

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211339

# 基于旋转门算法的电池储能辅助单机跟踪 AGC 指令控制策略

董 锴<sup>1</sup>, 蔡新雷<sup>1</sup>, 崔艳林<sup>1</sup>, 孟子杰<sup>1</sup>, 陈东阳<sup>2,3</sup>, 余 洋<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学(保定)), 河北 保定 071003; 3. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学(保定)), 河北 保定 071003)

**摘要:** 针对电池储能辅助单机跟踪 AGC 指令过程中机组爬坡频次高以及储能动作次数多的问题, 提出基于旋转门算法的电池储能辅助单机跟踪 AGC 指令控制策略。首先, 利用旋转门算法对 AGC 历史数据进行压缩, 对压缩结果采用线性插值处理, 进一步进行动态更新及实时修正, 并结合机组爬坡特性确定机组承担的功率调节指令。然后, 将储能系统动态地分为 3 个电池组, 根据储能系统功率调节指令确定电池组动作顺序, 进而设计功率分配方法实现储能系统上层功率分配, 同时确定各电池组电池单元功率分配原则完成下层功率分配。最后, 利用某电厂实际 AGC 指令对控制策略进行仿真分析, 验证了所提策略的有效性。

**关键词:** 储能; 火电机组; 跟踪 AGC 指令; 动态分组; 功率分配

## Tracking AGC commands control strategy of a thermal power unit assisted by battery energy storage based on a swing door trending algorithm

DONG Kai<sup>1</sup>, CAI Xinlei<sup>1</sup>, CUI Yanlin<sup>1</sup>, MENG Zijie<sup>1</sup>, CHEN Dongyang<sup>2,3</sup>, YU Yang<sup>2,3</sup>

(1. Electric Power Dispatching Control Center of Guangdong Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 3. Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid of Hebei Province (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** There is a problem of high climb frequencies of a thermal power unit and large reaction times of a battery energy storage system. Thus an AGC commands tracking control strategy of a thermal power unit assisted by a battery energy storage system based on a swing door trending algorithm is proposed. First, historical data of the AGC are compressed by the swing door trending algorithm and linear interpolation is used to deal with the compressed data. Dynamic update and real-time correction are carried out to obtain the power regulation command of the thermal power unit integrated with its climb feature. Then, the battery energy storage system is dynamically divided into three groups and their action sequences are determined by their power regulation commands. The power distribution approach of the battery energy storage system is designed to realize power allocation in upper-layer and the power allocation principle of the cells for the three packs is devised to accomplish power allocation in the lower-layer. Finally, the simulation of the proposed control strategy is conducted using the AGC commands of an actual power plant and its effectiveness is verified.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 036000KK52190005 (GDKJXM20198110)).

**Key words:** energy storage; thermal power unit; tracking AGC commands; dynamic grouping; power allocation

## 0 引言

随着我国“3060”双碳目标的提出, 间歇式新

能源将以更大规模接入电网, 源网荷功率不平衡的挑战将愈加严峻, 不过传统火电机组受爬坡速度等因素限制很难提供快速调节服务<sup>[1-3]</sup>。为此, 许多火电厂引入了电池储能系统(Battery Energy Storage System, BESS)以辅助火电机组参与自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)<sup>[4-5]</sup>, 研究储能

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(036000KK52190005 (GDKJXM20198110))

辅助单机跟踪 AGC 指令的控制策略以提升机组调节能至至关重要。

现有的 BESS 辅助单机跟踪 AGC 控制策略,首先让火电机组跟踪电网下发的 AGC 指令,然后再由 BESS 弥补机组实际出力与 AGC 指令的偏差[5],这主要存在两方面的问题:1) 为平抑快速波动的新能源并网功率,电网下发的 AGC 指令日趋复杂[6],短时间、小幅度频繁波动的特征愈加明显,由火电机组直接跟踪复杂 AGC 指令会使得机组调速器频繁动作,导致机组爬坡频次较高[7];2) 现有控制策略中较少考虑 BESS 分组技术,跟踪功率偏差时需 BESS 所有电池单元同时参与,且复杂 AGC 指令下电池单元会频繁响应,来回切换充放电状态,增加了电池的寿命损耗,影响了 BESS 运行的经济性[8]。

已有研究采用样本熵对 AGC 指令进行分析表明,其变化特性在某些时段具有相似性[9],故针对问题 1),可根据 AGC 历史数据分析其变化特性,并结合火电机组的爬坡速率安排机组预出力,让火电机组跟踪较为平稳的功率指令以减少机组爬坡频次并改善调速器频繁动作的问题[10]。但由于 AGC 历史数据的“海量”特征,如何进行数据压缩是需要解决的关键问题。旋转门(Swing Door Trending, SDT)算法是数据压缩领域的常用方法,已在风电爬坡检测等方面获得成功应用[11],本文将采用 SDT 算法对 AGC 指令进行处理,用于生成火电机组的功率调节指令。

针对问题 2),已有研究主要计及机组爬坡速率以减少 BESS 动作次数,如文献[12]通过判断调速器的可调出力以自适应调节 BESS 出力,在一定程度上减少了 BESS 的动作次数,但由于未考虑 BESS 分组,仍需所有电池单元同时参与响应,整体动作次数依然偏高,并且该方案忽略了电池单元之间的状态差异,可能会降低 BESS 下一时段的可持续调控能力[13]。

综上,本文将研究基于 SDT 算法的 BESS 辅助单机跟踪 AGC 指令控制策略:为降低机组爬坡频次,提出基于 SDT 算法的机组功率调节指令获取方法;为减少 BESS 动作次数,设计基于动态分组的 BESS 双层功率分配方法。通过跟踪某电厂实际 AGC 指令,结果表明,火电机组位于小范围调节区间内的功率方差明显降低,改善了其爬坡频次过高的问题;储能系统的动作次数相比于传统方案显著减少,同时其下一时段的可持续调控能力也有所提升,由此验证了本文控制策略的正确性和有效性。

