

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210164

基于改进下垂控制的并网级联型储能系统 SOC 均衡策略

户艳琴¹, 周仁友², 黄天翔¹, 张延¹, 宁涛¹, 于晶荣²

(1. 国网江西综合能源服务有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对并网级联型电池储能系统的电池荷电状态(State of Charge, SOC)不均衡问题, 提出了一种基于改进下垂控制的电池组 SOC 均衡策略。该策略在传统下垂控制基础上, 通过考虑各电池组 SOC 实时估计信息, 在不影响正常功率输出并保持与电网同步的前提下, 引入分配修正项来实时优化分配各级联模块的有功功率和电压幅值参考, 实现各级联模块的 SOC 均衡。通过调整分配修正系数, 调节各级联模块输出功率差异, 从而控制电池组的 SOC 均衡速度。采用奇异理论分析了该控制策略的稳定性, 给出了控制参数的设计依据。不同工况下级联型储能系统的仿真结果, 验证了所提控制策略及其理论分析的正确性和有效性。

关键词: 并网级联型储能系统; $P-\omega$ 下垂控制; 电网同步; 有功功率平衡; SOC 均衡

SOC balancing strategy of a grid-connected cascaded-type energy storage system based on advanced droop control

HU Yanqin¹, ZHOU Renyou², HUANG Tianxiang¹, ZHANG Yan¹, NING Tao¹, YU Jingrong²

(1. State Grid Jiangxi Integrated Energy Service Co., Ltd., Nanchang 330096, China;

2. College of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: There are imbalance problems in the State of Charge (SOC) of batteries in grid-connected cascaded-type battery energy storage systems. Thus an improved droop control considering SOC balancing strategy is proposed. Based on traditional droop control, this method introduces a distribution correction term by considering SOC real-time estimation information of each battery pack. Then the reference active power and reference voltage amplitude can be reasonably distributed according to the SOC information, and the SOC balancing of each module is achieved without affecting the normal power output as well as keeping synchronization with the grid. In this way, the SOC balancing speed can be adjusted by changing the correction coefficient. In addition, stability analysis of the system based on singular perturbation theory is carried out, and the design basis for control parameters is given. The simulation results under different conditions verify the correctness and validity of the proposed control strategy and the theoretical analysis.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ2348).

Key words: grid-connected cascaded-type battery energy storage system; $P-\omega$ droop control; grid synchronization; active power balancing; SOC balancing

0 引言

随着分布式发电技术的快速发展, 光伏、风机等可再生能源(Renewable Energy Sources, RES)越来越多地接入到交流电网中^[1-3]。为减小 RES 功率输出的波动性、间歇性对电网稳定运行和电能质量的

影响, RES 并网规约要求其配置相应容量的储能系统方可并网。电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)因其可靠性高、技术成熟和能量密度大等优点成为 RES 储能配置的首选方案^[4-7]。

在 BESS 实际充放电过程中, 考虑到电池硬件参数、工作特性等方面存在差异, 电池荷电状态 SOC 也必然存在差异^[8-9]。为调整 BESS 出力深度并防止 SOC 饱和或殆尽, 需要利用 SOC 均衡控制手段来降低 SOC 不均衡度, 从而提高储能电池寿命和改善系统供电可靠性。下垂控制是 SOC 均衡中最为

基金项目: 湖南省自然科学基金项目资助(2017JJ2348); 国网江西省电力有限公司科技项目“开展台区综合能效管理和提升的应用技术研究”(521855190001)

广泛采用的控制策略。现有基于下垂控制的 BESS 分为并联型和级联型两类。并联型 BESS 因其即插即用的特点被广泛应用于低压弱电网场合, 但难以满足大功率、高电压的应用; 而由多个 BESS 串联组成的级联型 BESS, 可在避免引入升压变压器的情况下, 实现交流侧直接并入中高压交流电网。相比于并联型 BESS, 级联型 BESS 在成本和体积方面具有明显的优势^[10-13], 更适合应用于大功率高电压的应用场合。

针对并网情况下储能单元的 SOC 均衡问题, 现有研究多是在并联型 BESS 拓扑结构下进行。文献[14-15]在多代理系统基础上提出了一种考虑 SOC 均衡的能量管理方案, 将每个储能单元作为可控代理, 通过调节各储能单元有功功率参考与自身实际 SOC 水平成比例关系, 进而降低 SOC 不均衡度。文献[16-18]提出了一种分布式协同控制方法, 通过调节多个储能单元的充放电行为, 使所有储能单元的 SOC 趋于一致, 同时能够快速响应来自电网的有功功率命令。但这些方案均是 将储能单元控制成电流源模式, 不适用于公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)处电压幅值不变的并网交流系统。

并联型 BESS 在保持 PCC 点电压幅值不变, 以及保证储能单元 SOC 均衡的研究, 多是在孤岛情形下进行。其基本思路是通过在下垂控制中考虑 SOC 状态变化, 根据 SOC 信息实时调节储能单元的输出功率, 从而实现各并联储能单元的 SOC 均衡^[19-25]。文献[19-20]提出了基于集中控制的 SOC 均衡策略, 利用高带宽通信实现多并联储能单元的 SOC 均衡。文献[21-22]提出了一种分布式下垂控制, 将 SOC 信息作为下垂控制的输入量来调节储能单元功率输出, 进而实现 SOC 均衡。文献[23-25]研究了无任何通信的分散式下垂控制方案, 仅仅利用本地信息对每个储能单元的输出功率进行控制, 进而降低 SOC 不均衡度。上述研究方案虽然可以保证 PCC 点电压幅值不变以及 SOC 均衡, 但由于并联型和级联型 BESS 的 SOC 均衡机理不同, 所以上述均衡策略无法保证级联型 BESS 的 SOC 均衡。

现有级联型 BESS 的 SOC 均衡的相关研究同样主要是针对孤岛场景。文献[26]针对级联型 BESS 提出了一种分散式 SOC 均衡控制策略, 通过改造下垂曲线, 在无通信情况下实现各子模块的 SOC 均衡。文献[27]提出了一种基于集中控制和改进下垂控制的 SOC 均衡策略, 共同调节各级联储能单元的 SOC 达到一致。但由于孤岛和并网模式下其功率传输特性不一样, 而调整 SOC 不均衡度的本质是调节

