

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.008

计及多点电池储能系统的电网二次调频协同控制

于昌海^{1,2}, 庞腊成^{1,2}, 吴继平^{1,2}, 曹荣章^{1,2}, 昌力^{1,2}

(1. 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;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:在“碳达峰·碳中和”国家能源战略变革背景下,大规模可再生能源的加速并网加剧了电力系统对于快速调频资源需求的迫切性,如何充分发挥以电池储能系统(battery energy storage systems, BESS)为代表的新型快速资源在电网调频中的作用是解决该问题的关键。首先,为满足电网各类型调频资源在自动发电控制(automatic generation control, AGC)系统中的接入监视与分类决策需求,提出“域-群-机”三级控制模型架构;然后,从 BESS 的荷电状态(state of charge, SOC)主动管理出发,提出基于改进的动态调频容量(dynamic available AGC, DAA)的多元集群协同控制策略,以及引入 SOC 影响因子的多点 BESS 功率分配策略;最后,结合实际电网的持续扰动工况及模拟跳机扰动工况进行仿真分析,验证了文中所提控制策略的有效性。文中所提策略不但可以显著改善各单点 BESS 的 SOC 一致性,而且能够提升电网调频品质。

关键词:电池储能系统(BESS);自动发电控制(AGC);域-群-机;协同控制;动态调频容量(DAA);荷电状态(SOC)影响因子

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)01-0068-09

0 引言

为应对全球气候变化、环境污染和能源危机等问题,世界各国正积极推动能源系统的战略转型。我国在2020年9月22日举办的联合国大会上提出了2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和的战略目标,进一步推动以风能、太阳能为代表的可再生能源发电的快速发展。然而,可再生能源发电具有波动性和不确定性,对电网表现出低惯性特性,传统电源的调频容量及响应速度已难以满足日益增加的调频需求^[1-5],高比例可再生能源对电力系统灵活调节能力提出了更高要求。

近年来,得益于电池成本的不断降低,具有快速响应能力的电池储能系统(battery energy storage system, BESS)在电网调频方面表现出了巨大的潜力与应用前景。国内以张北风光储、江苏和河南百兆瓦级储能示范工程为代表,对 BESS 参与自动发电控制(automatic generation control, AGC)做出了诸多积极探索;国外对大规模储能参与电网调频已开展大量示范与验证^[6-10]。

在规模化 BESS 参与电网二次调频领域,国内外学者已经取得了一系列成果。文献[11-13]提出按照调频信号的频域特征进行 BESS 资源分配,利用 BESS 的快速响应特性进行高频分量的跟踪响

应。文献[14-16]提出根据区域调节需求(area regulation requirement, ARR)分区的优先级分配策略,以提升区域电网的调频品质。文献[17]提出基于可表征储能电池动态调频容量(dynamic available AGC, DAA)的调频资源比例分配策略。

分布式 BESS 在中低压配电网、分布式电源侧及用户侧也得到了广泛应用^[18-23]。其中分布式 BESS 的聚合控制技术取得了积极进展:文献[24]提出基于一致性算法的等功率比例分配分布式 BESS 控制方法,实现了各个 BESS 通过等功率比例分配共同完成控制指令;文献[25]提出基于遗传算法的集群划分方法,通过逐层构建和求解配电网与集群层面的经济模型,确定各节点 BESS 最优时序出力,提高了储能运行经济性;文献[26]提出一种基于自适应均衡技术的分布式 BESS 聚合模型及评估方法,可实际应用于大规模参与辅助服务的分布式 BESS 的聚合。越来越多的分布式 BESS 聚合后已具备参与电网调频的基础条件,其广域调控效能存在挖掘空间。

但是,国内外储能参与电网二次调频控制的研究对象仍以集中式规模化 BESS 为主,且在 BESS 参与调频的场景中,当前研究鲜有考虑 BESS 在线可用性的主动管理,多将其荷电状态(state of charge, SOC)作为边界约束。如何对容量及性能方面存在诸多差异的多点 BESS 进行统筹决策、协同管理,充分挖掘电网中 BESS 的调频潜能,已经成为多点多类型 BESS 参与电网调频控制应用中的关键问题。

收稿日期:2023-08-28;修回日期:2023-11-10

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5100-202113024A-0-0-00)

针对上述问题,文中首先设计了支持不同类型调频资源接入 AGC 系统的“域-群-机”三级控制对象模型架构;在此基础上,分别提出了考虑 DAA 与 SOC 均衡管理的多元集群和多点 BESS 有功协同控制策略;最后,通过仿真试验验证了所提策略的有效性。

1 “域-群-机”模型架构

在风、光、水、火、储等多元调控主体蓬勃发展的环境下,电网调频控制对象资源池也得到了丰富与扩充。然而,各类调控对象具有单点容量不一、发电特性各异的特点,如 BESS 与火电机组在响应速率与支撑能力方面就存在显著差异:火电机组响应时滞长,调节速率较慢,存在过调与超调现象^[27]; BESS 响应特性优异,但其非一次能源,受容量约束而不能提供长周期稳定的功率支撑。

为满足不同类型调频资源在 AGC 系统中的协调控制及同类资源内部效能考核产生的复杂管理需求,文中设计了“域-群-机”三级控制对象模型架构,各级控制模型对象的功能定位描述如下。

