

提升新能源场站调节能力的储能优化配置策略

刘刚¹, 张芳影², 李晓峰^{2,3}, 刘双硕⁴, 李笑竹⁴

(1. 新疆新捷能源有限公司, 乌鲁木齐 830000; 2. 中国石油工程建设有限公司西北分公司, 新疆 鄯善 838202;
3. 新疆大学化工学院, 乌鲁木齐 830011; 4. 新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对以新能源为主体的新型电力系统灵活性资源不足、调节能力受限问题,提出一种用于提升新能源场站有功调节能力的储能配置方法。首先,针对风电场多时间尺度有功调节需求,提出基于双电池储能的风储系统多时间尺度运行方案,所提运行方案中双电池储能将应用于参与发电计划制定、跟踪发电计划、平抑风电波动与响应系统调频需求共4个应用场景。其次,构建计及储能寿命损耗的储能双层配置模型。最后,以新疆某风电场构建算例验证所提储能双层配置方法的可行性和有效性,结果表明所提储能配置方法可提升风电场有功调节能力的同时兼顾储能经济性。
关键词: 新能源场站; 储能; 配置; 多场景; 调节能力

Energy Storage Optimization Configuration Strategy for Enhancing Regulation Capacity of New Energy Stations

LIU Gang¹, ZHANG Fangying², LI Xiaofeng^{2,3}, LIU Shuangshuo⁴, LI Xiaozhu⁴

(1. Xinjiang Xinjie Energy Co., Ltd., Urumqi 830000, China; 2. Northwest Branch of China Petroleum Engineering Construction Co., Ltd., Xinjiang Shanshan 838202, China; 3. College of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, China; 4. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, China)

Abstract: In view of such issues as insufficient flexibility resources and limited regulation capacity in the new energy dominated power system, a kind of storage configuration method for enhancing the active power regulation capability of new energy stations is proposed. Firstly, in response to the multi time scale active power regulation requirements of wind farms, a multi time scale operation scheme for wind storage systems based on dual battery energy storage is proposed. In the proposed operation scheme, the dual battery energy storage will be used to participate such four application scenarios as participating in power generation planning, tracking power generation plans, smoothing wind power fluctuations and responding to system frequency regulation requirements. Then, a dual layer energy storage configuration model taking into account the loss of energy storage lifespan is constructed. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed dual layer energy storage configuration method are verified through the construction of a wind farm in Xinjiang. The results show that the proposed energy storage configuration method can, at the same time of considering energy storage economic performance, improve the active power regulation capability of the wind farm.

Keywords: new energy station; energy storage; configuration; multi-scenario; regulating ability

0 引言

在“双碳”目标和新型电力系统构建目标的驱动下,新能源将逐渐转变为系统主要电量供应电源^[1-3]。但新能源有功调节能力差,加剧了系统功率

调节压力,配套储能并采用合理的运行方案可有效改善新能源有功调节特性^[4-6]。但当前储能相关成本较高并且储能配置情况会对“新能源+储能”电站的运行效果产生影响^[7],因此研究兼顾提升新能源场站多时间尺度有功调节能力的储能优化配置方

收稿日期:2025-01-09

基金项目:新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2022E0210),新疆大学优秀博士研究生创新项目(XJU2023BS069)。

法,同时考虑储能运行寿命带来的影响,对电力系统清洁低碳转型意义重大。

新能源出力的间歇性、波动性和不确定性是影响有功调节能力的主要因素,其致使并网后加剧系统调峰压力、执行发电计划困难、出力波动严重及无法承担系统功率调节任务,因此提升新能源有功调节能力的关键即利用储能等技术改善风电并网的上述缺陷。目前,提升新能源调节能力的储能优化配置已有一定研究,文献[7-9]针对风电功率预测误差问题展开储能配置研究,解决了风电执行自身发电计划困难的现象,实现了提升风电场跟踪发电计划能力;文献[10-12]则利用储能抵消风电随机波动并提出配套储能配置方法,缓解了风电出力波动严重的问题,实现了提升风电场平稳并网的能力;文献[13-14]则对新能源参与系统调频的储能配置问题展开研究,使新能源与常规机组共同参与维持系统安全稳定运行,使新能源具备参与系统功率调节的能力。而储能优化配置问题的求解方法,主要集中在不确定性规划方法、智能算法及双层优化方法等,文献[17]采用随机规划方法分析风电、负荷的随机性并构建多个典型场景进行储能规划;文献[18]则构建了极端场景下的风电、负荷的出力特性,并采用鲁棒规划方法进行储能规划。上述研究提出的提升新能源有功调节能力储能配置方法大多针对单一有功调节能力,没有考虑不同时间尺度有功调节能力间的配合问题,同时还缺乏储能多个应用场景下运行效果对储能配置结果的影响分析。若仅将储能应用于单一应用场景,其只会在特定时段动作而在其余时段处于闲置状态,存在利用率较低的问题,已有部分文献提出储能多应用场景协同运行策略,如文献[15]建立了用户侧储能参与系统调峰的综合经济优化模型,从经济性角度验证了储能在多应用场景下协同运行的可行性;文献[16]所提方法可实现储能在调峰与调频控制间切换,而文献[17]则提出一种利用储能辅助风电场跟踪发电计划同时响应系统调频需求的控制策略。但上述研究没有充分挖掘储能在不同时间尺度有功调节能力间的配合潜力,无法满足新型电力系统对新能源场站有功调节能力的要求。

为解决上述问题,有研究利用双储能实现新能源场站的优化控制^[18],文献[16]面向多应用场景的调节需求,提出多工况双储能协同运行策略,文献[19]针对储能平抑风电功率波动过程中充放电状态切换频率过高,寿命减少的问题,提出基于双蓄电池组混合储能的波动平抑策略,文献[20]在“交替工

作、同步切换”的双储能运行策略的基础上,提出基于多主体投资的分层优化配置策略。但上述研究虽对多场景调节需求进行了区分,但未结合实际中的调度尺度,所提运行策略与配置方案与工程实际差距较大;同时也未能在储能配置阶段考虑储能在多应用场景下的协同运行,未能充分降低储能的投资成本。

基于上述分析,为提升新能源配套储能的利用率、增强新能源场站的有功调节能力,提出科学的储能配置方法,主要创新如下:

1)提出提升新能源场站多时间尺度有功调节能力的双储能协同运行模式;所提运行方案中储能将应用于参与发电计划制定、跟踪发电计划、平抑风电波动与响应系统调频需求共4个应用场景;