输出功率差异, 所以这些方案不适用于并网情形。

以上综述表明, 现有 SOC 均衡策略无法解决并网级联型 BESS 的 SOC 均衡问题。由于级联型 BESS 可以利用低压储能单元模块获取高电压, 很适合应用于大功率高电压并网场合, 所以研究并网级联型 BESS 的 SOC 均衡策略尤为重要。

为此, 本文重点研究了并网级联型 BESS 的 SOC 均衡策略, 针对并网情况下级联型 BESS 在放电过程中 SOC 不均衡问题, 提出了一种基于改进下垂控制的电池组 SOC 均衡方法。通过引入分配修正项, 并根据各子模块中电池组 SOC 实时估计信息, 实时优化调整各子模块的有功功率和电压幅值参考, 在保证级联型 BESS 与电网同步的前提下, 降低各电池组的 SOC 不均衡度。同时, 通过灵活调整下垂系数和分配修正系数, 可以调节电池组 SOC 均衡速度。此外, 基于奇异理论分析了该控制策略的稳定性, 并给出了控制参数的设计依据。最后通过 Matlab/Simulink 搭建了系统仿真模型, 验证了所提 SOC 均衡控制策略的有效性。

1 并网级联型 BESS 及 SOC 不均衡问题

1.1 并网级联型 BESS 系统结构与数学模型

以独立电池组为直流供电单元的并网级联型 BESS 主电路如图 1 所示。级联型 BESS 由多个模块化 BESS 级联构成; 每个子模块由单个电池组连接一个带有 LC 滤波器的 H 桥逆变器, 其中, 每个电池组是由一定数目电池单体经串/并联直接构成。通过各子模块的级联, 形成 PCC 点电压为 $V_p e^{j\theta_p}$, 再直接与交流电网并网。

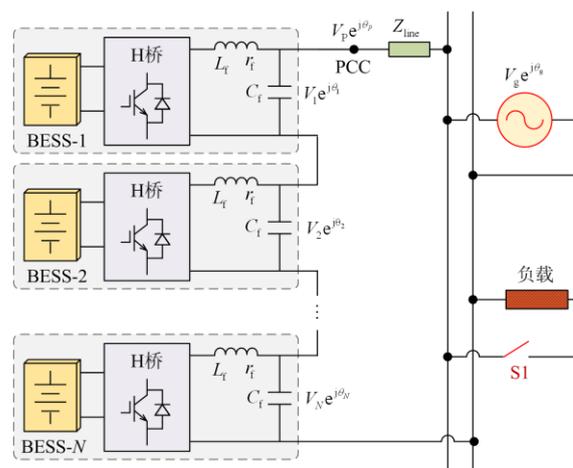


图 1 独立电池供电的级联型电池储能系统主电路

Fig. 1 Main circuit of independent battery powered cascaded-type battery energy storage system

通常, 每个子模块被设计成受控电压源, 因此可以认为第 i 个子模块输出电压为 $V_i e^{j\theta_i}$ 。由于并网级联型 BESS 是串联结构, 所有子模块输出电压的矢量和等于 PCC 点电压, 因此可以得到

$$V_p e^{j\theta_p} = \sum_{i=1}^N V_i e^{j\theta_i} \quad (1)$$

式中, N 为子模块的级联数量。

那么, 第 i 个子模块输出有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 可以表示为

$$P_i + jQ_i = V_i e^{j\theta_i} \cdot \left[\left(V_p e^{j\theta_p} - V_g e^{j\theta_g} \right) / \left| Z_{\text{line}} \right| e^{j\theta_{\text{line}}} \right]^* \quad (2)$$

式中: V_g 和 θ_g 分别是电网电压幅值和相角; $|Z_{\text{line}}|$ 和 θ_{line} 分别是电网阻抗幅值和角度。

根据式(1)和式(2), 任意一个子模块的功率传输特性可以表示为

$$P_i = \frac{V_i}{|Z_{\text{line}}|} \left(V_g \sin(\theta_i - \theta_g) - \sum_{j=1}^N V_j \sin(\theta_i - \theta_j) \right) \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{V_i}{|Z_{\text{line}}|} \left(\sum_{j=1}^N V_j \cos(\theta_i - \theta_j) - V_g \cos(\theta_i - \theta_g) \right) \quad (4)$$

1.2 并网级联型 BESS 的传统 $P-\omega$ 下垂控制

与孤岛运行不同, 并网运行的首要目标是保证逆变器与电网的同步。当级联型 BESS 处于并网模式时, 为了使各级联子模块与电网同步, 且每个子模块之间实现功率平衡, 可以采用 $P-\omega$ 下垂控制方案^[28-30]。

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* + m_i \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot P^* - P_i \right) \\ V_i = \frac{1}{N} \cdot V_g \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_i 与 V_i 分别为第 i 个子模块的角频率与电压幅值参考; ω^* 为电网角频率的标称额定值; P^* 为级联型 BESS 输出至电网的标称额定功率; m_i 为 $P-\omega$ 下垂控制系数, 且始终为正, 当子模块输出有功功率发生变化时, 会根据 m_i 动态调节下垂量, 进而调整子模块的角频率参考。

级联型 BESS 中每个子模块通过调节各自角频率和电压幅值以控制输出功率, 进而使级联型 BESS 与电网同步, 并实现所有子模块的功率平衡。当级联型 BESS 处于稳态时, 由于每个子模块的电压幅值参考相同, 且流过的电网电流相同, 因此

每个子模块的输出视在功率也相同。此外, 在稳态时, 每个级联子模块的角频率等于电网角频率 ($\omega_1 = \dots = \omega_N = \omega^*$), 则根据式(5)可推得, 每个子模块输出有功功率分配平衡 ($P_1 = P_2 = \dots = P_N = P^*/N$)。此时, 由式(3)可知, 每个子模块的相角一致 ($\theta_i = \theta_j; i, j \in \{1, 2, \dots, N\}$), 即所有子模块实现了同步。因此, 根据式(1)可推得, PCC 点的电压幅值和相角分别满足 $V_p = V_g$ 、 $\theta_p = \theta_1 = \dots = \theta_N$ 。

