

doi: 10.7690/bgzd.2026.01.007

基于聚合方法的电力系统分布式储能调频方法

王景钢¹, 袁良¹, 刘哲¹, 刘博¹, 滕卫军²

(1. 河南电力调度控制中心, 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450000)

摘要: 针对现代电力系统中的调频效率低、能力不足等问题, 提出考虑调频能量消耗与储能荷电状态 (state of charge, SOC) 差异的 2 层调频控制策略。引入基于聚合方法的分布式储能调频方法, 精简二次调频的求解变量, 提出 2 层调频控制策略, 兼顾储能功率的经济分配与 SOC 差异, 实现分布式储能单元调频输出的有效管理。仿真结果表明: 按照储能类型进行区域划分的分布式储能调频策略的调频偏差低。该策略的最大频率偏差仅为 0.125 Hz, 频率下滑速度仅为 1.26×10^{-3} Hz/s, 频率恢复速度高达 58.91×10^{-6} Hz/s。荷电状态与 0.5 的均方根误差值仅为 0.85, 相比于通过直接求解调频能量消耗函数进行调频的策略减少 0.39。该策略具有较高的调频效率, 降低能量消耗。

关键词: 调频; 聚合; 分布式储能; SOC; 电力系统**中图分类号:** TM76 **文献标志码:** A

Frequency Modulation Method for Distributed Energy Storage of Power System Based on Aggregation Method

Wang Jinggang¹, Yuan Liang¹, Liu Zhe¹, Liu Bo¹, Teng Weijun²

(1. He'nan Electric Power Dispatching and Control Center, Zhengzhou 450000, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Aiming at the problems of low frequency regulation efficiency and insufficient capacity in modern power system, a two-layer frequency regulation control strategy considering the difference between frequency regulation energy consumption and energy storage state of charge (SOC) is proposed. The frequency regulation method of distributed energy storage based on aggregation method is introduced to simplify the solution variables of secondary frequency regulation, and a two-layer frequency regulation control strategy is proposed, which takes into account the economic distribution of energy storage power and the difference of SOC, and realizes the effective management of frequency regulation output of distributed energy storage units. The simulation results show that the frequency modulation deviation of the distributed energy storage frequency modulation strategy divided according to the energy storage type is low. The maximum frequency deviation of this strategy is only 0.125 Hz, the frequency sliding speed is only 1.26×10^{-3} Hz/s, and the frequency recovery speed is up to 58.91×10^{-6} Hz/s. The root mean square error between the state of charge and 0.5 is only 0.85, which is 0.39 less than strategy of frequency modulation by directly solving the energy consumption function of frequency modulation. This strategy has high frequency modulation efficiency and low energy consumption.

Keywords: FM; aggregation; distributed energy storage; SOC; power system

0 引言

随着光伏、风电等可再生能源的大规模并网, 以新能源为主体的新型电力系统成为电力供应的重要组成部分。新能源出力具有间歇性、不稳定性等特征, 为电网的频率调节带来了重大挑战^[1-2]。传统的调频机组通常需要一定的时间来调整功率输出。其中, 火电机组通过调整燃烧煤炭的量来改变功率输出, 受限于燃烧效率和蒸汽涡轮机的响应速度, 反应时间通常较长。同时, 在负荷快速变化时, 传统机组的调整速度有限。此外, 频繁的启动、停机或快速调节功率, 容易对火电机组、蒸汽轮机等设备造成机械磨损。近年来, 电池储能技术逐步应用

到电力系统调频领域, 能更快速、精确地响应电网频率波动, 且在频繁调节中不会导致设备疲劳或磨损等优势, 已逐渐成为较为理想的频率调节方案^[3]。目前, 大多数研究针对二次调频场景仍采用基于调频耗量函数的方法。该方法能够根据各个储能单元的实时状态来调整它们的功率输出, 从而最大化系统的经济性^[4]。未来, 电力系统将引入更多的分布式储能单元, 若仅采用基于调频耗量函数的全局优化方法, 系统中需要优化的变量会急剧增加, 从而大幅增加了计算所需的时间^[5-6]。此外, 针对军用可再生新能源基地等特殊环境中, 随着新能源出力的波动, 电力系统的频率稳定性问题愈加严重, 该方法

收稿日期: 2024-11-16; 修回日期: 2024-12-22

基金项目: 国网河南省电力公司电力科学研究院 (52170224001)

第一作者: 王景钢 (1981—), 男, 河南人, 硕士。

无法快速应对频率变化。

目前,针对电网二次调频开展了大量研究。邢超等^[7]提出了双电池储能集成控制策略,构建了基于区域控制误差信号(area control error, ACE)控制的电池储能-常规机组调频模型。该方案有效减小了电池寿命损耗,与单电池控制相比,双电池储能集成控制的使用寿命延长了数倍。王圣等^[8]针对二次调频功率分配,提出了构建了一种储能锂电池“电阻-电容”等效电路和储能系统模型,以及频率分配策略,结果显示频率分配策略在提高系统调频能力的同时,还能最大限度延长电池寿命;Adibi等^[9]提出了一种基于强化学习的有损逆变器微电网二次频率控制方案,结果显示该方法在模型参数不确定性以及及时变负载和干扰的情况下,仍能保持良好的性能。综上,国内外研究者提出了大量的二次调频方法,但大多计算复杂度较高,且效益较低。针对这一问题,笔者引入了基于聚合方法的电力系统分布式储能调频策略,以期实现储能资源的合理分配,提升系统的调频能力,延长电池使用寿命。