(1) 域,为区域控制对象,以逻辑控制区或地理控制区为主体,对该区域内各调节资源集群进行统筹分配。

(2) 群,为集群模型对象,是同类发电机组/场站的集合,集群对象可自定义跟踪控制目标,也可参与区域调节分配,负责集群内各单点对象之间的协调分配。

(3) 机,为 AGC 系统控制决策最小单元与执行单元,其可以是水、火发电机组,也可以是风电场、光伏站和 BESS。为了达到 AGC 市场的最小准入容量要求,部分 BESS 对象可能是利用聚合器集成的多个分布式 BESS。

该架构设计优势如下。

(1) 系统鲁棒性更高。分层决策规避了大规模调频机组的集中通信与决策,进而避免了在多目标优化求解过程中遭遇“维数灾难”的问题,或陷入局部最优、全局失效的窘境。

(2) 决策同步性更强。该架构下通过纵向融合、横向互济可有效解决多元调频资源在技术管理与动态响应方面存在的差异性与不对称性问题。

(3) 对象适用性更广。该“域-群-机”三级架构分别对应“协同决策层-聚合管理层-资源接入层”,对未来可能出现的新型调频资源的模型管理与控制决策仍具有适用性与扩展性。

基于该架构,文中以充分挖掘广域 BESS 的调

频支撑潜力及 SOC 健康管理为出发点,分别在“域”和“群”2 个层面提出 BESS 对象参与电网二次调频的解决方案与控制策略。

2 区域多元集群协同分配

“群”是由空间分散的 AGC 机组逻辑聚合形成,在“域”与“机”之间引入该中间层,可有效解决调度面临的 AGC 调节资源主体众多、特性各异问题。文中将同一发电类型、响应特性相近的调控资源划分至一个集群对象,如风电集群、光伏集群、水电集群、火电集群、BESS 集群等。

2.1 集群对象 DAA 计算

文献[17]对 DAA 的定义为“储能 1 min 的持续充/放电能力”,文中对该定义进行了修改使其可有效表征各类调频资源的调频支撑能力,即未来一个 AGC 指令周期可提供的最大功率支撑,公式描述如下:

$$D_i(t+1) = \begin{cases} \sum_j \min \left\{ P_{i,j}^{\max}(t) - P_{i,j}^{\text{gen}}(t), \frac{T_{\text{cmd}}}{60} r_{i,j}^{\text{up}} \right\} & P_{\text{arr}}(t) \geq 0 \\ - \sum_j \min \left\{ P_{i,j}^{\text{gen}}(t) - P_{i,j}^{\min}(t), \frac{T_{\text{cmd}}}{60} r_{i,j}^{\text{dn}} \right\} & P_{\text{arr}}(t) < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_i(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻即未来一个控制时刻集群 i 的 DAA; $P_{i,j}^{\max}(t)$ 、 $P_{i,j}^{\min}(t)$ 分别为 t 时刻集群 i 内机组 j 的实际调节上限和调节下限; $P_{i,j}^{\text{gen}}(t)$ 为 t 时刻集群 i 内机组 j 的实时有功功率; T_{cmd} 为 AGC 系统的指令周期; $r_{i,j}^{\text{up}}$ 、 $r_{i,j}^{\text{dn}}$ 分别为集群 i 内机组 j 的额定上调速率和额定下调速率; $P_{\text{arr}}(t)$ 为 t 时刻 ARR。

式(1)对调频支撑能力的量化定义中既考虑了调频容量约束,又考虑了爬坡速率约束,可实现对不同资源调频能力的客观评价。

2.2 BESS 集群的等效 SOC 计算

BESS 具有响应迅速、跟踪精准、双向可调的优势,但其调节控制也有一定的局限性。SOC 是 BESS 最重要的运行指标之一,其不仅表征了系统剩余电量与可用状态,也是影响储能电池设备运行效率和寿命衰减的重要因素^[28]。

受制造工艺、电池特性等因素的影响,同一时刻各单点 BESS 在参与电网调频时的初始状态与运行工况不尽相同, BESS 集群作为一个整体参与调频需求分配时,首先应获知其等效 SOC 指标。BESS 集群的等效 SOC 计算公式如下:

$$S_{\text{equ}}(t) = \left(\sum_{j=1}^n E_j S_j(t) \right) / \sum_{j=1}^n E_j \quad (2)$$

式中: $S_{\text{equ}}(t)$ 为 t 时刻 BESS 集群的等效 SOC; E_j 为 BESS 机组 j 的额定容量; $S_j(t)$ 为 t 时刻 BESS 机组 j 的 SOC; n 为 BESS 机组数。记 BESS 集群 SOC 的期望值为 S_{ref} , 通常取 50%。

2.3 多元集群对象协同分配

为保障调频需求的可靠执行与 BESS 的实时在线可用性, 文中基于 BESS 集群等效 SOC 偏差与各集群 DAA 制定多元集群间的协同分配策略。首先, 考虑 BESS 集群特殊性, 确定 BESS 集群与非 BESS 类集群参与调频分配时的优先级与调节量, 然后各非 BESS 类集群再按照 DAA 比例分配确定各自调节量。

BESS 集群与非 BESS 类集群调节量分配规则如下。

(1) 当 $P_{\text{arr}}(t)(S_{\text{equ}}(t) - S_{\text{ref}}) \geq 0$, 即调频需求与 BESS 集群等效 SOC 偏差同向, 有利于 BESS 集群等效 SOC 回归期望值时, 优先调用 BESS 集群。