那么, 根据式(3)一式(5), 任意一个子模块的稳态功率可以表示为

$$\bar{P}_i = P^*/N = S_C \sin \delta; \quad \bar{Q}_i = S_C (1 - \cos \delta) \quad (6)$$

式中: $S_C = V_g^2 / (N \cdot |Z_{\text{line}}|)$ 表示单个子模块的功率传输容量; $\delta = \theta_p - \theta_g$ 表示级联型 BESS 系统的稳态功角。根据式(6), 可求得系统具有两个稳定平衡点, 且这两个平衡点分别为 $\delta = \arcsin(P^* \cdot |Z_{\text{line}}| / V_g^2)$ 和 $\delta = \pi - \arcsin(P^* \cdot |Z_{\text{line}}| / V_g^2)$, 表明在稳态时, 级联型 BESS 能够与电网实现同步, 同时保证各级联子模块输出功率平衡分配。

1.3 SOC 不均衡问题描述

为实现电池组 SOC 的均衡, 获取 SOC 的实时信息十分重要。为便于分析和实现, 本文采用安时积分法估计 SOC 信息, 且假设各电池组内部的电池单体已实现 SOC 均衡。

因此, 根据安时积分法, 第 i 个子模块中电池组的 SOC_i 可表示为

$$SOC_i = SOC_{0i} - \frac{\int P_{\text{in}_i} dt}{V_{\text{DCi}} C_{e_i}} \quad (7)$$

式中: SOC_{0i} 和 C_{e_i} 分别为第 i 个子模块中电池组 SOC 初始值和容量; P_{in_i} 为第 i 个子模块中电池组的输出有功功率; V_{DCi} 为第 i 个子模块中电池组输出的直流电压。

假定系统中所有子模块容量一样, 即电池组容量一致 ($C_{e_1} = C_{e_2} = \dots = C_{e_N} = C_e$)。考虑到电池组 SOC 变化非常缓慢, 且在电池安全工作区域内 ($10\% < SOC < 90\%$) 时, SOC 对电池开路电压影响很小, 因此可认为电池组输出电压是一个相等常数 ($V_{\text{DC1}} = V_{\text{DC2}} = \dots = V_{\text{DCN}} = V_{\text{DC}}$)^[31]。

为简便计算, 忽略 H 桥逆变器和 LC 滤波器的功率损耗。根据式(7), 第 i 个子模块中电池组的 SOC_i 和第 i 个子模块输出有功功率 P_i 的关系可以表示为

$$SOC_i = SOC_{0i} - \frac{\int P_{in_i} dt}{V_{DC} Ce} \approx SOC_{0i} - \frac{\int P_i dt}{V_{DC} Ce} \quad (8)$$

由于电池内部化学反应不一致, 使得各子模块中电池组 SOC 变化不一致, 最终导致各电池组 SOC 并不相等。此时, 若基于固定下垂系数的下垂控制对级联型 BESS 进行功率分配控制, 由于未考虑 SOC 的影响, 在各电池组 SOC 存在偏差的情形下, 将导致各模块中 SOC 小的电池组提前放电结束, 出现过放现象, 进而影响系统稳定及电池组使用寿命。

2 考虑 SOC 均衡的改进下垂控制

2.1 SOC 均衡控制策略

针对图 1 所示的级联型 BESS, 在系统运行过程中, 利用安时积分法实时估计每个子模块电池组的荷电状态 SOC_i , 则整个级联型 BESS 荷电状态的平均值 SOC_{ave} 可以表示为

$$SOC_{ave} = \frac{1}{N} (SOC_1 + SOC_2 + \dots + SOC_N) \quad (9)$$

各子模块的 SOC_i 与 SOC_{ave} 的差值 ΔSOC_i 可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta SOC_1 \\ \Delta SOC_2 \\ \vdots \\ \Delta SOC_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SOC_1 - SOC_{ave} \\ SOC_2 - SOC_{ave} \\ \vdots \\ SOC_N - SOC_{ave} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(8)表明, 子模块输出有功功率 P_i 是 SOC_i 的斜率, 因此对电池组 SOC 进行均衡控制, 其本质就是对各子模块输出有功功率的不平衡分配进行控制。由于在实际工作中, 各子模块的实际容量与电池组 SOC 成正比, 即在一定充放电时间内, 各子模块实际有功功率输出与电池组 SOC 大小成正比。为最终实现系统 SOC 的均衡, 本文通过改进传统下垂控制, 增加一项分配修正项 G_i , 通过考虑各电池组的实际 SOC_i 与 SOC_{ave} 的差值 ΔSOC_i , 优化分配各子模块的有功功率和电压幅值参考, 进而调节各电池组的 SOC 不均衡度。根据这个思路, 并网级联型 BESS 考虑 SOC 均衡的改进下垂控制可以表示为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* + m_i \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - P_i \right) \\ V_i = \frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot V_g \\ G_i = k_{soc} \cdot (1 - SOC_{ave}) \cdot \Delta SOC_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: G_i 为分配修正项, 用于修正各子模块的参考有功功率和电压, 实现 SOC 大的子模块多分配参考电压和有功功率, SOC 小的子模块少分配参考电压和有功功率; k_{soc} 为分配修正系数且始终为正; SOC_{ave} 经过分布式通信得到, 相比于电压和频率等物理量, SOC 的变化速率十分缓慢, 因此为各子模块的 SOC 信息进行低带宽通信提供了可能。

2.2 控制策略分析

由式(11)可推得第 i 个子模块输出有功功率为

$$P_i = \frac{\omega^* - \omega_i}{m_i} + \frac{(1 + G_i)}{N} \cdot P^* \quad (12)$$

同时, 结合式(8)和式(12), 可得到

$$SOC_i = SOC_{0i} - \frac{\int \left(\frac{\omega^* - \omega_i}{m_i} + \frac{(1 + G_i)}{N} \cdot P^* \right) dt}{V_{DC} Ce} \quad (13)$$

