\begin{cases} \lambda_{n-1}(L) = 5 \\ \lambda_1(L) = 1 \end{cases} \quad (34)$$

将计算所得的特征值代入式(20)得到:

$$\alpha = \frac{2}{\lambda_1(L) + \lambda_{n-1}(L)} = \frac{1}{3} \quad (35)$$

对比不同 α 对通信量和控制稳定性的影响,

给定指令功率5 kW, α 不同时观察通信量变化情况,结果如图11所示,总通信量对应 σ 的值记录在表3中。

图11展示了不同的 α 值对通信量的影响, α 值过大时,图11a系统无法稳定,图11b系统无法达成设定精度下SOC的一致;观察图11c~图11e, α 值过小时,智能体必须反复通信使SOC达到一致,前100个指令周期里图11d和图11e中的通信

表3 不同 α 的总通信量对比

Tab.3 Communication amount with different α		
α	$\sigma/\%$	SOC一致所需的指令周期
1/2	99.873	失控
1/2.6	85.561	137
1/3	29.733	138
1/4	29.461	139
1/5	33.302	139

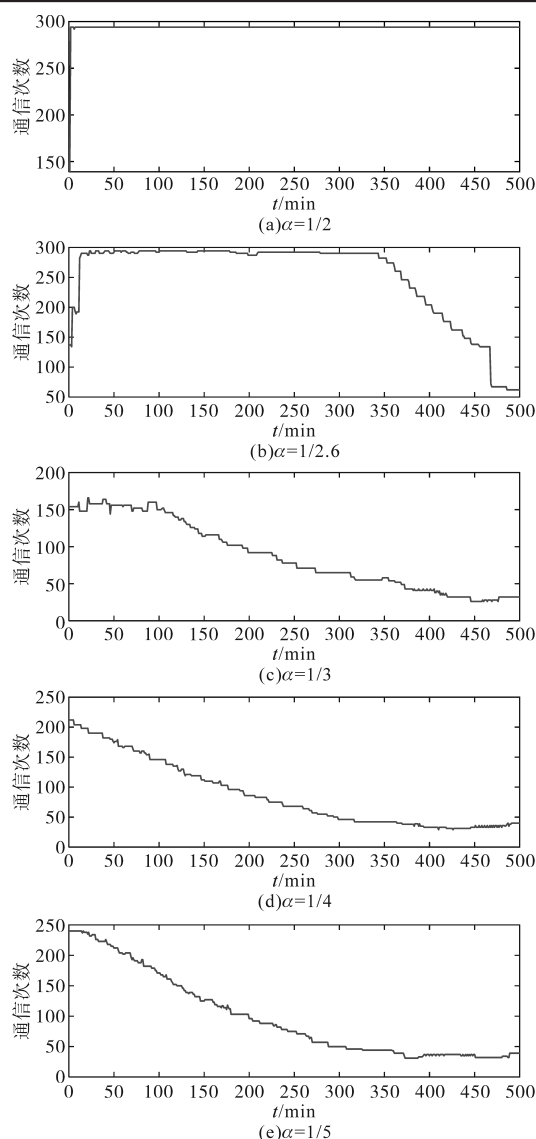


图11 不同 α 取值对通信量的影响

Fig.11 Impact of different α on communication amount

量都是150次以上,而图11c中 α 取最优值,保持在150次左右。

由 α 的谱半径约束和式(20)可知 α 的稳定阈值和最优值分别是1/2和1/3。表3展示了不同 α 值对应的 σ 值以及达到SOC均衡所需的指令周期数, α 设定为最优值附近时, σ 下降30%左右;当 α 继续降低,虽然由于迭代的步长下降,SOC能够在迭代过程中更精确地跟踪SOC均值,但是会导致控制初期迭代次数显著上升、通信量急剧增加,可能会在短时间内给通信网络带来巨大压力,而最优 α 值的通信量变化曲线相对较为平缓。此外越小的 α 在达到SOC收敛后越容易使式(16)不成立,导致系统稳定后偏移总功率约束较多,如图12所示。