公式描述如下:

$$\Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) = \min\{P_{\text{arr}}(t), D_{\text{bess}}(t)\} \quad (3)$$

$$\Delta P_{\text{n-bess}}^{\text{disp}}(t) = P_{\text{arr}}(t) - \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) \quad (4)$$

式中: $\Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t)$ 、 $\Delta P_{\text{n-bess}}^{\text{disp}}(t)$ 分别为 t 时刻 BESS 集群与非 BESS 类集群的调频需求分配量; $D_{\text{bess}}(t)$ 为 t 时刻 BESS 集群的 DAA。

(2) 当 $P_{\text{arr}}(t)(S_{\text{equ}}(t) - S_{\text{ref}}) < 0$, 即调频需求与 BESS 集群等效 SOC 偏差反向, 加剧 BESS 集群等效 SOC 偏离期望值时, 优先调用非 BESS 类集群。

公式描述如下:

$$\Delta P_{\text{n-bess}}^{\text{disp}}(t) = \min\{P_{\text{arr}}(t), D_{\text{n-bess}}(t)\} \quad (5)$$

$$\Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) = \min\{P_{\text{arr}}(t) - \Delta P_{\text{n-bess}}^{\text{disp}}(t), D_{\text{bess}}(t)\} \quad (6)$$

式中: $D_{\text{n-bess}}(t)$ 为 t 时刻非 BESS 类集群的 DAA。

确定非 BESS 类集群总分配量后, 以 DAA 为分担系数计算各集群分配调节量, 公式如下:

$$\Delta P_i^{\text{disp}}(t) = \min \left\{ \Delta P_{\text{n-bess}}^{\text{disp}}(t) \frac{D_i(t)}{\sum_i D_i(t)}, D_i(t) \right\} \quad (7)$$

$i \notin G_{\text{bess}}$

式中: $\Delta P_i^{\text{disp}}(t)$ 、 $D_i(t)$ 分别为 t 时刻集群 i 的调频需求分配量和 DAA; G_{bess} 为 BESS 集群。

3 集群多点对象控制管理

根据“域-群-机”模型架构设计, 各集群对象计算得到各自的调频需求分配量后, 还需要在各机

组/场站对象之间进行统筹分配。根据“三公”调度要求, 水火发电机组通常依据计划偏差进行调节量分配, 文中不再赘述。因 BESS 非一次能源, 通常不参与计划编制, 为保证其持续可用性, 文中提出计及 SOC 影响因子的 DAA 分配策略。

首先, 为避免 BESS 在参与调频控制的过程中出现过充/放电工况, 文中采用图 1 所示方法根据 SOC 偏离程度对各单点 BESS 的调节范围进行实时修正, 即当 BESS 的 SOC 处于理想运行区间时, 调节上/下限取额定放电/充电限额; 当 SOC 偏离理想运行区间时, 根据偏离距离比例调节 BESS 的放电/充电限额, 直至进入低限/高限禁止区间后触发禁放/禁充的强约束逻辑。

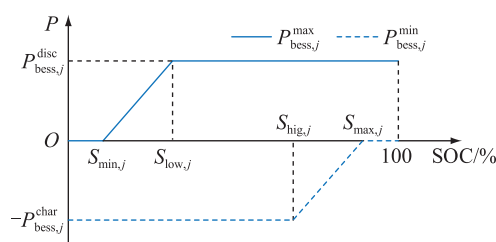


图 1 BESS 调节限额修正方法

Fig.1 Correction method of BESS regulation limitation

图 1 中, $P_{\text{bess},j}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{bess},j}^{\text{min}}$ 分别为 BESS 机组 j 的调节上限与调节下限; $P_{\text{bess},j}^{\text{disc}}$ 、 $P_{\text{bess},j}^{\text{char}}$ 分别为 BESS 机组 j 的额定放电功率和额定充电功率 (均取正值); $S_{\text{min},j}$ 、 $S_{\text{low},j}$ 、 $S_{\text{high},j}$ 、 $S_{\text{max},j}$ 分别为 BESS 机组 j 的 SOC 最低运行下限、理想运行下限、理想运行上限和最高运行上限。公式表述如下:

$$P_{\text{bess},j}^{\text{max}}(t) = \begin{cases} 0 & S_j(t) < S_{\text{min},j} \\ P_{\text{bess},j}^{\text{disc}} \frac{S_j(t) - S_{\text{min},j}}{S_{\text{low},j} - S_{\text{min},j}} & S_{\text{min},j} \leq S_j(t) \leq S_{\text{low},j} \\ P_{\text{bess},j}^{\text{disc}} & S_j(t) > S_{\text{low},j} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{\text{bess},j}^{\text{min}}(t) = \begin{cases} 0 & S_j(t) > S_{\text{max},j} \\ -P_{\text{bess},j}^{\text{char}} \frac{S_{\text{max},j} - S_j(t)}{S_{\text{max},j} - S_{\text{high},j}} & S_{\text{max},j} \geq S_j(t) \geq S_{\text{high},j} \\ -P_{\text{bess},j}^{\text{char}} & S_j(t) < S_{\text{high},j} \end{cases} \quad (9)$$