### 1 控制框架

本研究构建的 BESS 辅助单机跟踪 AGC 指令的

控制结构和流程分别如图 1 和图 2 所示。整个调节流程由火电机组参与调节和 BESS 参与调节两部分构成。

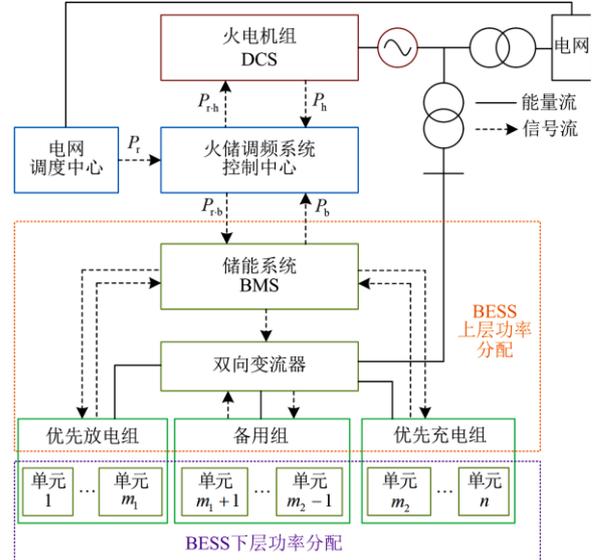


图 1 储能辅助火电机组跟踪 AGC 指令控制结构

Fig. 1 Control structure of thermal power unit tracking AGC commands assisted by energy storage system

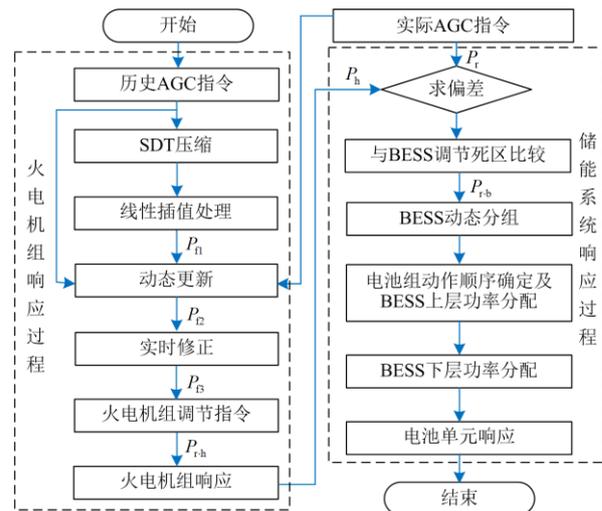


图 2 储能辅助火电机组跟踪 AGC 指令控制流程

Fig. 2 Control flow chart of thermal power unit tracking AGC commands assisted by energy storage system

#### 1) 火电机组调节过程

首先,电力调度中心将 AGC 指令  $P_r$  下发给火储系统控制中心。然后,控制中心以每小时为一个时段,采用 SDT 算法对日前 24 个时段的 AGC 指令进行压缩,将压缩结果进行线性插值得到  $P_{fl}$ 。将过去 3 天相同时段压缩后的 AGC 指令所在时刻求并集作为动态更新时刻,结合实际 AGC 指令在

动态更新时刻修正  $P_{f1}$ , 得到  $P_{f2}$ ; 在实际 AGC 指令突变时对  $P_{f2}$  进行实时修正, 得到  $P_{f3}$ ; 结合  $P_{f3}$ 、机组运行状态及最大爬坡速率  $P_{p,max}$  确定机组功率调节指令  $P_{r,h}$ , 并将其下发给机组集散控制系统执行。

## 2) BESS 调节过程

首先, 火储系统控制中心计算机组实际响应功率  $P_h$  与 AGC 指令  $P_r$  之间的偏差, 并将其与 BESS 调节死区作比较, 若偏差位于调节死区内, 则 BESS 不动作; 否则, 将 AGC 指令与调节死区的偏差作为 BESS 的功率调节指令  $P_{r,b}$ , 并将其下发给电池管理系统(Battery Management System, BMS)。然后, BMS 根据电池单元荷电状态(State of Charge, SOC)将 BESS 动态划分为优先放电组、备用组和优先充电组, 根据  $P_{r,b}$  的正负确定 3 个电池组的动作顺序和功率调节指令, 实现功率指令由 BESS 向电池组的上层功率分配。接着, 进一步确定 3 个电池组中电池单元功率分配原则, 按照电池组功率调节指令及电池单元的功率分配原则确定电池单元的功率调节指令, 完成功率指令由电池组向各自电池单元的的下层功率分配。最后, 电池单元进行响应, 完成调控。

## 2 火电机组及储能系统出力特性

火电机组出力主要受调速器和汽轮机影响, 其爬坡速度相对较慢, 对于快速变化的 AGC 指令往往难以及时响应<sup>[3]</sup>。考虑火电机组的爬坡速度限制, 其调速器出力特性可表示为

$$P_{h,t} = \begin{cases} P_{h,t-1} + P_{p,max}, & P_{r,t} > P_{h,t-1} + P_{p,max} \\ P_{r,t}, & P_{h,t-1} - P_{p,max} \leq P_{r,t} \leq P_{h,t-1} + P_{p,max} \\ P_{h,t-1} - P_{p,max}, & P_{r,t} < P_{h,t-1} - P_{p,max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{h,t}$  为  $t$  时刻火电机组出力;  $P_{r,t}$  为  $t$  时刻 AGC 指令;  $P_{p,max}$  为火电机组的最大爬坡功率, 本研究中上爬坡、下爬坡功率取为相等。

火电机组的运行约束限制可表示为:  $P_{h,t} \leq P_N$ , 其中  $P_N$  为火电机组的额定装机容量。

SOC 表征了电池的剩余电量, 准确的 SOC 估计对于描述电池状态极为重要<sup>[14]</sup>。SOC 的估算方法主要有开路电压法、安时积分法、神经网络和卡尔曼滤波等<sup>[15-16]</sup>。由于安时积分法原理简单, 易于计算, 故采用安时积分法对 SOC 进行估计, 如式(2)。

$$SOC_{n,t} = SOC_{n,t-1} + \frac{\int P_{bn,t} dt}{C_n} \quad (2)$$

式中:  $SOC_{n,t}$  为  $t$  时刻第  $n$  个电池单元的 SOC;  $P_{bn,t}$  为  $t$  时刻第  $n$  个电池单元的充放电功率, 充电时取正值, 放电时取负值;  $C_n$  为第  $n$  个电池单元的容量。

不考虑电池单元的高倍率充放电方式, 其功率约束可表示为

$$P_{bn,t} = \begin{cases} P_{b,max,n}, & P_{r,bn} > P_{b,max,n} \\ P_{r,bn}, & P_{b,min,n} \leq P_{r,bn} \leq P_{b,max,n} \\ P_{b,min,n}, & P_{r,bn} < P_{b,min,n} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P_{r,bn}$ 、 $P_{b,max,n}$  和  $P_{b,min,n}$  分别为第  $n$  个电池单元的功率调节指令、最大充电功率和最大放电功率。