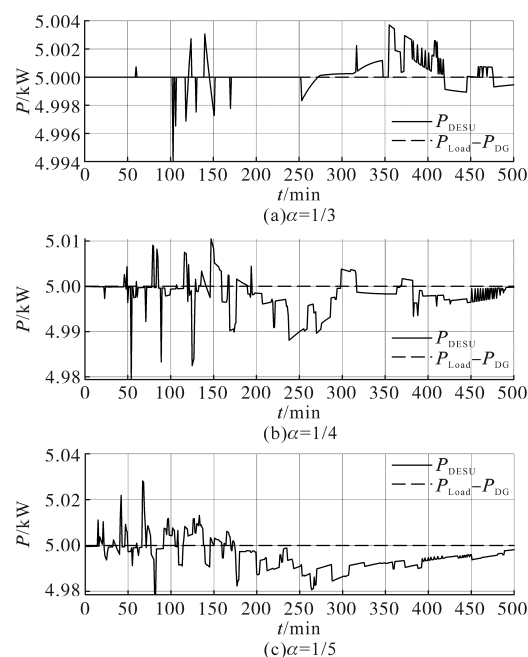


图12 α 取值对总功率约束的影响

Fig.12 Impact of different α to power constraint

综合通信量和满足总功率约束的精度需求而言,选择式(20)所确定的 α 值在实现储能SOC均衡控制上具有较好的性能。

4.2.3 仿真算例验证

以某地一天内的光伏发电数据作为分布式电源的出力曲线,以当地负荷变化数据作为负荷曲线,如图13所示。储能起始SOC和容量见表2。仿真结果如图14~图18所示。

图14为各储能系统SOC和状态量的变化曲线,各储能SOC迅速实现均衡,仿真开始340 min后,储能SOC峰谷差降低为1.283 6%,可以认为SOC达到一致。此外一致性迭代使每个储能获

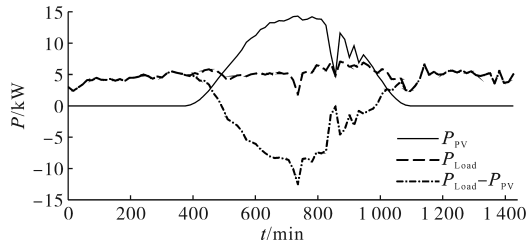


图13 算例2光伏与负荷功率曲线

Fig.13 Power curves of PV and load in example 2

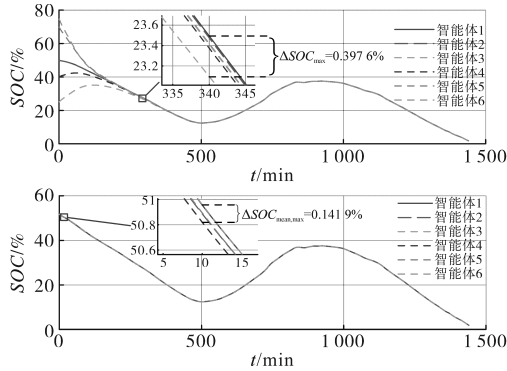


图14 储能SOC和智能体状态量变化曲线

Fig.14 Curves of SOC and state of agents

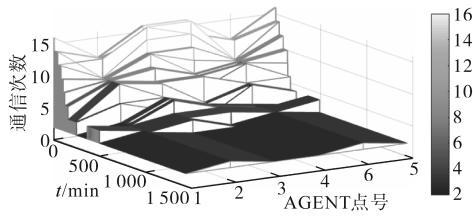


图15 通信量变化图

Fig.15 Communication amount of agents

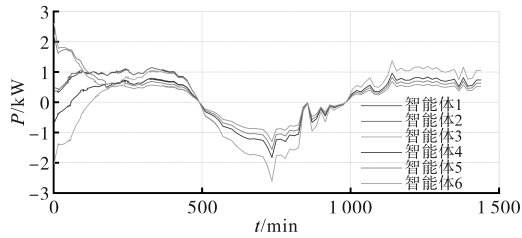


图16 算例2智能体功率曲线

Fig.16 Power curves of agents in example 2

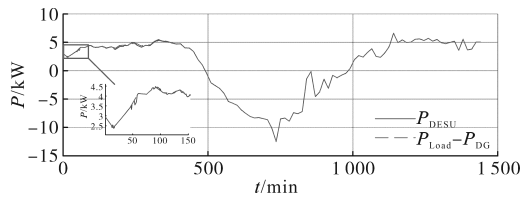


图17 算例2智能体和储能功率曲线

Fig.17 Total power curves of agents and power storage in example 2
得较为准确的整体SOC平均值,并且在运行过程中动态跟随SOC平均值。

图15为全过程中各智能体通信次数变化图,由于智能体2和智能体5有三个相邻智能体,这两个智能体与其各自相邻智能体通信的量约为

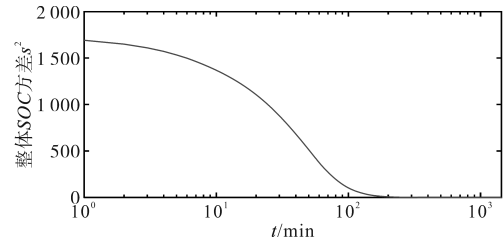


图18 算例2智能体SOC方差曲线

Fig.18 SOC variance of agents in example 2

其余各智能体的1.5倍。在储能SOC总体实现均衡前,需要进行频繁通信以实现对SOC均值的准确估计,而当SOC方差降低之后,通信次数明显下降,事实上全程58.04%的通信发生在前500 min里,说明式(16)和式(30)表达的触发机制在不影响智能体对整体SOC的估计效果的基础上能够显著降低不必要的通信。