2)计及多场景调节需求提出新能源配套储能的双层优化配置模型,从规划与运行两个层面考虑配置经济性,以实现配建储能的降本增效。

1 “新能源+储能”多时间尺度运行模型

1.1 含双电池储能的“新能源+储能”系统

当前电力系统中新能源场站以日前预测功率作为次日发电计划优先并网,调度中心根据预测功率安排系统中常规机组的出力计划及备用计划^[21],但该传统模式将加剧系统调峰、调频等调节压力^[22]。为改善新能源自身调节能力差的问题,在新能源配置储能构成“新能源+储能”系统并提出含15 min、2 min双时间尺度的运行模式,运行模式框图见图1。首先,调度中心根据次日系统负荷情况、新能源预测功率、新能源配套储能可用功率及容量情况确定新能源场站次日发电计划及储能制定计划预动作方案,实现最大程度接纳新能源并网的同时缓解新能源自身并入系统造成的“反调峰”问题。其次,“新能源+储能”系统以计划偏差最小为目标确定次日风储系统每15 min跟踪计划出力方案,实现最大程度执行日前所定发电计划;随后,“新能源+储能”系统在每15 min执行发电计划的过程中需对内部每2 min的新能源功率偏差量与波动量进行平抑,避免在更短时间尺度下产生的功率调节问题;最后,“新能源+储能”系统在平抑波动的基础上预留调频备用功率以实时响应系统调频需求,实现与常规机组一同承担系统功率调节的任务。

为使新能源具备执行上述运行模式的能力,考虑到大功率型储能可长时段连续充放电但经济性差,而单个能量型储能难以独自承担多时间尺度有功调节需求,且会导致储能充放电状态频繁

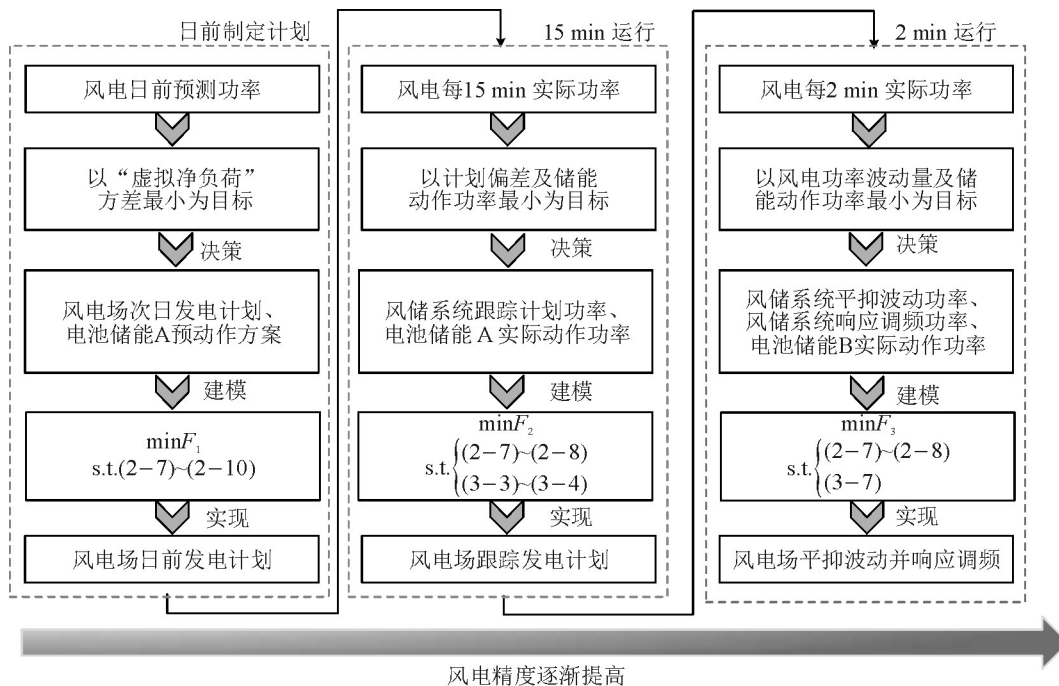


图1 “新能源+储能”系统运行模式
Fig. 1 Operation mode of new energy+energy storage system

切换,本文在新能源场站分别配置用于提升 15 min、2 min 时间尺度调节能力的双电池储能 A、B,风储系统结构见图 2。其中,电池储能 A(简称储能 A)控制周期为 15 min,用于日前参与制定新能源发电计划与次日补偿每 15 min 新能源出力与发电计划偏差量,储能 A 中仅有部分容量允许参与制定发电计划,这部分容量在次日可与储能 A 中剩余容量一同补偿计划偏差量,提升储能利用率,需要说明的是,储能 A 还是一个储能整体,仅在构建优化模型时将其总容量理解为两部分独立容量,但实际充放电功率及电量还是按储能整体进行的;电池储能 B(简称储能 B)控制周期为 2 min,用于平抑每 2 min 风电出力波动与计划偏差,并在此基础上预留备用功率,实时响应系统调频需求。



图2 含双电池储能的“新能源+储能”系统
Fig. 2 New energy+energy storage system with dual battery energy storage

1.2 “新能源+储能”系统多时间尺度运行模型

1.2.1 “新能源+储能”系统日前发电计划制定模型

本文所提“新能源+储能”系统运行模式能主动缓解系统调峰压力,因此调度中心采用如下策略制定“新能源+储能”系统日前发电计划:首先,调度中

心将系统负荷曲线按比例缩放后除去“新能源+储能”系统出力曲线得到“虚拟净负荷”;随后,以“虚拟净负荷”方差最小为目标优化“新能源+储能”系统发电计划及储能出力方案,最大程度减少新能源场站因自身并入系统增加的净负荷峰谷差。为此,定义“虚拟负荷”、“虚拟净负荷”如下:系统总负荷 $P_{L,t}$ 按该新能源场站装机容量 P_w^r 占系统中新能源总装机容量 $P_{n,all}^r$ 的比例缩放即为“虚拟负荷”;“虚拟负荷”除去新能源场站日前预测功率 $P_{w,t}^{da}$ 后为储能参与调节前的“虚拟净负荷” $P'_{vjl,t}$,“虚拟负荷”除去所定“新能源+储能”系统发电计划 $P_{w,t}^{plan}$ 后为储能参与调节后的“虚拟净负荷” $P_{vjl,t}$,相关表达式如式(1)所示^[23]

$$\begin{cases} P'_{vjl,t} = \left(\frac{P_w^r}{P_{n,all}^r} \right) P_{L,t} - P_{w,t}^{da} \\ P_{vjl,t} = \left(\frac{P_w^r}{P_{n,all}^r} \right) P_{L,t} - P_{w,t}^{plan} \\ P_{w,t}^{plan} = P_{w,t}^{da} - f_{A,t}^{if,c} P_{A,t}^{if,c} + f_{A,t}^{if,d} P_{A,t}^{if,d} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f_{A,t}^{if,c}$ 、 $f_{A,t}^{if,d}$ 分别为制定计划时电池储能 A 处于充、放电状态的 0-1 变量标志位,其值为 1 时表示储能 A 处于充、放电状态;为 0 则表示储能 A 不处于充、放电状态; $P_{A,t}^{if,c}$ 、 $P_{A,t}^{if,d}$ 分别为制定计划时储能 A 充、放电功率。

随后,以 $P_{vjl,t}$ 方差最小为目标确定“新能源+储能”系统日前发电计划制定模型,目标函数表达式为

$$F_1 = \min \frac{1}{T_1} \sum_{t=1}^{T_1} (P_{\text{vjl},t} - P_{\text{vjl}}^{\text{ave}})^2 \quad (2)$$

式中: $P_{\text{vjl}}^{\text{ave}}$ 为 $P_{\text{vjl},t}$ 的平均值; T_1 为调度周期内以 15 min 为时间分辨率的时刻数, 本文取 96。

