

## 分布式储能参与电网调频的站间-站内分层优化方法研究

李兆乾<sup>1</sup>, 刘世林<sup>1,2</sup>, 黄世婧<sup>1</sup>, 丁峰<sup>1</sup>

1. 安徽工程大学 电气工程学院, 安徽 芜湖 241000

2. 安徽工程大学 产业创新技术研究有限公司, 安徽 芜湖 241000

**摘要:**目的 针对分布式储能参与电网调频的经济优化运行问题, 研究一种站间-站内分层优化运行方法, 从而实现调频功率在各储能电站以及储能电站内各储能单元之间的优化分配。方法 首先, 在综合考虑各储能电站剩余调频能力的基础上, 构建优化运行模型, 以能量损耗成本与寿命衰减成本最小为目标, 从而实现调频功率在各储能电站间的合理分配; 其次, 以能量损耗成本、寿命衰减成本及调节性能比率为指标, 采用主客观综合权重 TOPSIS 评价法对各储能单元调频能力进行评估, 进而实现调频需求在各储能单元间的优化分配。结果 利用仿真实验对该方法进行对比验证, 仿真实验结果表明: 该方法不仅具有较好的经济性, 还能充分调动各储能单元的调频积极性。结论 分布式储能参与电网调频, 通过站间-站内分层优化解决了经济性问题, 降低了区域电网内储能参与电网调频的成本, 同时充分发挥了各储能电站及其内部各储能单元的调频能力。

**关键词:** 分布式储能; 分层优化; 功率分配; 主客观综合权重

中图分类号: TM73 文献标识码: A doi: 10. 16055/j. issn. 1672-058X. 2026. 0001. 011

### Research on Inter-station and In-station Hierarchical Optimization Method for Distributed Energy Storage Participating in Grid Frequency Regulation

LI Zhaoqian<sup>1</sup>, LIU Shilin<sup>1,2</sup>, HUANG Shijing<sup>1</sup>, DING Feng<sup>1</sup>

1. School of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

2. Industrial Innovation Technology Research Co., LTD., Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

**Abstract: Objective** This study aims to address the economic optimal operation problem of distributed energy storage participating in power grid frequency regulation. A hierarchical optimal operation method between stations and within stations is explored to achieve the optimal allocation of frequency regulation power among energy storage stations and among energy storage units within each energy storage station. **Methods** First, an optimal operation model was constructed based on a comprehensive consideration of the remaining frequency regulation capacity of each energy storage station, with the goal of minimizing the energy loss cost and the life-decay cost. This achieved a reasonable allocation of frequency regulation power among energy storage stations. Second, using the energy loss cost, life-decay cost, and regulation performance ratio as indicators, the TOPSIS evaluation method with integrated subjective-objective weights was employed to evaluate the frequency regulation capacity of each energy storage unit. Subsequently, the optimal allocation of frequency regulation demand among energy storage units was realized. **Results** The method was verified through

收稿日期: 2024-02-26 修回日期: 2024-05-11 文章编号: 1672-058X(2026)01-0086-11

作者简介: 李兆乾(1999—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 从事电力系统及其自动化研究。

引用格式: 李兆乾, 刘世林, 黄世婧, 等. 分布式储能参与电网调频的站间-站内分层优化方法研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2026, 43(1): 86-96.

LI Zhaoqian, LIU Shilin, HUANG Shijing, et al. Research on inter-station and in-station hierarchical optimization method for distributed energy storage participating in grid frequency regulation[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2026, 43(1): 86-96.

comparative simulation experiments. The simulation results indicated that this method not only had good economic efficiency but also could fully mobilize the enthusiasm of each energy storage unit for frequency regulation.

**Conclusion** Distributed energy storage participating in grid frequency regulation resolves economic problems through a two-layer optimization framework (inter-station and intra-station levels). The proposed method reduces the cost of energy storage participating in power grid frequency regulation in the regional power grid, and fully utilizes the frequency regulation capabilities of each energy storage station and its internal energy storage units.

**Keywords:** distributed energy storage; hierarchical optimization; power allocation; integrated subjective-objective weight

随着可再生能源的大力发展,风能、太阳能等可再生能源在电力系统中的比例逐步增加,电力系统正朝着高比例可再生能源系统发展<sup>[1]</sup>。由于电源的不稳定性和波动性增大,电力系统的频率稳定面临着巨大挑战。储能技术被视为有效应对新能源并网挑战的重要技术途径,凭借其快速响应特性在电网调频领域展现出显著的竞争优势,近年来备受关注,并有望成为电力系统自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)中不可或缺的参与者。

在当前储能调频资源十分有限的情况下,如何更有效地利用这些资源参与电网调频已成为国内外研究的热点。提高储能设施的能效和灵活性,以实现更有效的电网调频,有助于实现能源系统的可持续发展和提高电力网络的稳定性。周婷婷等<sup>[2]</sup>通过仿真分析传统机组和储能参与调频两种情况下电网频率的波动特征,验证了储能参与调频的有效性;严干贵等<sup>[3]</sup>建立充放电功率-效率模型,最大化电池储能单元群运行效率,减小功率损失;刘起兴等<sup>[4]</sup>提出基于模型预测控制的电池储能辅助调频策略,有效抑制了电网频率偏差。上述文献表明:现阶段储能参与电网调频均为单个储能电站,无法兼顾区域内多个储能电站,若无法对不同储能电站的调频成本进行比较,制定最经济的调频方案将变得相当困难。因此,如何优化区域内所有储能电站的输出协调,从而实现区域调频的经济最优状态成为研究热点。

区域电网含有多个储能电站(Energy Storage Power Stations, ESPSs),不同的储能电站常由不同类型、不同寿命阶段或梯次利用的储能单元(Energy Storage Units, ESUs)混合集成,各储能单元的调节成本、性能以及衰减特性等均存在差异<sup>[5-6]</sup>。王亚莉等<sup>[7]</sup>通过构建多应用场景经济优化模型,提高了储能的利用率和经济性;汤杰等<sup>[8]</sup>提出一种以净收益最大为目标的储能参与调频容量配置方法,实现了较好的经济效益;李圣祺等<sup>[9-10]</sup>以最小化储能调频成本,考虑荷电状态(State of

Charge, SOC)惩罚项,建立了各类储能电站参与二次调频的功率分配模型,进行调频功率的优化分配。只关注储能电站的经济性而忽视储能单元是不够充分的,储能电站的调频能力只受各个储能单元的荷电状态影响。因此,研究储能电站内各储能单元之间的调频功率分配问题至关重要,必须考虑储能单元的SOC状态。这一因素对于实现储能电站的高效运行和提高调频性能至关重要。

综上所述,现有文献大多验证储能参与调频的有效性,并提出了一系列优化方法,以提高储能设施的能效和灵活性,实现更有效的电网调频。现有研究大多集中在储能电站层面,对于多个储能电站的协同调度和调频成本比较等问题尚未深入探讨。此外,现有研究忽视了站内储能单元之间的调频功率分配问题,这对于提高储能电站的运行效率和调频性能非常关键。鉴于不同储能电站和站内各储能单元在成本和性能上存在差异,本文提出一种新的分布式储能系统优化运行策略,该策略考虑了调频成本和储能单元的荷电状态。首先在储能电站间对调频功率进行初步分配,考虑每个储能电站剩余调频能力的同时,引入抗拒系数作为目标函数的一部分,以经济最优为目标,将调频功率分配给不同的储能电站。这一策略有望提高储能系统的运行效率和节约成本,有助于实现电力系统的可持续发展;其次,基于层次分析法(Aalytic Hierarchy Process, AHP)确定指标主观权重,基于熵权法(Entropy Weight Method, EWM)确定指标客观权重,利用基于主客观综合权重的逼近理想解排序评价法(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOSIS)对各储能单元调频能力进行评估,进而实现调频需求在储能单元间的优化分配;最后进行仿真实验,验证所提策略的可行性及优越性。