1 基于聚合方法的分布式储能调频方法

1.1 基于聚合方法的电力系统二次调频

二次调频是电力系统调频控制的一个关键环节,其目的是在电网发生频率偏差时,迅速恢复系

统的频率到预定的标准值^[10-11]。二次调频的原理如图 1 所示。

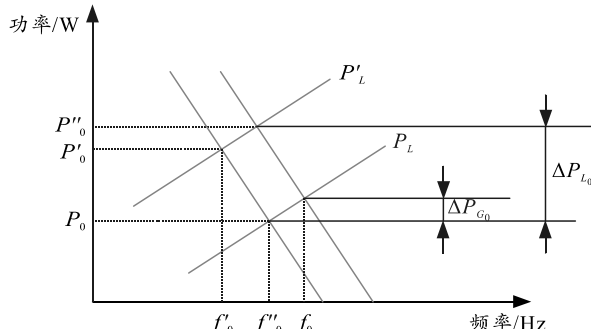


图 1 二次调频原理

图 1 中,在一次调频结束后,频率从 f_0 降至 f'_0 ,功率从 P_0 提升至 P'_0 。如果频率 f'_0 超过了允许的范围,二次调频就会启动。此时,调频器通过增大发电机的输出功率,使频率恢复到正常范围。当有功功率增加 ΔP_{L0} ,对应的频率变为 f''_0 ,功率提升至 P''_0 。发电机增加的出力表示为 ΔP_{L0} ^[12-14]。

在未来的电网中,越来越多的分布式储能单元将投入使用。传统的调频能量消耗函数方法已无法满足二次调频的功率分配需求,计算复杂度极高^[15]。针对这一问题,笔者引入了储能聚合单元以实现分布式储能单元的分区管理。引入聚合方法后的储能控制架构如图 2 所示。

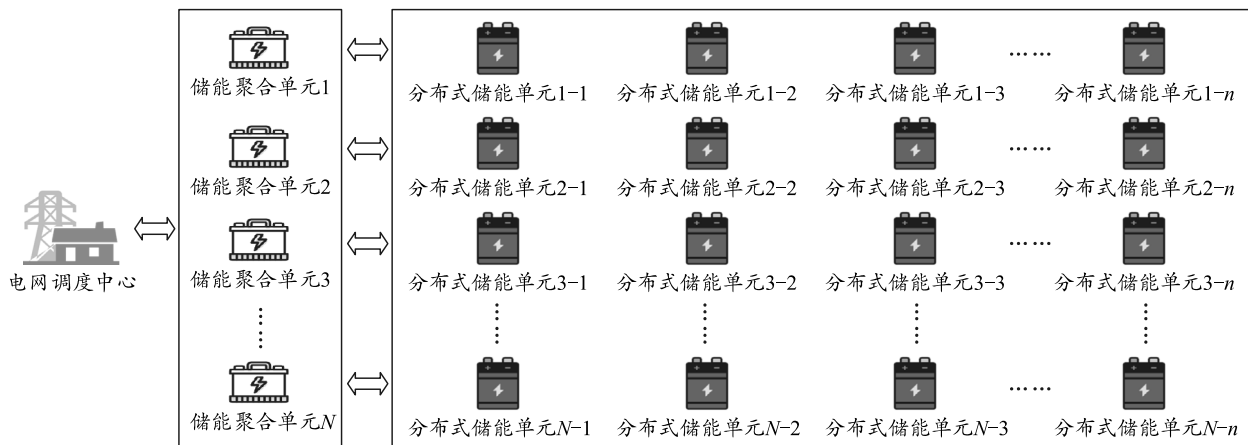


图 2 引入聚合方法后的储能控制架构

图 2 中,每个储能聚合单元均能管理多个分布式储能单元,并对其进行出力特性的聚合与调频。在各个分区中,分布式储能单元将其运行信息传递到储能聚合单元,后者将数据进行汇总并传递给调度中心。当调度中心在进行功率分配时,无需处理过多复杂的变量,有效精简了计算量。此外,当指令下发给储能聚合单元后,会将功率重新分配到区内各个分布式储能单元。在电力系统中,储能单元

的性能直接影响到调频的效果和电网的稳定性,其性能由 3 个特性来描述:1) 可用容量。储能单元能够提供的总电能量。2) 功率范围。储能单元可以在单位时间内提供的功率范围,反映了储能单元的瞬时功率输出能力。3) 爬坡速率。储能单元在单位时间内能够调整功率输出的速率。分布式储能单元指的是分散在电力系统不同位置的多个储能装置,在实际应用中,需要将多个分布式储能单元进行聚合,