然后, 考虑各 BESS 的当前 SOC 与期望值的偏离方向、偏离程度及与集群调频需求方向的关系, 计算其 SOC 影响因子, 进而对原始 DAA 进行相应的缩放调整。公式描述如下:

$$c_{\text{bess},j}(t) = \alpha_{\text{bess},j}(t) D_{\text{bess},j}(t) \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{bess},j}(t) = \begin{cases} 1 + \frac{S_j(t) - S_{\text{ref}}}{S_{\text{ref}}} & \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) \geq 0 \\ 1 + \frac{S_{\text{ref}} - S_j(t)}{S_{\text{ref}}} & \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$D_{\text{bess},j}(t) = \begin{cases} \min \left\{ P_{\text{bess},j}^{\text{max}}(t) - P_{\text{bess},j}^{\text{gen}}(t), \frac{T_{\text{cmd}}^{\text{up}}}{60} r_{\text{bess},j}^{\text{up}} \right\} & \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) \geq 0 \\ \min \left\{ P_{\text{bess},j}^{\text{gen}}(t) - P_{\text{bess},j}^{\text{min}}(t), \frac{T_{\text{cmd}}^{\text{dn}}}{60} r_{\text{bess},j}^{\text{dn}} \right\} & \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $c_{\text{bess},j}(t)$ 为 t 时刻 BESS 机组 j 的分配因子; $\alpha_{\text{bess},j}(t)$ 为 t 时刻 BESS 机组 j 的 SOC 影响因子; $D_{\text{bess},j}(t)$ 为 t 时刻 BESS 机组 j 的 DAA; $P_{\text{bess},j}^{\text{gen}}(t)$ 为 t 时刻 BESS 机组 j 的有功功率值; $r_{\text{bess},j}^{\text{up}}$ 、 $r_{\text{bess},j}^{\text{dn}}$ 分别为 BESS 机组 j 的额定上、下调速率。

从式(11)可以看出, SOC 影响因子的变化范围在 0~2 之间。该值大于 1 表示集群调频需求有利于 BESS 的 SOC 恢复, 值越大对原始 DAA 的放大倍数也越大; 反之, 则加剧 BESS 的 SOC 偏离, 值越小对原始 DAA 的收缩调整越大。

最终, 根据该分配因子计算得到各单点 BESS 的分配调节量, 公式如下:

$$P_{\text{bess},j}^{\text{disp}}(t) = \Delta P_{\text{bess}}^{\text{disp}}(t) \frac{c_{\text{bess},j}(t)}{\sum_{j=1}^n c_{\text{bess},j}(t)} \quad (13)$$

4 算例分析

4.1 仿真系统

文中基于 MATLAB/Simulink 平台搭建了区域等效模型^[29]对所提策略进行算例仿真分析, 在保证文中核心控制策略完整性的前提下, 对相关仿真模型进行简化处理。非 BESS 类集群选取水火等值机模型作为一个集群对象, 不再对水、火单机模型进行详细建模。BESS 仿真模型采用图 2 所示简化的电池储能模型, 仅考虑变流器单元(下文简称为 PCS)响应的一阶延迟环节, 通过对 BESS 对象充、放电功率积分计算其电能耗量(暂不考虑能量转化过程中的电能损失, 正值代表能量注入, 负值代表能量流出)及 SOC 实时值。

图 2 中, $P_{\text{bess}}^{\text{targ}}$ 为控制指令; $P_{\text{bess}}^{\text{gen}}$ 为有功输出; E 为额定容量; S_{init} 为 SOC 初始值; S 为 SOC 当前值; $f(S)$ 为考虑 SOC 的调节范围修正函数; T_{PCS} 为 PCS 响应时延; K_T 为积分电量计算时间常数, 其值与仿

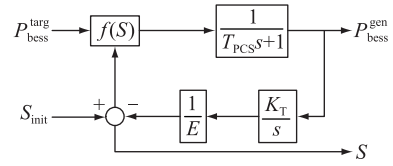


图 2 含 SOC 指标的 BESS 仿真模型

Fig.2 Simulation model of BESS with SOC index

真步长有关。

包含多点 BESS 的区域电网调频动态模型如图 3 所示。其中, ΔP_T 、 ΔP_R 、 ΔP_G 、 ΔP_D 、 P_B 、 ΔP_E 、 Δf 分别为联络线交换偏差、AGC 调节量、机组出力变化量、负荷扰动、储能有功、系统总有功不平衡量及频率偏差; R 、 B 分别为等效机组的调差系数和区域电网的频偏系数; T_G 、 T_T 、 T_R 、 T_S 、 C 、 M 、 D 分别为调速器时间常数、涡轮机时间常数、再热器时间常数、汽轮机时间常数、再热器增益、系统惯性系数与负荷频率特性系数; $T_{\text{PCS1}} \sim T_{\text{PCS5}}$ 分别为 PCS1—PCS5 的响应时延; C1、C2 分别为水火机组集群与 BESS 集群之间的调节需求分配器和 BESS 集群内部的调节需求分配器。C1 和 C2 调节需求分配器均通过 MATLAB 软件中的 M 函数编程实现, 分别采用文献[17]所提 DAA 比例分配策略和文中提出的控制策略。上述各参数变量取值如表 1 所示。

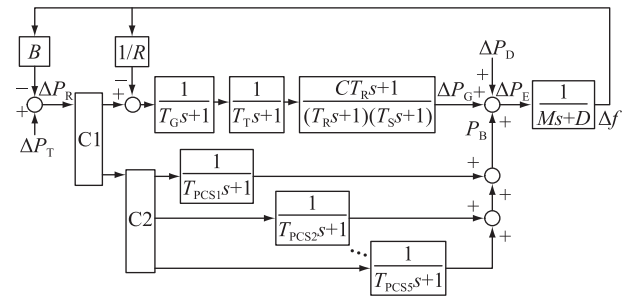


图 3 含多点 BESS 的单区域控制系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of single area power system with multiple BESS