约束条件如下:

1) “新能源+储能”系统运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq f_{A,t}^{\text{if-c}} + f_{A,t}^{\text{if-d}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{A,t}^{\text{if-c}} \leq P_{A,t}^{\text{if-c max}} \\ 0 \leq P_{A,t}^{\text{if-d}} \leq P_{A,t}^{\text{if-d max}} \\ S_A^{\text{min}} \leq S_{A,t+1}^{\text{if}} \leq S_A^{\text{max}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_{A,t}^{\text{if-c max}} = \min(P_{A,t}, (S_{A,t}^{\text{max}} - S_{A,t}^{\text{if}}) \frac{E_A^{\text{if}}}{\eta_c T_{c1}}) \\ P_{A,t}^{\text{if-d max}} = \min(P_{A,t}, (S_{A,t}^{\text{if}} - S_{A,t}^{\text{min}}) \frac{\eta_d E_A^{\text{if}}}{T_{c1}}) \end{cases} \quad (4)$$

$$S_{A,t+1}^{\text{if}} = S_{A,t}^{\text{if}} + \frac{f_{A,t}^{\text{if-c}} P_{A,t}^{\text{if-c max}} \eta_c T_{c1}}{E_A^{\text{if}}} - \frac{f_{A,t}^{\text{if-d}} P_{A,t}^{\text{if-d max}} T_{c1}}{\eta_d E_A^{\text{if}}} \quad (5)$$

式中: $P_{A,t}^{\text{if-c max}}$ 、 $P_{A,t}^{\text{if-d max}}$ 分别为 t 时刻储能 A 制定计划允许最大充、放电功率; $S_{A,t+1}^{\text{if}}$ 为 $t+1$ 时刻初储能 A 制定计划部分荷电状态 (state of charge, SOC), S_A^{max} 、 S_A^{min} 则为 SOC 上、下限; $P_{A,t}$ 为储能 A 额定功率; E_A^{if} 为储能 A 用于制定计划部分容量; η_c 、 η_d 分别为储能 A 充、放电效率, 本文均取 0.9; T_{c1} 为储能 A 控制周期, 本文取 15 min。

2) 电量转移约束

为保证储能参与制定新能源场站发电计划前、后风电场各日上网电量维持不变, 应使各日储能制定发电计划时总充电量与总放电量相同。

$$\sum_{t=1}^{T_1} \eta_c f_{A,t}^{\text{if-c}} P_{A,t}^{\text{if-c}} T_{c1} = \sum_{t=1}^{T_1} \left(\frac{f_{A,t}^{\text{if-d}} P_{A,t}^{\text{if-d}} T_{c1}}{\eta_d} \right) \quad (6)$$

3) 储能允许动作时段约束

为在储能容量有限的情况下最大程度缓解新能源场站“反调峰”现象, 需根据各日储能参与调整前“虚拟净负荷”峰谷特性确定储能允许动作时段^[24]。

$$\begin{cases} L_{\text{down}} = P_{\text{vjl},t}^{\text{max}} - P_A^r \\ L_{\text{up}} = P_{\text{vjl},t}^{\text{min}} + P_A^r \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{A,t}^{\text{if-c}} = 0, L_{\text{up}} \leq \left(\frac{P_w^r}{P_{n,\text{all}}^r} \right) P_{L,t} \leq L_{\text{down}} \\ P_{A,t}^{\text{if-d}} = 0, L_{\text{up}} \leq \left(\frac{P_w^r}{P_{n,\text{all}}^r} \right) P_{L,t} \leq L_{\text{down}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: L_{down} 为允许储能充电的削峰门槛线; L_{up} 为允许储能放电的填谷门槛线。

1.2.2 “新能源+储能”系统 15 min 尺度运行模型

“新能源+储能”系统在执行所定日前发电计划时, 允许发电功率与发电计划间存在偏差量, 在发电计划功率曲线上附加允许偏差量即可得到计划允许偏差带, 由式(8)计算计划允许误差上限 $\tilde{P}_{w,t}^{\text{plan}}$ 、下限 $P_{w,t}^{\text{plan}}$ 。当“新能源+储能”系统发电功率处于允许偏差范围内认为此时满足系统调度运行要求。当风电功率处于允许偏差范围外时, 电池储能 A 动作以补偿偏差电量。因此构建以“新能源+储能”系统发电计划偏差量以及储能动作功率最小的目标函数如式(9), 以优化“新能源+储能”系统跟踪计划效果。

$$\begin{cases} \tilde{P}_{w,t}^{\text{plan}} = (1 + \delta_{\text{pc}}) P_{w,t}^{\text{plan}} \\ \underline{P}_{w,t}^{\text{plan}} = (1 - \delta_{\text{pc}}) P_{w,t}^{\text{plan}} \end{cases} \quad (9)$$

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^{T_1} (\lambda_1 (P_{\text{gz},t} - P_{w,t}^{\text{plan}})^2 + \lambda_2 (P_{A,t}^{\text{gz}})^2) \quad (10)$$

式中: δ_{pc} 为计划允许偏差率; $P_{\text{gz},t}$ 为 t 时刻风储系统跟踪计划发电功率; $P_{A,t}^{\text{gz}}$ 为 t 时刻电池储能 A 跟踪计划功率。

此时除同样需满足风储系统运行约束以外, 还需满足以下约束条件:

1) 跟踪计划功率平衡约束

$$P_{\text{gz},t} = P_{w,t}^{\text{real}} + P_{A,t}^{\text{if}} + P_{A,t}^{\text{gz}} \quad (11)$$

2) 储能允许动作功率约束

$$S_{A,\text{strat}} = S_{A,\text{end}} \quad (12)$$

式中: $S_{A,\text{strat}}$ 与 $S_{A,\text{end}}$ 分别为电池储能 A 允许制定计划时段的起始时刻与终止时刻的 SOC 情况, 该式主要用于确保电池储能 A 按跟踪计划功率动作后不会对日前所确定制定计划动作方案的可执行性产生影响, 即电池储能 A 跟踪计划时应在日前所确定各时刻制定计划剩余容量下进行, 以实现电池储能 A 同时具备参与发电计划制定与跟踪计划两个应用场景的能力。

1.2.3 “新能源+储能”系统 2 min 尺度运行模型

“新能源+储能”系统在执行每 15 min 发电计划时, 应确保每 2 min 的发电功率与前一时刻实际并网功率间满足允许波动率要求, 随后“新能源+储能”系统在平抑波动的基础上预留调频备用, 实时响应系统每 2 min 内的调频需求。因此建立“新能源+储能”系统 2 min 尺度运行模型如下, 其中若任意时刻“新能源+储能”系统因响应系统调频需求而导致该时刻实际并网功率无法满足发电计划允许偏差要求时, 则下一时刻“新能源+储能”系统只需

