

考虑规模化电池储能 SOC 一致性的电力系统 二次调频控制策略

吕力行¹, 陈少华¹, 张小白², 庞涛², 黄崇鑫³

(1.浙江浙能电力股份有限公司萧山发电厂, 浙江 杭州 311251;
2.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106;
3.南京邮电大学自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210023)

[摘要]针对规模化电池储能参与电力系统二次调频问题,提出了考虑储能荷电状态(state of charge, SOC)的分层协调控制策略。在区域控制中心层,给出了考虑二次调频需求和储能SOC水平的二次调频功率分配策略,使储能SOC尽可能地维持在正常工作区间,以确保储能持续参与二次调频的能力;在储能站层,采用分布式协同控制算法实现了二次调频功率指令跟踪,并保证各组储能单元SOC趋于一致以提升储能系统的综合运行性能。最后,通过两区域互联电力系统仿真,验证了所提出的规模化储能参与二次调频控制策略的有效性。

[关键词]二次调频; 电池储能; 荷电状态; 一致性; 多智能体系统

[中图分类号] TM734 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rld.202012296

[引用本文格式] 吕力行, 陈少华, 张小白, 等. 考虑规模化电池储能 SOC 一致性的电力系统二次调频控制策略[J]. 热力发电, 2021, 50(7): 108-117. LYU Lixing, CHEN Shaohua, ZHANG Xiaobai, et al. Control strategy for secondary frequency regulation of power system considering SOC consensus of large-scale battery energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(7): 108-117.

Control strategy for secondary frequency regulation of power system considering SOC consensus of large-scale battery energy storage

LYU Lixing¹, CHEN Shaohua¹, ZHANG Xiaobai², PANG Tao², HUANG Chongxin³

(1. Xiaoshan Power Plant, Zhejiang Zheneng Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 311251, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: For the problem of large-scale battery energy storage (BES) system participating in the secondary frequency regulation, a hierarchical coordinated control strategy considering the state of charge (SOC) of the BES is proposed. At the area control center level, a power allocation strategy for the secondary frequency regulation considering the area regulation requirement (ARR) and the SOC of the BES is presented. The power allocation strategy makes the SOC of the BES maintain in the normal interval as much as possible to enable the BES to participate in the secondary frequency regulation continuously. At the BES station level, a distributed cooperative control algorithm is adopted to realize the power command tracking of the secondary frequency regulation, and ensure that the SOC of all the energy storage units reach a consensus to improve the comprehensive operation performances of the BES. Finally, the effectiveness of the proposed control strategy for the large-scale BES participating in the secondary frequency regulation is verified through the simulation on a two-area interconnected power system.

Key words: secondary frequency regulation, battery energy storage, state of charge, consensus, multi-agent system

传统调频资源在应对变化速度快、波动幅度大的负荷时存在自身局限,不利于电力系统调频品质进一步提升,因此亟需协调配置调节速度快、控制

灵活的调频资源^[1-2]。随着电化学储能技术的不断发展,电池储能从小容量分散式应用逐渐向大容量规模化接入发展。储能系统通过控制电池充放电来满足

收稿日期: 2020-12-12

基金项目: 浙江浙能电力股份有限公司科技项目

Supported by: Science and Technology Project of Zhejiang Zheneng Electric Power Co., Ltd.

第一作者简介: 吕力行(1966), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为源网荷储互动技术, xing_hh_77@163.com。

通信作者简介: 黄崇鑫(1983), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为电力系统运行与控制, huangchongxin@foxmail.com。

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

足电网调频需求^[3]。与水电机组、火电机组等传统调频电源相比，规模化电池储能系统具有调节速度快、调频指令跟踪精确、功率双向调节等优势，在调频领域具有巨大的应用潜力^[4]。

针对规模化电池储能参与电网二次调频问题，国内外已开展了一系列研究工作。文献[5]针对模型参数不确定性及通信延时问题提出了两层模型预测控制方法，用于控制分布式电池储能系统参与电力系统二次调频；文献[6]针对电网故障情况下的功率平衡需求，推导了用于大电网调控的规模化电池储能调频的控制模型，并基于响应曲线法优化 PI 控制器参数；文献[7]基于 Logistic 回归函数构建了储能自适应调频和储能自恢复 2 种工况的出力控制规律，用于解决系统调频需求和储能恢复需求间的协调配合问题；文献[8]结合系统频率偏差大小和储能 SOC，基于模糊控制方法平滑储能系统出力；文献[9]考虑了储能和传统机组在调节速度和容量上的差异，提出了实现储能和传统机组协调互补的二次调频策略；文献[10]根据不同调频需求与电池储能系统 SOC 水平，确定模型预测控制策略中的输出加权矩阵和约束，从而形成电池储能系统的最优控制变量。上述研究将储能系统等效成一个调频电源参与电力系统二次调频，未考虑储能站内各组储能单元的协调控制，特别是 SOC 一致性控制问题。

文献[11]指出，储能站内各组储能单元 SOC 保持一致具有诸多优点，如：实现储能系统调频容量最大化，保持储能高效健康运行，以及防止各电池储能单元不均衡老化等。针对如何保持规模化电池储能站内各组储能单元 SOC 一致性问题，文献[12]将各组储能单元 SOC 偏差引入优化模型的目标函数中，并通过求解最优功率分配策略实现各组储能单元 SOC 一致。虽然该方法可保证各储能单元 SOC 一致，但由于求解优化模型耗时较长，难以实现系统的实时闭环控制。文献[13]将扰动观测器和有限时间分布式协同算法相结合，实现了储能站层的功率跟踪及储能站内各储能单元 SOC 一致。但是，该控制策略忽略了上层区域调频需求（area regulation requirement, ARR）和储能站整体 SOC 之间的协调配合问题，易导致储能站 SOC 偏离预设运行区间。

为兼顾电力系统调频需求和储能站 SOC 自恢复需求，同时保证储能站内各组储能单元 SOC 一致，本文提出了考虑储能站 SOC 的二次调频分层协调控制策略。在区域控制中心层，根据 ARR 所在

区间和电池储能站整体的 SOC，将调频功率合理分配给电池储能站和传统调频机组，在实现二次调频目标的同时保证储能站的 SOC 尽可能地维持在预设区间；在储能站层，采用分布式协同控制算法，实现储能站调节功率指令跟踪，并确保各组储能单元 SOC 趋于一致。最后，通过系统仿真试验，对本文控制策略进行有效性验证。