式(13)表明, 调节分配修正项 G_i , 可以实现电池组 SOC 均衡。

根据式(12)和式(13), 利用表 1 和表 2 中的仿真参数可以得到放电过程下的数值解, 如图 2 所示。

表 1 系统配置参数

Table 1 System configuration parameters	
仿真参数	仿真取值
电网电压 V_g/V	600
额定角频率 $\omega^*/(\text{rad/s})$	100 π
标称额定功率 P^*/kW	15
线路阻抗 Ω	0.1+j1
直流侧电压 V_{DC}/V	300
电池组容量 $Ce_i/(A \cdot h)$	30:30:30
电池组初始 $SOC/\%$	90:85:80
滤波电感 L_f/mH	0.9
滤波电容 $C_f/\mu F$	33
负载 $1/\Omega$	5+j10

表 2 控制参数

Table 2 Control parameters	
仿真参数	仿真取值
下垂系数 m	0.000 1
分配修正项系数 k_{soc}	3.5
电压环 k_{PV}/k_{RV}	0.11/73
电压环谐振频率 $\omega_v/(\text{rad/s})$	100 π
电压环截止频率 $\omega_c/(\text{rad/s})$	5
电流环 k_{PI}	0.07

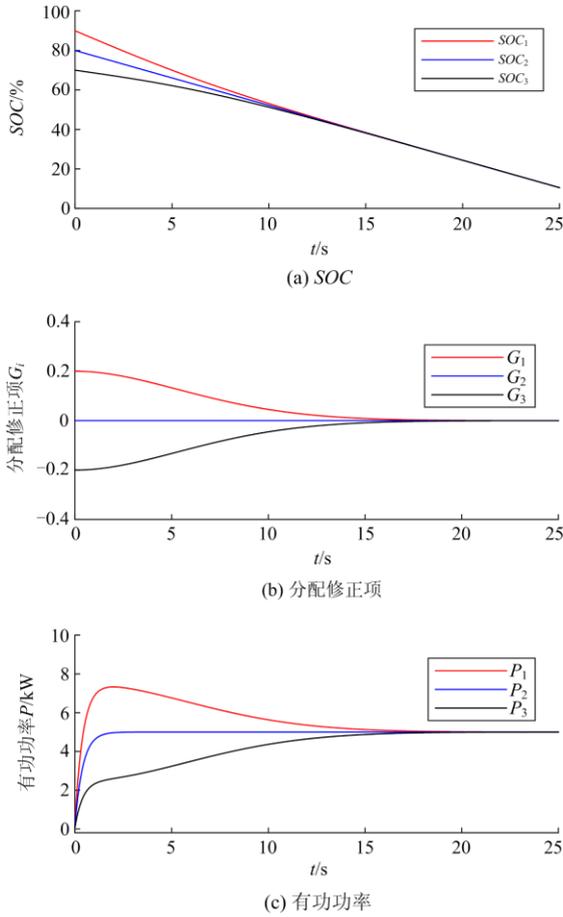


图 2 SOC 均衡过程

Fig. 2 SOC balancing process

当各子模块中电池组的容量相同、但电池组初始 SOC 不同($SOC_{01} > SOC_{02} > SOC_{03}$)时, 通过式(11)和图 2(b)可得 $G_1 > G_2 > G_3$ 。在 SOC 均衡过程中, 可以得出 $\Delta\omega_1 > \Delta\omega_2 > \Delta\omega_3$, 其中 Δ 表示扰动量。由于系统输出有功功率 P 与频率 ω 呈正相关, 所以各子模块的输出有功功率的变化为 $\Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_3$, 如图 2(c)所示。同时, 在实际放电过程中, 各子模块输出有功功率与电池组 SOC 大小成正比, 因此可得到 $\Delta SOC_1 > \Delta SOC_2 > \Delta SOC_3$ 。此外, 根据式(12)和图 2(c)可以观察到, 当系统达到稳态时, 各子模块输出功率实现了平衡分配。表明在电池组容量一致的情况下, SOC 大的电池组将输出更大的功率, SOC 小的电池组输出更小功率, 最终实现各子模块中电池组 SOC 均衡。

3 稳定性分析与参数设计

3.1 基于奇异理论的稳定性分析

由于 SOC 变化速度比功率、电压等变量的变化速度慢 10 倍以上, 因此可以将该系统看作是一个双

时间尺度系统, 并利用奇异理论对该系统建模, 分析其系统稳态结果以及稳定性。

由于 $d\theta_i/dt = \omega_i$, 结合式(8)和式(11), 建立系统模型为

$$\begin{cases} \frac{d\theta_i}{dt} = \omega^* + m_i \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - P_i \right) \\ \frac{dSOC_i}{dt} = -\frac{P_i}{V_{DC} C_e} \end{cases} \quad (14)$$

令 $V_{DC} C_e = 1/(m_i \varepsilon)$, 将其代入式(14), 可以得到

$$\begin{cases} \frac{d\theta_i}{dt} = \omega^* + m_i \cdot \left(\frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - P_i \right) \\ \frac{dSOC_i}{dt} = -\varepsilon \cdot m_i \cdot P_i \end{cases} \quad (15)$$

由于 ε 是个很小的正数, 可以看出式(15)是快系统的标准型。将系统准稳态平衡点平移到原点, 即令 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \theta_s$ 并代入式(15), 可以得到快系统模型为

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\theta}_i}{dt} = \omega^* + m_i \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - m_i \cdot P_i - \omega_s \\ \frac{dSOC_i}{dt} = -\varepsilon \cdot m_i \cdot P_i \end{cases} \quad (16)$$

式中, 准稳态平衡点 $\theta_s = \omega_s t + \theta_0$, ω_s 是 ω_i 的准稳态值, θ_0 取决于参考相角的选择。

令 $\tau = \varepsilon \cdot t$ 并代入式(16), 得到慢系统模型为

$$\begin{cases} \varepsilon \frac{d\tilde{\theta}_i}{d\tau} = \omega^* + m_i \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - m_i \cdot P_i - \omega_s \\ \frac{dSOC_i}{d\tau} = -m_i \cdot P_i \end{cases} \quad (17)$$

3.1.1 慢系统分析

在慢系统中, 一般认为快变量 $\tilde{\theta}_i$ 已经达到了准稳态, 而慢变量 SOC_i 仍然在变化。令 $\varepsilon = 0$ 代入慢系统模型式(17)可以得到

$$\begin{cases} 0 = \omega^* + m_i \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - m_i \cdot P_{is} - \omega_s \\ \frac{dSOC_i}{d\tau} = -m_i \cdot P_{is} \end{cases} \quad (18)$$