表 1 区域电网仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters in area power system

参数	数值	参数	数值
$R/\%$	5	T_S/s	8
$B/[\text{MW} \cdot (0.1\text{Hz})^{-1}]$	800	C	0.25
T_G/s	0.5	M/s	10
T_T/s	0.5	D	1
T_R/s	0.2		

为验证文中策略对多点储能 SOC 的影响, 仿真模型选取了 5 个容量不等、SOC 初始状态各有差异的 BESS 控制对象, 各 BESS 模型参数如表 2 所示。

仿真过程中,所有 BESS 控制对象的 SOC 期望值均取 50%,允许运行区间为[10%,90%]。

表 2 BESS 仿真模型参数

Table 2 Value of BESS simulation model parameters

模型名称	E	$S_{\text{ini}}/\%$	T_{PCS}/s
BESS-A	10 MW/10 MW·h	70	3
BESS-B	16 MW/16 MW·h	20	2
BESS-C	20 MW/40 MW·h	60	5
BESS-D	24 MW/40 MW·h	30	4
BESS-E	30 MW/60 MW·h	40	2

文中分别针对电网持续负荷扰动(持续扰动)及跳机扰动(阶跃扰动)2种工况进行仿真分析。2种工况下分别设计3个运行控制场景,场景1:不配置 BESS;场景2:配置额定功率为100 MW的多点 BESS,各控制对象之间皆采用原始 DAA 比例分配策略;场景3:配置额定功率为100 MW的多点 BESS,控制分配策略采用文中所提策略。

4.2 持续扰动工况下的仿真分析

取某区域电网连续2h的区域控制偏差(area control error, ACE)历史采样曲线(采样时间间隔5s)作为系统输入,模拟电网实际负荷持续扰动工况。ACE波动曲线如图4所示。

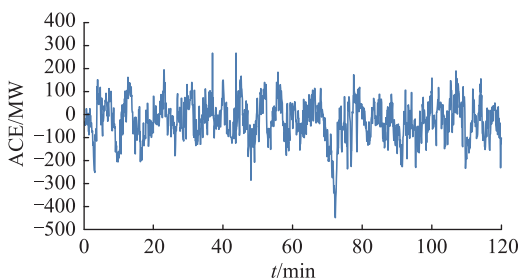


图4 ACE历史采样曲线

Fig.4 Curve of sampled ACE

持续扰动工况下3个运行控制场景仿真结果中的频差分布情况如表3所示。

表3 持续扰动工况下3个场景的频差分布

Table 3 Frequency difference distribution of three scenarios under continuous disturbance case %

场景	频差分布		
	$ \Delta f \leq 0.03 \text{ Hz}$	$0.03 \text{ Hz} < \Delta f < 0.05 \text{ Hz}$	$ \Delta f \geq 0.05 \text{ Hz}$
场景1	32.78	21.32	45.90
场景2	37.24	22.71	40.05
场景3	45.49	16.32	38.19

从表3中可以看出,区域电网配置 BESS 后频率质量有明显改善:低频差成分占比升高,高频差成分占比降低。对比场景2和场景3的频差分布情况,可知采用文中策略后的系统频率质量有了进一

步提升,频差小于等于0.03 Hz的占比进一步提升了约8个百分点,频差大于等于0.05 Hz的占比进一步降低了约2个百分点。

图5和图6分别为场景2和场景3仿真过程中的5个 BESS 的 SOC 变化曲线。

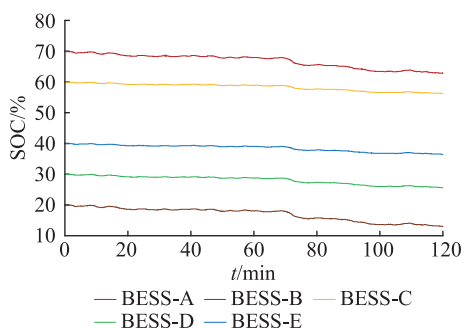


图5 持续扰动工况下场景2中各 BESS 机组的 SOC 曲线

Fig.5 SOC curve of each BESS plant in scenario 2 under continuous disturbance case

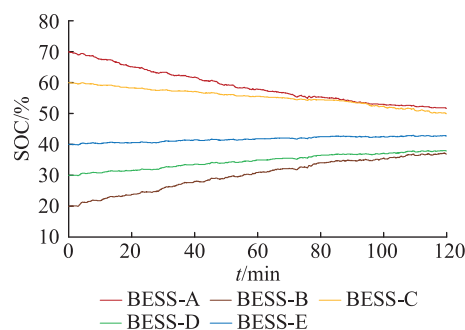


图6 持续扰动工况下场景3中各 BESS 机组的 SOC 曲线

Fig.6 SOC curve of each BESS plant in scenario 3 under continuous disturbance case