1 含规模化电池储能二次调频模型

1.1 电池储能参与二次调频概述

规模化电池储能系统通常由多组电池储能单元并列构成，每组储能单元由电池、功率变换器（power converter system, PCS）和升压变压器组成（图 1）。

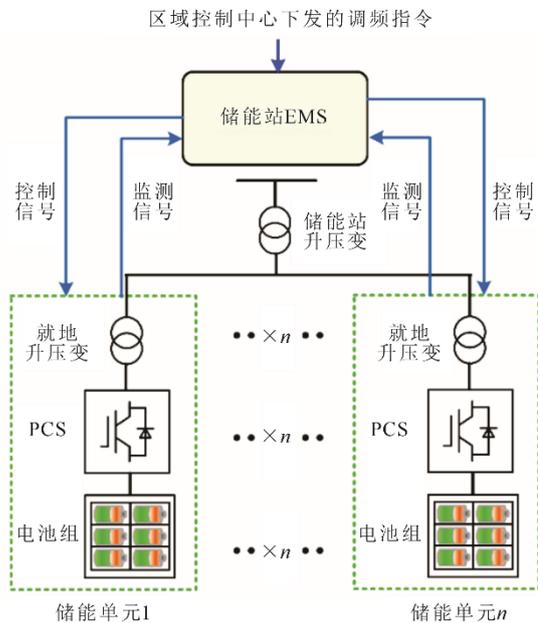


图 1 规模化电池储能系统结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of large-scale battery energy storage (BES) system

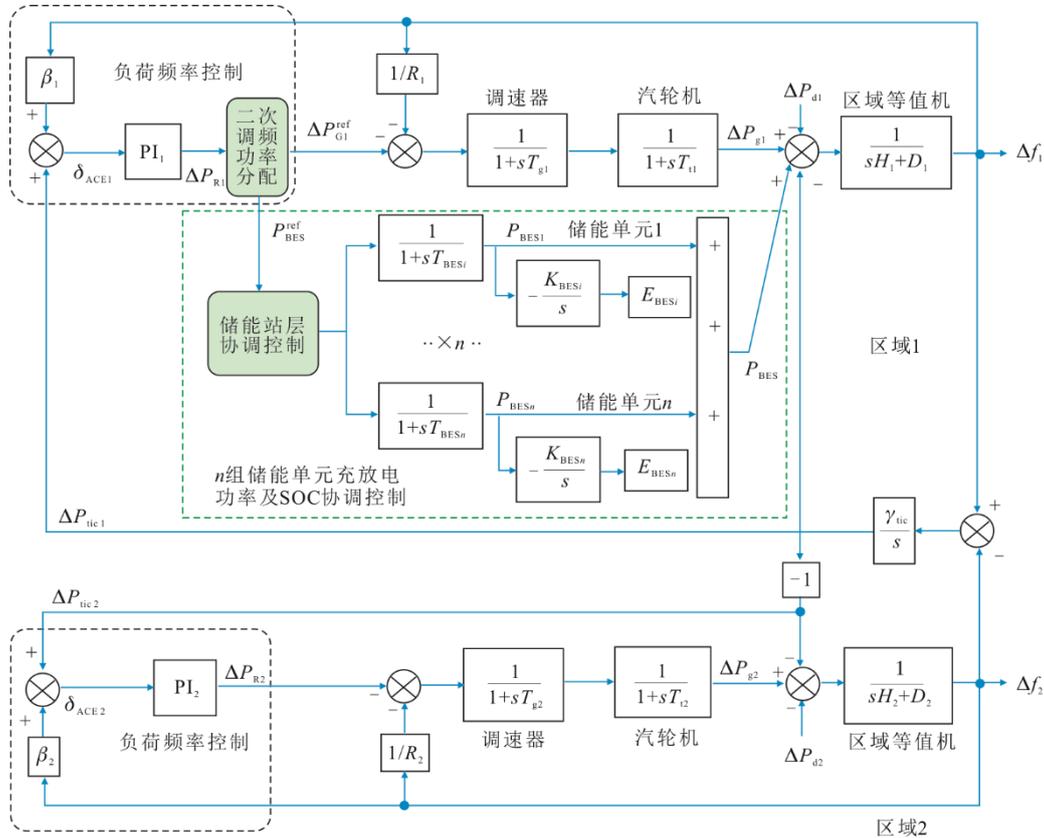
电力系统二次调频又称为电力系统负荷频率控制（load frequency control, LFC），其通过对电力系统中的调频电源出力进行二次调整，实现有功电源出力与负荷平衡，从而达到恢复系统频率和联络线功率的目的^[14]。目前，大规模电网主要采用分区控制模式，区域电网调度中心的二次调频软件通过实时监视系统频率及区域之间的联络线偏差，计算出区域控制偏差（area control error, ACE），将 ACE 信号按照预定的控制规则计算出二次调频功率下发给辖区内的调频机组和储能电站执行。储能站能量管理系统（energy management system, EMS）在收到二次调频功率指令后，通过协调储能站内各储

能单元实现调频功率跟踪,参与区域调度中心的二次频率控制。

1.2 负荷频率控制等值模型

典型的规模化电池储能参与负荷频率控制的两区域互联模型如图2所示。图2中,每个区域的

传统调频电源用1台等值的非再热式火电机组表示,其动态模型包括调速器、汽轮机、区域等值发电机的传递函数模型。规模化储能电站模型则由n套储能单元简化模型构成,每套储能单元的动态模型包括功率输出响应以及储能电量状态的传递函数模型。



ΔP_R —二次调频功率需求; ΔP_G^{ref} —传统机组参与二次调频的功率变化量; ΔP_g —传统机组实际功率变化量; ΔP_d —负荷扰动量; ΔP_{tie} —联络线功率偏差; P_{BES}^{ref} —储能站参与二次调频的功率; P_{BESi} —第*i*组电池储能单元的功率; E_{BESi} —第*i*组电池储能单元的电量; Δf —系统频率偏差; δ_{ACE} —区域控制偏差; T_g —调速器时间常数; T_t —汽轮机时间常数; R —等值机组调差系数; H —区域惯性系数; D —区域阻尼系数; T_{BESi} —第*i*组电池储能单元的功率调节时间常数; K_{BESi} —第*i*组电池储能单元的充放电系数; β —区域频率偏差系数; γ_{tie} —联络线同步系数。

图2 含规模化电池储能的两区域互联电力系统 LFC 等值模型

Fig.2 The equivalent model of two-area interconnected power system with large-scale battery energy storage for LFC