图16为在本文所述的控制策略下,6个储能的功率变化曲线,达到SOC均衡后储能输出功率正比于储能的额定电量。图17为综合能源系统内负载和分布式电源功率之差 $P_L - P_{DG}$ 和所有储能的功率之和 $P_{DESU} = \sum_{i=1}^n P_i$ 的变化曲线,各储能总功率在较小指令周期内就实现了对综合能源系统功率需求的稳定跟随,并自动保持综合能源系统内的功率平衡。图16和图17的结果表明本文所述控制策略能够在满足综合能源系统内功率平衡的基础上实现SOC快速均衡。

图18展示了各储能SOC的方差变化,方差近似呈指数关系递减。由图18可知,500 min后SOC方差已经降低至稳定,SOC均衡效果已经基本实现,由于智能体自身SOC与整体SOC均值已十分接近,此时的通信仅为智能体更新自身实时SOC到相邻智能体处,几乎不需要进行迭代计算便得到SOC均值的估计值。

仿真在 $t \in (500, 900)$ 期间时,光伏出力高于综合能源系统内的负载,此时储能SOC对功率分配的比例产生的是负贡献,因此SOC越高的储能吸收的功率值越低,与实际需求一致。

图19展示了3.3节所述的事件驱动机制对通信量的影响,在储能实际SOC存在区别时,事件驱动与非事件驱动在通信量上具有显著差异。当储能实际SOC基本实现一致化后,事件驱动和非事件驱动的通信量相同,智能体仅在每个指令周期开始前播报通信自身实际SOC。按照前文所述的方式,通过式(17)计算本例中采用事件驱

动和非事件驱动方式的通信占比得到:事件驱动方式下 σ 的值为7.470 9%;非事件驱动方式下 σ 的值为15.241%,可见事件驱动结构能够进一步减少多智能体控制系统的通信压力。

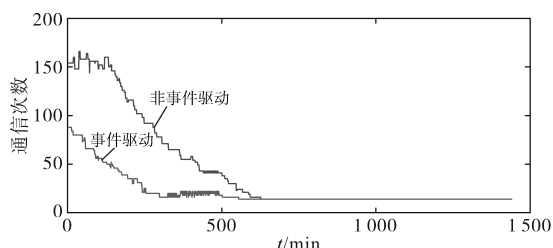


图19 事件驱动对通信量的影响

Fig.19 Influence of event-triggered condition on communication amount

5 结论

考虑到未来大规模综合能源系统可能存在储能系统由不同厂家提供、距离较远等因素,集中式控制结构无法解决对各储能系统的协调控制问题,本文以多智能体分布式控制策略为基础,采用一致性算法实现整体SOC均衡,并通过合适选取一致性迭代求和时的系数加速迭代收敛,在通信时采用事件驱动触发的形式,降低迭代时的通信量。在本文所进行的仿真结果中,在维持控制策略效果的同时,能够降低约50%的通信量。

本文所述的储能SOC均衡控制策略,考虑了储能具有不同的额定电量和SOC初始值,具有分布式结构、鲁棒性高、适合通信资源受限的情景等特点,在采用下垂控制的系统中能够实现频率恢复、满足功率平衡条件的同时,将各储能的SOC维持在相对均衡的状态,在未来因综合能源系统规模进一步扩大而导致集中式的储能控制结构效率降低时,具备一定的应用前景。

参考文献

- [1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19), 100-107.
- [2] XIE Hu, ZHENG Shu, NI Ming. Microgrid development in China: a method for renewable energy and energy storage capacity configuration in a megawatt-level isolated microgrid[J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(2): 28-35.
- [3] 孟明,陈世超,赵树军,等.新能源微电网研究综述[J].现代

电力, 2017, 34(1): 1-7.