形成一个整体来参与电网调频。当多个分布式储能单元聚合成一个“虚拟储能单元”时，整体的出力特性可通过以上 3 个指标来表征。其中，可用容量的上下限表达式为^[16]：

$$\left. \begin{aligned} C_{a,b}^{\min} &= 0.1C_{a,b} \\ C_{a,b}^{\max} &= 0.9C_{a,b} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 $C_{a,b}$ 为分布式储能单元的额定容量。其上限与下限表达式为：

$$\left. \begin{aligned} C_{ES,a}^{\min} &= \sum_{b=1}^n C_{a,b}^{\min} \\ C_{ES,a}^{\max} &= \sum_{b=1}^n C_{a,b}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

储能聚合单元的功率范围均由各个分布式储能单元的输出功率决定，其功率上限与下限为：

$$\left. \begin{aligned} P_{ES,a}^{\min} &= \sum_{b=1}^n P_{a,b}^{\min} \\ P_{ES,a}^{\max} &= \sum_{b=1}^n P_{a,b}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $P_{a,b}^{\max}$ 、 $P_{a,b}^{\min}$ 为第 a 个储能聚合单元中第 b 台分布式储能单元的输出功率上限与下限。爬坡速率的影响因素包括额定爬坡速率以及前一时刻的输出功率。爬坡速率上限为：

$$R_{a,b,t}^{\max} = \begin{cases} R_{a,b}^{\max}, & P_{a,b}^{\max} - P_{a,b,t-1} \geq R_{a,b}^{\max} \Delta t \\ \frac{P_{a,b}^{\max} - P_{a,b,t-1}}{\Delta t}, & P_{a,b}^{\max} - P_{a,b,t-1} < R_{a,b}^{\max} \Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中： Δt 为采样时间，取值为 1 s； $R_{a,b}^{\max}$ 为额定爬坡速率上限； $R_{a,b,t}^{\max}$ 为 t 时刻第 b 台分布式储能单元的爬坡速率上限； $P_{a,b,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻的输出功率。同理，爬坡速率下限为：

$$R_{a,b,t}^{\min} = \begin{cases} R_{a,b}^{\min}, & P_{a,b}^{\min} - P_{a,b,t-1} \leq R_{a,b}^{\min} \Delta t \\ \frac{P_{a,b}^{\min} - P_{a,b,t-1}}{\Delta t}, & P_{a,b}^{\min} - P_{a,b,t-1} > R_{a,b}^{\min} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中： $R_{a,b}^{\min}$ 为额定爬坡速率下限； $R_{a,b,t}^{\min}$ 为 t 时刻第 b 台分布式储能单元的爬坡速率。储能聚合单元的爬坡速率上限与下限为：

$$\left. \begin{aligned} R_{ES,a}^{\min} &= \sum_{b=1}^n R_{a,b,t}^{\min} \\ R_{ES,a}^{\max} &= \sum_{b=1}^n R_{a,b,t}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

以上运行特性表达式均未考虑荷电状态 (SOC) 超出安全工作范围的情况。若储能单元的 SOC 超过了电池的最大充电限制，会导致电池内部产生过高的电压，增加安全风险^[17]。若 SOC 低于电池的最小放电限值，会导致电池过度放电，损坏电池，降低电池的使用寿命。为了避免在聚合时发生 SOC 越限问题，笔者引入了充电修正因子 A 和放电修正因子 B ，分别对应充电和放电过程。在储能单元的 SOC 值处于正常范围时，储能系统能够平稳地进行充放电。此时，充放电修正因子均设定为 0。当 SOC 值达到下限时，放电修正因子 B 设定为 1。当 SOC 值达到上限时，充电修正因子 A 设定为 1。此外，若 SOC 达到上限无法充电时，仍可进行放电操作。同时，若 SOC 达到下限无法放电时，仍可进行充电操作。不同 SOC 值区间下对应的修正因子取值如图 3 所示。

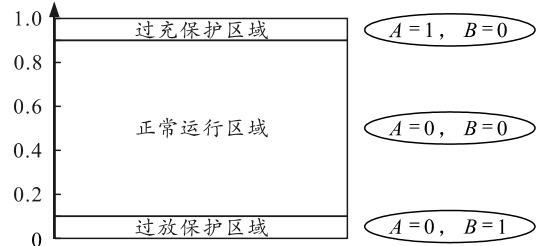


图 3 不同 SOC 值区间下对应的修正因子取值

图 3 中，设置 SOC 下限为 0.1，超过 0.1 的区间为过放保护区，此时， $A=0$ ， $B=1$ 。SOC 的上限为 0.9，超出 0.9 的范围为过充保护区，此时， $A=1$ ， $B=0$ 。若某个分布式储能单元的 SOC 超出了安全工作范围，不能继续参与充电或放电时，应将该储能单元在上一时刻已经贡献的功率从当前的输出功率中扣除，防止其失去放电或充电能力后对系统的调频输出产生负面影响。校正后的剩余电量为^[18]：

$$C_{ES,a,t-1}^* = \sum_{b=1}^n S_{a,b,t-1} C_{a,b} \quad (7)$$

式中： $C_{ES,a,t-1}^*$ 为校正后的剩余电量； $S_{a,b,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻储能单元 b 的 SOC 值。校正后的输出功率为：

$$P_{ES,a,t-1}^* = P_{ES,a,t-1} - \sum_{b=1}^n (A+B) P_{a,b,t-1} \quad (8)$$

式中： $P_{ES,a,t-1}^*$ 为校正后的输出功率； $P_{a,b,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻储能单元 b 的输出功率； $P_{ES,a,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻储能聚合单元的输出功率。