在图2所示的负荷频率控制模型中,规模化电池储能模型主要包括储能站内各组储能单元的动态模型和控制策略模型。针对规模化电池储能参与二次调频的问题,考虑到每组电池单元在PCS控制下可快速精确地跟踪参考功率指令,各组储能电池单元的实际功率输出对参考功率指令的动态响应过程用一阶惯性环节进行描述^[13]:

$$G_{BESi}(s) = \frac{1}{1 + sT_{BESi}} \quad (1)$$

储能电池存储电量与充放电功率密切相关,若不计储能电池的充电与放电损耗,每组储能电池的剩余电量与充放电功率的动态关系如下^[13]:

$$E_i(t) = E_i(t_0) - \frac{1}{3600} \int_{t_0}^t P_{BESi}(t) dt \quad (2)$$

式中: $E_i(t_0)$ 为第*i*组储能单元在初始 t_0 时刻的电量, kW·h; P_{BESi} 为储能充放电功率, 大于0表示放电, 反之表示充电。

荷电状态(SOC)是电池所剩电量的相对度量,定义为电池剩余电量 $E_i(t)$ 与额定电量 E_{max} 之比, 即 $S_{SOCi}(t) = E_i(t) / E_{max}$ 。其中, $S_{SOCi}(t) = 0$ 表示电池放完电, $S_{SOCi}(t) = 1$ 表示电池充满电。基于上述SOC定义, 将式(2)左右两边同时除以 E_{max} , 可得:

$$S_{SOCi}(t) = S_{SOCi}(t_0) - \frac{1}{3600E_{max}} \int_{t_0}^t P_{BESi}(t) dt \quad (3)$$

式中 $S_{SOCi}(t_0)$ 为初始 t_0 时刻的 SOC。

总体上,含规模化电池储能的二次调频与传统二次调频相比具有如下特点,在设计调频策略时需加以考虑:

1) 相对于传统机组,规模化储能电站的响应时间更短,在设计调频功率分配策略时,需结合系统调频需求充分利用储能站的调节优势;

2) 规模化储能电站的充放电容量有限,一旦处于深度充放电状态,其调频支撑能力将大幅衰减,调频功率分配策略应考虑储能站的电量状态自恢复问题;

3) 储能电站由多组储能电池单元构成,在储能站层面须考虑由各组电池储能单元协同完成区域控制中心下发的调频功率跟踪问题;

4) 为保持电池储能站高效健康运行,须考虑储能站内各组电池储能单元的 SOC 一致性控制问题。

2 电池储能参与二次调频控制策略

规模化电池储能参与电力系统二次调频的能力受到电池容量及电池 SOC 限制,长时间持续放电(或充电)会使电池存储的电量耗竭(或蓄满),而电池储能系统在耗竭或蓄满状态下只能进行单向调频,参与调频的能力大大削弱。因此,在区域控制中心层,电力系统二次调频要充分考虑电池储能与传统机组的调节特性差异,合理分配二次调频功率需求。在电池储能站层,考虑到规模化电池储能系统由多套电池储能单元构成,须对电池储能系统整体的 SOC 进行统一管理,并保持每套储能单元的 SOC 一致,从而最大化利用电池储能系统的调节能力,避免某些储能单元因深度充放电而停止运行。

2.1 区域控制层级的二次调频控制策略

在区域控制中心层,电力系统二次调频通常根据 ARR (或 ACE) 的大小来划分调节区间,一般包括调节死区、正常调节区、紧急调节区^[13]3个区间。本文将根据 ARR 所处的调节区间以及规模化电池储能系统整体的 SOC 水平,协调控制传统调频机组和储能。

2.1.1 紧急调节区内快速响应控制

当ARR在紧急调节区域时,二次调频的首要目标是利用区域内调频电源容量快速地减小ACE,并将调频需求恢复到正常控制区内。由于电池储能系统的调节速度较快,在紧急控制区内最大化利用储能系统的调节容量,不足部分由传统机组分担。因此,在紧急控制区内,储能和传统机组的功率分配策略为

$$\begin{cases} P_{\text{BES,ref}} = \begin{cases} \min(P_{\text{BES,d,max}}, \Delta P_{\text{R}}), \Delta P_{\text{R}} > \Delta P_{\text{R,em}} \\ \max(P_{\text{BES,c,max}}, \Delta P_{\text{R}}), \Delta P_{\text{R}} < -\Delta P_{\text{R,em}} \end{cases} \\ \Delta P_{\text{G,ref}} = \Delta P_{\text{R}} - P_{\text{BES,ref}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{BES,ref}}$ 、 $\Delta P_{\text{G,ref}}$ 分别表示电池储能系统和传统机组的调节量, $P_{\text{BES,d,max}}$ 、 $P_{\text{BES,c,max}}$ 分别表示电池储能系统的最大放、充电功率; $\Delta P_{\text{R,em}}$ 表示紧急调节区的临界值, $|\Delta P_{\text{R}}| \geq \Delta P_{\text{R,em}}$ 表示ARR处在紧急控制区内。当调频需求处在紧急调节区时,根据功率分摊策略(式(4)),电池储能系统实际上是“竭尽所能”参与调频,暂不考虑储能的SOC是否处在正常运行区间。需要说明的是,储能系统除了在接近 $S_{\text{SOC}}=1$ 时要求继续吸收功率,或在接近 $S_{\text{SOC}}=0$ 时要求继续释放功率之外,即使处在非理想区间外也能满足持续数分钟级别的紧急调频需求。

2.1.2 正常调节区内互补协调控制

若ARR处在正常调节区内,说明当前参与二次调频电源的备用较为充裕且ACE相对较小。在此情形下,区域控制中心可根据不同调频电源特性,协调分配二次调频功率需求。本文提出的传统机组与电池储能系统的协调分配策略基本思路如下。

1) 电池储能系统 SOC 在预先设定的正常运行区间工况 储能系统被视为基本调频电源,根据容量大小按比例分配调频需求,兼顾各电源参与调频的公平性。

2) 电池储能系统 SOC 偏离正常运行区间工况 若二次调频方向有利于恢复储能 SOC,则储能按其最大功率容量执行调频任务,剩余调频需求由传统机组承担;若二次调频方向不利于恢复储能 SOC,则储能不参与二次调频,调频任务全部由传统机组承担。