## 1 分布式储能电站结构原理

本文旨在研究区域电网中不同类型的储能电站,

每个储能电站都包含多个储能单元,如图 1 所示。

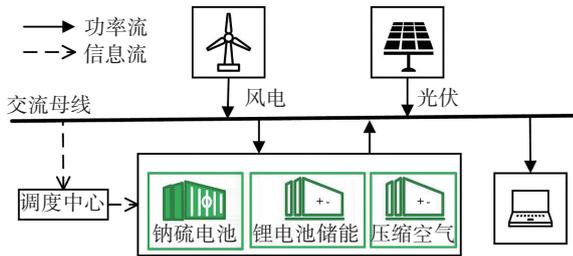


图 1 储能电站结构图

Fig. 1 Structural diagram of energy storage power station

在这里用  $P_{e,i}(t)$  表示  $t$  时刻储能电站  $i$  分配的调频功率,  $P_{e,i,j}(t)$  表示  $t$  时刻储能电站  $i$  对其站内各储能单元  $j$  分配的调频功率,两者的关系如式(1)和式(2)所示:

$$P_{e,i}(t) = \alpha_e^c(t) \cdot P_{e,i}^c(t) + \alpha_e^d(t) \cdot P_{e,i}^d(t) \quad (1)$$

$$P_{e,i,j}(t) = \alpha_{e,i,j}^c(t) \cdot P_{e,i,j}^c(t) + \alpha_{e,i,j}^d(t) \cdot P_{e,i,j}^d(t) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中,  $P_{e,i}^c(t)$  和  $P_{e,i}^d(t)$  分别表示  $t$  时刻电网给储能电站  $i$  的充放电功率;  $P_{e,i,j}^c(t)$ 、 $P_{e,i,j}^d(t)$  分别表示  $t$  时刻储能电站  $i$  内储能单元  $j$  的充放电功率;  $\alpha_e^c(t)$ 、 $\alpha_e^d(t)$  代表充放电标志,确定的方法如式(3)所示:

$$\begin{cases} \alpha_e^c(t) = 0, \alpha_e^d(t) = 1, P_{AGC}(t) > 0 \\ \alpha_e^c(t) = 1, \alpha_e^d(t) = 0, P_{AGC}(t) < 0 \\ \alpha_e^c(t) = 0, \alpha_e^d(t) = 0, P_{AGC}(t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $P_{AGC}(t)$  为该区域内储能电站总自动发电控制指令。

## 2 分布式储能电站调频功率优化策略

### 2.1 双层功率优化分配策略

分布式储能电站由不同类型和不同寿命阶段的独立储能单元构成。本文提出调频指令在储能电站之间以及各个储能电站的储能单元之间的分层优化策略,这涉及储能电站之间和储能单元之间的功率优化,如图 2 所示。在分布式储能电站之间的功率优化分配中,需要综合考虑不同电站的调频成本和各自的剩余调频能力,以达到经济最优的目标,从而初步将 AGC (Automatic Generation Control) 指令分配给各储能电站。之后,将储能电站的优化结果进一步分配到每个储能电站内部各个储能单元之间,基于 AHP 确定指标的主观权重<sup>[11]</sup>,基于 EWM 确定指标的客观权重,以主客观综合权重的 TOPSIS 法<sup>[12-13]</sup>构建评估体系,根据评估结果优化储能电站内部储能单元之间的功率分配。电网

调度中心根据实际的调频需求向储能电站下达 AGC 调频指令,选取系统的调度周期为 15 min,在储能电站之间以经济最优为目标进行调频功率的初分配,各储能电站对各自储能单元参与的电网调频进行评估,并完成调频指令在储能单元之间的分配和下发。

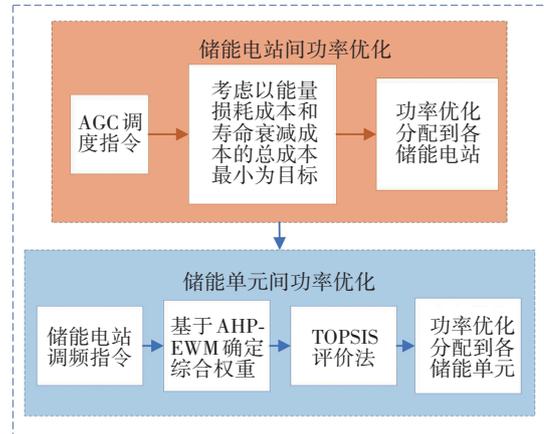


图 2 双层优化策略图

Fig. 2 Diagram of dual-layer optimization strategy

所述调频模型可以实现调频功率在储能电站和各储能单元之间的分级优化,旨在综合考虑区域电网调频的经济性以充分发挥储能单元的调频潜力,从而确保储能电站在长期运行中具备可靠且可持续的调频性能。这一方法有望提高系统的整体效能。

### 2.2 功率优化分配模型的建立

协调区域内各分布式储能电站积极参与电网调频,优先在各储能电站间进行功率的优化分配,而后在各储能电站内储能单元间进行功率的优化分配。

以简化储能调频成本的计算并减少模型的复杂性为目的,本文忽略了远距离输电过程中的损耗以及储能电站之间的利益分配,同时考虑到储能的初始投资建设成本是固定的,在功率分配时起不到影响作用,因此暂不考虑,将调频成本简化为主要体现不同储能调频成本差异的能量损耗成本和寿命折损成本,如式(4)和式(5)所示:

$$\begin{aligned} C_{\text{loss},i}(t) &= \left[ P_{e,i}^d(t) \cdot \left( \frac{1}{\eta_{d,i}} - 1 \right) + P_{e,i}^c(t) \cdot (1 - \eta_{c,i}) \right] \cdot c_e \cdot \Delta t \\ C_{\text{life},i}(t) &= \left[ \left( \frac{\Delta t \cdot P_{e,i}^d(t)}{E_{r,i} \cdot \eta_{d,i}} \right)^{k_p} + \left( \frac{\Delta t \cdot P_{e,i}^c(t)}{E_{r,i}} \cdot \eta_{c,i} \right)^{k_p} \right] \cdot C_{\text{cost},i} \cdot P_{r,i} / (2N_{\text{eq},i}) \end{aligned} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中,  $C_{\text{loss},i}(t)$ 、 $C_{\text{life},i}(t)$  分别表示储能电站