1.2 考虑调频能量消耗与 SOC 差异的 2 层调频控制

研究通过引入储能聚合单元，精简了求解变量，

解决了传统功率分配存在的计算量过大等问题。基于此，笔者进一步提出了一种 2 层调频控制策略：1) 最小化储能调频能量消耗函数，根据调度中心下发的功率分配指令进行初步分配；2) 确保各个分布式储能单元 SOC 值保持平衡，分配最终的调频输出功率。2 层调频控制策略框架如图 4 所示。

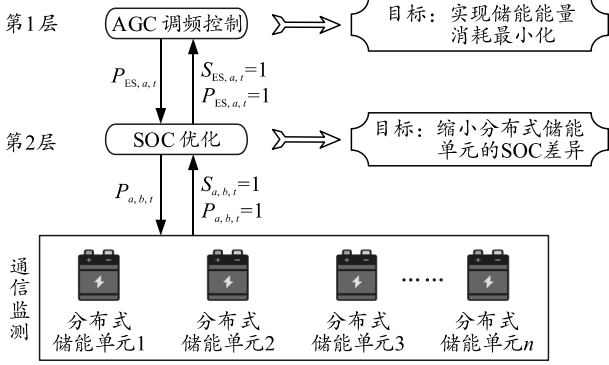


图 4 2 层调频控制策略框架

由图 4 可知：2 层调频控制策略中的第 1 层需要对调度中心发出的自动发电控制指令 (automatic generation control, AGC) 进行调频功率优化，以实现储能调频能量消耗最小化^[19]。在第 2 层优化之后，每个分布式储能单元会接收到一个初步的功率指令 $P_{ES,a,t}$ 。第 2 层主要对各个分布式储能单元的 SOC 值进行优化，缩小其中的差距，同时将输出功率 $P_{a,b,t}$ 下达给通信监测系统，确保每个储能单元的状态信息能够被实时收集和分析，实现有效的功率和 SOC 优化。AGC 指令分配到储能单元或传统机组的模式，包括区域调节需求信号 (area regulation requirement, ARR) 与 ACE 2 种。两者的不同之处在于 ARR 模式在分配信号前增加了积分环节，相比之下，ACE 能够快速恢复调频偏差，而 ARR 能够有效改善系统的稳态频率偏差^[20-21]。为了实现更优的调频效果，研究采用了基于 ARR 与 ACE 的综合控制方法如图 5 所示。

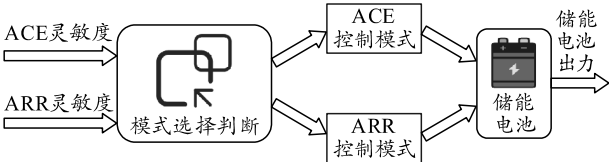


图 5 基于 ARR 与 ACE 的综合控制方法

图 5 中，在选取 AGC 指令的分配模式时，需要计算 ARR 与 ACE 信号的灵敏度，当 ARR 的灵敏度与系统频率偏差的比值大于 ACE 的灵敏度与频率偏差的比值时，选择 ARR 模式，反之选择 ARR 模式。确定好指令分配模式后，接着需要确定调频

能量消耗函数。由于二次调频信号由储能聚合单元与传统机组共同参与，因此调频能量消耗函数包括储能聚合单元与传统机组 2 部分。储能聚合单元主要负责承担变化速度较快的功率，而传统机组负责承担变化较为平稳的功率。储能聚合单元的调频能量消耗函数：

$$D_{a,t} = \alpha P_{ES,a,t}^2 + \beta (C_{ES,a,t} - C_{ref})^2 \quad (9)$$

式中： $D_{a,t}$ 为 t 时刻储能聚合单元的调频能量消耗； $C_{ES,a,t}$ 为 t 时刻储能聚合单元的实时容量； C_{ref} 为容量参考值，取值为额定容量的 1/2； α 为实时功率的权重系数，取值为 3； β 为容量偏差的权重系数，取值为 1。传统机组的调频能量消耗函数：

$$D_{G,t} = \gamma P_{G,t}^2 \quad (10)$$

式中： $D_{G,t}$ 为 t 时刻储传统机组的调频能量消耗； γ 为权重系数； $P_{G,t}$ 为 t 时刻储传统机组的输出功率。此外，实际运行中可能存在函数求解失败的情况，原因在于当前储能单元的功率无法满足调度中心的需求，针对这一问题，研究引入了新的目标函数，以最小化调频需求的信号误差：