最大程度完成跟踪发电计划并响应系统调频需求即可。

$$F_3 = \min \sum_{t=1}^{T_2} (\lambda_1 (P_{w,t}^{\text{bd}} - P_{w,t}^{\text{bdjz}})^2 + \lambda_2 (P_{B,t}^{\text{bd}})^2) \quad (13)$$

$$P_{w,t}^{\text{bdjz}} = \begin{cases} P_{w,t-1}^G, P_{w,t}^{\text{jh}} \leq P_{w,t-1}^G \leq \tilde{P}_{w,t}^{\text{jh}} \\ \tilde{P}_{w,t}^{\text{jh}}, \tilde{P}_{w,t}^{\text{jh}} \leq P_{w,t-1}^G \\ P_{w,t}^{\text{jh}}, P_{w,t-1}^G \leq \tilde{P}_{w,t}^{\text{jh}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{w,t}^{\text{bd}}$ 为 t 时刻“新能源+储能”系统平抑波动发电功率; $P_{B,t}^{\text{bd}}$ 为 t 时刻电池储能 B 平抑波动功率; $P_{w,t}^{\text{bdjz}}$ 为 t 时刻系统波动基准功率; $P_{w,t-1}^G$ 为 $t-1$ 时刻系统实际并网功率。

此时除同样需满足系统运行约束以外,还需满足平抑波动功率平衡约束:

$$P_{w,t}^{\text{bd}} = P_{w,t}^{\text{real}} + P_{A,t}^{\text{df}} + P_{A,t}^{\text{gz}} + P_{B,t}^{\text{bd}} \quad (15)$$

得到各时刻 $P_{w,t}^{\text{bd}}$ 后,系统以当前风电功率的 10% 预留上、下调频备用功率 $P_{w,t}^{\text{upF}}$ 、 $P_{w,t}^{\text{dnF}}$,随后系统以实际调频功率 $P_{w,t}^{\text{realF}}$ 实时响应系统调频需求,并得到该时刻系统响应系统调频需求的实际并网功率 $P_{w,t}^G$ 为

$$P_{w,t}^{\text{upF}} = \begin{cases} \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}}, & (P_{B,t}^{\text{dmax}} - P_{B,t}^{\text{bd}}) > \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}} \\ P_{B,t}^{\text{dmax}} - P_{B,t}^{\text{bd}}, & (P_{B,t}^{\text{dmax}} - P_{B,t}^{\text{bd}}) \leq \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}} \end{cases} \quad (16)$$

$$P_{w,t}^{\text{dnF}} = \begin{cases} \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}}, & (P_{B,t}^{\text{cmax}} + P_{B,t}^{\text{bd}}) > \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}} \\ P_{B,t}^{\text{cmax}} + P_{B,t}^{\text{bd}}, & (P_{B,t}^{\text{cmax}} + P_{B,t}^{\text{bd}}) \leq \lambda_{\min} P_{w,t}^{\text{real}} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_{w,t}^G = P_{w,t}^{\text{bd}} + P_{w,t}^{\text{realF}} \\ -P_{w,t}^{\text{upF}} \leq P_{w,t}^{\text{realF}} \leq P_{w,t}^{\text{dnF}} \end{cases} \quad (18)$$

2 多时间尺度储能配置模型

2.1 上层:储能规划

储能规划配置时以储能系统全寿命周期内等年值总成本 C 最小为优化目标,其包括储能初始投资成本 C_{inv} 与运行维护成本 C_{om} ,计算公式为

$$\min C = C_{\text{inv}} + C_{\text{om}} \quad (19)$$

$$C_{\text{ess,inv}} = \frac{r(1+r)^{Y_A}}{(1+r)^{Y_A} - 1} (C_e E_A^r + C_p P_A^r) + \frac{r(1+r)^{Y_B}}{(1+r)^{Y_B} - 1} (C_e E_B^r + C_p P_B^r) \quad (20)$$

$$C_{\text{ess,om}} = \frac{r(1+r)^{Y_A}}{(1+r)^{Y_A} - 1} (C_{\text{pom}} P_A^r + \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s C_{\text{com}} W_{s,A}) + \frac{r(1+r)^{Y_B}}{(1+r)^{Y_B} - 1} (C_{\text{pom}} P_B^r + \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s C_{\text{com}} W_{s,B}) \quad (21)$$

$$Y_A = \frac{N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},A})}{\sum_{u=1}^{H_A} N_{\text{eq}}(D_{\text{od},A,u})} \quad (22)$$

$$Y_B = \frac{N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},B})}{\sum_{u=1}^{H_B} N_{\text{eq}}(D_{\text{od},B,u})} \quad (23)$$

$$C_{b,t} = \begin{cases} 1, & P_{b,t} P_{b,nz} < 0 \\ 0, & P_{b,t} P_{b,nz} \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} H_A = \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s \sum_{t=1}^T C_{A,t} \\ H_B = \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s \sum_{t=1}^T C_{B,t} \end{cases} \quad (25)$$

式中: r 为折现率; Y_A 、 Y_B 为储能 A、B 使用年限; C_e 为储能单位容量成本; E_A^r 、 E_B^r 为储能 A、B 配置容量; C_p 为储能单位功率成本; P_A^r 、 P_B^r 为储能 A、B 配置功率; 运维成本包含固定的功率成本和可变的容量成本; C_{pom} 、 C_{com} 分别为储能单位功率、电量运维成本; ρ_s 为场景 s 在全年的权重; N_s 为全年所含场景数量; $W_{s,A}$ 、 $W_{s,B}$ 为典型场景 s 下储能 A、B 总充放电电量; $N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},A})$ 、 $N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},B})$ 分别为储能 A、B 充放电深度为 1 的等效循环寿命; $D_{\text{od1},A,u}$ 、 $D_{\text{od1},B,u}$ 分别为储能 A、B 的第 u 次循环周期的充放电深度; $N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},A,u})$ 、 $N_{\text{eq}}(D_{\text{od1},B,u})$ 分别为储能 A、B 充放电深度为 $D_{\text{od},A,u}$ 、 $D_{\text{od},B,u}$ 的等效循环寿命; H_A 、 H_B 分别为一年内储能 A、B 充、放电转换次数。 $C_{b,t}$ 为储能充放电状态转换标志位,故 $C_{A,t}$ 、 $C_{B,t}$ 分别为储能 A、B 的充放电状态转换标志位。还需要满足储能容量约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P^r \leq P^{\text{max}} \\ 0 \leq E^r \leq E^{\text{max}} \end{cases} \quad (26)$$

2.2 下层:储能运行

下层通过对各日进行多时间尺度模拟运行,分析上层储能初步配置方案运行效果。考虑以全年时序负荷、新能源场站功率模拟运行存在求解规模过大的问题,且负荷、新能源功率存在一定规律性。本文在确定储能配置方案时要求新能源需要具备一定的跟踪计划能力,在此基础上最大程度提升其余有功调节能力,故在各时间尺度运行模型约束条件的基础上额外考虑跟踪计划能力置信度约束。

$$Z_{\text{plan,sum}} \geq Z_{\text{plan,best}} \quad (27)$$

$$Z_{\text{plan,sum}} = \frac{\sum_{t=1}^{T_n} Z_{\text{plan,t}}}{T_n} \quad (28)$$

$$Z_{\text{plan},t} = \begin{cases} 1, & P_{w,t}^{\text{plan}} \leq P_{w,t}^{\text{gzig}} \leq \tilde{P}_{w,t}^{\text{plan}} \\ 0, & \tilde{P}_{w,t}^{\text{plan}} < P_{w,t}^{\text{gzig}} \\ 0, & P_{w,t}^{\text{gzig}} < P_{w,t}^{\text{plan}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $Z_{\text{plan},\text{sum}}$ 为系统跟踪计划能力置信度; T_n 为计数变量,时间尺度为 15 min 时为 96,而时间尺度为 2 min 时为 720; $Z_{\text{plan},\text{best}}$ 为风储系统跟踪计划最优能力置信度,其为风储系统跟踪计划调节能力与所配储能功率变化拐点,在配置模型中考虑该置信度约束可实现在满足技术性要求下兼顾一定经济性; $Z_{\text{plan},t}$ 为 t 时刻风储系统跟踪计划完成状态标识, $P_{w,t}^{\text{gzig}}$ 为跟踪计划统计功率,时间尺度为 15 min 时为 $P_{\text{gz},t}$,而时间尺度为 2 min 时为 $P_{w,t}^{\text{bd}}$ 。