从图5中可以看出,场景2中5个独立 BESS 在经历连续2h的频率响应调节后,SOC变化幅度不大。其原因为该区域电网 ACE 在零值附近波动,再次验证了 BESS 参与电网调频的可行性。同时,注意到5个独立 BESS 的 SOC 均有一定幅度的下降,表明受新能源出力波动及负荷变化影响,该时段电网 ACE 均值并不完全为0。因此,叠加 SOC 初始状态及能量损耗等因素的影响,若不做 SOC 主动管理势必影响 BESS 的 SOC 运行区间,造成部分时段 BESS 不可用,甚至影响电池设备运行效率和寿命。从图6中可以直观看到,场景3中5个独立 BESS 的 SOC 运行曲线沿时间轴方向向期望值“靠拢”,验证了文中第3章所提策略的有效性。一方面通过 SOC 偏离情况对 BESS 调节范围的修正,规避了恶化 SOC 的调节指令;另一方面动态 SOC 影响因子使偏离期望 SOC 越远的 BESS,在有利于自身 SOC 恢复的调节量分配过程中拥有更大的配比系数,从而促使经历长周期的滚动调节后所有 BESS 的 SOC 偏差

趋于一致。

定量分析 2 种功率控制策略下 SOC 的一致性,分别计算 5 个 BESS 的 SOC 起、止值,极差 δ 和标准差 γ 指标,如表 4 所示。

表 4 SOC 指标对比
Table 4 Comparison of SOC indexes

指标	测试前	测试后		
		场景 2	场景 3	
BESS-A	70.0	63.0	51.7	
BESS-B	20.0	13.0	36.9	
SOC/%	BESS-C	60.0	56.3	50.0
	BESS-D	30.0	25.6	37.9
	BESS-E	40.0	36.5	42.7
δ	50.0	50.0	14.8	
γ	20.7	21.6	8.6	

由表 4 可知,场景 2 中仅考虑 DAA 分配控制对 BESS 集群 SOC 一致性提升没有贡献,甚至会恶化其分散程度,而场景 3 引入 SOC 动态影响因子后 SOC 极差与标准差均显著减小,即 SOC 趋于一致,且各 BESS 的 SOC 均趋向于期望值。

4.3 阶跃扰动工况下的仿真分析

仿真系统模拟 500 MW 的单机脱网故障,绘制阶跃扰动工况下 3 个运行控制场景中扰动发生后 10 min 的频率恢复曲线,如图 7 所示。

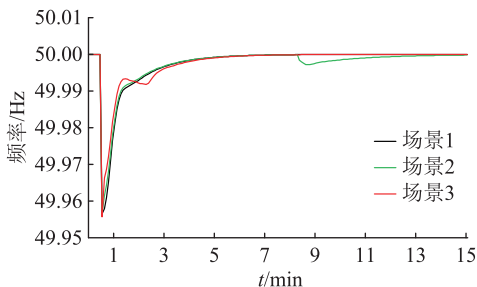


图 7 阶跃扰动工况下的频率恢复曲线
Fig.7 Frequency recovery curves under step disturbance case

从图 7 中可以看出,得益于 BESS 的快速调节特性,在大功率缺失扰动工况下系统配置 BESS 后可有效提供快速支撑,缩短系统低频运行时间。因水火集群备用占比较大,采用原始 DAA 分配策略的场景 2 中 BESS 的快速调频潜力未能充分发挥,其频率恢复速率要低于场景 3。观察到场景 2 的频率恢复曲线在 8 min 附近发生了二次偏移。

将场景 2 中各 BESS 的有功支撑及 SOC 变化情况绘制成曲线,分别如图 8、图 9 所示。从图 8 中可以看出系统发生扰动后,水火集群和 BESS 集群均开始提供持续的功率支撑。图 9 中显示各单点

BESS 的 SOC 均持续降低,在 8 min 附近,BESS-B 机组的 SOC 已经落至允许下限失去支撑能力,新的功率缺额引发了图 7 所示的频率二次偏移。

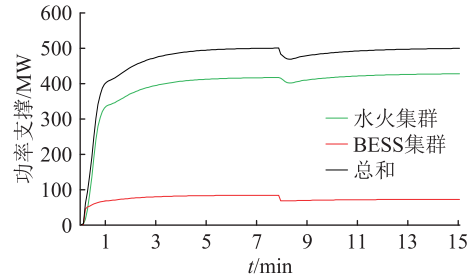


图 8 场景 2 中有功功率支撑曲线
Fig.8 Active power curves in scenario 2

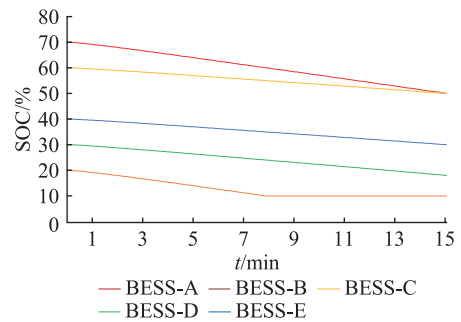


图 9 阶跃扰动工况下场景 2 中各 BESS 机组的 SOC 曲线
Fig.9 SOC curve of each BESS plant in scenario 2 under step disturbance case