基于上述分析,在正常调节区的储能与传统机组的功率分配策略为

$$\begin{cases} P_{\text{BES,ref}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{BES,d,max}}}{\Delta P_{\text{G,max}} + P_{\text{BES,d,max}}} \Delta P_{\text{R}}, & \text{if } S_{\text{SOC,L}} \leq S_{\text{SOC}} \leq S_{\text{SOC,U}} \\ \max(P_{\text{BES,c,max}}, \Delta P_{\text{R}}), & \text{if } S_{\text{SOC}} \leq S_{\text{SOC,L}} \ \& \ \Delta P_{\text{R}} < 0 \\ \min(P_{\text{BES,d,max}}, \Delta P_{\text{R}}), & \text{if } S_{\text{SOC}} \geq S_{\text{SOC,U}} \ \& \ \Delta P_{\text{R}} > 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \\ \Delta P_{\text{G,ref}} = \Delta P_{\text{R}} - P_{\text{BES,ref}} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $\Delta P_{G,\max}$ 为传统机组最大调节容量， $S_{\text{SOC,U}}$ 、 $S_{\text{SOC,L}}$ 分别为储能 SOC 正常运行区间的上、下界。

2.1.3 调节死区内储能 SOC 自恢复控制

为避免频繁调节，当 ARR 处在调节死区时，区域控制中心通常不再调整各调频机组的功率参考值。但是，在储能参与二次调频场景下，考虑到储能不能长时间单向参与调频，须将储能 SOC 恢复到理想工作区间，为下一阶段参与二次调频服务做好准备。因此，在调节死区内，储能 SOC 恢复策略一方面要快速将储能 SOC 恢复到正常运行区间，另一方面要避免引起 ACE 增大而跳出调节死区。

当储能站 SOC 处在正常运行区间 ($S_{\text{SOC,L}} \leq S_{\text{SOC}} \leq S_{\text{SOC,U}}$) 时，将储能站当所承担的调频功率全部转移给传统调频机组，此时分配给储能站的调频功率为 0。当储能 SOC 高于正常运行区间上界 ($S_{\text{SOC}} > S_{\text{SOC,U}}$) 时，储能站需要放电来恢复 SOC，而当储能 SOC 低于正常运行区间下界 ($S_{\text{SOC}} < S_{\text{SOC,L}}$) 时，储能站需要充电来恢复 SOC，储能站在自恢复期间的充放电功率大小与其 SOC 水平成比例。在调节死区内，储能站与传统机组功率分配策略如下：

$$P_{\text{BES,ref}} = \begin{cases} 0, & S_{\text{SOC,L}} \leq S_{\text{SOC}} \leq S_{\text{SOC,U}} \\ \frac{S_{\text{SOC}} - S_{\text{SOC,U}}}{1 - S_{\text{SOC,U}}} P_{\text{BES,d,max}}, & S_{\text{SOC}} > S_{\text{SOC,U}} \\ \frac{S_{\text{SOC,L}} - S_{\text{SOC}}}{S_{\text{SOC,L}}} P_{\text{BES,c,max}}, & S_{\text{SOC}} < S_{\text{SOC,L}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta P_{G,\text{ref}} = \Delta P_R - P_{\text{BES,ref}}$$

2.2 储能站层级的储能单元 SOC 一致性控制策略

上层区域控制中心根据二次调频需求以及储能站 SOC 水平制定相应功率分配策略 (式(4)一式(6))，并将二次调频功率指令下给发传统调频机组和储能电站执行。下层储能站接收到二次调频指令后，快速协调站内各组储能单元出力实现调频功率跟踪，并保证各组储能单元 SOC 一致，以提高储能系统的综合运行效率。为此，本节采用分布式协同控制方法实现规模化储能电站的功率跟踪和各储能单元 SOC 一致收敛 2 个目标。

2.2.1 储能电池单元的动态模型

对于每组储能电池单元而言，其功率调节惯性时间常数 T_{BES_i} 较短 (毫秒级)，而储能系统在响应二次调频的调节周期较长 (数秒至数分钟)。因此，在规模化电池储能系统动态模型中，可忽略各储能单

元的惯性时间常数 T_{BES_i} ，近似认为 $P_{\text{BES}_i} = P_{\text{BES}_i,\text{ref}}$ 。

储能单元 SOC 与充放电功率的关系 (式(3)) 可用一阶动态方程表示，即对式(3)求导可得

$$\frac{dS_{\text{SOC},i}(t)}{dt} = -\frac{1}{3600E_{\text{max}}} P_{\text{BES}_i}(t) \quad (7)$$

为动态调整各组储能单元功率输出，在每组储能单元的功率参考信号前插入理想积分器 (1/s)，则储能单元的充放电功率与积分器输入信号的动态响应关系可表示为

$$\frac{dP_{\text{BES}_i}(t)}{dt} = u_{\text{BES}_i}(t) \quad (8)$$

式中： $u_{\text{BES}_i}(t)$ 表示积分器的输入信号。定义新变量 $S_{\text{BES}_i}(t) = -3600E_{\text{max}} S_{\text{SOC},i}(t)$ ，每组储能单元的动态特性可用二阶积分模型表示：

$$\begin{cases} \frac{dS_{\text{BES}_i}(t)}{dt} = P_{\text{BES}_i}(t) \\ \frac{dP_{\text{BES}_i}(t)}{dt} = u_{\text{BES}_i}(t) \end{cases} \quad (9)$$

每一组储能单元的动态用式(9)描述，由多组储能单元构成的规模化储能系统可视作由多个二阶积分动态构成的多智能体系统。这样，可采用多智能体系统理论中的分布式协同控制算法实现多组电池储能单元的 SOC 一致收敛。

2.2.2 储能系统分布式协同控制算法

在多智能体系统理论中，各智能体之间的通信网络通常用图 $G = \{V, E, A\}$ 表示。其中： $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示 n 个节点的集合； $E = V \times V$ 表示边的集合，即通信链路的集合； $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 是用来描述节点与边关系的邻接矩阵， a_{ij} 为边的权重。在无向图中， $(v_i, v_j) = (v_j, v_i)$ ， $a_{ij} > 0$ 表示节点 i 和节点 j 可以相互传递信息， $a_{ij} = 0$ 表示节点 i 和节点 j 之间无通信连接^[15]。