所建双层配置模型时上层采用粒子群优化算法,而下层的各日“新能源+储能”系统多时间尺度运行模型则采用 Yalmip 工具箱调用 GUROBI 进行求解。

3 算例仿真

3.1 算例基础参数设置

为验证所提储能配置方法有效性,以新疆某风电场历史出力及所接系统历史负荷数据构建算例^[25],其中该风电场装机容量为 200 MW,电池储能 A、B 的 SOC 上下限分别为 0.9 和 0.1,充放电效率均为 0.9,而 δ_{pc} 、 δ_{bd} 分别为 0.1 和 0.02。所选典型日数据如图 3 所示。

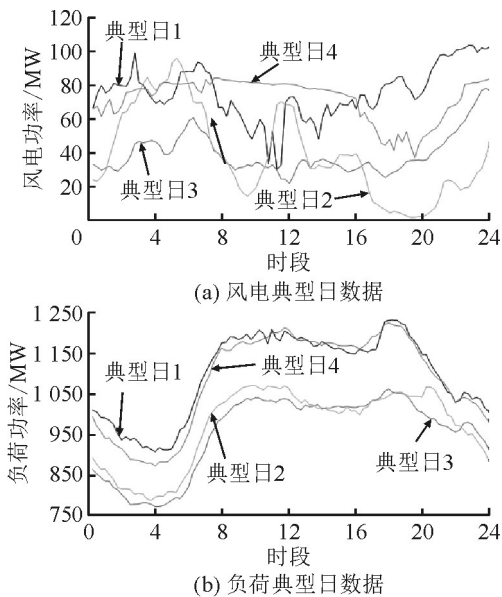


图3 风电、负荷典型日曲线

Fig. 3 Typical daily curve of wind power and load

选取某型号磷酸铁锂电池进行配置,相关参数见表 1。

表 1 储能相关成本参数
Table 1 Cost parameters related to energy storage

参数	数值
单位容量成本/元/kW·h	1 400
单位功率成本/元/kW	1 360
单位功率运维成本/元/kW	90
单位电量运维成本/元/kW	10
贴现率 $r/\%$	5

基于上述前提,设置以下不同配置情景,对比分析考虑储能寿命损耗对确定储能最优配置方案的影响:

1) 情景 1:满足跟踪计划能力置信度的储能最小功率、容量配置方案;

2) 情景 2:在满足跟踪计划能力置信度的前提下采用本文所提计及储能寿命损耗的储能最优功率、容量配置方案。

3.2 配套储能配置结果分析

基于风电场历史数据,分析储能配置功率所决定的跟踪计划能力置信度如图 4 所示。

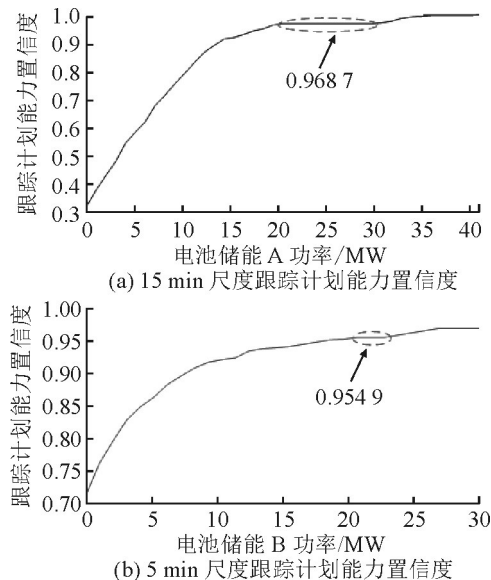


图4 储能配置功率与调节能力置信度关系

Fig. 4 Confidence relationship between energy storage configuration power and regulation capability

由图 4 可以看出,储能 A 在每 15 min 跟踪计划时会在配置功率为 21~22 MW 的范围内遇到调节能力拐点,此时对应 $Z_{\text{plan},\text{best}}$ 为 96.87%;储能 B 协助补偿 15 min 内每 2 min 功率偏差时,会在配置功率为 20~21 MW 时遇到调节能力拐点,此时对应 $Z_{\text{plan},\text{best}}$ 为 95.49%;综上所述,分别取 96.87%和 95.49%作为配置模型中储能 A、B 在 15 min 与 2 min 尺度跟踪计划的最优能力置信度。

储能 A 中参与制定发电计划部分容量配置时

长为 1 h,基于此优化储能 A 最优功率、剩余容量以及储能 B 最优功率、总容量,配置结果见表 2。

表2 储能优化配置结果
Table 2 Results of energy storage optimization configuration

参数	情景1		情景2	
	储能A	储能B	储能A	储能B
配置功率/MW	22.50	20.50	24.10	20.00
配置容量/MW·h	56.00	11.70	58.90	15.30
使用寿命/年	4.36	3.30	4.42	4.73
等年值成本/万	3 242.7		2 860.4	

由表 2 可知,由于情景 1 没有考虑储能寿命损耗对配置结果的影响,所配储能功率、容量虽小于情景 2,但储能寿命损耗有所增加,储能使用年限降低,导致在储能等年值投资总成本方面,情景 1 为 2 987 万元,高于情景 2 时的 2 617.9 万元;而情景 1、2 下储能的全年运维成本相差较小,因此在等年值总成本方面,情景 2 相较于情景 1 每年可减少 382.3 万元。综上所述,在规划阶段计及储能寿命损耗的影响,可在一定程度上延长储能使用年限,确保风储系统经济性。

3.3 配套储能运行方案分析

3.3.1 风储系统 15 min 尺度运行效果分析

为量化分析风电自身跟踪计划的调节需求情况,构建用于评价风电场发电计划完成程度的计划偏差总功率指标 W_{gz} 以及计划偏差率指标 p_{gz} ,可表示为

$$\begin{cases} W_{gz} = \sum_{t=1}^{T/T_{cl}} f(|P_{w,t}^{real} - P_{w,t}^{plan}| - \delta_{pc} P_{w,t}^{plan}) \\ p_{gz} = \sum_{t=1}^{T/T_{cl}} S(|P_{w,t}^{real} - P_{w,t}^{plan}| - \delta_{pc} P_{w,t}^{plan}) T_{cl} / T \end{cases} \quad (30)$$