电池单元在运行时还应尽量避免过充、过放以导致电池寿命受损<sup>[17]</sup>, 以 SOC 来表征电池单元运行的容量限制, 可写为

$$P_{bn,t} = \begin{cases} 0, & (P_{bn,t} > 0) \& (SOC_{n,t-1} > SOC_{max,n}) \\ P_{bn,t}, & SOC_{min,n} \leq SOC_{n,t-1} \leq SOC_{max,n} \\ 0, & (P_{bn,t} < 0) \& (SOC_{n,t-1} < SOC_{min,n}) \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $SOC_{max,n}$  和  $SOC_{min,n}$  分别表示第  $n$  个电池单元 SOC 的上限和下限。

## 3 基于 SDT 算法的火电机组功率调节指令确定方法

### 3.1 基于 SDT 算法的 AGC 指令压缩

本研究对电网下发的 AGC 指令进行数据压缩、线性插值、动态更新及实时修正等一系列处理, 最终得到较为平稳的机组功率调节指令信号。当 AGC 指令在小范围波动时, 火电机组响应较为平稳的功率调节指令, 可有效降低其爬坡频次。

Bristol 于 1990 年提出的 SDT 算法<sup>[18]</sup>, 以其压缩比高、执行速度快和误差可控等特点, 在风电爬坡检测、SCADA 系统数据压缩等领域获得了成功应用<sup>[11,19]</sup>。其基本原理为: 当接收到一个新数据时, 该数据会与上一个记录值构造出平行四边形, 若当前值和上一个记录值之间存在平行四边形外部的数据, 则将当前值的上一个数据值进行记录; 若当前值和上一个记录值之间的数据均在平行四边形内部, 则继续接收新的数据, 不记录任何数据, 达到数据压缩的目的。

压缩偏移量  $E$  是 SDT 算法的重要参数, 直接决定了 AGC 指令的压缩结果,  $E$  值过大会导致原始信息的大量丢失,  $E$  值过小会提取到大量的冗余信息<sup>[20]</sup>。本研究压缩 AGC 指令的目的在于安排火电机组的预出力, 故需结合火电机组出力特性决定偏移量  $E$  的取值。基于 SDT 算法的 AGC 指令数

据压缩的步骤如下所述。

步骤 1 初始化

$$\begin{cases} k_{1d} = \frac{x_1 - (x_0 + E)}{t_1 - t_0} \\ k_{2d} = \frac{x_1 - (x_0 - E)}{t_1 - t_0} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $t_0$  和  $x_0$  分别为初始时刻及其对应的数据值;  $t_1$  和  $x_1$  分别为第 1 个时刻及其对应的数据值;  $k_{1d}$  和  $k_{2d}$  分别为上、下支点门斜率的初始值。

步骤 2 计算斜率

$$\begin{cases} k_1 = \frac{x_j - (x_k + E)}{t_j - t_k} \\ k_2 = \frac{x_j - (x_k - E)}{t_j - t_k} \\ k_j = \frac{x_j - x_k}{t_j - t_k} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $t_j$  和  $x_j$  分别为第  $j$  个时刻及其对应的数据值;  $t_k$  和  $x_k$  分别为第  $k$  个时刻及其对应的数据值。

步骤 3 斜率更新

$$\begin{cases} k_{1d} = \max\{k_1, k_{1d}\} \\ k_{2d} = \max\{k_2, k_{2d}\} \end{cases} \quad (7)$$

步骤 4 数据记录

$$k_{1d} \geq k_{2d} \quad (8)$$

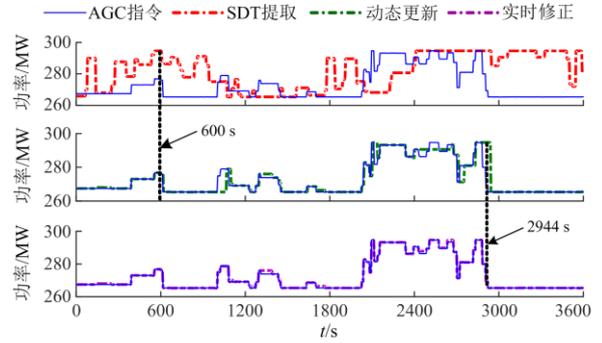
若满足式(8), 则将前一时刻  $t_{j-1}$  的数据值  $x_{j-1}$  进行记录, 并返回步骤 2, 否则返回步骤 3。

为展示 SDT 算法压缩 AGC 指令的有效性, 以处理广东电网某天 02:00—03:00 的 AGC 指令为例进行说明。选取前 1 天同时段的 AGC 历史数据, 计 AGC 指令 4 s 下发一次, 则该时段内共有 900 个数据。将  $E$  分别取  $0.25P_{p-max}$ 、 $0.5P_{p-max}$ 、 $P_{p-max}$ 、 $2P_{p-max}$  和  $4P_{p-max}$ , 利用 SDT 算法对 AGC 指令进行压缩, 然后对压缩结果进行线性插值, 得到  $P_{fl}$ 。结果表明, 压缩偏移量  $E$  为  $P_{p-max}$  时压缩效果最佳, 此时插值后的结果如图 3(a)红色虚线所示。

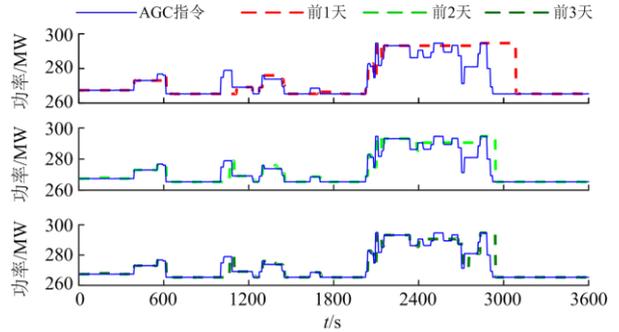
### 3.2 动态更新

由图 3(a)可知, 数据压缩、线性插值后的 AGC 指令  $P_{fl}$  只能反映 AGC 指令的基本趋势, 在许多时刻与实际 AGC 指令仍有较大偏差, 故本研究进一步使用更多 AGC 历史数据及实际数据对  $P_{fl}$  进行动态更新。

1) 确定动态更新时刻。进一步选取前 2 天和前 3 天相应时段内 AGC 历史数据, 通过 SDT 算法压



(a) 压缩插值、动态更新及实时修正后的结果



(b) 取过去前1天、前2天、前3天压缩结果作为动态更新时刻

图 3 AGC 指令处理结果

Fig. 3 Processed results of AGC commands

缩前 2 天和前 3 天的 AGC 指令, 将压缩结果对应时刻与日前时刻取并集以形成  $P_{fl}$  的动态更新时刻。需提到的是, 通过该步骤只增加了动态更新时刻, 并未改变  $P_{fl}$ 。