$i$  的充放电能量损耗成本和寿命衰减成本;  $E_{r,i}$  为储能电站  $i$  的额定容量;  $c_e$  为储能参与调频时的充放电价格,取 520 元/(MW · h);  $\Delta t$  表示相邻两个调度指令之间的时间间隔,设定时间间隔为 15 min;  $\eta_i^c$ 、 $\eta_i^d$  分别表示储能电站  $i$  的充电效率和放电效率;  $c_{\text{cost},i}$ 、 $P_{r,i}$  分别表示储能电站  $i$  的单位功率成本和额定功率;  $N_{\text{eq},i}$  为储能电站  $i$  100% 充放电深度下的等效循环次数;  $k_p$  一般取常数,范围在 0.8~2.1 之间<sup>[14]</sup>,本文取 1。  $t$  时刻电站  $i$  的调频成本  $C_i(t)$  如式(6)所示:

$$C_i(t) = C_{\text{loss},i}(t) + C_{\text{life},i}(t) \quad (6)$$

如果只关注调频成本,可能会导致部分储能电站因其相对较低的调频成本,一直承担频率调节责任,而具有较高调频能力同时调频成本较高的储能电站则没有参与调度,这不利于整体系统的调节性能。为激发储能电站参与调频的积极性,在考虑储能电站剩余调频能力的前提下,应首先考虑调频成本较低,剩余调频能力较大的电站来履行调频责任,同时尽量减轻调频成本高、剩余调频能力小的储能电站负担。因此,需对目标函数进行修正,通过引入抗拒系数  $H_i^r(t)$ ,该系数反映了储能电站在充电或放电时的抗拒程度。抗拒系数的构建方法如下式(7)所示。

$$\begin{cases} H_{c-i}^r(t)' = \sum_{j=1}^J E_{r,i,j} \cdot \frac{V_{\text{soc},i,j}(t-1) - V_{\text{soc},i,j}^{\text{min}}}{\Delta t} \\ H_{d-i}^r(t)' = \sum_{j=1}^J E_{r,i,j} \cdot \frac{V_{\text{soc},i,j}^{\text{max}} - V_{\text{soc},i,j}(t-1)}{\Delta t} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,  $H_{c-i}^r(t)'$ 、 $H_{d-i}^r(t)'$  分别表示  $t$  时刻储能电站  $i$  的充电和放电抗拒系数;  $V_{\text{soc},i,j}(t-1)$  表示在  $(t-1)$  时刻储能电站  $i$  内储能单元  $j$  的 SOC 值;  $V_{\text{soc},i,j}^{\text{max}}$ 、 $V_{\text{soc},i,j}^{\text{min}}$  分别表示储能电站  $i$  内储能单元  $j$  所允许的最大、最小荷电状态;  $E_{r,i,j}$  为储能电站  $i$  内储能单元  $j$  的额定容量;  $J$  为储能单元数量。

$$\begin{cases} H_i^r(t) = \alpha_e^c(t) \cdot H_{c-i}^r(t) + \alpha_e^d(t) \cdot H_{d-i}^r(t) \\ \begin{cases} H_{c-i}^r(t) = [H_{c-i}^r(t)'] / [\sum_{i=1}^I H_{c-i}^r(t)'] \\ H_{d-i}^r(t) = [H_{d-i}^r(t)'] / [\sum_{i=1}^I H_{d-i}^r(t)'] \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,  $H_{c-i}^r(t)$ 、 $H_{d-i}^r(t)$  分别为归一化后的充放电抗拒系数。

综上,由抗拒系数和调频成本构成的目标函数如式(9)所示。

$$E = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I H_i^r(t) \cdot C_i(t) \quad (9)$$

式(9)中,  $I$  为区域内储能电站的数量;  $T$  为总调度次数。

各个储能电站储能单元的初始 SOC 状态不同, SOC 的上下限也存在差异。为了更加合理的分配 AGC 指令,本文引入调节性能比率指标,假设储能单元  $i$  的最大允许荷电状态为  $S_{\text{soc},i}^{\text{max}}$ ,最小允许荷电状态为  $S_{\text{soc},i}^{\text{min}}$ ,设定储能理想的荷电状态为最大、最小荷电状态的中点,记为  $S_{\text{soc},i}^{\text{mid}}$ ,那么在调频结束后储能的 SOC 越接近  $S_{\text{soc},i}^{\text{mid}}$ ,储能在应对下一个调频指令时便有充足的响应容量,储能单元的调频性能越好。定义储能的调节性能比率为响应指令后储能单元的 SOC 与  $S_{\text{soc},i}^{\text{mid}}$  的比值,如式(10)和式(11)所示:

$$S_{\text{mid},i} = (S_{\text{soc},i}^{\text{min}} + S_{\text{soc},i}^{\text{mid}}) / 2 \quad (10)$$

$$S_{\text{soc},i}^{\text{ad}} = S_{\text{soc},i} / S_{\text{mid},i} \quad (11)$$

式(10)和式(11)中,  $S_{\text{soc},i}^{\text{ad}}$  为储能单元  $i$  的调节性能比率指标,其数值越接近 1,说明储能实时 SOC 越接近理想状态;  $S_{\text{soc},i}$  为储能单元响应调频指令后的实际 SOC。

### 2.3 主客观综合权重的确定

#### 2.3.1 基于 AHP 的主观权重赋值

AHP 法将问题层次化,构建一个多层次分析模型结构,将人类主观判断转化为多个因素之间重要程度的比较,将难以量化的定性评估转化为可操作的重要性比较。这种方法帮助决策者更直观地衡量各个因素之间的关联性,从而为决策提供更有针对性和可操作性的指导。AHP 法计算权重主要包含 3 种方法:算术平均法、几何平均法以及特征根法,本文主要采用算术平均法进行权重的计算。

层次分析法的判断流程:

(1) 对各个指标进行逐个比较,得出相对标度,获得判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)中,  $n$  代表指标的个数,  $a_{ij}$  代表指标之间的相对重要程度。

(2) 把矩阵按列进行归一化(每个元素除以其所在列的和)处理,然后把所得矩阵的每列求和,计算权

重向量即为所得向量乘  $1/n$ 。

$$\omega_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

(3) 进行一致性检验, 计算一致性指标为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (14)$$

式(14)中的  $\lambda_{\max}$  为特征向量的最大值。

(4) 通过查找对应的平均随机一致性指标  $RI$ , 计算一致性比例  $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (15)$$

当  $CR < 0.1$  时, 则表示判断矩阵通过了一致性检验; 反之则需对判断矩阵进行修正处理, 直至判断矩阵通过一致性检测。

### 2.3.2 基于 EWM 的客观权重赋值

假设评价对象  $i$  有  $m$  个, 评价指标  $j$  有  $n$  个, 则确定 EWM 权重赋值步骤如下:

(1) 根据评价对象及指标形成原始数据矩阵并进行标准化。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (16)$$

(2) 对标准化后的数据矩阵进行归一化。

$$C_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (17)$$

(3) 根据 EWM 计算权重, 计算第  $i$  个评价对象第  $j$  项指标出现的概率。

$$p_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sum_{i=1}^n C_{ij}} \quad (18)$$

(4) 计算第  $j$  项指标信息熵以及信息熵冗余度。

$$e_j = - \frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (19)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (20)$$

(5) 确定第  $j$  项指标的客观权重。

$$w_j^{EWM} = d_j / \sum_{j=1}^n d_j \quad (21)$$

### 2.4 综合权重的确立

综合权重为主观权重与客观权重的结合, 如式(22)所示:

$$w_j^z = \alpha w_j^{AHP} + (1 - \alpha) w_j^{EWM} \quad (22)$$

式(22)中,  $w_j^{AHP}$  表示第  $j$  个指标的主观权重;  $\alpha$  表示主观偏好系数;  $w_j^{EWM}$  表示第  $j$  个指标的客观权重;  $1 - \alpha$  表示客观偏好系数,  $\alpha = 0.5$ 。