式中: $P_{w,t}^{real}$ 为 t 时刻风电实际功率; δ_{pc} 为发电计划允许偏差率,本文取 0.1。储能 A 协助风电场执行每 15 min 发电计划情况见图 5,性能指标见表 3。

图 5 可看出储能 A 会在“削峰填谷”时段按日前所确定制定计划预动作功率充放电,而在剩余的跟踪计划时段协助补偿计划偏差功率,但要确保在制定计划起始和结束时段 SOC 与日前阶段所确定预

动作功率保持一致。表 3 可以看出,在储能 A 的协助下,各典型日 p_{gz} 降至 2.08%、3.13%、3.13%、3.13%, W_{gz} 改善效果同样明显,仅有个别时段无法执行发电计划,因此在满足跟踪计划最优能力置信度的前提下选择舍弃这些时段以确保储能配置方案的经济性。

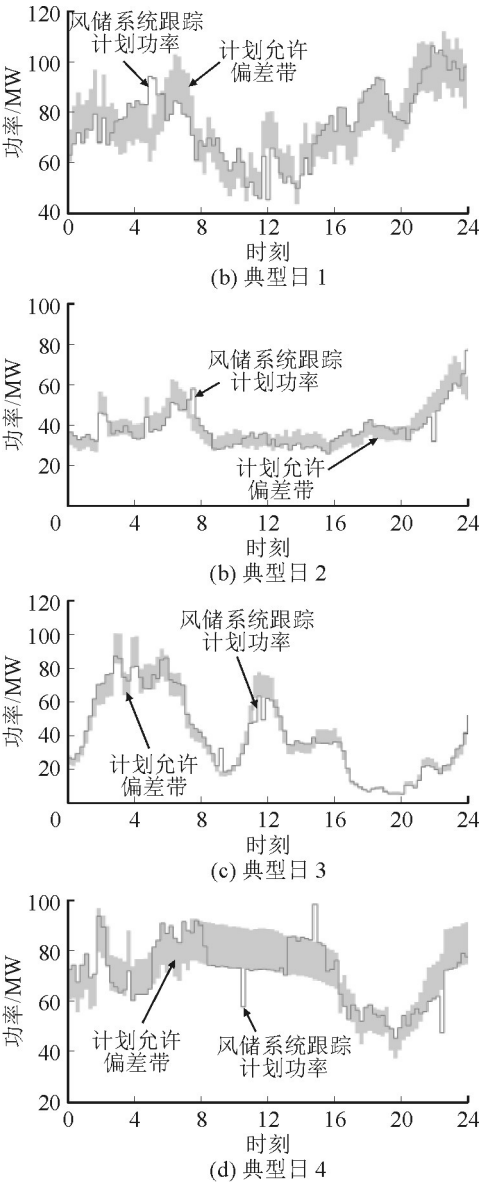


图5 储能配置功率与调节能力置信度关系
Fig. 5 Confidence relationship between energy storage configuration power and regulation capability

表3 储能A加入前后风电场15 min尺度跟踪计划性能指标
Table 3 Index of 15 minute scale tracking plan for wind farm before and after the addition of energy storage A

参数	典型日1	典型日2	典型日3	典型日4
原始风电功率的 W_{gz} /MW	1 207.69	1 734.25	2 483.94	1 725.88
原始风电功率的 p_{gz} /%	61.46	82.29	85.42	71.88
储能A参与调节后的 W_{gz} /MW	47.82	120.62	123.47	141.53
储能A参与调节后的 p_{gz} /%	2.08	3.13	3.13	3.13

储能 A 中参与制定发电计划部分容量的最终动作情况及 SOC 情况见图 6,由该图可以看出,该部分容量储能会在“削峰填谷”时段按日前所确定制定计划预动作功率充放电,而在剩余的跟踪计划时段协助补偿计划偏差功率,但要确保在制定计划起始和结束时段 SOC 与日前阶段所确定预动作功率保持一致。

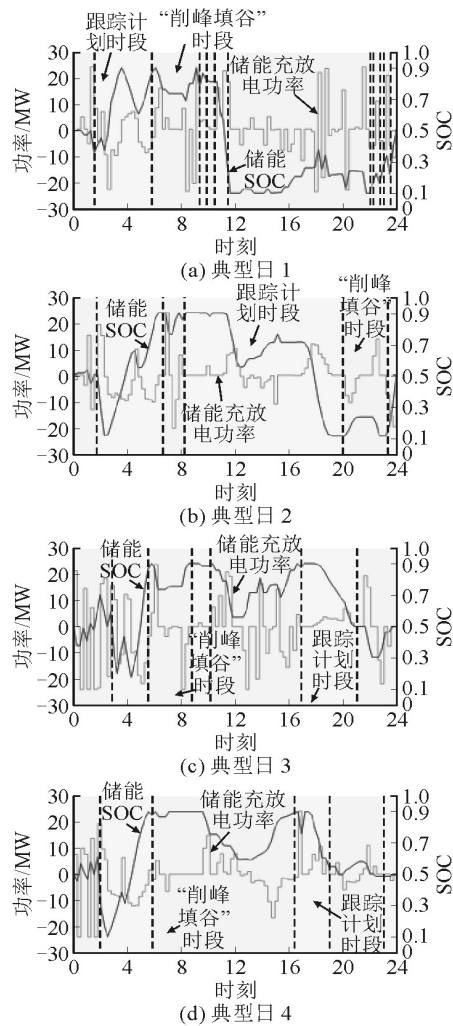


图6 储能配置功率与调节能力置信度关系
Fig. 6 Confidence relationship between energy storage configuration power and regulation capability

3.3.2 风储系统 2 min 尺度运行效果分析

为量化分析风电场响应系统调频需求情况,构建用于评价风电场响应调频需求效果的调频缺额总功率 W_{ip} 以及调频缺额率 p_{ip} ,可表示为

表4 储能B加入前、后风电场响应系统调频需求对比情况

参数	典型日 1	典型日 2	典型日 3	典型日 4
待响应调频信号时段数	62	70	68	71
待响应调频总功率/MW	266.32	228.29	182.67	326.96
运行模式下的 W_{ip} /MW	4.09	0	3.17	6.45
运行模式下的 p_{ip} /%	1.61	0	1.47	1.41

$$\begin{cases} W_{ip} = \sum_{t=1}^{T/T_2} f(P_{xt,t}^{Freal} - P_{w,t}^{realF}) \\ P_{ip} = \sum_{t=1}^{T/T_2} S(P_{xt,t}^{Freal} - P_{w,t}^{realF})T_{c2}/T \end{cases} \quad (31)$$

式中: $P_{xt,t}^{Freal}$ 为 t 时刻调度中心下发给风电场的待响应调频功率; $P_{w,t}^{realF}$ 为 t 时刻风电场实际响应调频功率。