为使规模化储能系统跟踪区域控制中心下发的调频指令，本文在储能电站 EMS 层设计 1 个编号为 0 的二阶领导智能体，其模型结构如图 3 所示，用于实时监控和更新储能电站整体的参考功率跟踪状况和 SOC 水平，其动态模型如下：

$$\begin{cases} \frac{dS_{\text{BES}_0}(t)}{dt} = P_{\text{BES}_0}(t) \\ \frac{dP_{\text{BES}_0}(t)}{dt} = K_0 (P_{\text{BES,ref}}(t) - P_{\text{BES}}(t)) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{\text{BES,ref}}(t)$ 表示 t 时刻区域控制中心下发给储能电站的二次调频参考功率， $P_{\text{BES}}(t)$ 表示 t 时刻储能电站并网节点处的实测功率， K_0 为正增益系数。

由式(10)可以看出, 领导智能体将根据功率跟踪偏差实时调整 $P_{BES0}(t)$ 和 $S_{BES0}(t)$, 并下发给站内各组储能单元执行。

由储能站 EMS 层的领导智能体和各组储能单元的追随智能体构成的领导追随 (leader-following) 多智能体系统, 实现 $S_i(t)=S_0(t)$ 和 $P_{BESi}(t)=P_{BES0}(t)$ 一致收敛的分布式协同控制算法如下^[16]:

$$u_{BESi} = -\sum_{j=0}^n a_{ij} \left[(S_{BESi} - S_{BESj}) + \lambda_1 (P_{BESi} - P_{BESj}) \right] - \lambda_2 \operatorname{sgn} \left(\sum_{j=0}^n a_{ij} \left[\lambda_3 (S_{BESi} - S_{BESj}) + (P_{BESi} - P_{BESj}) \right] \right) \quad (11)$$

式中: a_{ij} 表示通信邻接矩阵 A 的元素, 这里取 $a_{ij}=1$ 表示第 i 和第 j 个智能体存在通信连接, $a_{ij}=0$ 表示彼此之间无通信; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 是正增益常数。

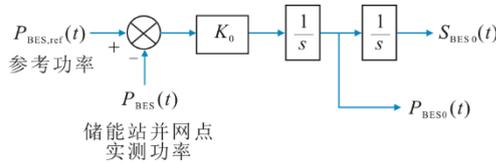


图 3 储能站领导智能体模型结构

Fig.3 The model structure of leader agent at BES station

分布式协同控制算法(式(11))对于通信拓扑的要求是, 储能站 EMS 层的信息至少可以通过 1 条通信路径到达任意一组储能单元, 即通信拓扑是连通的。例如: 由储能站 EMS 层领导智能体(编号 0)和 4 个储能单元追随智能体(编号 1—4)构成的多智能体系统, 其不同的通信拓扑及其相应的邻接矩阵如图 4 所示。

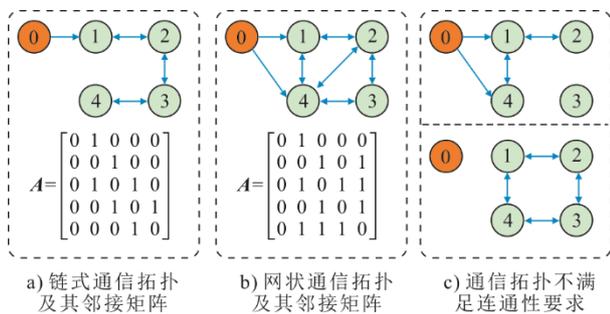


图 4 多智能体系统的通信拓扑及其邻接矩阵

Fig.4 The communication topology of the multi-agent system and its adjacency matrix

图 4 中单向箭头表示储能站 EMS 层的领导智能体向站内的某些储能单元下发信息 S_{BES0} 和 P_{BES0} , 双向箭头表示相邻储能单元之间相互传递自

身的信息 S_{BESi} 和 P_{BESi} 。图 4a)链式通信拓扑和图 4b)网状通信拓扑均满足连通性要求, 而图 4c)由于存在信息孤岛不满足连通性要求。需要说明的是, 不同的通信拓扑结构, 算法收敛速度不同。一般通信拓扑越紧密, 算法的收敛速度越快, 但通信成本会相应增加。因此, 在实际应用时, 还须在算法收敛速度和通信成本之间加以权衡。分布式协同控制算法(式(11))除要求通信拓扑保持连通性外, 各正增益常数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 还需满足一定条件。关于分布式协同控制算法实现一致性跟踪的充要条件可参考文献[15-18], 此处不再赘述。综上所述, 规模化电池储能参与二次调频控制策略的具体实现步骤为:

1) 区域控制中心量测系统频率偏差 Δf 和联络线控制偏差 ΔP_{tie} , 计算出区域控制偏差 δ_{ACE} , 并利用 PI 控制器整定出区域调频功率需求 ΔP_R ;

2) 区域控制中心根据 $|\Delta P_R|$ 的大小来判断系统当前所处的调节区间(紧急调节区、正常调节区和调节死区);

3) 结合储能站的 SOC, 若系统处在紧急调节区内, 采用功率分配策略(式(4)); 若在正常调节区, 采用功率分配策略(式(5)); 若在调节死区, 则采用功率分配策略(式(6));

4) 将调节量 $P_{BES.ref}$ 和 $\Delta P_{G.ref}$ 分别下发给电池储能站和传统机组执行来实现电力系统二次调频目标;

5) 储能站接收到参考调节功率 $P_{BES.ref}$ 之后, 量测储能站并网点功率 P_{BES} , 利用储能站领导智能体的动态模型(式(10))计算出 P_{BES0} 和 S_{BES0} , 下发至与领导智能体直接通信的储能单元;

6) 储能站内各组电池储能单元量测自身状态信息 (S_{BESi} 和 P_{BESi}), 并将这 2 个信号发送给与之相邻的储能单元;

7) 每组储能单元利用分布式协同控制算法(式(11))进行充放电控制, 最终通过 n 组储能单元协同实现储能站功率跟踪目标, 即 $P_{BES}=P_{BES.ref}$, 以及 SOC 一致性收敛目标, 即 $S_{SOC1}=S_{SOC2}=\dots=S_{SOCn}$ 。

3 算例仿真试验

3.1 仿真系统及控制策略参数

利用软件 MATLAB/Simulink 搭建本文提出的考虑规模化电池储能 SOC 一致性的二次调频分层控制系统模型, 并采用如图 2 所示的两区域互联电网模型进行模拟仿真实验, 系统基准容量为 1 000 MW, 两区域互联系统参数见表 1。在区域 1 和区域 2 中, 传统机组的二次调频容量均为 100 MW (0.1 pu)。区