同上,绘制场景 3 中的功率支撑曲线与各单点 SOC 曲线,分别如图 10 和图 11 所示。

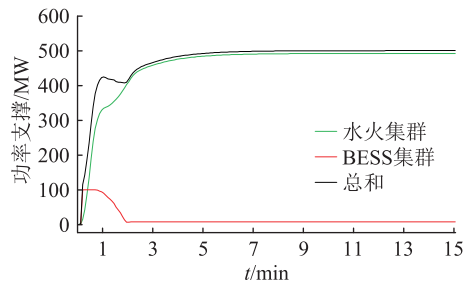


图 10 场景 3 中有功功率支撑曲线
Fig.10 Active power curves in scenario 3

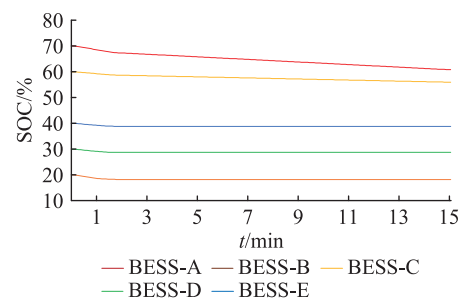


图 11 阶跃扰动工况下场景 3 中各 BESS 机组的 SOC 曲线
Fig.11 SOC curve of each BESS plant in scenario 3 under step disturbance case

对比发现,场景3中BESS集群仅在缺额发生后的1 min提供了满额功率支撑,后续逐渐减小功率支撑,至2 min时已完全退出,这也解释了图7中场景3的频率恢复曲线在该时段出现的停滞现象。测算得知,扰动发生时刻BESS集群对象等效SOC为42.3%,略低于期望SOC,故水火集群优先参与调频控制。但由于水火机组限速环节约束,其DAA能低于ARR,故BESS集群也同时参与了调频分配。在水火集群调节能力释放的过程中,BESS对象逐步退出功率支撑。从各BESS机组的SOC变化曲线可以看出,该场景下没有出现SOC持续衰减的现象。初始SOC最高的BESS-A机组变化幅度最大,表明其在对SOC恢复的有利调节过程中承担了更多调频节量。

上述持续负荷扰动和模拟跳机扰动2个工况下的仿真分析结果表明,文中所提控制策略在改善电网调频质量的同时,兼顾了各独立BESS的SOC一致性,保证了BESS在电网调频控制场景中的持续可用性与理想工作区间。

5 结论

针对电网调频资源的多样性与响应特性的差异性,文中以多元资源协同与多点多类型BESS统一管理为出发点,提出了SOC均衡管理与DAA的多点BESS参与电网调频的模型架构与控制策略,并通过仿真对所提策略的有效性进行了验证。

“域-群-机”三级AGC控制模型架构可满足电网中不同调频资源的接入与系统建模需求,以支撑不同调频资源的协调分配与分类决策。基于该架构可实现各种类型、不同容量的多点BESS的聚合,并提出基于改进DAA的多元集群协同控制策略。

BESS为能量有限型资源,维持各单点BESS的在线可用性与运行经济性是BESS集群持续参与AGC的基本前提。文中分别提出了考虑SOC管理的单点BESS和集群BESS控制管理策略,在兼顾系统频率质量的前提下,实现了SOC均衡的主动优化控制。

随着国内电力市场改革的逐步深化,不同储能主体参与电网调频的成本与收益将成为AGC分配策略中的重要影响因素,因此综合考虑不同调频资源之间的经济性分配策略有待进一步研究。

参考文献:

[1] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192.
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on

inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.

[2] 张军六, 李佳朋, 唐震, 等. 基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3): 50-60.
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(3): 50-60.

[3] NERC Resources Subcommittee. Balancing and frequency control[EB/OL]. [2023-06-15]. https://www.researchgate.net/publication/282980830_Balancing_and_Frequency_Control_A_Technical_Document_Prepared_by_the_NERC_Resources_Subcommittee.

[4] 方勇杰. 英国“8·9”停电事故对频率稳定控制技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(24): 1-5.
FANG Yongjie. Reflections on frequency stability control technology based on the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 1-5.

[5] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 211-222.

[6] 刘庆楷, 刘明波, 陆文甜. 考虑退化成本的电池储能参与调频辅助服务市场的控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(8): 3043-3051.
LIU Qingkai, LIU Mingbo, LU Wentian. Control method for battery energy storage participating in frequency regulation market considering degradation cost[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3043-3051.

[7] 陈沛, 张新松, 郭晓丽, 等. 考虑AGC指令随机特性的火-储混合电站二次调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(12): 168-177.
CHEN Pei, ZHANG Xinsong, GUO Xiaoli, et al. Secondary frequency regulation of a hybrid coal-fired generator and BESS power station considering random characteristics of AGC instructions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 168-177.

[8] 李建林, 牛萌, 王上行, 等. 江苏电网侧百兆瓦级电池储能电站运行与控制分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 28-35.
LI Jianlin, NIU Meng, WANG Shangxing, et al. Operation and control analysis of 100 MW class battery energy storage station on grid side in Jiangsu power grid of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 28-35.