### 2.5 TOPSIS 模型

根据 AHP 法和 EWM 法分别确定指标的主观权重以及客观权重, 然后根据主、客观权重确定指标的综合权重, 将综合权重与 TOPSIS 法相结合计算待评估储能单元与标准化矩阵的最大和最小值并计算欧式距离, 则可以得到评价对象的得分。第  $j$  个储能单元与最大值、最小值的距离如式(23)所示, 得分如式(24)所示:

$$\begin{cases} D_j^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^z (x_j^+ - x_{ij})^2} \\ D_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j^z (x_j^- - x_{ij})^2} \end{cases} \quad (23)$$

$$S_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (24)$$

由式(24)可知,  $0 \leq S_j \leq 1$ , 且  $S_j$  值越大  $D_j^+$  越小, 即越接近最大值, 该值越大说明储能单元调频效果越好。

### 2.6 功率优化分配

#### 2.6.1 储能电站之间的功率优化分配

储能电站接受的调频任务取决于其自身剩余调频能力  $P_{left,i}$  的约束<sup>[15]</sup>, 剩余调频能力的计算方法如下:

$$\begin{cases} P_{left,i}(t) = \alpha_e^c(t) P_{left,i}^c(t) + \alpha_e^d(t) P_{left,i}^d(t) \\ \left\{ \begin{aligned} P_{left,i}^c(t) &= \sum_{j=1}^J \min \left\{ \begin{aligned} &P_{r,i,j}, \\ &\frac{[S_{soc,i,j}^{\max} - S_{soc,i,j}(t-1)]}{\Delta t \cdot \eta_{c,i}} \cdot E_{r,i,j} \end{aligned} \right\} \\ P_{left,i}^d(t) &= \sum_{j=1}^J \min \left\{ \begin{aligned} &P_{r,i,j}, \\ &\frac{[S_{soc,i,j}(t-1) - S_{soc,i,j}^{\min}]}{\Delta t} \cdot E_{r,i,j} \cdot \eta_{d,i} \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (25)$$

式(25)中,  $P_{left,i}^c(t)$ 、 $P_{left,i}^d(t)$  分别为  $t$  时刻储能电站  $i$  的充放电剩余调频能力。

根据区域电网中各储能电站的自身情况, 在遵循经济最优原则的同时, 充分利用储能电站的调频潜力, 对 AGC 指令在储能电站之间进行分配, 并确定储能电站的出力约束。

1) 当  $\beta \cdot \sum_{i=1}^I P_{left,i}(t) \geq |P_{AGC}(t)|$ , 即区域电网内储能电站可以满足当下调度中心下发的 AGC 指令时,

约束为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^I P_{e,i}^c(t) = \alpha_e^c(t) \cdot |P_{AGC}(t)| \\ \sum_{i=1}^I P_{e,i}^d(t) = \alpha_e^d(t) \cdot P_{AGC}(t) \end{cases} \quad (26)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{e,i}^c(t) \leq \alpha_e^c(t) \cdot P_{left,i}^c(t) \\ 0 \leq P_{e,i}^d(t) \leq \alpha_e^d(t) \cdot P_{left,i}^d(t) \end{cases} \quad (27)$$

式(26)为频率安全约束,式(27)为调频出力约束。

2) 当区域电网内储能电站总调频能力无法满足

AGC 指令时,  $\beta \cdot \sum_{i=1}^I P_{left,i}(t) \leq P_{AGC}(t)$ , 储能电站按自身剩余调频能力出力。其约束为

$$\begin{cases} P_{e,i}^c(t) = \alpha_e^c(t) \cdot P_{left,i}^c(t) \\ P_{e,i}^d(t) = \alpha_e^d(t) \cdot P_{left,i}^d(t) \end{cases} \quad (28)$$

### 2.6.2 站内各储能单元间功率优化分配

优化储能电站内部各储能单元间调频功率分配, 储能出力如式(29)所示,其运行约束如下:

$$P_{e,i,j} = \frac{S_{j-1}}{\sum_{j \in n} S_{j-1}} \cdot P_{e,i} \quad (29)$$

$$\text{st.} \begin{cases} P_{e,i,j}^{\min} \leq P_{e,i,j} \leq P_{e,i,j}^{\max} \\ \sum_{j=1}^J P_{e,i,j}^c(t) = \alpha_e^c(t) \cdot |P_{e,i}(t)| \\ \sum_{j=1}^J P_{e,i,j}^d(t) = \alpha_e^d(t) \cdot P_{e,i}(t) \\ S_{soc,i,j}^{\min} \leq S_{soc,i,j} \leq S_{soc,i,j}^{\max} \\ S_{soc,i,j} = S_{soc,i,j} - \frac{[\eta_{e,i,j} P_{e,i,j}^c + P_{e,i,j}^d / \eta_{d,i,j}]}{E_{r,i,j}} \Delta t \\ P_{e,i,j}^c \cdot P_{e,i,j}^d = 0 \end{cases} \quad (30)$$

式(30)中,  $P_{e,i}(t)$  为  $t$  时刻储能电站  $i$  分配的调频功率;  $P_{e,i,j}^c$  和  $P_{e,i,j}^d$  分别为第  $i$  个储能电站内第  $j$  个储能单元的充放电功率;  $P_{e,i,j}^{\min}$  和  $P_{e,i,j}^{\max}$  分别为储能电站  $i$  内储能单元  $j$  的最小、最大输出功率;  $S_{soc,i,j}^{\min}$  和  $S_{soc,i,j}^{\max}$  分别为储能电站  $i$  中储能单元  $j$  的最小和最大荷电状态。

分布式储能电站功率优化,首先是 AGC 指令在区域电网内各储能电站之间以经济最优为目标进行分配,然后将各储能电站分配得到的调频功率基于主客观综合权重 TOPSIS 法在各自的储能单元之间进行分配,具体流程如图 3 所示。

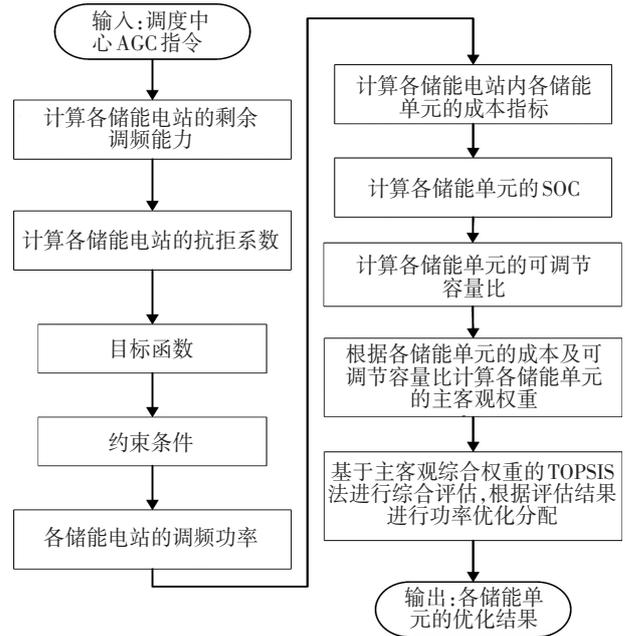


图 3 分布式储能调频功率优化流程

Fig. 3 Optimization process of frequency regulation power for distributed energy storage