$$D_t = \min \left| \sum_a^N P_{ES,a,t} - P_{AGC,t}^{ES} \right| \quad (11)$$

式中 $P_{AGC,t}^{ES}$ 为 t 时刻调度中心发送的功率需求信号。由于储能聚合单元是由多个分布式储能单元所组成的，因此储能聚合单元在获得调频功率后分配给各个组成部分。在理想的情况下，每个分布式储能单元的 SOC 值均在 0.5 左右波动，从而能够确保储能聚合单元在不同工况下均具有良好的调频能力。在实际情况下，SOC 值存在超出安全工作范围的情况，需要尽可能使分布式储能单元的 SOC 值保持平衡。针对这一问题，研究设置了一个目标函数，以优化 SOC 值分布。该函数为：

$$F_{a,t} = \min \sum_{b \neq k} |S_{a,b,t} - S_{a,k,t}| \quad (12)$$

式中： $F_{a,t}$ 为 t 时刻分布式储能单元的目标函数总和； $S_{a,b,t}$ 为 t 时刻储能单元 b 的 SOC 值； $S_{a,k,t}$ 为 t 时刻储能单元 k 的 SOC 值。函数的约束条件：

$$\left. \begin{aligned} P_{ES,a,t} &= \sum_{b=1}^n P_{a,b,t} \\ P_{a,b}^{\min} &\leq P_{a,b,t} \leq P_{a,b}^{\max} \\ C_{a,b}^{\min} &\leq C_{a,b,t} \leq C_{a,b}^{\max} \\ R_{a,b}^{\min} &\leq R_{a,b,t} \leq R_{a,b}^{\max} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

考虑调频能量消耗与储能 SOC 差异的 2 层调频控制策略流程如图 6 所示。

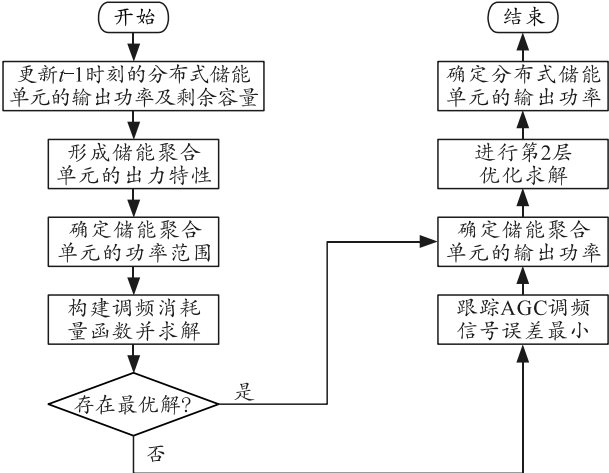


图 6 调频能量消耗与储能 SOC 差异的 2 层调频控制流程

由图 6 可知：考虑调频能量消耗与储能 SOC 差异的 2 层调频控制策略流程为首先收集并更新每个储能单元在 $t-1$ 时刻的 SOC 值与输出功率。接着确定整体出力特性，并确定其功率范围。随后进行 2 层调频控制，构建调频能量消耗函数，并求解最优解。检查上一步的优化求解是否有解。如果是，则继续下一步；如果不是，则跳转到下一步。如果没有最优解，则转向另一个优化问题，即最小化 AGC 调频信号的误差。接下来进行第 2 层的优化计算，平衡各个分布式储能单元的 SOC 值，最后得到各分布式储能单元的输出功率。

2 基于聚合方法的分布式储能调频实例

2.1 仿真分析策略与储能单元划分方案设置

为验证基于聚合方法的分布式储能调频策略的优越性，笔者在 Matlab/Simulink 中对某区域电网进行了仿真分析，该区域电网的相关参数如表 1 所示。

表 1 区域电网的相关参数

名称	参数值	名称	参数值
装机容量/MW	1 000	惯性常数	12
新能源渗透率/%	20	积分常数	-0.15
负荷阻尼系数	1.6	汽轮机时间常数	0.2
调差系数	25	爬坡速率/(MW/h)	200

该电网配备了总容量为 20 MWh 的分布式储能，包含锂电池、超级电容与铅酸电池 3 种类型。各个分布式储能单元的相关参数如表 2 所示。

笔者设置了 3 种策略进行对比。策略 1 通过直接求解调频能量消耗函数进行二次调频，策略 2 与 3 采用了基于聚合方法的分布式储能调频策略。其中策略 2 按照充放电效率的大小进行区域划分，策