储能 B 平抑每 2 min 风电功率波动与补偿计划偏差,此时风储系统发电功率见图 7,性能指标见表 4。

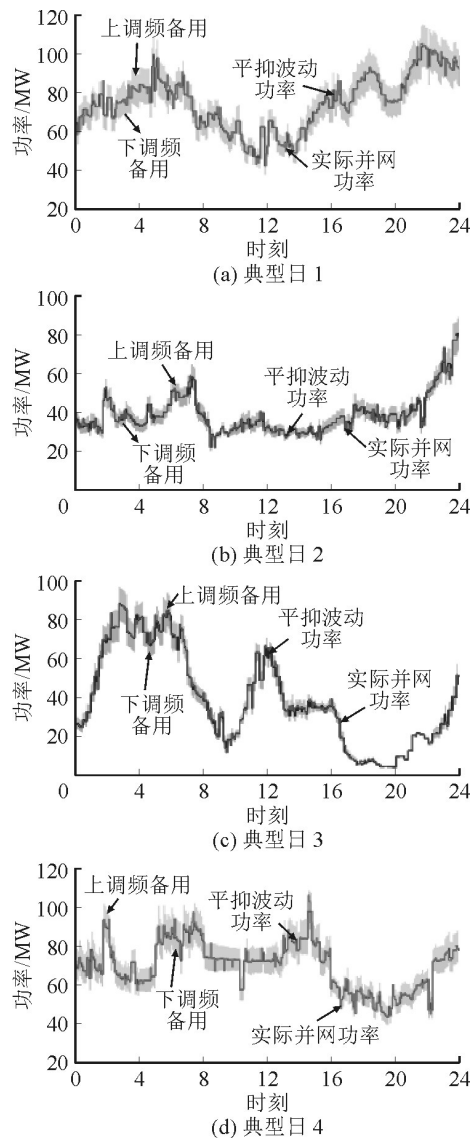


图7 风储系统预留备用并响应系统调频需求效果图
Fig. 7 Effect diagram of reserving backup for wind storage system and responding to system frequency regulation requirements

上述结果可看出,4个典型日下调度中心分别下发62、70、68、71个待响应调频信号,调频总功率分别为266.32 MW、228.29 MW、182.67 MW、326.96 MW,储能B在跟踪计划、平抑波动后通过预留备用功率的形式响应系统调频需求,风储系统响应系统调频需求后的最终并网功率均在所预留调频备用的范围内,并在典型日2中完全满足系统调频需求,而在剩余3个典型日中均只有一个时段的调频需求无法满足, W_{tp} 分别为4.09 MW、3.17 MW、6.45 MW, p_{tp} 分别为1.61%、1.47%、1.41%。综上所述,采用本文所提风储系统运行模式同样可在一定程度改善风电场响应系统调频需求的能力。

4 结语

针对现有新能源场站配套储能优化配置研究提升有功调节能力较为单一的问题,考虑新能源场站各有功调节需求间的耦合关系,挖掘储能调节潜力,提出用以提升新能源场站多时间尺度有功调节能力的“新能源+储能”系统运行模式;基于所提运行模式,构建计及新能源场站有功调节改善效果和储能寿命损耗的储能双层配置模型。通过算例仿真分析,得出如下结论:

1)所提双储能运行策略在提升风电场有功调节能力的同时可有效缓解储能充放电状态频繁切换的问题,实现延长储能使用寿命,同时可有效提升风电场不同时间尺度有功调节能力;

2)计及多场景调节需求提出新能源配套储能的双层优化配置模型,在满足风电场有功调节需求的同时具有更优的经济性,较传统配建储能配置方法储能的等年值总成本每年可减少382.3万元。

后续将进一步提高新能源场站暂态运行的无功调节能力,研究考虑风电场暂态运行时多调节资源协同电压控制的灵活性资源配置方法。

参考文献

- [1] 兑潇玮,朱桂萍,刘艳章.考虑预测误差的风电场储能配置优化方法[J].电网技术,2017,41(2):434-439.
DUI Xiaowei, ZHU Guiping, LIU Yanzhang. Research on battery storage sizing for wind farm considering forecast error[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 434-439.
- [2] 吴玮坪,胡泽春,宋永华.结合随机规划和序贯蒙特卡洛模拟的风电场储能优化配置方法[J].电网技术,2018,42(4):1055-1062.
WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. Optimal sizing of energy storage system for wind farms combining stochastic programming and sequential Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1055-1062.
- [3] 曹明浩,于继来.面向风电场发电曲线偏差校正的电化学储能系统容量规划方法[J].电力系统自动化,2022,46(11):27-36.
CAO Minghao, YU Jilai. Capacity planning method of electrochemical energy storage system for generation curve deviation correction of wind power farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(11): 27-36.
- [4] 甘伟,郭剑波,艾小猛,等.应用于风电场出力平滑的多尺度多指标储能配置[J].电力系统自动化,2019,43(9):92-98.
GAN Wei, GUO Jianbo, AI Xiaomeng, et al. Multi-scale multi-index sizing of energy storage applied to fluctuation mitigation of wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 92-98.
- [5] 徐衍会,徐宜佳.平抑风电波动的混合储能容量配置及控制策略[J].中国电力,2022,55(6):186-193.
XU Yanhui, XU Yijia. Capacity configuration and control strategy of hybrid energy storage to smooth wind power fluctuations[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 186-193.
- [6] 张小莲,陈冲,张仰飞,等.考虑电池运行状态的风电场储能容量优化配置[J].电力系统自动化,2022,46(18):199-207.
ZHANG Xiaolian, CHEN Chong, ZHANG Yangfei, et al. Optimal configuration of wind farm energy storage capacity considering battery operation state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 199-207.
- [7] 朱瑛,秦立宽,颜全椿,等.考虑频率响应过程的风储联合调频策略及储能系统优化配置方法[J].电力自动化设备,2021,41(10):28-35.
ZHU Ying, QIN Likuan, YAN Quanchun, et al. Wind-storage combined frequency regulation strategy and optimal configuration method of energy storage system considering process of frequency response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 28-35.
- [8] 刘颖明,王瑛玮,王晓东,等.基于蚁狮算法的风电集群储能容量配置优化方法[J].太阳能学报,2021,42(1):431-437.
LIU Yingming, WANG Yingwei, WANG Xiaodong, et al. Optimization of storage capacity allocation in wind farm cluster based on ant lion optimization algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(1): 431-437.
- [9] 陈长青,李欣然,张冰玉,等.基于多时间尺度的储能调峰调频协同控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(5):94-105.
CHEN Changqing, LI Xinran, ZHANG Bingyu, et al. Energy storage peak and frequency modulation cooperative control strategy based on multi-time-scale[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 94-105.