## 3 仿真实验与结果分析

### 3.1 参数设置

为验证本文所提优化策略的有效性,以区域内各分布式储能电站为例,在 MATLAB(2021b)中进行仿真分析。假设该区域的分布式储能电站总装机为 60 MW/60 MW · h,包括 3 个不同电池类型的储能电站适用于调频应用场景,每个储能电站由 6 个储能单元构成。各储能电站的技术参数及电池类型如表 1 所示,各储能电站中不同储能单元的初始 SOC 值如表 2 所示。

表 1 分布式储能参数

Table 1 Parameters of distributed energy storage

参 数	电站 1	电站 2	电站 3
电池类型	钠硫	锂电	压缩空气
充电效率/%	0.83	0.95	0.7
放电效率/%	0.83	0.95	0.7
额定功率/MW	3 * 6	4 * 6	3 * 6
额定容量/(MW · h)	3 * 6	4 * 6	3 * 6
单位功率成本/(元/kW)	2 500	1 500	3 000
循环寿命/次	3 000	2 000	10 000
SOC 上限	0.9	0.9	0.9
SOC 下限	0.1	0.1	0.1

表 2 储能单元的初始 SOC

Table 2 Initial state of charge (SOC) of energy storage unit

电 站	1	2	3	4	5	6
1	0.80	0.65	0.8	0.75	0.65	0.65
2	0.25	0.20	0.20	0.25	0.30	0.20
3	0.45	0.60	0.65	0.40	0.50	0.55

### 3.2 仿真结果分析

利用某地区实际 AGC 数据进行仿真实验。首先在不同储能电站间进行调频功率分配,分别采用基于剩余调频能力比例分配的策略(策略 1)和本文所采用的以调频成本最优为目标的策略(策略 2)进行对比分析。两种策略下不同储能电站对 AGC 指令的响应情况如图 4 所示。

由图 4 可知,2 种策略下各储能电站的总出力均可以积极响应 AGC 指令,策略 1 中在每个调度指令下各储能电站承担的调频任务较平均,策略 2 中根据各储能电站的剩余调频能力进行功率分配,3 个储能电站承担的调频任务各异,在满足经济性的条件下,储能电站 1 承担了较多的调频任务,储能电站 3 则承担了最少的调频任务。

在将 AGC 指令分配给区域内不同的储能电站后,各储能电站按照各自储能单元的额定功率等比例分配策略(策略 1)及基于主客观权重确定的综合权重分配策略(策略 2)将调频任务分配给各自内部的储能单元。两种策略下各储能电站内各储能单元响应情况如图 5、图 6、图 7 所示。

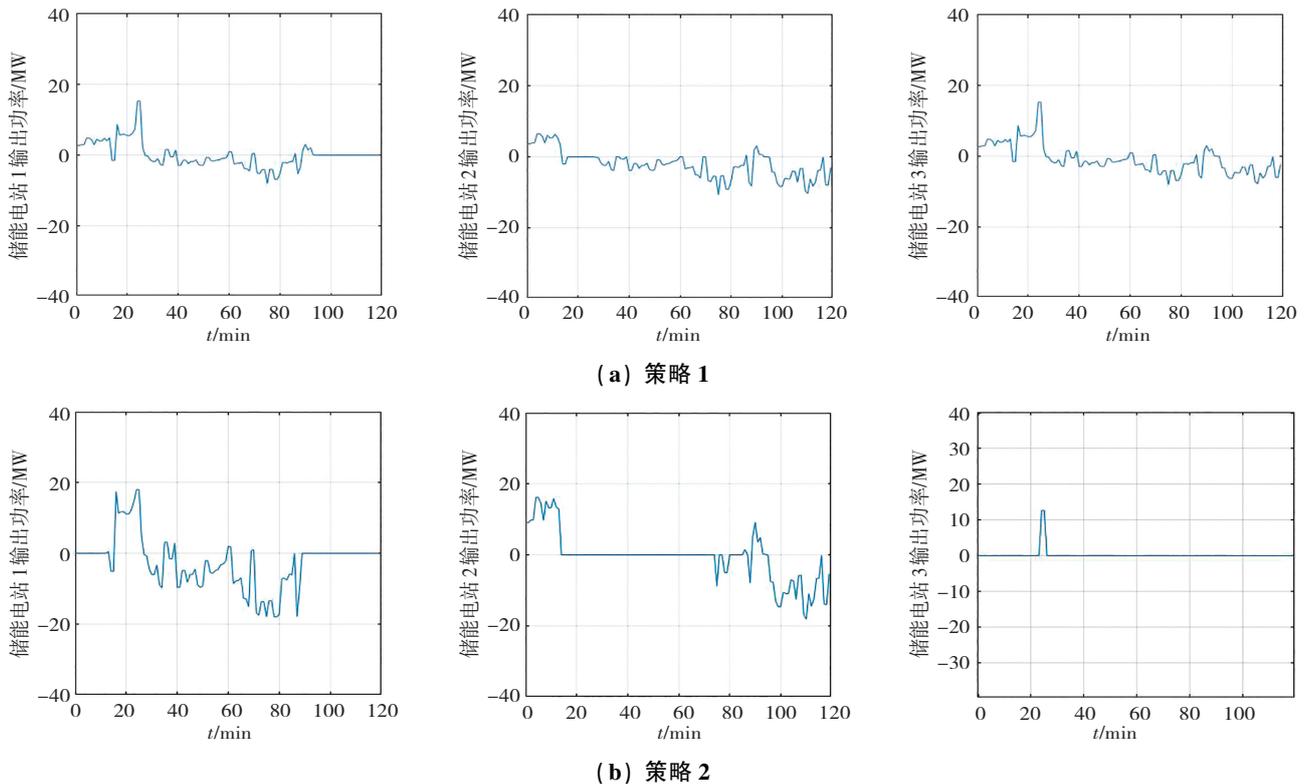
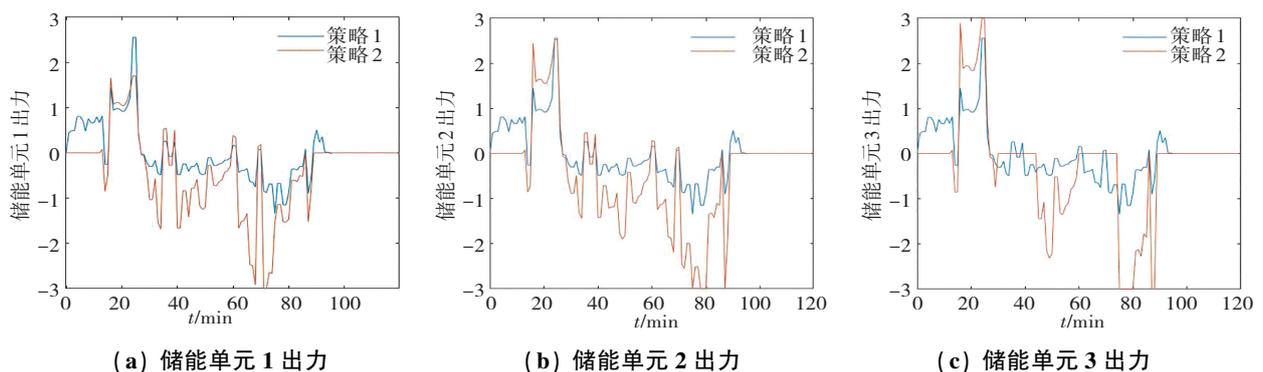


图 4 各储能电站在不同策略下的出力对比

Fig. 4 Comparison of output of each energy storage station under different strategies