式中, P_{is} 是第 i 个子模块输出有功 P_i 的准稳态值。

同理, 在准稳态时, 第 j 个子模块的慢模型可以表达为

$$\begin{cases} 0 = \omega^* + m_j \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + G_j) \cdot P^* - m_j \cdot P_{js} - \omega_s \\ \frac{dSOC_j}{d\tau} = -m_j \cdot P_{js} \end{cases} \quad (19)$$

在准稳态时, 结合式(18)和式(19)可以得到

$$\frac{m_i \cdot G_i \cdot P^*}{N} + \frac{dSOC_i}{d\tau} = \frac{m_j \cdot G_j \cdot P^*}{N} + \frac{dSOC_j}{d\tau} \quad (20)$$

根据式(11)将分配修正项 G_i 代入式(20), 同时令 $z = SOC_i - SOC_j$ 可以得到

$$\frac{dz}{d\tau} + \frac{m_i \cdot k_{soc} \cdot (1 - SOC_{ave}) \cdot P^*}{N} \cdot z = 0 \quad (21)$$

对式(21)进行求解, 可以得到

$$z = z(0) \cdot e^{-\frac{m_i \cdot k_{soc} \cdot (1 - SOC_{ave}) \cdot P^*}{N} \tau} \quad (22)$$

显然, 在稳态时令 $\tau = +\infty$, 慢系统将达到稳定, 且稳态结果为

$$SOC_i = SOC_j \quad (23)$$

对慢系统模型进行分析, 基于慢时间尺度下, 当整个系统达到稳态时, 系统中每个子模块均能够达到 SOC 平衡。同时, 对式(22)分析发现, SOC 收敛速度受参数 m_i 、 k_{soc} 和 N 影响。

3.1.2 快系统分析

在快系统中, 由于 SOC 变化很慢, 可以默认 SOC_{ave} 、 ΔSOC_i 、 SOC_i 等均为常数。

在快系统模型式(16)中令 $\varepsilon = 0$, 可得到

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{\theta}_i}{dt} = \omega^* + m_i \cdot \frac{1}{N} \cdot (1 + G_i) \cdot P^* - m_i \cdot P_i - \omega_s \\ \frac{dSOC_i}{dt} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

根据式(11), 令 $M = (1 + G_i) / N$, 则可以得到

$$V_i = M \cdot V_g \quad (25)$$

为保证每个子模块输出电压差异适中, 本文考虑将子模块输出电压幅值控制在可允许范围内(即 $V_g/N - \Delta V_{max} < V_i < V_g/N + \Delta V_{max}$, ΔV_{max} 为每个子模块所允许的最大电压偏差, $\Delta V_{max} < V_g/N$), 根据式(11)和式(25)推得, $M > 0$ 。

将式(3)和式(25)代入式(24)中, 并在其准稳态点附近加一小扰动, 得到小信号模型为

$$\frac{d\Delta\tilde{\theta}_i}{dt} = -M' \cdot \left(\frac{\cos \delta}{M} \cdot (\Delta\theta_i - \Delta\theta_g) - \sum_{j=1, j \neq i}^N (\Delta\theta_i - \Delta\theta_j) \right) \quad (26)$$

式中: $M' = m_i \cdot M^2 \cdot V_g^2 / |Z_{line}|$; $\Delta\theta_i$ 、 $\Delta\theta_j$ 和 $\Delta\theta_g$ 代表平衡点附近的小抖动。

式(26)的状态空间模型可以描述为

$$\dot{X} = -M' \cdot L \cdot X \quad (27)$$

式中: $X = [\Delta\theta_1 \ \cdots \ \Delta\theta_N]^T$;

$$L = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{M} - N + 1 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & \frac{\cos \delta}{M} - N + 1 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \cdots & \frac{\cos \delta}{M} - N + 1 \end{bmatrix} = \left(\frac{\cos \delta}{M} - N \right) I_{N \times N} + 1_N \cdot 1_N^T$$

令 $A = -M' \cdot L$, 则系统特征值可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_1(A) = -M' \frac{\cos \delta}{M} \\ \lambda_2(A) = \cdots = \lambda_N(A) = -M' \left(\frac{\cos \delta}{M} - N \right) \end{cases} \quad (28)$$

从而得到系统稳定性的充要条件为

$$\Delta = \frac{\cos \delta}{M} - N > 0 \quad (29)$$

从式(29)可知, 由于 M 和 N 都大于零, 在稳定性约束下, 功角 δ 应位于区间 $(-\pi/2, \pi/2)$ 内, 因此根据 1.2 节分析, $\delta = \arcsin(P^* \cdot |Z_{line}| / V_g^2)$ 为稳定平衡点。

通过上述奇异理论分析, 本文提出的考虑 SOC 均衡的改进下垂控制能够使得级联储能 BESS 中每个子模块在慢系统达到 SOC 均衡, 同时在快系统中证明了系统的稳定性。从理论角度证明了考虑 SOC 均衡的改进下垂策略的可行性和稳定性。

3.2 参数设计

本文根据分配修正系数 k_{soc} 优化分配输入至电网的有功功率和电网电压, 但 k_{soc} 过大将造成子模块输出电压不在工作允许范围内。根据式(27)可知, 通过灵活调节下垂系数 m_i , 可以改变动态过程中功角 δ 的收敛速度, 但是 m_i 过大容易导致较大的频率偏差。此外, 由式(22)分析, SOC 收敛速度受 m_i 和 k_{soc} 影响, m_i 和 k_{soc} 较小将导致子模块的 SOC 收敛速度变慢。因此, m_i 和 k_{soc} 的选择需要在系统稳定、频率偏差、电压幅值偏差与 SOC 收敛速度这些性能方面折中考虑。

考虑到子模块输出电压幅值控制在工作允许范围 $(V_g/N - \Delta V_{max} < V_i < V_g/N + \Delta V_{max})$, 根据式(11)可得

$$|k_{soc} (1 - SOC_{ave}) (SOC_i - SOC_{ave})| < \frac{N \cdot \Delta V_{max}}{V_g} \quad (30)$$