略 3 按照储能类型进行区域划分，具体划分方案如表 3 所示。

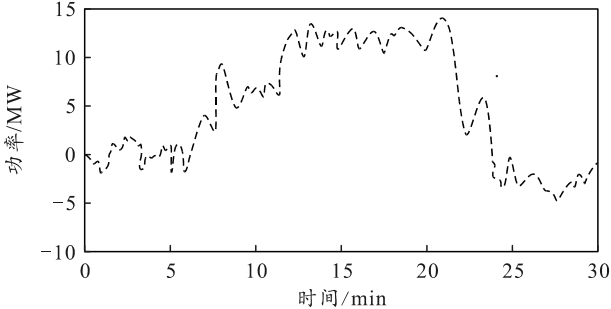
表 2 各个分布式储能单元的相关参数

类型	编号	额定容量/MWh	输出功率/MW	响应时间/s
锂电池	1-1	1.100	± 1.5	0.100
	1-2	1.350	± 2.0	0.100
	1-3	1.650	± 2.5	0.100
	1-4	1.750	± 3.0	0.100
超级电容	2-1	0.550	± 5.5	0.001
	2-2	0.625	± 6.5	0.001
	2-3	0.700	± 8.0	0.001
	2-4	1.125	± 10.0	0.001
铅酸电池	3-1	1.050	± 1.4	1.000
	3-2	1.350	± 1.5	1.000
	3-3	1.600	± 1.6	1.000
	3-4	1.750	± 2.5	1.000

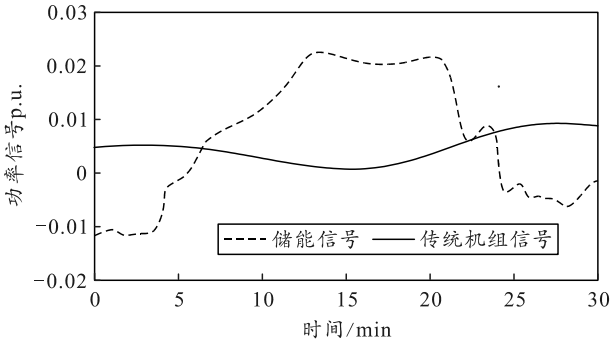
表 3 不同策略的划分方案

储能聚合单元	策略 2	策略 3
1	1-2、1-3、3-1、3-2	1-1、1-2、1-3、1-4
2	1-4、2-1、2-2、2-4	2-1、2-2、2-3、2-4
3	1-1、2-3、3-3、3-4	3-1、3-2、3-3、3-4

该区域电网 30 min 连续负荷扰动及下二次调频信号如图 7 所示。



(a) 连续扰动下的负荷变化曲线



(b) 储能与传统机组的二次调频信号

图 7 负荷变化曲线与二次调频信号

传统机组主要负责对变化较小的信号进行调频，而储能则负责对变化较大的信号进行调频。

2.2 基于聚合方法的分布式储能二次调频仿真

不同调频策略下，系统的频率偏差曲线如图 8 所示。

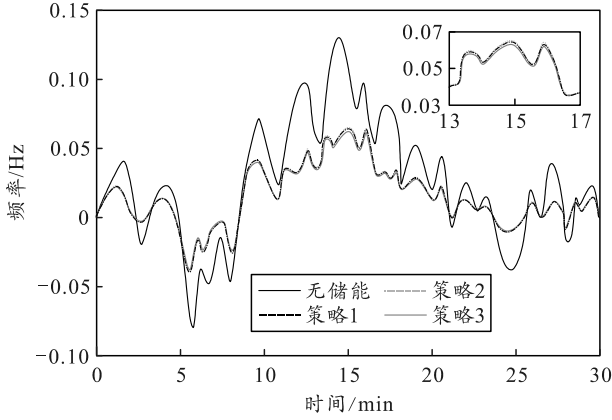


图 8 不同调频策略下的频率偏差曲线

由图 8 可知：具有储能的 3 个策略的基本偏差基本相同，且均明显低于无储能的情况。策略 3 的调频偏差最低，在 15 min 时，其偏差仅为 0.065 2，略低于其余 2 种策略。同时可以看出：通过聚合各个分布式储能单元，仍然能够达到较优异的调频效果。说明该方法在缩减变量的同时，还兼顾了调频能力。