2) 动态更新  $P_{fl}$ 。计算动态更新时刻下  $P_{fl}$  与电网实际下发 AGC 指令  $P_r$  的偏差, 如果偏差超过设定的阈值, 则将该时刻的功率值修正为实际 AGC 指令, 否则仍保持原功率值不变, 动态更新结果  $P_{f2}$  的计算公式为

$$P_{f2,t} = \begin{cases} P_{r,t}, & |P_{fl,t} - P_{r,t}| > M \\ P_{fl,t}, & |P_{fl,t} - P_{r,t}| \leq M \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $P_{f2,t}$  和  $P_{fl,t}$  分别为  $t$  时刻动态更新后的结果以及压缩插值后的结果;  $M$  为阈值, 其取值与储能系统的动态分组有关, 将在 4.2 节予以阐述。

为进一步解释动态更新规则, 将前 1 天、前 2 天和前 3 天同时段 AGC 历史数据压缩结果所在时刻作为更新时刻对上述  $P_{fl}$  进行动态更新, 结果如图 3(b)虚线所示。当  $P_{f2}$  与  $P_r$  的偏差位于 BESS 的最大充/放电功率范围内, 视为该时刻更新后的功率值准确, 否则视为不准确。统计各天数下该时段内  $P_{f2}$  的准确个数, 并计算准确个数与功率值总数的比值, 记为  $P_{f2}$  准确率, 结果见表 1 所示。可知,

使用 AGC 历史数据越多,  $P_{r2}$  的准确率越高, 但过多的历史数据也会影响计算速度, 使用前 3 天 AGC 历史数据获得的  $P_{r2}$  准确率已高达 95.67%, 故本文选取前 3 天 AGC 历史数据确定的时刻作为动态更新时刻, 并根据式(9)进行动态更新。

表 1 前 3 天动态更新时刻数量及动态更新后  $P_{r2}$  准确率  
Table 1 Number of dynamic update moments in the past three days and the  $P_{r2}$  accuracy after dynamic update

前几天	动态更新时刻数量	$P_{r2}$ 准确率/%
1	97	89.56
2	197	92.78
3	279	95.67

### 3.3 实时修正

动态更新环节仅更新了部分时刻的功率值, 而其他时刻同样可能存在  $P_{r2}$  与  $P_r$  偏差较大的情况。为此, 在某些 AGC 指令突变时刻, 本研究继续对  $P_{r2}$  进行实时修正得到  $P_{r3}$ 。若实际 AGC 指令的偏差超过了火电机组最大爬坡功率, 即认为实际 AGC 指令发生突变, 则将该时刻的功率值修正为突变后的 AGC 指令, 否则保持原功率值不变, 在  $t$  时刻实时修正结果  $P_{r3,t}$  的计算公式为

$$P_{r3,t} = \begin{cases} P_{r,t}, & |P_{r,t} - P_{r,t-1}| > P_{p-max} \\ P_{r2,t}, & |P_{r,t} - P_{r,t-1}| \leq P_{p-max} \end{cases} \quad (10)$$

实时修正后的结果  $P_{r3}$  见图 3(a)紫色线条。总结本研究 AGC 指令的一系列处理过程, 呈现如下特点。

1) 利用 SDT 算法压缩 AGC 指令并进行线性插值处理, 得到的  $P_{r1}$  表征了实际 AGC 指令的大致波动特性, 经过动态更新后,  $P_{r2}$  与  $P_r$  的偏差值明显变小, 如图 3(a)显示。在 600 s,  $P_{r1}$  与  $P_r$  偏差约为 22 MW, 而动态更新后的结果  $P_{r2}$  与  $P_r$  几乎相等, 不过动态更新后的结果  $P_{r2}$  与  $P_r$  在某些时刻仍然存在一定偏差。

2) 继续引入实时修正后,  $P_{r3}$  与  $P_r$  较好吻合, 基本改善了  $P_{r2}$  部分时刻偏差较大的问题, 比如图 3(a)中 2944 s 时的  $P_{r2}$  与  $P_r$  偏差约为 29 MW, 而实时修正后的  $P_{r3}$  与  $P_r$  偏差接近于零。由此可见, 对 AGC 指令压缩插值后进行动态更新及实时修正, 确实有效提高了  $P_{r3}$  的准确率。

### 3.4 功率调节指令确定

结合  $t$  时刻修正后的结果  $P_{r3,t}$  以及火电机组自身的爬坡速率限制  $P_{p-max}$ , 以最终确定火电机组在  $t$

时刻的功率调节指令  $P_{r-h,t}$ , 即

$$P_{r-h,t} = \begin{cases} P_{h,t-1} + P_{p-max}, & P_{r3,t} - P_{h,t-1} > P_{p-max} \\ P_{r3,t}, & |P_{r3,t} - P_{h,t-1}| \leq P_{p-max} \\ P_{h,t-1} - P_{p-max}, & P_{r3,t} - P_{h,t-1} < -P_{p-max} \end{cases} \quad (11)$$

## 4 基于动态分组的储能系统双层功率分配方法

### 4.1 功率调节指令确定

当 AGC 指令突变时, 火电机组由于最大上/下坡功率的限制, 难以及时准确地跟踪 AGC 指令, 此时需要 BESS 进行辅助以满足调节速率、调节精度等要求。为降低 BESS 动作次数, 在不影响调节精度的前提下, 本研究引入了 BESS 的动作死区<sup>[21]</sup>, 当 BESS 功率调节指令位于调节死区内时, BESS 不动作, 即 BESS 的功率调节指令为

$$P_{r-b,t} = \begin{cases} P_{r,t} - P_{h,t} - P_{dead}, & P_{r,t} - P_{h,t} > P_{dead} \\ 0, & |P_{r,t} - P_{h,t}| \leq P_{dead} \\ P_{r,t} - P_{h,t} + P_{dead}, & P_{r,t} - P_{h,t} < -P_{dead} \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $P_{dead}$  为 BESS 调节死区。

### 4.2 动态分组技术

BESS 在响应功率调节指令时, 当前研究大多数以均分或者按照固定比例的方法进行分配, 这类方法忽略了各电池单元之间的协调配合<sup>[22]</sup>, 使得所有电池单元均会频繁充放电。为减少 BESS 整体动作次数, 设计了 BESS 的动态分组技术。