域 1 和区域 2 基于 ARR 的调节分区情况为： $|\Delta P_R| \leq 0.005 \text{ pu}$ 设置为调节死区， $0.005 \text{ pu} \leq |\Delta P_R| \leq 0.08 \text{ pu}$ 设置为正常调节区， $0.08 \text{ pu} < |\Delta P_R|$ 设置为紧急调节区。

区域 1 的储能站（编号 0）与 12 组储能单元间的通信拓扑以及仿真模型框图如图 5 所示。每组储能单元的最大充放电功率为 2 MW，最大存储电量为 2.5 MW·h，因此储能站整体的最大充放电功率为 $12 \times 2 \text{ MW} = 24 \text{ MW}$ ，最大存储电量为 $12 \times 2.5 \text{ MW} \cdot \text{h} = 30 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。储能功率调节时间常数 $T_{\text{BES}} = 0.01 \text{ s}$ ，储能 SOC 正常工作区间设定为 (0.3, 0.7)。二次调频控制系统参数设定为：区域 1 和区

域 2 的 PI 控制器参数为 $k_p = 0.16$ 、 $k_i = 0.48$ ，储能站领导智能积分系数 $K_0 = 0.15$ ，分布式协同控制算法参数为 $\lambda_1 = 5$ 、 $\lambda_2 = 10$ 、 $\lambda_3 = 1$ 。

表 1 两区域互联系统参数
Tab.1 Parameters of two-area interconnected power system

参数	区域 1	区域 2
T_g/s	0.08	0.10
T_t/s	0.30	0.35
$R/(\text{Hz} \cdot \text{pu}^{-1})$	2.4	2.5
$H/(\text{pu} \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.166 7	0.200 0
$D/(\text{pu} \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.008 3	0.010 0
$\beta/(\text{pu} \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.425	0.450
$\gamma_{\text{tie}}/(\text{pu} \cdot \text{Hz}^{-1})$	0.545	0.545

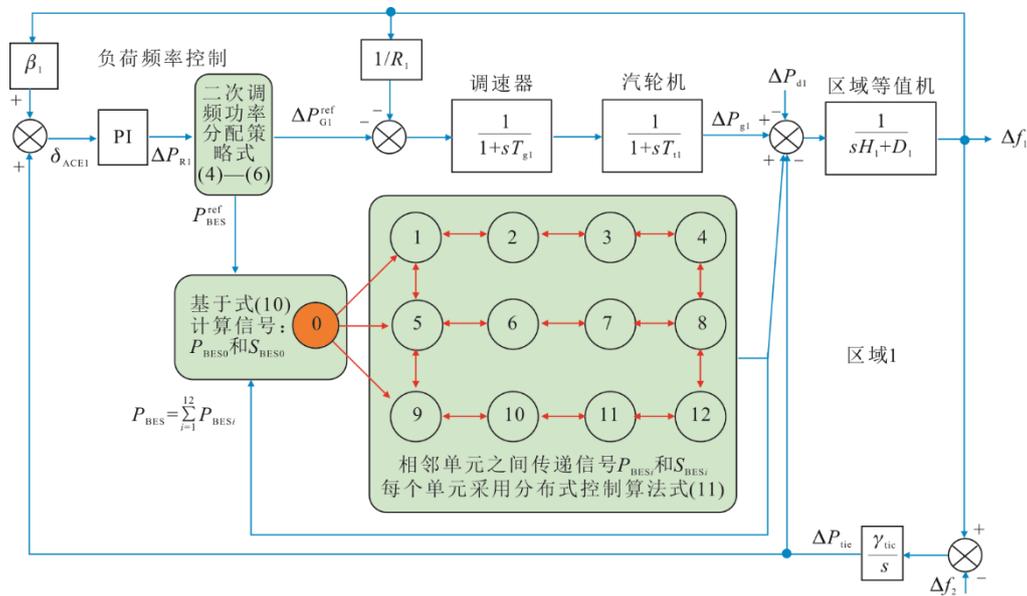


图 5 含电池储能站的区域 1 仿真模型框图
Fig.5 Simulation model diagram of Area 1 with BES station

3.2 系统仿真结果分析

3.2.1 小负荷扰动工况

区域 1 内设定小负荷扰动曲线如图 6 所示。假设第 1~12 组储能单元的初始 SOC 依次为 51%、52%、53%、54%、55%、56%、57%、58%、59%、60%、61%、62%。系统仿真结果如图 7 所示。

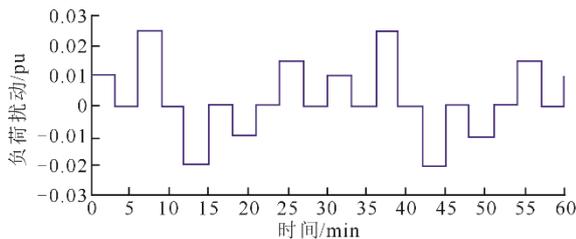


图 6 区域 1 内小负荷扰动曲线
Fig.6 The mall load disturbance curve in Area 1

由图 7 可以看出：发生小负荷扰动时，系统频率偏差、ACE 在 1 min 内恢复至 0，可满足联络线和频率偏差控制（tie-line and frequency bias control, TBC）模式的性能要求；储能站实际出力可准确、快速地跟踪二次调频功率指令。需要的说明是，在初始阶段（0~5 min）存在的跟踪误差主要是在调节各储能单元的 SOC 过程中产生的，如果各储能单元的初始 SOC 相同，则不会产生上述功率跟踪误差。根据图 7 中各储能单元 SOC 响应曲线可知，经过 5 min 左右调节时间，各储能单元的 SOC 一致收敛。并且，在 60 min 调节时间内，本文的二次调频功率分配策略保证了储能站 SOC 维持在正常运行范围，提高了储能站持续参与二次调频的能力。