继续验证不同策略下的 SOC 变化曲线，结果如图 9 所示。

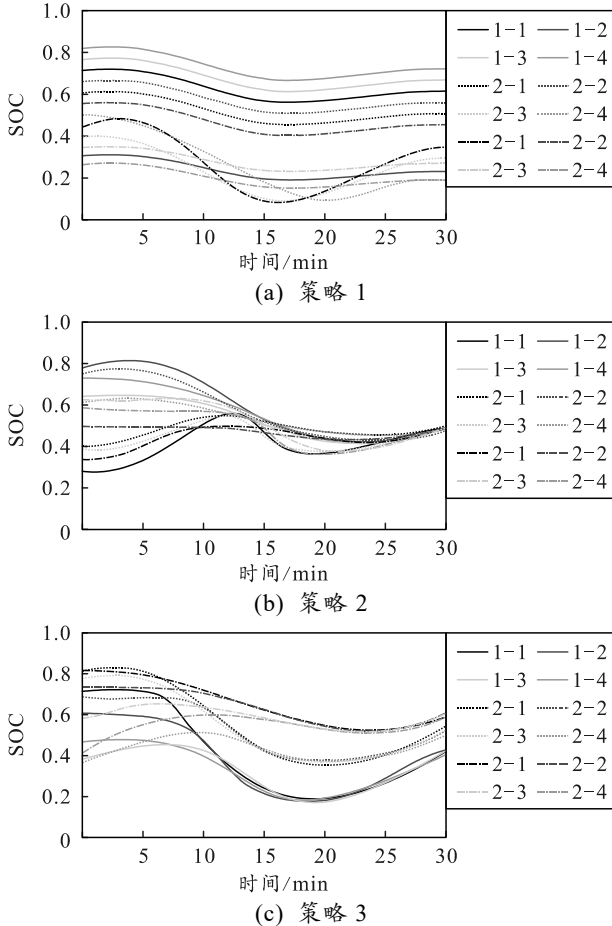


图 9 不同策略下的 SOC 变化曲线

由图 9(a)可知：策略 1 中各个分布式储能单元的 SOC 曲线变化趋势相同，但部分储能单元的 SOC 值超出安全范围，包括编号为 2-3、2-4 以及 3-1 的分布式储能单元。由图 9(b)与(c)可知：采用了聚合方法后，不同储能聚合单元中的分布式储能单元的 SOC 值在后期均达到了平衡状态，不存在越限现象。其中，策略 2 的各个分布式储能单元的 SOC 值在后期均稳定在 0.3~0.6。策略 3 的分布式储能单元的 SOC 值在后期稳定在 0.2~0.7。

笔者进一步对比了不同策略的最大频率偏差 Δf_m 、频率下滑速度 V_m 、频率恢复速度 V_r 、SOC 与 0.5 的均方根误差值 S_{rmse} 以及调频结束时储能单元的剩余电量 C_{remain} 。仿真结果如图 10 所示。

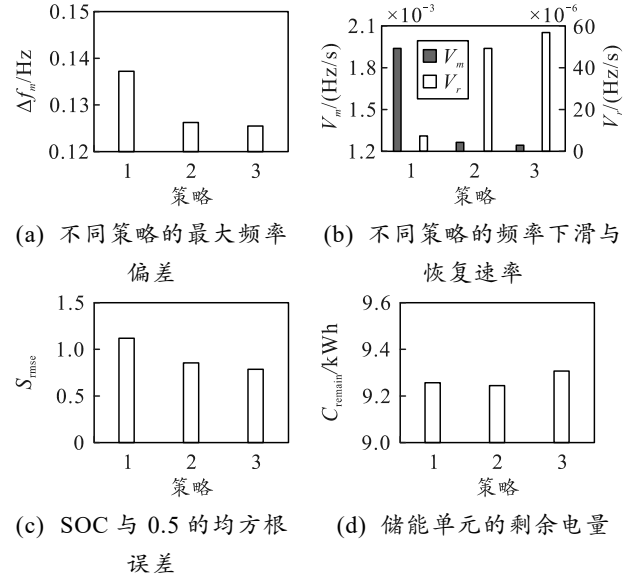


图 10 性能指标测试结果

由图 10(a)可知：策略 1 的 Δf_m 高达 0.137 Hz，而引入聚合方法的策略 2 与 3 的 Δf_m 分别仅为 0.126 和 0.125 Hz。由图 10(b)可知：策略 1 的 V_m 高达 1.95×10^{-3} Hz/s， V_r 仅为 8.15×10^{-6} Hz/s。而策略 3 的 V_m 仅为 1.26×10^{-3} Hz/s， V_r 高达 58.91×10^{-6} Hz/s。说明该策略对暂态与稳态频率偏差均具有更优异的恢复效果。由图 10(c)可知：策略 3 的 S_{rmse} 仅为 0.85，相比于策略 1 减少了 0.39，代表该策略能够更精准地控制 SOC 值，提高储能系统的稳定性。由图 10(d)可知：策略 3 的 C_{remain} 高达 9.30 kWh，均高于其余 2 种策略，说明该策略通过优化调频过程中的能量消耗和储能单元的使用，提高了电池的能量保持能力和调节灵活性，确保了较高的剩余电量。

笔者验证了不同 SOC 初值条件下的调频能量消耗情况：1) 假设第 1 个储能聚合单元的分布式储

能单元的 SOC 初值为 0.6, 第 2 个为 0.4, 第 3 个为 0.55。2) 假设所有分布式储能单元的 SOC 初值均为 0.6。不同情景下各个策略的调频能量消耗对比结果如图 11 所示。