原则上, 应让 SOC 较低的电池单元优先充电, SOC 较高的电池单元优先放电, 从而保证 BESS 在下一周期的可充/放电功率和容量保持最大。为此, 对电池单元进行编号并根据 SOC 降序排列, 若电池单元 SOC 相等, 则编号大排序靠前, 将所有电池单元划分为 3 个电池组——优先放电组、备用组和优先充电组, 且分配给优先放电组和优先充电组的电池单元数量相等。式(9)的阈值  $M$  即为优先动作组最大充/放电功率的绝对值。

在 BESS 运行一段时间后, 其电池单元的 SOC 会发生变化, 需要每隔一段时间对分组情况进行动态调整。由于电池单元 SOC 变化取决于实际 AGC 指令, 而固定时间调整分组难以计及 AGC 指令特性, 故本研究选取 AGC 指令动态更新时刻作为 BESS 动态分组的动态调整时刻。另外, 在相对较短的时间段内, 电池单元的充放电量一般不会太大, 经过比较分析, 决定仅采用前 1 天的 AGC 指

令压缩结果所在时刻作为动态分组的调整时刻。

#### 4.3 双层功率分配方法

BESS 响应其功率调节指令  $P_{r,b}$  时, 针对现有方法忽略各电池单元状态差异的问题, 本研究考虑运行经济性和可持续调控能力, 并结合 BESS 动态分组情况, 设计了 BESS 响应功率指令的双层功率分配方法。经济性是指在满足 SOC、最大充放电功率等约束条件下, 避免过充、过放, 同时使运行成本最低<sup>[23]</sup>。可持续调控能力是指维持各电池组电池单元 SOC 均在最优范围内, 以保证下一个周期内充放电功率达到最大<sup>[13]</sup>。

##### 4.3.1 BESS 上层功率分配

根据  $P_{r,b}$  判断 BESS 的工作状态并确定电池组的动作顺序, 根据电池组的最大充/放电功率及动作顺序对功率进行初次分配, 确定每个电池组的功率调节指令。

###### 1) 充电过程功率分配

当  $P_{r,b} > 0$  时, BESS 需要充电, 3 个电池组的动作顺序为: 优先充电组 → 备用组 → 优先放电组。将优先充电组、备用组和优先放电组的最大充电功率分别记为  $P_{g_{cmax}}$ 、 $P_{g_{bmax}}$  和  $P_{g_{dmax}}$ 。

当  $P_{r,b} \leq P_{g_{cmax}}$  时, 优先充电组承担全部调节功率, 并按经济分配原则实现功率在优先充电组电池单元中的二次分配, 其余电池组不动作以减少充电次数。经济分配原则将在下一节予以阐述。

当  $P_{g_{cmax}} < P_{r,b} \leq (P_{g_{cmax}} + P_{g_{bmax}})$  时, 优先充电组以最大充电功率工作, 备用组承担剩余功率差额, 并以经济分配原则实现备用组电池单元的功率分配。

当  $P_{r,b} > (P_{g_{cmax}} + P_{g_{bmax}})$  时, 优先充电组和备用组均以最大充电功率工作, 优先放电组采用 SOC 均衡分配原则进行优先放电组电池单元的功率分配。SOC 均衡分配原则将在下一节予以阐述。

###### 2) 放电过程功率分配

当  $P_{r,b} < 0$  时, 储能系统需要放电, 3 个电池组的动作顺序为: 优先放电组 → 备用组 → 优先充电组。

当  $P_{r,b} \geq -P_{g_{dmax}}$  时, 优先放电组承担全部调节功率, 并按经济分配原则实现放电组电池单元的功率分配, 其余电池组不动作。

当  $-P_{g_{dmax}} > P_{r,b} \geq (-P_{g_{dmax}} - P_{g_{bmax}})$  时, 优先放电组以最大放电功率工作, 备用组承担剩余功率差额, 并以经济分配原则完成备用组电池单元的功率分配。

当  $P_{r,b} < (-P_{g_{dmax}} - P_{g_{bmax}})$  时, 优先放电组和备用

组以最大放电功率工作, 优先充电组采用 SOC 均衡分配原则完成优先充电组电池单元功率分配。

##### 4.3.2 BESS 下层功率分配

根据 BESS 上层功率分配结果及各电池组电池单元采用的功率分配原则, 完成下层功率分配。

###### 1) 经济分配原则

以 BESS 在每个周期内的总运行成本  $F$  最低为优化目标, 将电池组的功率调节指令分配给电池单元。本研究中总运行成本同时考虑了充放电功率和 SOC, 如式(13)所示<sup>[24]</sup>。

$$\begin{cases} F = \sum_{i=1}^N \eta_1 \Delta P_i^2 - \eta_2 \Delta SOC_i \\ \Delta P_i = P_{r,bi,t} - P_{bi,t-1} \\ \Delta SOC_i = \frac{P_{r,bi,t} \cdot T}{C_i} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N$  为电池组电池单元个数;  $\eta_1$  和  $\eta_2$  为正的常数, 分别取 0.002 和 0.4;  $\Delta P_i$  为电池组第  $i$  个电池单元的功率变化量;  $P_{r,bi,t}$  为  $t$  时刻电池单元  $i$  的分配功率;  $\Delta SOC_i$  为电池组第  $i$  个电池单元的 SOC 变化量;  $T$  为调度周期;  $C_i$  为电池组第  $i$  个电池单元的最大容量。

###### 2) 最大充/放电功率分配原则

最大充/放电功率分配指是电池单元在满足运行约束条件下, 以最大的充电/放电功率参与响应。

###### 3) SOC 均衡分配原则

为实现电池组每个电池单元的 SOC 相对均衡, 采用 Sigmoid 函数描述电池单元的充放电过程, 以表征电池单元的充放电能力<sup>[25]</sup>。电池单元的充电函数和放电函数分别见式(14)和式(15)所示。

$$f_{ch}(SOC_{i,t-1}) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-10 \times (SOC_{i,t-1} - 0.5)}} \quad (14)$$

$$f_{dis}(SOC_{i,t-1}) = \frac{1}{1 + e^{-10 \times (SOC_{i,t-1} - 0.5)}} \quad (15)$$

式中,  $SOC_{i,t-1}$  为电池组第  $i$  个电池单元在  $t-1$  时刻的荷电状态。

SOC 均衡原则下电池组充电和放电时的功率分配方法分别见式(16)和式(17)所示。

$$\frac{P_{r,bi,t}}{f_{ch}(SOC_{i,t-1})} = \frac{P_{r,bj,t}}{f_{ch}(SOC_{j,t-1})} \quad \forall i, j \in N \quad (16)$$

$$\frac{P_{r,bi,t}}{f_{dis}(SOC_{i,t-1})} = \frac{P_{r,bj,t}}{f_{dis}(SOC_{j,t-1})} \quad \forall i, j \in N \quad (17)$$