(a) 储能单元 1 出力

(b) 储能单元 2 出力

(c) 储能单元 3 出力

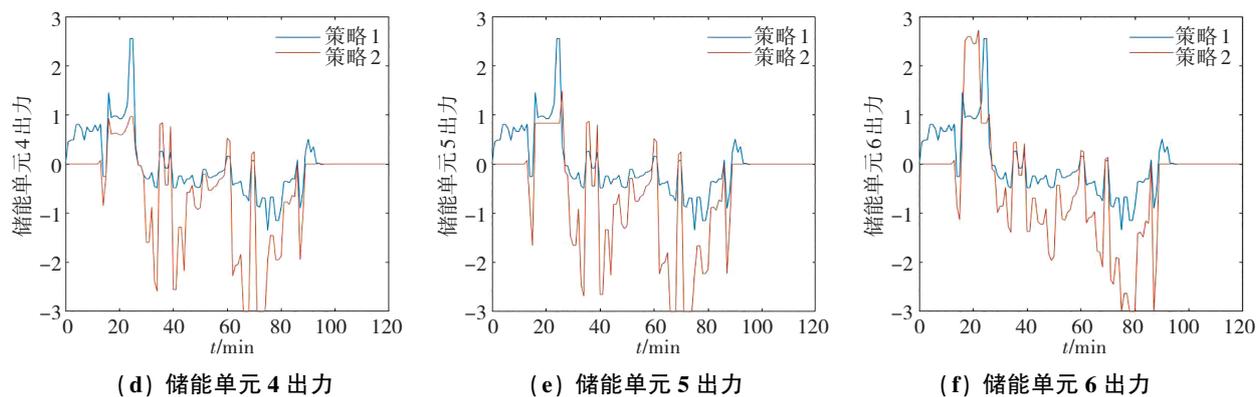


图 5 不同策略下储能电站 1 内各储能单元出力对比

Fig. 5 Comparison of output of each energy storage unit within energy storage station 1 under different strategies

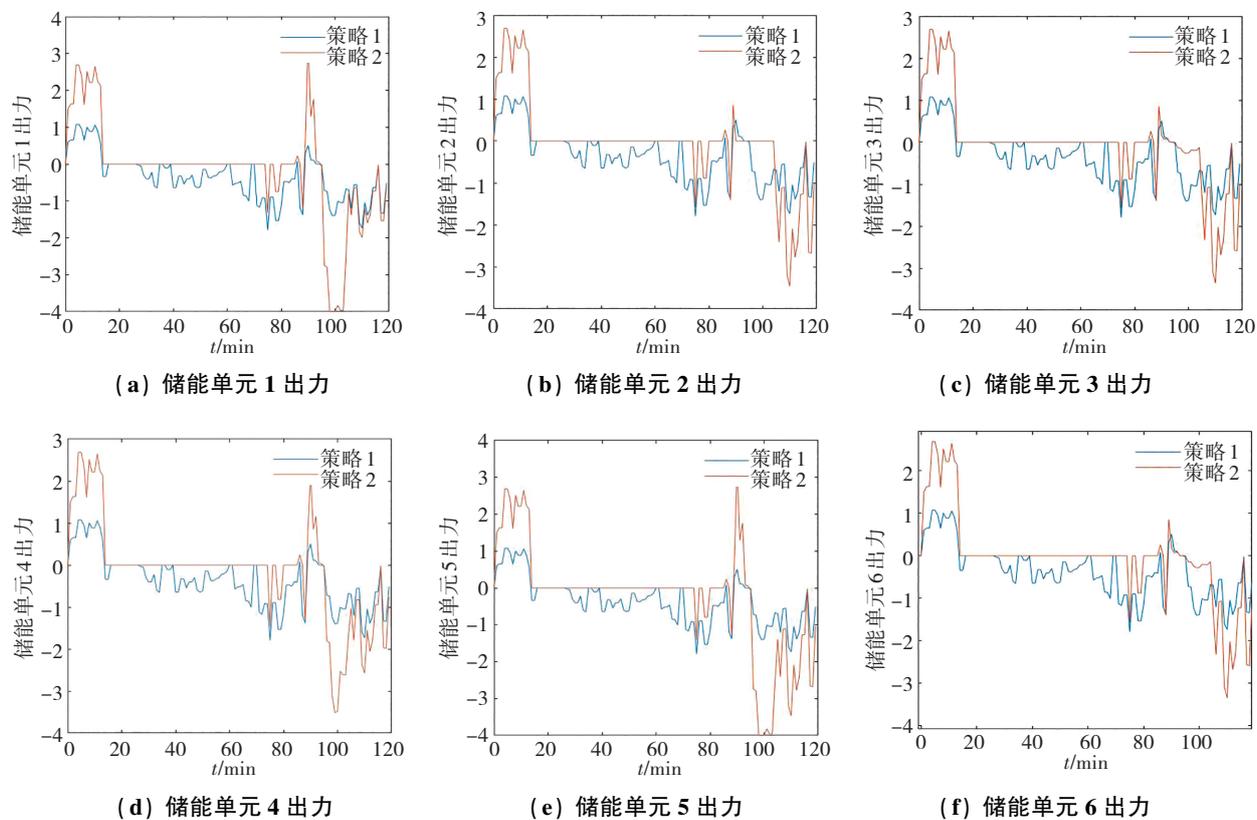
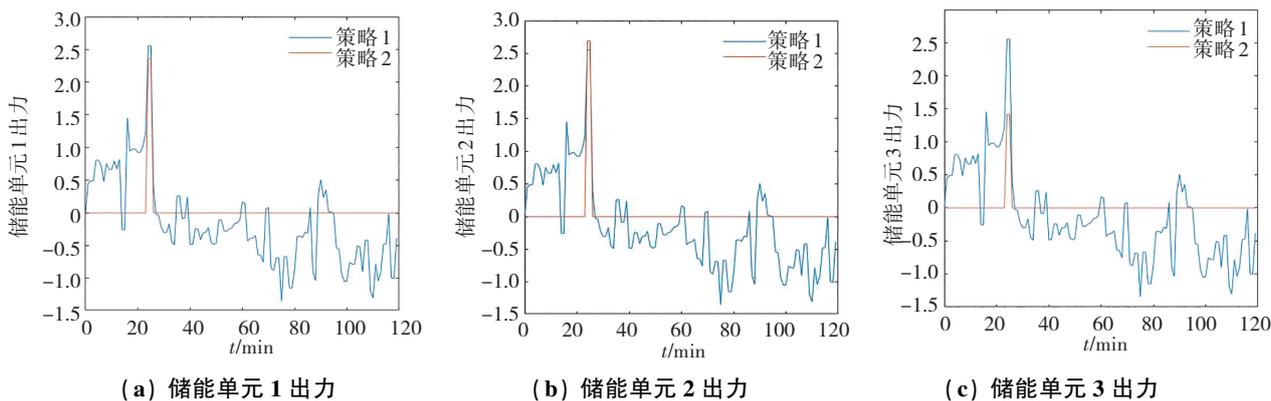


图 6 不同策略下储能电站 2 内各储能单元出力对比

Fig. 6 Comparison of output of each energy storage unit within energy storage station 2 under different strategies