- MENG Ming, CHEN Shichao, ZHAO Shujun, et al. Overview on research of renewable energy microgrid[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(1): 1-7.
- [4] 刘胜崇,帕孜来·马合木提,葛震君.基于模糊控制的蓄电池系统储能单元SOC均衡方法[J].现代电子技术, 2020, 43(24): 135-139.
LIU Shengchong, PAZILAI Mahemuti, GE Zhenjun. Fuzzy control based SOC equalization method for battery energy storage unit[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(24): 135-139.
- [5] WANG Hui, WU Zhenxi, SHI Guangze, et al. SOC balancing method for hybrid energy storage system in microgrid[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 3rd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Taiyuan, China, 2019: 141-145.
- [6] 吴青峰,智泽英,赵志诚,等.孤岛微电网不同尺寸DESUs的SoC均衡方案[J].电测与仪表, 2023, 60(1): 111-115.
WU Qingfeng, ZHI Zeying, ZHAO Zhicheng, et al. SoC balancing scheme for DESUs with different sizes in islanded micro-grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 111-115.
- [7] 郑丽君,王子鹏,吕世轩,等.基于荷电状态的直流微电网中多储能分级运行控制方法[J].电网技术, 2021, 45(3): 1006-1015.
ZHENG Lijun, WANG Zipeng, LÜ Shixuan, et al. Hierarchical operation control of multi-energy storage in DC microgrid based on state hierarchical[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1006-1015.
- [8] HUANG Wangxin, ABU QAHOUQ J A. Energy sharing control scheme for state-of-charge balancing of distributed battery energy storage system[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 2764-2776.
- [9] XU Yang, ZHANG Tongxin. A hierarchical structure approach of battery balancing based on SOC[C]//Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC), Xi'an, China, 2018: 1217-1222.
- [10] 梁光胜,付国强,赖程鹏,等.基于SOC的电池均衡控制技术的仿真研究[J].电源技术, 2016, 40(2): 332-334, 372.
LIANG Guangsheng, FU Guoqiang, LAI Chengpeng, et al. Simulation research on equalization technique of batteries based on SOC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(2): 332-334, 372.
- [11] JI Kailong, ZHANG Fan, LI Ling, et al. Active SOC balancing control strategy based on adaptive hierarchical inverse ratio coefficient algorithm for multi-energy storage units in data center [C]//Proceedings of the 2024 6th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES), Chengdu, China, 2024: 895-900.
- [12] LI Chendan, DRAGICEVIC T, VASQUEZ J C, et al. Multia-agent-based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in AC microgrids[J]. Proceedings

- of the 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Charlotte, NC, USA, 2015: 2967–2973.
- [13] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, TEODORESCU R. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2016, 58(1): 158–172.
- [14] GU Jipeng, YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, et al. Fuzzy droop control for SOC balance and stability analysis of DC microgrid with distributed energy storage systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(4): 1203–1216.
- [15] GUAN Yajun, MENG Lexuan, LI Chendan, et al. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4847–4860.
- [16] WANG Bo, ZHANG Cuo, DONG Zhaoyang. Interval optimization based coordination of demand response and battery energy storage system considering SoC management in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2922–2931.
- [17] MOHSEN Hosseini S, CARLI R, JANTZEN J, et al. Multi-block ADMM approach for decentralized demand response of energy communities with flexible loads and shared energy storage system[C]//Proceedings of the 2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Vouliagmeni, Greece, 2022: 67–72.
- [18] WU Qingfeng, GUAN Ruizhi, SUN Xiaofeng, et al. SoC balancing strategy for multiple energy storage units with different capacities in islanded microgrids based on droop control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(4): 1932–1941.
- [19] LAI Jingang, LU Xiaoqing, ANTONELLO Monti, et al. Distributed event-driven power sharing control for CCVSI-based distributed generators in AC islanded microgrids[C]//Proceedings of the 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019: 3469–3474.
- [20] DIMAROGONAS D V, FRAZZOLI E, JOHANSSON K H. Distributed event-triggered control for multi-agent systems[J]. IEEE Transaction Automatic Control, 2012, 57: 1291–1297.
- [21] XIAO L, BOYD S. Fast linear iterations for distributed averaging[J]. Systems & Control Letters, 2004, 53(1): 65–78.
- [22] 季迎旭, 杜海江, 孙航. 蓄电池SOC估算方法综述[J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 18–22.
- JI Yingxu, DU Haijiang, SUN Hang. A survey of state of charge estimation methods[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(4): 18–22.
- [23] 徐少华, 李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25–33, 6.
- XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control strategy for photovoltaic/battery micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25–33, 6.
- [24] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47–52.
- LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. 2011, 35(8): 47–52.
- [25] 周喜超, 洪育金, 夏岩, 等. 基于多智能体的电池储能系统SOC均衡控制策略[J]. 浙江电力, 2020, 39(5): 35–40.
- ZHOU Xichao, HONG Yujin, XIA Yan, et al. SOC balanced control strategy for battery energy storage system based on multiple-agent[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(5): 35–40.

收稿日期: 2025-08-08

修改稿日期: 2025-10-21