式中,  $P_{r,bi,t}$  为  $t$  时刻电池组  $j$  的分配功率。

## 5 仿真验证及分析

### 5.1 参数设置及评价指标

#### 5.1.1 参数设置

选取广东电网区域内某台 330 MW 火电机组为研究对象, 爬坡速率为 2%/min。BESS 选用锂离子电池, 规模为 10 MW/5 MWh, 调节死区为  $\pm 0.2$  MW, 由 10 个 1 MW/0.5 MWh 的电池单元组成, 初始荷电状态分别为 0.7、0.56、0.42、0.68、0.63、0.42、0.63、0.36、0.5、0.32。选取火储系统跟踪冬季某天 02:00—03:00 时段波动较大的 AGC 指令, 以检验本文控制策略的优越性。

#### 5.1.2 评价指标

##### 1) 火电机组评价指标

选用火电机组响应 AGC 指令时的爬坡频次作为评价指标, 并以机组出力功率方差作为衡量爬坡频次的标准<sup>[10]</sup>, 方差越大表示机组爬坡频次越高。

##### 2) 电池储能系统评价指标

当电池单元的充放电功率不为 0 时, 记为动作一次, 则 BESS 动作次数为调度周期内所有电池单元动作次数之和。另外, 采用所有电池单元 SOC 的标准差  $\sigma(\text{SOC})$  来衡量 BESS 可持续调控能力,  $\sigma(\text{SOC})$  越大表示 BESS 的可持续调控能力越小。

##### 3) 跟踪效果评价指标

采用跟踪准确率来评价储能辅助机组跟踪 AGC 指令的效果。对于每个 AGC 指令, 如果火储出力与其偏差低于机组容量的 1%, 记为一次准确跟踪, 则整个调度周期内火储系统的跟踪准确率为准确跟踪次数与 AGC 指令个数的比值。

### 5.2 火电机组跟踪功率调节指令结果

将火电机组跟踪  $P_{\text{B}}$  与火电机组直接跟踪 AGC 指令  $P_r$  进行对比, 结果如图 4 所示。可见, 火电机组基本实现了对于  $P_{\text{B}}$  的跟踪, 当 AGC 指令在小范围波动时, 火电机组直接跟踪 AGC 指令的出力功率方差为 45.3734, 而本文方案下出力功率方差仅为 41.3114, 由此降低了火电机组的爬坡频次, 有效改善了传统方案下火电机组爬坡频次高的问题, 减少了设备磨损。

### 5.3 储能响应功率调节指令结果

根据 SOC 排序结果, 将电池单元分为 3 个电池组。由于电池单元 5、7 的初始 SOC 相同, 因此将编号较大的电池单元 7 分给优先放电组; 同理, 将电池单元 6 分给备用组, 分组结果如表 2 所示。可知, 优先放电组和优先充电组均分配了 3 个电池单元, 因而在对压缩后的 AGC 指令进行动态更新时, 式(9)中阈值  $M$  取 3 MW。

依据  $P_{\text{r,b}}$  和表 2 的分组结果, 确定 3 个电池组的动作顺序, 进而完成 BESS 上层功率分配, 结果如图 5 所示。在 2092 s 时, AGC 指令发生突变, BESS 的跟踪功率指令为 21 MW, 此时优先充电组和备用组均以最大充电功率工作, 不过它们的充电总功率仅为 7 MW, 14 MW 功率缺额只能由优先放电组承担; 而在 2700 s 时, BESS 的跟踪功率指令为 -17.5 MW, 此时优先放电组和备用组均以最大放电功率工作, 放电总功率为 7 MW, 10.5 MW 功率差额将分配给优先充电组去承担。

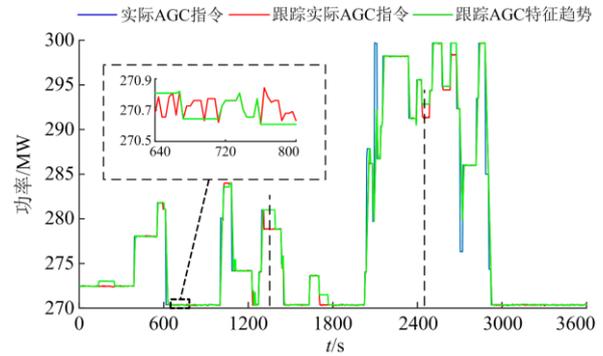


图 4 火电机组跟踪  $P_{\text{B}}$  与  $P_r$  对比

Fig. 4 Comparison of thermal power unit tracking  $P_{\text{B}}$  and  $P_r$

表 2 电池储能系统分组结果

Table 2 Grouping result of BESS

电池单元组别	电池单元编号
优先放电组	1 4 7
备用组	2 5 6 9
优先充电组	3 8 10

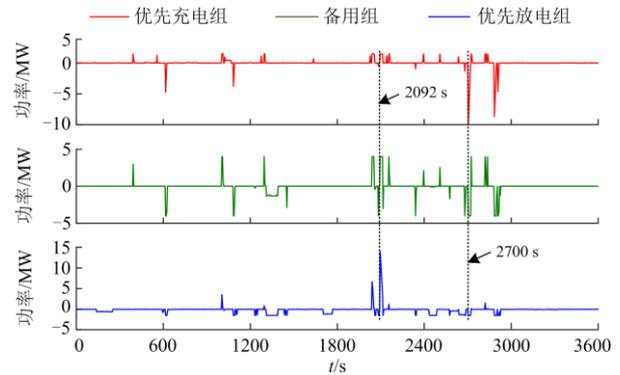


图 5 BESS 上层功率分配结果

Fig. 5 Upper layer power distribution results of BESS

电池单元功率调节指令分配结果和响应结果分别见图 6 和图 7。在电池组分得上层功率指令较大的时刻, 分配给电池单元的功率指令也相应较大, 如在 2092 s 时上层功率指令为 21 MW 分配给

电池单元 1、2、4 的充电功率约为 4.7 MW，均实现了完全响应。虽然在 2092 s 时电池单元 1、2、4 分得了约 4.7 MW 的调节功率，但受最大充电功率和 SOC 运行限制，其实际响应功率仅约为 1 MW，类似地，在 2700 s 时，电池单元 3、4、10 实际响应功率也仅为 -1 MW。