由于 $k_{soc} > 0$, 根据电池组 SOC 的安全工作区域, $(1 - SOC_{ave}) > 0$ 。由式(30)可得

$$k_{soc} < \frac{N \cdot \Delta V_{max}}{V_g \cdot (1 - SOC_{ave}) \cdot |SOC_i - SOC_{ave}|} \quad (31)$$

求解式(31),其实质在于求得式(31)右边的最小值,即需要求解 $\max\{(1-SOC_{ave})|SOC_i-SOC_{ave}|\}$ 。考虑到在极端情况下(系统仅有2个子模块级联,其中 $SOC_1=90\%$, $SOC_2=10\%$),式(31)需要恒成立。则有: $\max\{(1-SOC_{ave})|SOC_i-SOC_{ave}|\}=0.2$ 。

那么,分配修正系数 k_{soc} 取值范围可以表示为

$$0 < k_{soc} < \frac{5N \cdot \Delta V_{max}}{V_g} \quad (32)$$

为保证系统安全稳定运行,式(32)应始终成立。

在并网级联型 BESS 中,通常以子模块中 H 桥逆变器最大容量来衡量子模块的容量,而下垂控制原理是通过改变频率来改变 H 桥逆变器的输出有功功率。为了保证频率偏差在系统可允许范围内以及各子模块承担合理的功率输出,可以将 m_i 设计为

$$m_i \leq \frac{\Delta\omega_{max}}{2P_{i_max}} \quad (33)$$

式中: $\Delta\omega_{max}$ 为系统所允许的最大频率偏差; P_{i_max} 为第 i 个子模块所能输出最大功率。

4 仿真验证

为验证所提控制策略的正确性与有效性,基于 Matlab/Simulink 环境搭建如图 1 所示 3 个子模块组成的并网级联型储能系统。每个子模块的具体控制结构如图 3 所示,功率计算模块根据子模块输出的电压电流计算出本模块有功功率 P_i ;改进下垂控制模块利用本模块实际输出有功功率 P_i 、有功功率参考 P^* 和电网电压幅值 V_g 得到参考相位 θ_{ref} 和给定电压幅值 V_i ; θ_{ref} 和 V_i 进而组成电压电流双内环参考电压信号 V_{iref} ;电压电流双环分别采用 PR 和 P 控制来跟踪参考电压信号 V_{iref} ,得到调制波与载波进

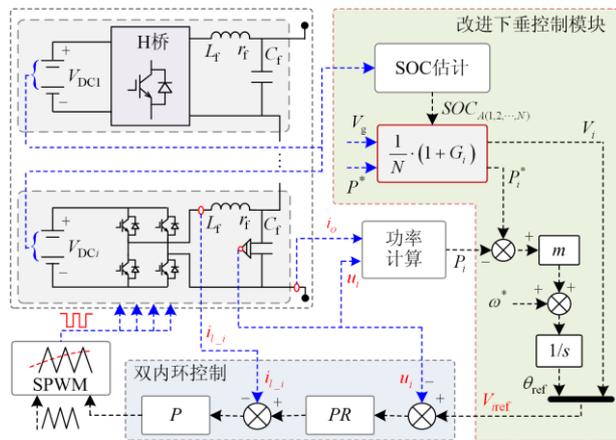


图 3 第 i 个子模块控制框图

Fig. 3 Control structure of the i th inverter

行比较,最终输出 PWM 控制 H 桥逆变器 4 个功率开关。系统配置和控制参数如表 1 和表 2 所示。

4.1 算例 1: 所提 SOC 均衡控制策略的性能

在这一节中,下垂系数 $m=0.0001$,分配修正系数 $k_{soc}=3.5$,额定功率 $P^*=15\text{ kW}$,各电池组初始荷电状态值 SOC_{01} 、 SOC_{02} 、 SOC_{03} 分别为 90% 、 85% 、 80% ,采用所提 SOC 均衡策略的性能如图 4 所示。

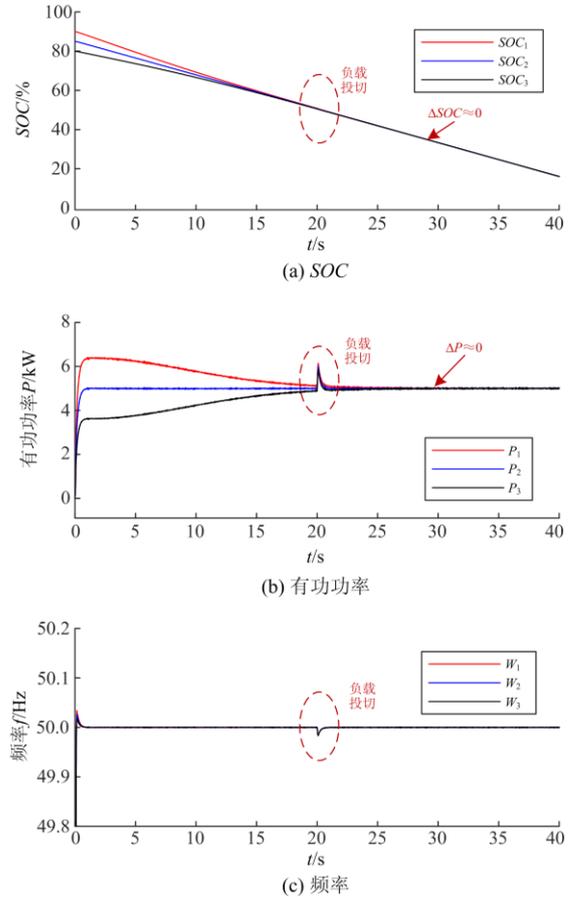


图 4 采用所提 SOC 均衡策略的性能

Fig. 4 Performance of proposed SOC balancing method

从图 4(a)和图 4(b)可以观察到,当系统到达稳态时, ΔSOC 和 ΔP 逐渐趋于零($\Delta SOC = SOC_{max} - SOC_{min}$, $\Delta P = P_{max} - P_{min}$),3 个子模块输出有功功率被平衡分配(比例为 1:1:1)。观察图 4(b)和图 4(c),在 $t=20\text{ s}$ 时负载 1 投入运行,子模块输出功率和频率虽然出现一定程度的波动,但没有影响输出功率的收敛趋势,一段时间后,各子模块的频率也重新和电网频率实现同步。