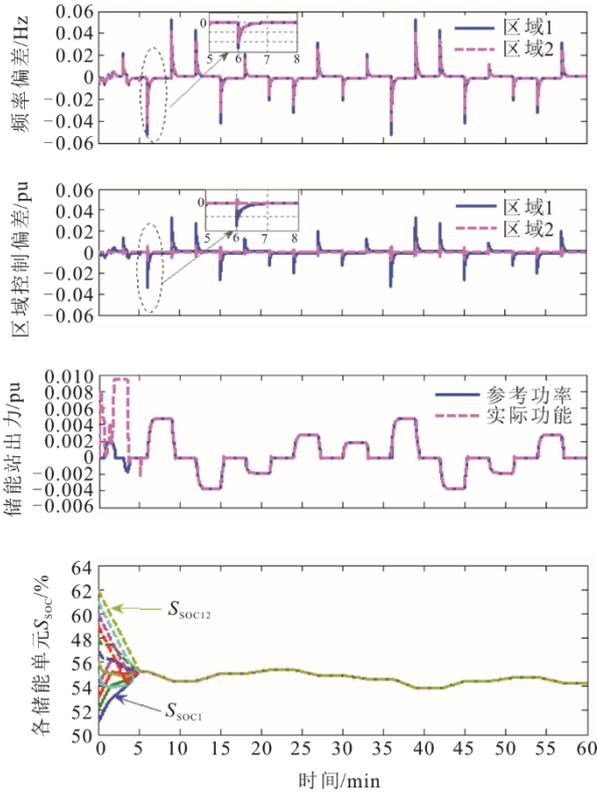


图 7 小负荷扰动工况下系统动态响应曲线
Fig.7 Dynamic response curves of the system under small load disturbance

3.2.2 大负荷扰动工况

设定大负荷扰动曲线如图 8 所示。正、反向最大负荷扰动分别达到 0.12、-0.12 pu。假设第 1~12 组储能单元的初始 SOC 依次为 20%、22%、24%、26%、28%、30%、32%、34%、36%、38%、40%、42%。实验测试中，将本文二次调频策略与不考虑储能 SOC 的情况进行对比分析。不考虑储能 SOC 的二次调频策略为：在区域控制中心层，根据储能站和传统机组容量大小按比例分配二次调频功率需求；在储能站层，将二次调频任务平均分配给 12 组储能单元。

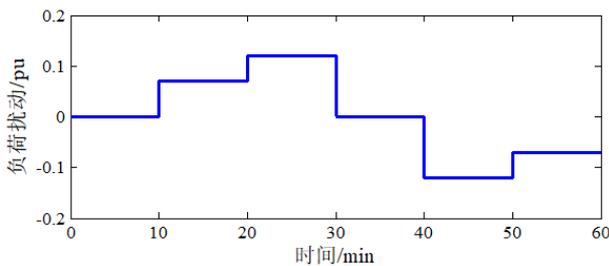


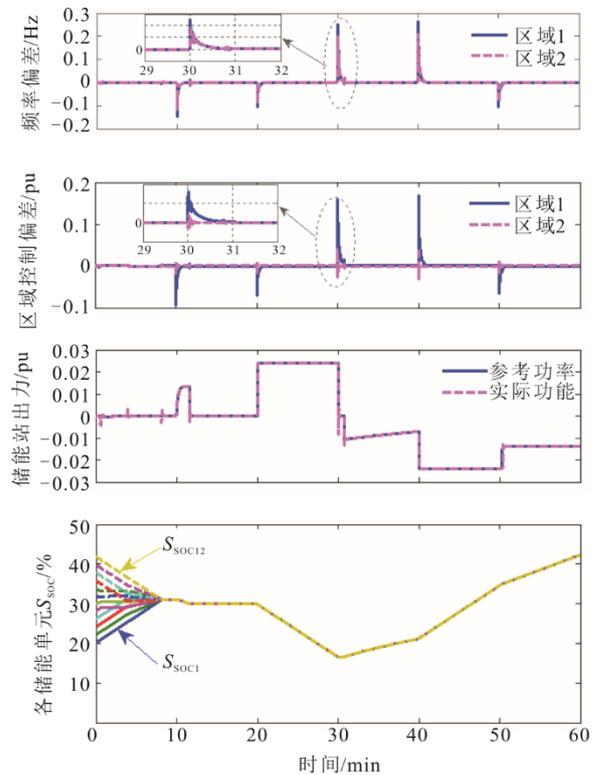
图 8 大负荷扰动曲线
Fig.8 The large load disturbance curve

大负荷扰动工况下，系统仿真结果如图 9 所示。由图 9a)可以看出，在大负荷扰动 (-0.12 pu) 发生时刻 (t=30 min)，瞬时最大频率偏差达到 0.25 Hz，区域控制偏差达到 0.17 pu，在本文控制策略作用下，经过 1 min 左右，频率偏差和区域控制偏差恢复至 0；从储能站出力曲线来看，储能实际功率输出能够快速准确跟踪区域控制中心下发的二次调频功率指令；在正向大负荷扰动发生时段 (20~30 min) 和反向大负荷扰动发生时段 (40~50 min)，储能站功率按最大容量输出给予电网频率支撑；由各组储能单元 SOC 曲线可以看出，经过 10 min 左右，各储能单元的 SOC 趋于一致。

对比图9a)和图9b)可知：

1)从储能站 SOC 响应曲线看，不考虑储能 SOC 的控制策略在大扰动发生后持续放电，在 25~30 min，1、2、3 号储能单元由于深度放电限制（低于 5%）而停止放电。相比之下，本文策略不仅使储能站内各组储能单元一致收敛，而且更好地维持了各储能单元的 SOC。

2)从储能站出力响应曲线看，不考虑储能 SOC 的控制策略在 25~30 min 期间，由于 1、2、3 号储能单元相继停止放电，使得储能站功率出现了最大 0.006 pu 的功率跟踪误差。而本文策略能够自主恢复储能单元的 SOC，实现了准确的功率跟踪目标。