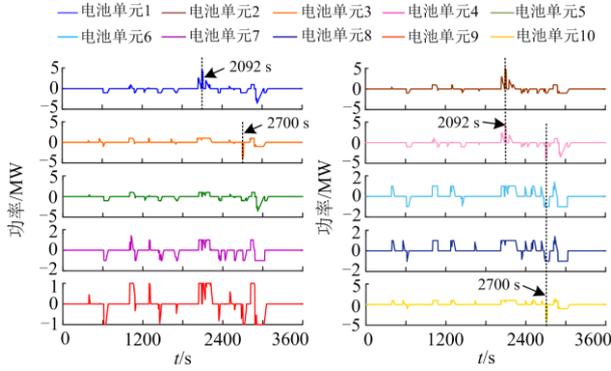


图 6 BESS 下层功率分配结果

Fig. 6 Lower layer power distribution results of BESS

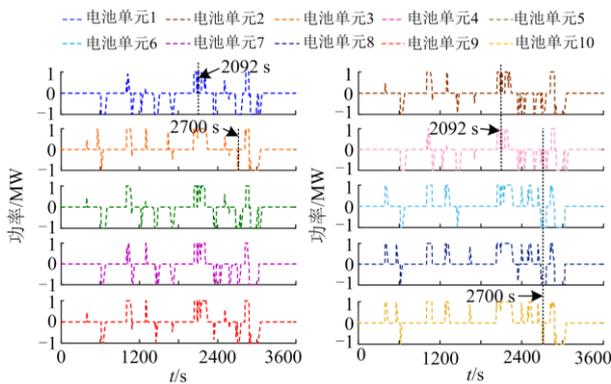


图 7 电池单元响应结果

Fig. 7 Response results of battery units

将本研究基于动态分组的双层功率分配策略与传统未分组控制策略下的电池单元动作次数进行对比，结果如表 3 所示。由于传统控制策略未考虑 BESS 分组，且仅按照电池单元的剩余电量之比实现电池单元的功率分配，故 BESS 的动作次数高达 3530 次。而本研究方案下 BESS 动作次数仅为 2320 次，可见本文策略有效地减少了电池单元的动作次数，减小了储能资源的寿命损失。

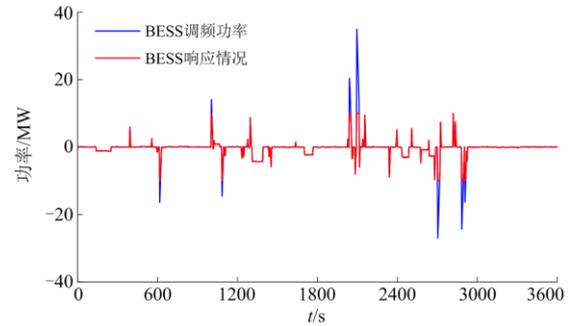
BESS 跟踪其功率调节指令的最终结果如图 8(a)所示，可见，BESS 较好地实现了对于功率指令的准确跟踪，部分时刻未实现完全跟踪是由于 BESS 的功率调节指令超出其最大充放电功率所致。各电池单元的 SOC 变化见图 8(b)，电池单元运行时均未出现过充、过放，并且每个电池单元 SOC 随着调控进程均趋向于 0.52。由于在初始时

刻所有电池单元 SOC 的标准差  $\sigma(\text{SOC})$  为 0.1373，调度周期结束后  $\sigma(\text{SOC})$  为 0.0024，由此充分保证了下一时段储能系统的可持续调控能力。

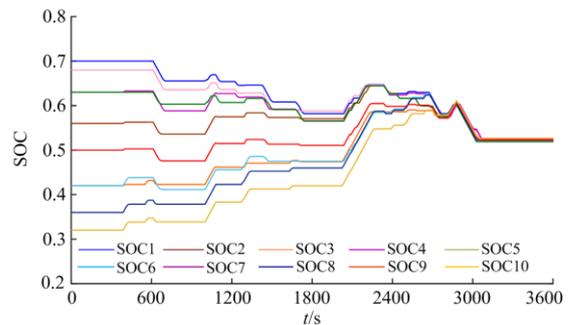
表 3 储能系统的动作次数对比

Table 3 Comparison of action times of energy storage system

电池单元编号	本文方案 动作次数	传统方案 动作次数	减少动作 次数
1	241	353	112
2	226	353	127
3	196	353	157
4	232	353	121
5	248	353	105
6	246	353	107
7	239	353	114
8	241	353	112
9	218	353	135
10	233	353	120
总动作次数	2320	3530	1210



(a) BESS响应功率调节指令结果



(b) 电池单元的荷电状态

图 8 BESS 响应功率调节指令结果及电池单元的荷电状态

Fig. 8 Result of BESS responding to power regulation commands and state of charge of each battery unit

### 5.4 储能辅助单机跟踪 AGC 指令结果

本文方案下 BESS 辅助火电机组跟踪 AGC 指令的最终结果如图 9 所示。

本文方案下跟踪准确率达 96.56%，传统方法下火储跟踪的准确率为 96.23%，而只用火电机组跟踪的准确率约为 75.89%，因此，基于 SDT 算法

的储能辅助机组控制策略能够准确地跟踪 AGC 指令, 进一步结合 5.2 节和 5.3 节结果, 本文策略还有效改善了传统策略下火电机组爬坡频次高以及储能系统动作次数多的问题。

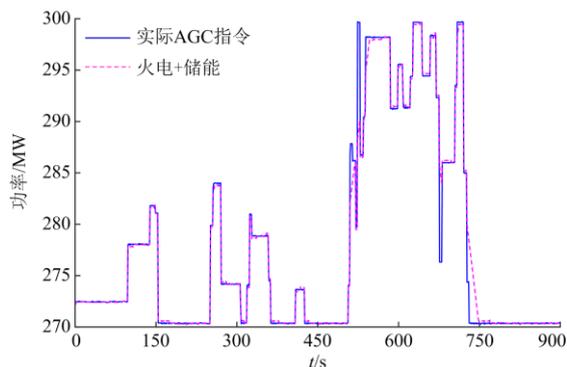


图 9 基于旋转门算法的储能辅助单机跟踪结果

Fig. 9 Tracking result of energy storage assisted thermal power unit based on SDT algorithm

## 6 结论

1) 利用 SDT 算法对 AGC 指令进行压缩, 对压缩结果进行线性插值处理, 进一步对其动态更新及实时修正得到火电机组功率调节指令, 与直接跟踪 AGC 指令相比, 该方法有效降低了机组爬坡频次, 减少了机组磨损。

2) 基于动态分组技术的 BESS 双层功率分配方法确定电池单元的功率调节指令, 与传统未分组方法相比, 显著降低了 BESS 动作次数, 减小了寿命损耗, 并且电池单元响应功率指令后的 SOC 均向中间值靠近, 同时避免了过充、过放现象。

3) 通过仿真跟踪实际 AGC 指令表明, 所提控制策略能够保证火储系统准确、快速跟踪 AGC 指令, 改善了火储系统运行经济性。

本文研究未考虑储能系统的高倍率充放电, 后续可结合收益情况计及高倍率充放电方式, 以进一步提升火储系统整体运行性能。

## 参考文献

[1] 张朝炜, 柳云祥, 朱永利. 基于改进人工鱼群算法的大规模多目标机组组合优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 100-108.  
ZHANG Zhaowei, LIU Yunxiang, ZHU Yongli. Large scale multi-objective unit commitment optimization based on an improved artificial fish swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 100-108.