此外,从图 4(a)可以看出,负载投切对 SOC 均衡趋势没有影响,表明该 SOC 均衡控制策略能够实现预期效果,各电池组 SOC 最终实现均衡,各子模

块输出功率平衡分配, 同时也与电网实现同步, 且负载投切不影响电池组 SOC 和输出功率收敛。

4.2 算例 2: 分配修正系数对 SOC 均衡速度的影响

图 5 给出了不同的分配修正系数 k_{soc} 对 SOC 均衡速度影响的波形。初始情况下, 各电池组初始荷电状态值 SOC_{01} 、 SOC_{02} 、 SOC_{03} 分别为 90%、85%、80%。从图 5(a)和图 5(b)可知, 当 $k_{soc}=3$ 时, 3 个子模块的电池组经过 20 s 实现了 SOC 均衡; 而当 $k_{soc}=6$ 时, 大致经过 12 s 便可以平衡。因此可以得到结论: 分配修正系数 k_{soc} 是 SOC 均衡速度影响因子, 在一定范围内, 调节 k_{soc} 可调整 SOC 均衡速度, 证明了 3.1 节稳定性分析的正确性。

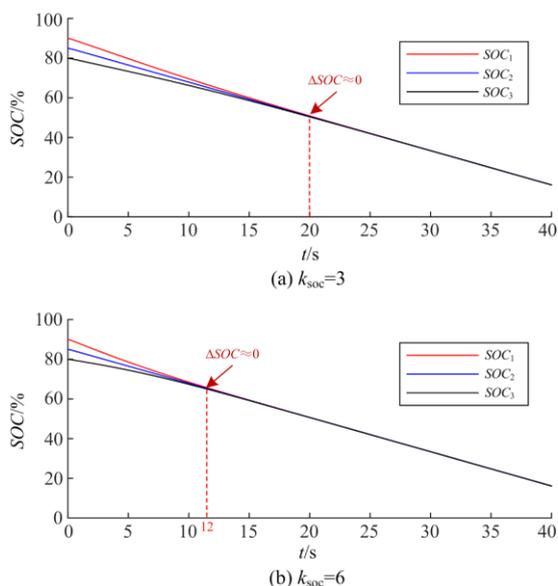


图 5 分配修正系数 k_{soc} 对 SOC 均衡速度的影响
Fig. 5 Effect of distribution correction coefficient k_{soc} on SOC balancing velocity

4.3 算例 3: 传统下垂与改进下垂控制的电池组放电过程比较

图 6 给出了传统下垂与改进下垂控制的电池组放电过程仿真结果。初始情况下, 分别设定各电池组初始荷电状态值 SOC_{01} 、 SOC_{02} 、 SOC_{03} 为 50%、45%、40%。通常, 电池的 SOC 安全工作区域为 $10\% < SOC < 90\%$ 。观察图 6 可知, 传统下垂控制策略下(即没有考虑 SOC 均衡), 在 17.5 s 时, 有电池组进入不安全工作区域, 如图 6(a)所示; 而采用考虑 SOC 均衡的改进下垂控制策略情况下, 电池组一直工作在安全工作区域, 如图 6(b)所示。说明采用所提的改进下垂控制策略, 电池组放电的深度可以保证在安全工作区域, 保证电池组寿命。

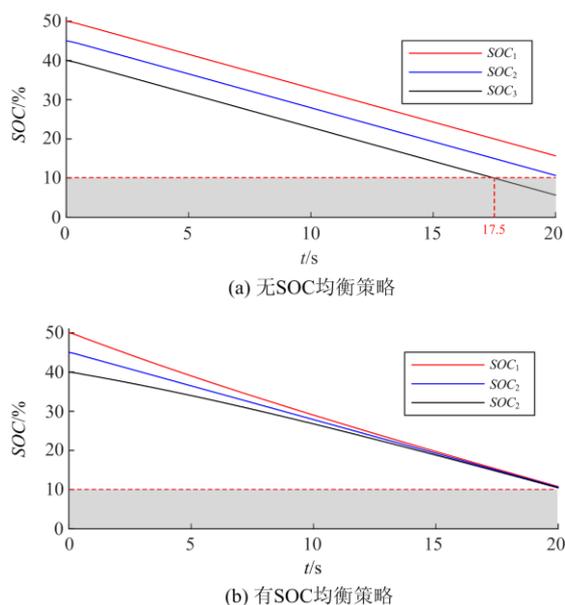


图 6 传统下垂控制与改进下垂控制的电池组放电过程
Fig. 6 Discharging process of BESS on traditional droop control and advanced droop control

5 结论

本文介绍了级联储能系统采用传统 $P-\omega$ 下垂控制时 SOC 不均衡的本质, 并在此基础上提出了基于改进下垂控制的电池组 SOC 均衡方法。通过考虑 SOC 实时信息, 引入分配修正项来实时调整子模块的参考功率和电压, 进而降低各电池组的 SOC 不均衡度。同时, 通过灵活调整分配修正系数, 可以调节电池组 SOC 的均衡速度。此外, 利用奇异理论验证了系统控制策略的稳定性, 并给出了控制参数的设计依据。仿真分析表明所提控制策略的有效性及其正确性。

参考文献

[1] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.