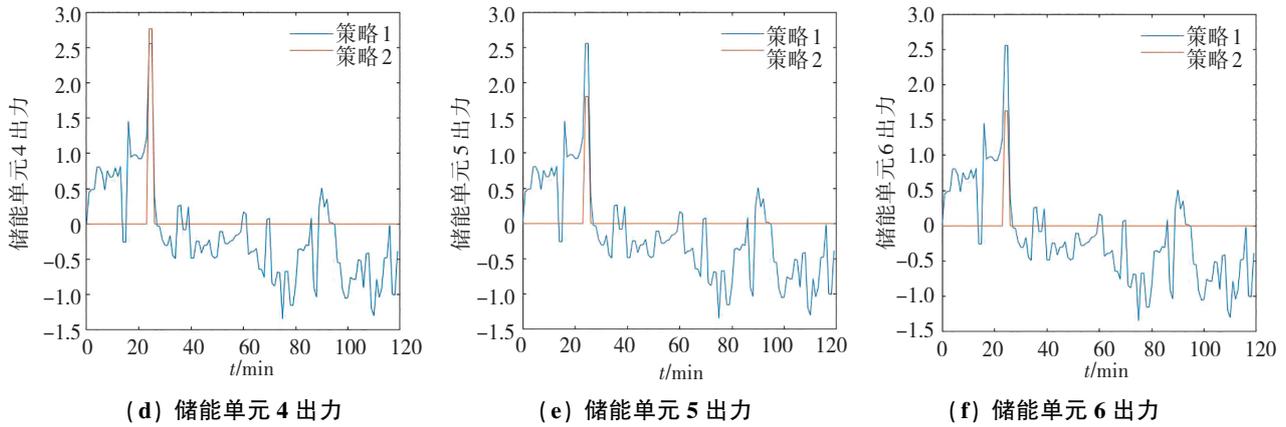


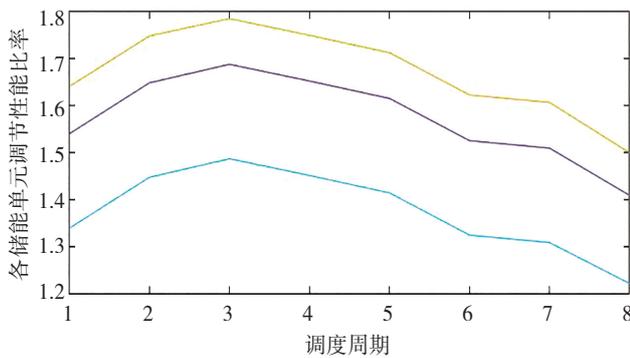
图 7 不同策略下储能电站 3 内各储能单元出力对比

Fig. 7 Comparison of output of each energy storage unit within energy storage station 3 under different strategies

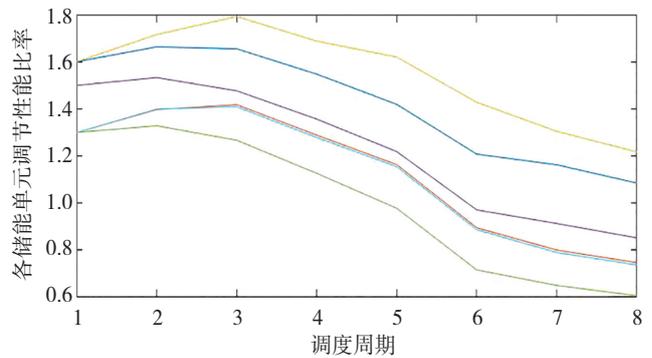
本算例中,同一储能电站内各储能单元额定功率相同。可以看出策略 1 中不同储能电站内各储能单元承担了等量的调频责任,出力趋势相同,承担的调频功率相对平衡;在本文所提的策略 2 中,根据各储能单元的性能参数不同,出力情况也有所差异,本文所提的策略考虑成本影响,承担的调频责任较多,储能电站内各储能单元的损耗成本也随之增加,反之,储能电站内各储能单元的损耗成本随之减小。优先发挥损耗成本小、调节性能优的储能单元调节优势,优化储能单元出力,进一步降低储能电站总的损耗成本,实现调频资源

的合理利用。

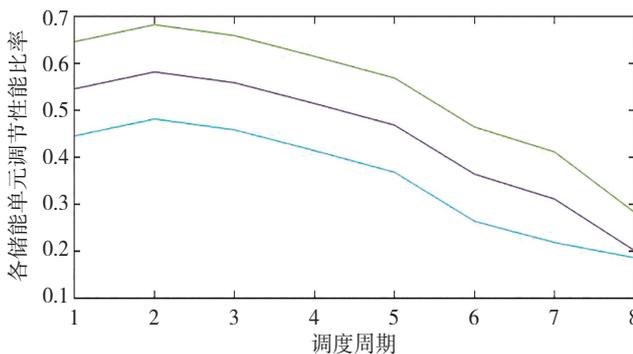
图 8 展示了不同策略下,各储能电站内储能单元的调节性能比率对比仿真结果。可以看出:整体上策略 2 相较于策略 1,比率更接近于 1,说明储能单元的实时 SOC 更接近理想状态。不同储能电站内各储能单元的调节性能比率有所不同,在储能电站 1 中,储能单元 3 的调节性能比率相对较高;在储能电站 2 中,储能单元 5 的调节性能比率相对较高;在储能电站 3 中,储能单元 3 的调节性能比率相对较高。调节性能比率越高,表示该储能单元承担的调频任务越重。



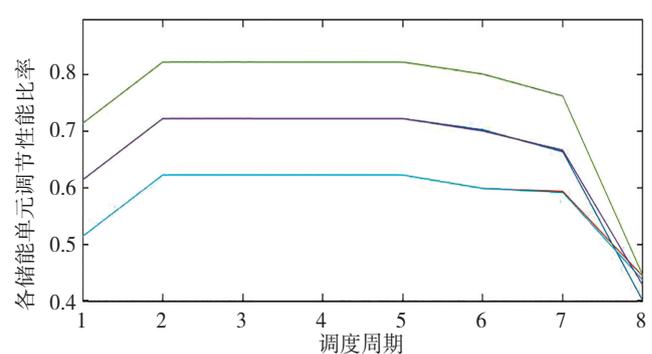
(a) 策略 1(储能电站 1)



(b) 策略 2(储能电站 1)



(c) 策略 1(储能电站 2)



(d) 策略 2(储能电站 2)

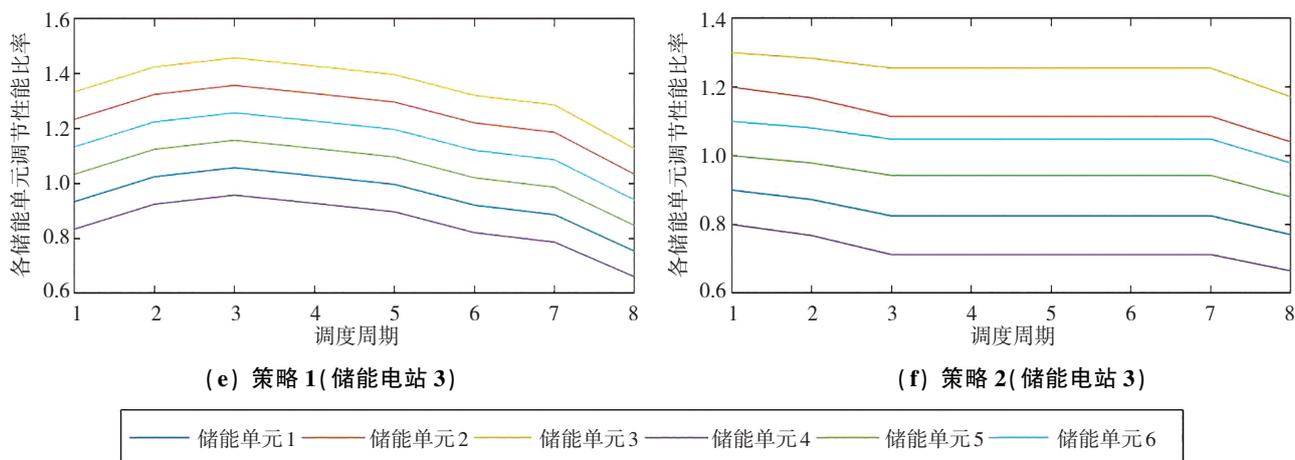


图 8 不同策略下各储能电站内储能单元调节性能比率

Fig. 8 Regulation performance ratios of energy storage units within each energy storage station under different strategies