[2] 杨谦, 刘继春, 蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 74-84.

YANG Qian, LIU Jichun, JIANG Wanxiao. Peak regulation strategy of power system considering the interaction of source-network-load-storage under different penetration rate of PV[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 74-84.

[3] MENG G, CHANG Q, SUN Y, et al. Energy storage auxiliary frequency modulation control strategy considering ACE and SOC of energy storage[J]. IEEE Access, 2021, 9: 26271-26277.

[4] 李卫国, 焦盘龙, 刘新宇, 等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 43-52.  
LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52.

[5] 谢惠藩, 王超, 刘湃泓, 等. 南方电网储能联合火电调频技术应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 172-179.  
XIE Huifan, WANG Chao, LIU Paihong, et al. Application of joint frequency regulation technology of energy storage and thermal power in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 172-179.

[6] XI L, ZHANG L, LIU J, et al. A virtual generation ecosystem control strategy for automatic generation control of interconnected microgrids[J]. IEEE Access, 2020, 8: 94165-94175.

[7] 王凡, 李海峰, 胥国毅, 等. 调频关键参数对电网频率特性的影响及其灵敏度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 1-8.  
WANG Fan, LI Haifeng, XU Guoyi, et al. Influence of key parameters of frequency control on frequency characteristics of power grid and sensitivity analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 1-8.

[8] 祖其武, 牛玉刚, 邹媛媛, 等. 基于弹性负荷分时调度和多电源联合供电的微网经济运行[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 20-27.  
ZU Qiwu, NIU Yugang, ZOU Yuanyuan, et al. Economic operation of microgrid based on elastic load sub-period dispatch and combined power supply of multiple energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 20-27.

[9] 张舒铠, 刘鑫屏, 张锐锋. 基于样本熵的 AGC 指令复杂性分析[J]. 电力科学与工程, 2015, 31(6): 43-48.  
ZHANG Shukai, LIU Xinping, ZHANG Ruifeng. Analysis of the AGC instruction complexity based on sample entropy[J]. Electric Power Science and Engineering, 2015, 31(6): 43-48.

- [10] 曹子珣, 陈红坤, 胡畔, 等. 计及市场收益的含储能火电厂日前-日内两阶段优化调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 106-113.  
CAO Zixun, CHEN Hongkun, HU Pan, et al. Day-ahead and intraday two-stage optimal dispatch model of a thermal power plant with energy storage and taking into account the profit[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 106-113.
- [11] 张颖超, 宗阳, 邓华, 等. 基于趋势特征的风电功率爬坡事件检测方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 122-127, 132.  
ZHANG Yingchao, ZONG Yang, DENG Hua, et al. Wind power ramp event detection method based on trend feature[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 122-127, 132.
- [12] 赵源筱, 耿光超, 江全元, 等. 考虑功率变化速率的储能辅助单机调频控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 141-147.  
ZHAO Yuanxiao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 141-147.
- [13] 禹红, 夏向阳, 彭梦妮, 等. 基于虚拟同步电机技术的混合储能平抑微网频率波动策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 47-54.  
YU Hong, XIA Xiangyang, PENG Mengni, et al. Research on strategy of micro-grid frequency control in hybrid energy storage system based on virtual synchronous generator technology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 47-54.
- [14] SEO M, SONG Y, KIM J, et al. Innovative lumped battery model for state of charge estimation of lithium-ion batteries under various ambient temperatures[J]. Energy, 2021, 226(7).
- [15] CHEN Z, ZHAO H, SHU X, et al. Synthetic state of charge estimation for lithium-ion batteries based on long short-term memory network modeling and adaptive H-Infinity filter[J]. Energy, 2021, 228(8).
- [16] LI X, HUANG Z, TIAN J, et al. State-of-charge estimation tolerant of battery aging based on a physics-based model and an adaptive cubature Kalman filter[J]. Energy, 2021, 220(2).
- [17] LIU C, GAO N, CAI X, et al. Differentiation power control of modules in second-life battery energy storage system based on cascaded H-bridge converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6609-6624.
- [18] BRISTOL E. Swing door trending: adaptive trend recording[C] // ISA National Conference Proceedings, October 14-18, 1990, Washington, America: 749-753.
- [19] CUI Y, HE Y, XIONG X, et al. Algorithm for identifying wind power ramp events via novel improved dynamic swinging door[J]. Renewable Energy, 2021, 171(6): 542-556.
- [20] LI H, WANG Y, ZHANG X, et al. Evaluation method of wind power consumption capacity based on multi-fractal theory[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9(3).
- [21] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 基于灵敏度分析的储能电池参与二次调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(12): 224-233.  
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Battery energy storage control strategy in secondary frequency regulation considering its action moment and depth[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 224-233.
- [22] CHAOUI H, SICARD P. Hierarchical energy management scheme for multiple battery-based smart grids[C] // IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics(ISIE), June 1-4, 2014, Istanbul, Turkey: 2020-2023.
- [23] ZHU T, WILLS R, LOT R, et al. Adaptive energy management of a battery-supercapacitor energy storage system for electric vehicles based on flexible perception and neural network fitting[J]. Applied Energy, 2021, 292(6).
- [24] JIA Y, DONG Z Y, SUN C, et al. Distributed economic model predictive control for a wind-photovoltaic-battery microgrid power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(2): 1089-1099.
- [25] 刘根才, 陆志欣, 杨智诚, 等. 考虑 SOC 均衡的分布式储能聚合控制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 174-181.  
LIU Gencai, LU Zhixin, YANG Zhicheng, et al. Distributed energy storage aggregation control method considering SOC equalization[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 174-181.

收稿日期: 2021-10-02; 修回日期: 2021-11-10

作者简介:

董 镔(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制; E-mail: dongkai@mail.gd.csg.cn

蔡新雷(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制; E-mail: 517665114@qq.com

余 洋(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统。E-mail: ncepu\_yy@163.com

(编辑 姜新丽)