a) 本文提出的二次调频策略

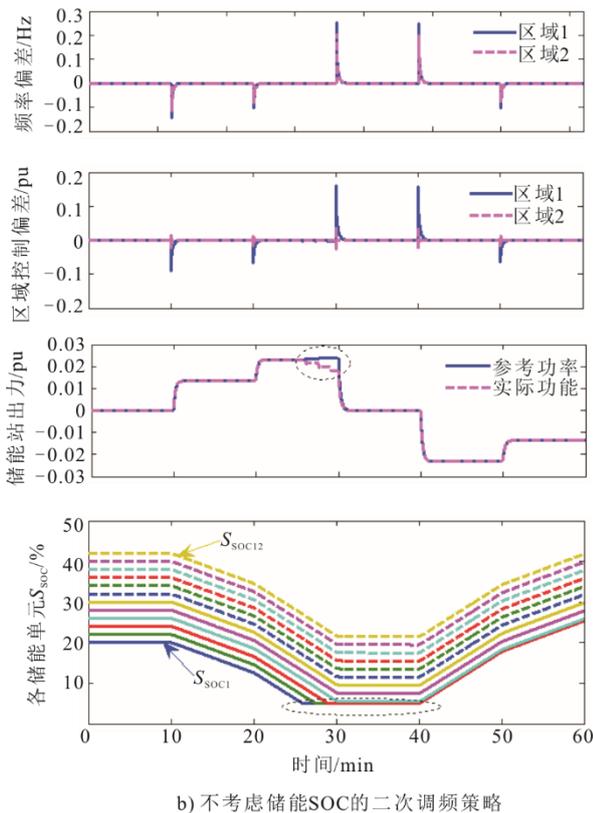


图9 大负荷扰动工况下系统动态响应

Fig.9 Dynamic response curves of the system under large load disturbance

3) 从系统频率偏差和区域控制偏差的响应曲线看, 2种二次调频策略性能相近, 这主要是因为仿真测试系统中负荷扰动没有超过总的调频容量, 不考虑储能SOC的控制策略出现的0.006 pu功率跟踪误差最终由传统机组来弥补。如果传统调频机组已无调频容量, 那么储能站的调频功率跟踪误差势必引起系统频率偏差和区域控制偏差。

从总体上来看, 本文的二次调频策略能够保证储能站内各组储能单元SOC运行在较好的水平, 有效防止储能单元SOC越限而停止运行, 最大化利用储能站的调频容量以支撑系统的频率恢复。

4 结 论

1) 本文控制策略可使系统频率偏差、区域控制偏差在大扰动(最大负荷扰动达到0.12 pu)情况下在1 min内调整至0, 储能电站总功率在4 min内实现无差跟踪, 储能站内12组储能单元的SOC(最大相差24%)在10 min内达到一致收敛。该策略达到了二次调频目标, 保证了储能电站SOC在设定的运行区间, 从而提高了储能电站持续参与二次调

频的能力。另外, 利用分布式协同控制算法实现了储能站内各组储能单元SOC一致收敛, 不仅有利于电池储能系统高效健康运行, 还有助于评估计算储能站整体的电量水平。

2) 本文策略主要适用于由相同电池类型构成的集中式规模化电池储能参与电力系统二次调频场景, 对于由大量分布式电池储能(电池储能参数不同、安装地域分散)聚合而成的规模化储能系统, 其参与电力系统调频的相关策略还有待深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 周喜超. 电力储能技术发展现状及走向分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 7-12.
ZHOU Xichao. Development status and trend analysis of electric energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 7-12
- [2] DOENGES K, EGIDO I, SIGRIST L, et al. Improving AGC performance in power systems with regulation response accuracy margins using battery energy storage system (BESS)[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2816-2825.
- [3] 程亦直, 张沛超, 季珉杰, 等. 分布式电池储能系统参与自动发电控制的协调控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 66-73.
CHENG Yizhi, ZHANG Peichao, JI Minjie, et al. A coordinated control method for distributed battery energy storage system to participate in automatic generation control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 66-73.
- [4] 周婷婷, 李欣然, 姜学皎. 储能电源参与电网调频的需求评估方法[J]. 电力建设, 2016, 37(8): 65-71.
ZHOU Tingting, LI Xinran, JIANG Xuejiao. Demands assessment method of energy storage power sources in grid frequency regulation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 65-71.
- [5] OSHNOEI A, KHERADMANDI M, MUYEEN S M. Robust control scheme for distributed battery energy storage systems in load frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4178-4188.
- [6] 贾学翠, 李相俊, 万君, 等. 平抑电网大功率扰动的规模化电池储能系统控制方法[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 69-76.
JIA Xuecui, LI Xiangjun, WAN Jun, et al. Control method of large-scale battery energy storage system for suppressing the disturbance of power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 69-76.
- [7] 李若, 李欣然, 谭庄熙, 等. 考虑储能电池参与二次调频的综合控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 74-82.
LI Ruo, LI Xinran, TAN Zhuangxi, et al. Integrated control strategy considering energy storage battery participating in secondary frequency regulation[J]. Automation of Power Systems, 2018, 42(8): 74-82.
- [8] 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.
- [9] 于昌海, 吴继平, 杨海晶, 等. 规模化储能系统参与电网调频的控制策略研究[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(4): 68-73.
YU Changhai, WU Jiping, YANG Haijing, et al. Frequency regulation strategy for power grid incorporating large-scale energy storage[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(4): 68-73.
- [10] 刘起兴, 和识之, 卢伟辉, 等. 电池储能辅助二次调频的模型预测控制方法[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(23): 119-125.
LIU Qixing, HE Shizhi, LU Weihui, et al. Model predictive control method for battery energy storage assisting secondary frequency regulation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23): 119-125.
- [11] NGUYEN D H, KHAZAEI J. Multi-agent time-delayed fast consensus design for distributed battery energy storage systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 9(3): 1397-1406.
- [12] 胡斌, 黄一鸣, 陈国璋. 考虑 SOC 一致性的锂电池储能系统功率分配策略[J]. *华北电力技术*, 2017(12): 20.
HU Bin, HUANG Yiming, CHEN Guozhang. Power distribution strategy of Li-BESS considering SOC consistency[J]. *North China Electric Power*, 2017(12): 20.
- [13] WANG Y, XU Y, TANG Y, et al. Aggregated energy storage for power system frequency control: a finite-time consensus approach[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(4): 3675-3686.
- [14] 谢志佳, 李德鑫, 王佳蕊, 等. 储能系统参与电力系统调频应用场景及控制方法研究[J]. *热力发电*, 2020, 49(8): 117-125.
XIE Zhijia, LI Deixin, WANG Jiarui, et al. Application scenarios and control method research of energy storage system participating in power system frequency modulation[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(8): 117-125.
- [15] HUANG C, WENG S, YUE D, 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.
- [16] CAO Y, REN W. Distributed coordinated tracking with reduced interaction via a variable structure approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(1): 33-48.
- [17] 吴仁光, 郑立, 李凯鹏, 等. 面向综合能源配电网的储能系统优化配置方法[J]. *广东电力*, 2020, 33(3): 42-50.
WU Renguang, ZHENG Li, LI Kaipeng, et al. Optimized configuration method of energy storage system for integrated energy distribution network[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(3): 42-50.
- [18] 高海翔, 董超, 孟子杰, 等. 机组-储能联合系统参与调频辅助服务市场的关键技术研究与实践[J]. *广东电力*, 2020, 33(6): 52-58.
GAO Haixiang, DONG Chao, MENG Zijie, et al. Key technologies and practice of generator-storage combination system participating in frequency regulation ancillary service markets[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(6): 52-58.

(责任编辑 李园)