各储能电站内储能单元的总成本如表 3 所示。其中总成本为区域内所有储能电站的能量损耗成本以及寿命衰减成本之和。

两种策略下,储能能量损耗成本与充放电功率和效率有关,寿命衰减成本与充放电过程及单位功率成本有关。相较于策略 1 的等比例分配调频功率,策略 2

可以更好地根据各储能电站内储能单元的特性进行功率的最优分配,从而使得成本损耗最小化。相较于储能电站 1 和储能电站 2,储能电站 3 的单位功率成本偏高,从而使储能电站 1 和 2 承担较多的调频任务,在完成调频任务的同时降低损耗。两种策略相比,策略 2 比策略 1 总成本降低了 39.80%。

表 3 不同策略下调频成本

Table 3 Frequency regulation costs under different strategies

策 略	成本指标	储能电站 1	储能电站 2	储能电站 3	单项成本之和	总成本
策略 1	能量损耗成本	480.244 7	184.747 2	1 330.040 8	1 995.032 7	2 000.924 7
	寿命衰减成本	2.084 8	2.641 9	1.165 3	5.892	
策略 2	能量损耗成本	927.519 3	204.022 1	65.855 4	1 197.396 8	1 204.566 4
	寿命衰减成本	4.243 0	2.882 3	0.044 3	7.169 6	

### 4 结 论

针对电网调频功率优化分配,在 AGC 指令于分布式储能电站间进行一次功率优化分配后,本文利用主客观综合权重 TOPSIS 评价法,将各储能电站收到的调频指令在其内部储能单元间进行二次调频功率优化分配,并进行仿真验证,可得出以下结论:

本文提出的策略,可以根据不同储能电站的剩余调频能力来合理分配调频功率,让调频成本较高但剩余调频能力较大的储能电站负责相应的充电和放电任务。这样既可以增强区域整体调频能力,又可以实现经济效益的最优化。该策略有助于充分发挥各储能电站的潜力,提升系统的调节能力,同时最大程度地降低总体调频成本。在储能单元功率优化分配时,除考虑能量损耗成本和寿命衰减成本外,还考虑了各储能单

元的调节性能比率指标。在所提策略下,使得 SOC 相对理想的储能单元承担较多的调频任务,有利于增加各储能电站调频的可靠性和可持续性。

### 参考文献(References):

[1] 蔡文亮,赵正晖,汪洋,等. 面向新型能源结构的系统调频技术回顾与展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 1-9.  
CAI Wen-liang, ZHAO Zheng-hui, WANG Yang, et al. Review and prospect of system frequency modulation technology for new energy structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 1-9.

[2] 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 Ting-ting, LI Xin-ran, JANG Xue-jiao. Demands assessment method of energy storage power sources in grid

- frequency regulation[J]. *Electric Power Construction*, 2016, 37(8): 65-71.
- [3] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(14): 26-34.  
YAN Gan-gui, LIU Ying, DUAN Shuang-ming, et al. Power distribution strategy for battery energy storage unit group participating in secondary frequency regulation of power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(14): 26-34.
- [4] 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 Qi-xing, HE Shi-zhi, LU Wei-hui, et al. Model predictive control method for battery energy storage assisting secondary frequency regulation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(23): 119-125.
- [5] 郭伟, 赵洪山. 基于改进分布式一致性算法的电池储能阵列分组控制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(23): 4991-5000.  
GUO Wei, ZHAO Hong-shan. Grouping control strategy of battery energy storage array system based on an improved distributed consensus algorithm[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(23): 4991-5000.
- [6] 李建林, 王哲, 曾伟, 等. 百兆瓦级电化学储能电站能量管理研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 72-84.  
LI Jian-lin, WANG Zhe, ZENG Wei, et al. Review of energy management research on 100-Megawatt electrochemical energy storage power stations[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 72-84.
- [7] 王亚莉, 叶泽, 黄际元, 等. 基于动态峰谷时段划分的储能调峰调频经济调度研究[J]. *中国电力*, 2022, 55(8): 64-72.  
WANG Ya-li, YE Ze, HUANG Ji-yuan, et al. Research on economic scheduling of ES peak and frequency regulation based on dynamic Peak-Valley time division[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 64-72.
- [8] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(5): 963-972.  
TANG Jie, LI Xin-ran, HUANG Ji-yuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(5): 963-972.
- [9] 张圣祺, 袁蓓, 季振东, 等. 基于分布式控制原理的电池储能系统二次调频控制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(S2): 637-645.  
ZHANG Sheng-qi, YUAN Bei, JI Zhen-dong, et al. Secondary frequency modulation control of battery energy storage systems based on distributed control principle[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(S2): 637-645.
- [10] 张圣祺, 袁蓓, 徐青山, 等. 规模化储能参与下的电网二次调频优化控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(5): 82-88, 95.  
ZHANG Sheng-qi, YUAN Bei, XU Qing-shan, et al. Optimal control strategy of secondary frequency regulation for power grid with large-scale energy storages[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(5): 82-88, 95.
- [11] 刘洋恺, 孙伟卿, 刘唯. 基于 AHP 和 TOPSIS-模糊综合评价的多场景储能选型方法[J]. *储能科学与技术*, 2024, 13(2): 691-701.  
LIU Yang-kai, SUN Wei-qing, LIU Wei. Multiscenario energy storage selection method based on AHP and TOPSIS-fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2024, 13(2): 691-701.
- [12] 曾晔, 加鹤萍, 杨菁, 等. 基于模糊层次分析法-熵权法-逼近理想解排序法的虚拟电厂综合贡献度评估方法[J]. *现代电力*, 2024, 41(1): 144-151.  
ZENG Ye, JIA He-ping, YANG Jing, et al. Comprehensive contribution degree evaluation method of virtual power plants based on FAHP-EWM-TOPSIS method[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(1): 144-151.
- [13] 李响, 牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(S1): 178-184.  
LI Xiang, NIU Sai. Study on multi-layer evaluation system of source-network-load under double carbon target[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(S1): 178-184.
- [14] 刘佳婕, 贾燕冰, 韩肖清, 等. 基于效能评估的混合储能电站调频功率优化[J]. *高电压技术*, 2024, 50(6): 2467-2477.  
LIU Jia-jie, JIA Yan-bing, HAN Xiao-qing, et al. Frequency regulation power optimization of hybrid energy storage station based on efficiency evaluation[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(6): 2467-2477.
- [15] 李军徽, 侯涛, 严干贵, 等. 计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(23): 8020-8033.  
LI Jun-hui, HOU Tao, YAN Gan-gui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(23): 8020-8033.

责任编辑:李翠薇