- [10]李军徽,侯涛,穆钢,等. 电力市场环境下考虑风电调度和调频极限的储能优化控制[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1791-1804.
- LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Optimal control strategy for energy storage considering wind farm scheduling plan and modulation frequency limitation under electricity market environment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1791-1804.
- [11]SHI Yuanyuan, XU Bolun, WANG Di, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.
- [12]AKRAM U, MITHULANANTHAN N, RAZA M Q, et al. RoCoF restrictive planning framework and wind speed forecast informed operation strategy of energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 224-234.
- [13]ZAHASKY C, KREVOR S. Global geologic Carbon storage requirements of climate change mitigation scenarios[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(6): 1561-1567.
- [14]吴杰,丁明,张晶晶. 基于云模型和K-means聚类的风电场储能容量优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 67-73.
- WU Jie, DING Ming, ZHANG Jingjing. Capacity configuration method of energy storage system for wind farm based on cloud model and K-means clustering[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24): 67-73.
- [15]何俊强,师长立,马明,等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 157-164.
- HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-164.
- [16]马兰,谢丽蓉,叶林,等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1016-1029.
- MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation stabilization strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016-1029.
- [17]刘春明,王俊旺,李瑞月,等. 基于生产模拟的风光能源基地储能容量优化配置方法 [J/OL]. 现代电力, 1-10 [2024-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v.>
- LIU Chunming, WANG Junwang, LI Ruiyue, et al. Optimization configuration method for energy storage capacity of wind and solar energy base based on production simulation [J/OL]. Modern Electric Power, 1-10[2024-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v.>
- [18]严干贵,李洪波,段双明,等. 基于双铅碳电池储能系统的微电网优化运行控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 46-53.
- YAN Gangui, LI Hongbo, DUAN Shuangming, et al. Optimal operation control strategy of microgrid based on double-lead Carbon battery energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 46-53.
- [19]王利民,程静. 用于风电波动平抑的双蓄电池组混合储能控制策略 [J/OL]. 电源学报, 1-17[2025-02-08]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids.>
- WANG Liming, CHENG Jin. Hybrid energy storage control strategy of dual battery pack for wind power fluctuation suppression [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-17[2025-02-08]. <https://kns.cnki.net/kns8s/defaultresult/index?crossids.>
- [20]卞一帆,谢丽蓉,鲁宗相,等. 基于多主体投资的双储能系统分层优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 63-73.
- BIAN Yifan, XIE Lirong, LU Zongxiang, et al. Multi-agent investment based hierarchical optimal configuration scheme for dual energy storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 63-73.
- [21]王若谷,解振学,常小强,等. 一种基于混合储能改善跟踪光伏发电出力特性方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(2): 126-133.
- WANG Ruogu, XIE Zhenxue, CHANG Xiaoqiang, et al. Research on method for improving tracking photovoltaic power generation output characteristics based on hydrogen and battery hybrid energy storage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 126-133.
- [22]张锋,李思儒,孙谊嫒,等. 新能源电站应用储能技术对电网公司购售电决策的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 230-236.
- ZHANG Feng, LI Siru, SUN Yiqian, et al. Impact of energy storage technology of new energy power station on power trading strategy of power grid company[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(6): 230-236.
- [23]田春笋,王浚怡,蒋小亮,等. 基于模糊控制与风速分区的风电机组一次调频控制策略研究[J]. 可再生能源, 2025, 43(1): 124-133.
- TIAN Chunzheng, WANG Junyi, JIANG Xiaoliang, et al. Research on primary frequency modulation control strategy of wind turbines based on fuzzy control and wind speed zoning[J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(1): 124-133.
- [24]耿察民,杨小龙,王亚欧,等. 火储联合调峰调频供热系统协同控制研究[J]. 汽轮机技术, 2023, 65(6): 455-460.
- GENG Chamin, YANG Xiaolong, WANG Yaou, et al. Research on coordinated control of power plant integrated with molten salt storage for peak load regulation and fre-

quency control and heat supply[J]. Turbine Technology, 2023, 65(6):455-460.

- [25] LI Xiaozhu, CHEN Laijun, SUN Fan, et al. Share or not share, the analysis of energy storage interaction of multiple renewable energy stations based on the evolution game[J]. Renewable Energy, 2023, 208(5):679-692.

作者简介:

刘刚(1981—),男,工程师,主要研究方向为新能源高效利用。

张芳影(1984—),女,高级工程师,主要研究方向为高比例新能源系统运行调控。

李晓峰(1986—),男,高级工程师,主要研究方向为新能源低碳利用与高效运行。

刘双硕(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为新型储能运行模式。

李笑竹(1990—),女,通信作者,副教授,主要研究方向为新型电力系统优化调控与新型储能规模化应用。E-mail: 272268272@qq.com。

(上接第43页)

- [23] 胡耘. 动力电池荷电状态(SOC)估算方法综述[J]. 汽车实用技术, 2019(8):36-38.

HU Yun. Summary of methods for state of charge estimation of powerbatteries[J]. Automobile Technology, 2019(8):36-38.

- [24] GIBILISCO P, IEVA G, MARCONE F, et al. Day-ahead operation planning for microgrids embedding battery energy storage systems. a case study on the PrInCE lab microgrid [C]//2018 AEIT International Annual Conference. IEEE, 2018:1-6.

- [25] 贺悝, 冷肇星, 谭庄熙, 等. 考虑放电倍率的电池储能容量自适应SOC估计方法[J/OL]. 储能科学与技术, 1-12 [2025-02-28]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0080>.

HE Li, LENG Zhaoxing, TAN Zhuangxi, et al. Adaptive SOC estimation method for battery energy storage capacity considering discharge rate[J/OL]. Energy Storage Science and Technology, 1 - 12[2025 - 02 - 28]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0080>.

- [26] 牛远方, 冯天豫, 王成福, 等. 兼顾经济效益与寿命损失的含储能配电网多时间尺度协调调度[J]. 电力建设, 2024, 45(11):89-101.

NIU Yuanfang, FENG Tianyuan, WANG Chengfu, et al. Multi-time scale optimal dispatching method of active distribution network considering the influence of cycle life for energy storage system[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(11):89-101.

- [27] 李斌, 李博睿, 李超, 等. 考虑过充/过放的电化学储能电站建模及故障特性分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14):119-128.

LI Bin, LI Borui, LI Chao, et al. Modeling and fault characteristic analysis of electrochemical energy storage station

considering overcharging/overdischarging[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14):119-128.

- [28] 樊会丛, 段志国, 陈志永, 等. 基于多智能体深度策略梯度的离网型微网双层优化调度[J/OL]. 中国电力, 2025:1-11 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250214.0958.006.html>.

FAN H C, DUAN Z G, CHEN Z Y, et al. Two-layer optimal scheduling of off-grid microgrid based on multi-agent deep policy gradient[J/OL]. China Electric Power, 2025:1-11 [2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20250214.0958.006.html>.

- [29] 王子健. 微电网混合储能系统功率分配策略及容量优化配置研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2023.

- [30] 梁叶, 蔡孟冶, 姜岩峰, 等. 基于修正安时积分法的锂电池荷电状态估算[J/OL]. 电源学报, 1-13[2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20250214.1637.004.html>.

LIANG Ye, CAI Mengyi, JIANG Yanfeng, et al. State of charge estimation of lithium battery based on modified ampere-hour integral method[J/OL]. Journal of Power Supply, 1-13[2025-02-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20250214.1637.004.html>.

作者简介:

王晓慧(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为微电网协同调度。E-mail:wangxiaohui3@sia.cn。

崔世界(1985—),男,副研究员,通信作者,主要研究方向为能源调度、边缘智能、人工智能。E-mail:cuishijie@sia.cn。

杨超(1988—),男,高级工程师,主要研究方向为电网数字化,人工智能,网络安全。

王悦(1979—),男,高级工程师,主要研究方向为雷电防御,雷电灾害风险评估,雷电灾害调查鉴定。