[2] 方保民, 李红志, 孔祥鹏, 等. 含高比例光伏出力的长期分布式储能配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 121-129.
FANG Baomin, LI Hongzhi, KONG Xiangpeng, et al. Research on long-term distributed energy storage configuration with a high proportion of photovoltaic

- output[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 121-129.
- [3] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 2-11.
- [4] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 168-178.
LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 168-178.
- [5] 李欣然, 邓涛, 黄际元, 等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略[J]. *高电压技术*, 2017, 43(7): 2362-2369.
LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, et al. Battery energy storage systems self-adaptation control strategy in fast frequency regulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(7): 2362-2369.
- [6] 马智慧, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能调频死区的一次调频控制方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(10): 2102-2115.
MA Zhihui, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control of primary frequency regulation considering dead band of energy storage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(10): 2102-2115.
- [7] 崔红芬, 杨波, 蒋叶, 等. 基于模糊控制和 SOC 自恢复储能参与二次调频控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(22): 89-97.
CUI Hongfen, YANG Bo, JIANG Ye, et al. Strategy based on fuzzy control and self adaptive modification of SOC involved in secondary frequency regulation with battery energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 89-97.
- [8] LI Junhui, GAO Fengjie, YAN Gangui, et al. Modeling and SOC estimation of lithium iron phosphate battery considering capacity loss[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(1): 61-69. DOI: 10.1186/s41601-018-0078-0.
- [9] 袁娜娜, 王允建, 张君, 等. 直流微网中基于 SOC 的改进下垂控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(15): 17-23.
YUAN Nana, WANG Yunjian, ZHANG Jun, et al. Improved droop control based on SOC in DC microgrid[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(15): 17-23.
- [10] 李新, 杨苒晨, 邵雨亭, 等. 级联型储能系统中虚拟同步发电机控制及电池均均衡策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 180-187.
LI Xin, YANG Ranchen, SHAO Yuting, et al. Strategy of virtual synchronous generator control and battery balancing in cascaded H-bridge based energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 180-187.
- [11] 薛皓, 何晋伟, 郭培健. 基于级联 H 桥变换器的电池储能系统容错控制[J]. *高电压技术*, 2020, 46(10): 3418-3430.
XUE Hao, HE Jinwei, GUO Peijian. Fault-tolerance control of battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(10): 3418-3430.
- [12] 曹伟, 徐永海, 李善颖, 等. 适用于大容量储能系统的级联 H 桥和模块化多电平逆变器分析比较[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(4): 30-37.
CAO Wei, XU Yonghai, LI Shanying, et al. Analysis and comparison of cascaded H-bridge and modular multi-level converters suitable for large-capacity energy storage system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(4): 30-37.
- [13] 牟晓春, 唐瑭, 王小红, 等. 高压大容量储能变流器电池组平衡控制策略[J]. *电测与仪表*, 2019, 56(22): 103-108, 114.
MOU Xiaochun, TANG Tang, WANG Xiaohong, et al. Battery pack balancing control strategy for high voltage and large capacity energy storage converter[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2019, 56(22): 103-108, 114.
- [14] 吴青峰, 孙孝峰, 才玮琪, 等. 考虑 SOC 平衡的并网微电网能量供需平衡方案[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(11): 17-25.
WU Qingfeng, SUN Xiaofeng, CAI Weiqi, et al. Energy supply and demand balance scheme of grid connected microgrid considering SOC balance[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2020, 41(11): 17-25.
- [15] LIEGMANN E, MAJUMDER R. An efficient method of multiple storage control in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(6): 3437-3444. DOI: 10.1186/s41601-018-0078-0.
- [16] 孙纯军, 倪春花, 窦晓波. 基于 SOC 状态反馈的混合储能功率优化策略[J]. *电测与仪表*, 2016, 53(15): 81-88.
SUN Chunjun, NI Chunhua, DOU Xiaobo. Research on optimal power allocation strategy based on SOC state feedback in hybrid energy storage system[J]. *Electrical*

- Measurement & Instrumentation, 2016, 53(15): 81-88.
- [17] HUANG Chongqin, WENG Shengxuan, YUE Dong, et al. Distributed cooperative control of energy storage units in microgrid based on multi-agent consensus method[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 147: 213-223.
- [18] 李辉, 黄瑶妹, 马飞. 基于荷电状态的混合储能系统协调控制策略[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 158-163.
- LI Hui, HUANG Yaomei, MA Fei. Coordinated control strategy for hybrid energy storage system based on state of charge[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 158-163.
- [19] PALIBAN O, KAUHANIEMI K. Power sharing for distributed energy storage systems in AC microgrid: based on state-of-charge[C] // 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), November 15-18, 2015, Brisbane, Australia: 1-5.
- [20] GUAN Y, VASQUEZ J C, GUERRERO J M, et al. Coordinated secondary control for balanced discharge rate of energy storage system in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 5019-5028.
- [21] LI Chendan, COELHO E A A, DRAGICEVIC T, et al. Multiagent-based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2369-2381.
- [22] 韦佐霖, 陈民铀, 李杰, 等. 孤岛微网中分布式储能 SOC 和效率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 169-177.
- WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 169-177.
- [23] 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.
- [24] SUN Xiaofeng, HAO Yangcong, WU Qingfeng, et al. A multifunctional and wireless droop control for distributed energy storage units in islanded AC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 736-751.
- [25] 张继元, 舒杰, 宁佳, 等. 考虑 SOC 自均衡的光储独立微电网协调控制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 2): 277-287.
- ZHANG Jiyuan, SHU Jie, NING Jia, et al. Coordinated control for PV/storage hybrid islanded microgrid considering SOC balancing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2): 277-287.
- [26] SHI Guanze, HAN Hua, SUN Yao, et al. A decentralized SOC balancing method for cascaded-type energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2321-2333.
- [27] WANG Hui, WU Zhenxi, SHI Guangze, et al. SOC balancing method for hybrid energy storage system in microgrid[C] // 2019 IEEE 3rd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), March 16-18, 2019, Taiyuan, China: 141-145.
- [28] HOU Xiaochao, SUN Yao, HAN Hua, et al. A fully decentralized control of grid-connected cascaded inverters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(1): 315-317.
- [29] 郑若楠, 韩华, 李国杰, 等. 逆变器串并联型微电网的一种本地主从协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 47-56.
- ZHENG Ruonan, HAN Hua, LI Guojie, et al. A local master-slave coordinated control strategy for series-parallel inverter microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 47-56.
- [30] SUN Yao, SHI Guangze, LI Xing, et al. An f-P/Q droop control in cascaded-type microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1136-1138.
- [31] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 1-10.
- LI Junhui, GAO Zhuo, YING Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10.

收稿日期: 2021-02-10; 修回日期: 2021-03-20

作者简介:

户艳琴(1984—), 女, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为储能技术、新能源发电以及微电网控制; E-mail: 120018953@qq.com

周仁友(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式能源发电与电力电子等. E-mail: 1923574903@qq.com

(编辑 张爱琴)