[9] MEJÍA-GIRALDO D, VELÁSQUEZ-GÓMEZ G, MUÑOZ-GALEANO N, et al. A BESS sizing strategy for primary frequency regu-

- lation support of solar photovoltaic plants[J]. *Energies*, 2019, 12(2):317.
- [10] RAMÍREZ M, CASTELLANOS R, CALDERÓN G, et al. Placement and sizing of battery energy storage for primary frequency control in an isolated section of the Mexican power system[J]. *Electric Power Systems Research*, 2018, 160:142-150.
- [11] 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.
- [12] 张舒鹏, 董树锋, 徐成司, 等. 大规模储能参与电网调频的双层控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19):55-62.
- ZHANG Shupeng, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Bi-level-control strategy for power grid frequency regulation with participation of large-scale energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19):55-62.
- [13] SARDI J, MITHULANANTHAN N, GALLAGHER M, et al. Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis[J]. *Applied Energy*, 2017, 190:453-463.
- [14] 胡泽春, 谢旭, 张放, 等. 含储能资源参与的自动发电控制策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29):5080-5087.
- HU Zechun, XIE Xu, ZHANG Fang, et al. Research on automatic generation control strategy incorporating energy storage resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29):5080-5087.
- [15] 廖小兵, 刘开培, 乐健, 等. 基于双层模型预测结构的跨区域 AGC 机组协同控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16):4674-4685, 4970.
- LIAO Xiaobing, LIU Kaipei, LE Jian, et al. Coordinated control strategy for AGC units across areas based on bi-level model predictive control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16):4674-4685, 4970.
- [16] 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, 105.
- 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, 105.
- [17] CHENGY Z, TABRIZI M, SAHNI M, et al. Dynamic available AGC based approach for enhancing utility scale energy storage performance[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 5(2):1070-1078.
- [18] 李建林, 袁晓冬, 郁正纲, 等. 利用储能系统提升电网电能质量研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(8):15-24.
- LI Jianlin, YUAN Xiaodong, YU Zhenggang, et al. Comments on power quality enhancement research for power grid by energy storage system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(8):15-24.
- [19] 杜永峰. 分布式储能参与电网降损场景的方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(10):107-114.
- DU Yongfeng. Analysis and research on the influence of distributed energy storage operation on regional power grid loss[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(10):107-114.
- [20] 闫群民, 穆佳豪, 马永翔, 等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2):67-74.
- YAN Qunmin, MU Jiahao, MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2):67-74.
- [21] 刘秋华, 杨圣城, 刘鑫. 分布式储能商业模式分析与展望[J]. *电力需求侧管理*, 2023, 25(1):67-73.
- LIU Qiu-hua, YANG Shengcheng, LIU Xin. Analysis and prospect of distributed energy storage business modes[J]. *Power Demand Side Management*, 2023, 25(1):67-73.
- [22] 刘欣, 宁新福, 金翼, 等. 配电网分布式储能的分层优化配置方法[J]. *浙江电力*, 2023, 42(5):95-104.
- LIU Xin, NING Xinfu, JIN Yi, et al. A hierarchical optimal configuration method for distributed energy storage in distribution networks[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(5):95-104.
- [23] 赵乙潼, 王慧芳, 何奔腾, 等. 面向用户侧的电池储能配置与运行优化策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(6):121-128.
- ZHAO Yitong, WANG Huifang, HE Benteng, et al. Optimization strategy of configuration and operation for user-side battery energy storage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(6):121-128.
- [24] 刘忠, 杨陈, 蒋玮, 等. 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(7):61-69.
- LIU Zhong, YANG Chen, JIANG Wei, et al. Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(7):61-69.
- [25] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23):76-83.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23):76-83.
- [26] 叶鹏, 刘思奇, 关多娇, 等. 基于自适应均衡技术的分布式储能聚合模型及评估方法[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(12):1689-1699.
- YE Peng, LIU Siqi, GUAN Duojiao, et al. An aggregation model and evaluation method of distributed energy storage based on adaptive equalization technology[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(12):1689-1699.

[27] 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.

[28] KAZEMI M, ZAREIPOUR H. Long-term scheduling of battery storage systems in energy and regulation markets considering battery's lifespan[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6):6840-6849.

[29] HE G N, CHEN Q X, MOUTIS P, et al. An intertemporal deci-

sion framework for electrochemical energy storage management [J]. Nature Energy, 2018, 3(5):404-412.

作者简介:



于昌海

于昌海(1987),男,硕士,高级工程师,从事电网调度自动化控制、新能源有功协同控制相关工作(E-mail:yuchanghai@sgepri.sgcc.com.cn);

庞腊成(1968),男,硕士,高级工程师,从事智能配电网分析及应用相关工作;

吴继平(1984),男,硕士,高级工程师,从事电网调度自动化控制相关工作。

Coordination control for secondary frequency regulation with participation of multiple battery energy storage systems

YU Changhai^{1,2}, PANG Lacheng^{1,2}, WU Jiping^{1,2}, CAO Rongzhang^{1,2}, CHANG Li^{1,2}

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

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

Abstract: In the procedure of carbon peaking and carbon neutrality energy revolution, large-scale renewable energy is aggrandizing frequency regulation capacity of power grid. How to make the best use of new rapid resources, represented by battery energy storage systems (BESS), in the secondary frequency regulation is the key to solve the problem. Firstly, a three-layer frame is designed, embodying area, cluster and plant, which can satisfy the needs for access monitoring and classification decision of various regulation resources in automatic generation control (AGC) system. Secondly, a coordination control strategy including BESS is proposed, and so is the strategy of regulation requirements assignment based on state of charge (SOC) effecting factor in BESS group. Finally, simulations are conducted for continuous disturbance cases from an actual power system, as well as simulations for tripping fault disturbances. The results show that the proposed strategy can improve the SOC consistency between the respective BESS, promoting the availability of BESS, and improve the performance of network frequency response characteristics either.

Keywords: battery energy storage systems (BESS); automatic generation control (AGC); area, cluster and plant; coordination control; dynamic available AGC (DAA); state of charge (SOC) effecting factor

(编辑 陆海霞)