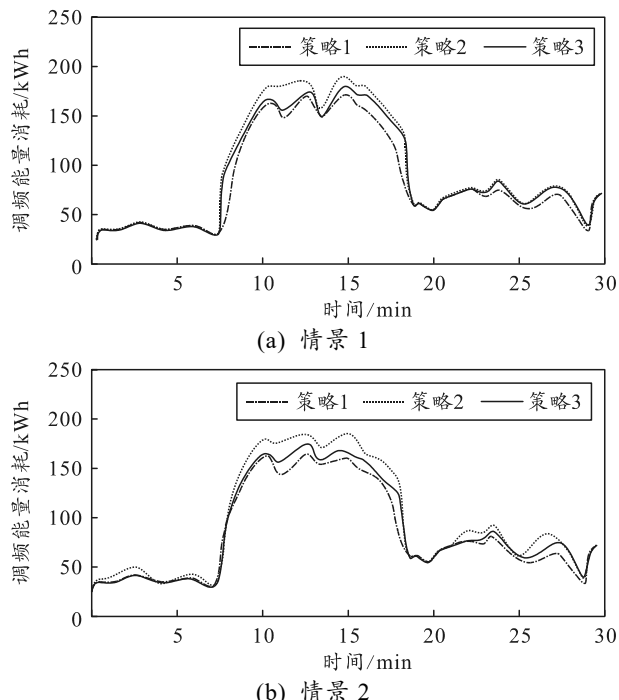


图 11 不同情景下各个策略的调频能量消耗对比结果

由图 11 可知: 在不同情景中, 策略 1 的调频能量消耗量均最低, 其次是策略 3, 策略 2 最高。图 11(a)中, 在 12 min 时, 策略 1 与 3 的调频能量消耗量差异最大, 其值为 9.58 kWh, 而此时策略 3 的调频能量消耗量高达 183.28 kWh, 比策略 2 高出了 25.64 kWh。由图 11(b)可知: 策略 1 与 3 的调频能量消耗量差异最大值仅为 11.32 kWh, 而策略 1 与 2 的调频能量消耗量差异最大值高达 38.59 kWh。说明策略 3 不仅能够降低调频计算量, 而且确保了调频经济性。综合来看, 策略 3 的调频效果最佳。

3 结论

笔者引入基于聚合方法的分布式储能调频方法, 提出了考虑调频能量消耗与储能 SOC 差异的 2 层调频控制策略。仿真结果显示: 引入分布式储能的 3 种策略均显著降低了系统的频率偏差, 其中策略 3 表现最佳, 在 15 min 时的频率偏差仅为 0.065 2 Hz。在调频性能对比中, 策略 1 的 Δf_m 高达 0.137 Hz, 而引入聚合方法的策略 2 与 3 的 Δf_m 分别为 0.126 和 0.125 Hz。策略 1 的 V_m 高达 1.95×10^{-3} Hz/s, V_r 仅为 8.15×10^{-6} Hz/s。而策略 3 的 V_m 仅为 1.26×10^{-3} Hz/s, V_r 高达 58.91×10^{-6} Hz/s。策略

3 的 S_{rmse} 仅为 0.85, C_{remain} 高达 9.30 kWh。在不同 SOC 初值条件下的调频能量消耗情况对比中, 第 1 种情境中, 策略 1 在 12 min 时与策略 3 的调频能量消耗量差异最大, 其值为 9.58 kWh, 而此时策略 3 的调频能量消耗量高达 183.28 kWh, 比策略 2 高出了 25.64 kWh。在第 2 种情景中, 策略 1 与 3 的调频能量消耗量差异最大值仅为 11.32 kWh, 而策略 1 与 2 的调频能量消耗量差异最大值高达 38.59 kWh。综上, 笔者采用的基于聚合方法的分布式储能调频策略具有较高的调频效率与调频能力。其中按照储能类型进行区域划分的策略 3 在各项调频性能评估中均取得较优结果, 在精简调频计算量的同时, 提升了经济效益, 同时, 该方法可有效解决军工系统中的频率波动问题。笔者仅考虑了聚合方法对调频效率与经济性的影响, 后续将探究该方法在不同复杂场景中的适应能力与鲁棒性。

参考文献:

- [1] 朱靖恺, 崔勇, 杜洋, 等. 采用改进量子粒子群优化算法的虚拟电厂参与二次调频两阶段优化[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(4): 112-120.
- [2] 毛田, 周保荣, 劳子卿, 等. 区域供冷系统参与电力系统二次调频的控制策略[J]. 南方电网技术, 2024, 18(11): 88-96.
- [3] 聂立君, 邢海军, 江伟建, 等. 聚合商模式下考虑调峰需求的分布式储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 153-162.
- [4] 张圣祺, 刘何毓, 汪飞, 等. 面向电网二次调频需求的“PXP”储能集群分布式均衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 886-900.
- [5] 邹燕, 于国强, 罗凯明, 等. 基于改进粒子群的火储联合 AGC 调频控制仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(7): 128-136.
- [6] 李志军, 苗庆玉, 郭燕龙, 等. 具有时变增益的分布式有限时间二次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 139-146.
- [7] 邢超, 肖家杰, 李培强, 等. 面向电网二次调频的多类型储能集成控制策略及经济性评估[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(10): 3265-3274.
- [8] 王圣, 延寒, 李健, 等. 计及电池寿命的储能系统参与二次调频功率分配策略[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(9): 95-101.
- [9] ADIBI M, WOUDE J V D. Secondary frequency control of microgrids: An online reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2022, 67(9): 4824-4831.