

多类型灵活资源参与下的主动配电网电化学储能检修优化策略

蔡 杰¹, 何立钢², 鄂士平³, 李吕满¹, 许敏兴², 周英博¹, 苗世洪²

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430011; 2. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430048)

摘要: 电化学储能电站作为电力系统应对新能源并网问题、实现功率平衡的有效手段, 其运维工作至关重要, 亟需制定合理的检修计划。为提高电化学储能电站检修计划的经济性与可靠性, 提出一种多类型灵活资源参与下的主动配电网储能电站检修策略。首先, 搭建移动式储能、应急电源车以及变频空调集群在内的多类型灵活资源运行模型, 为检修工作提供额外的功率支撑; 然后, 基于主动配电网系统运行约束与储能设备检修计划约束, 搭建电化学储能电站检修多目标优化模型, 并采用宽容分层序列法求解对应的最优检修方案; 最后, 基于 IEEE 33 节点系统进行了仿真分析, 结果表明, 所提策略可以兼顾设备及时检修需求与电网安全经济运行需求。

关键词: 电化学储能; 主动配电网; 多类型灵活资源; 状态检修; 多目标优化

Optimization strategy for overhauling active distribution network electrochemical energy storage with participation of multi-type flexible resources

CAI Jie¹, HE Ligang², E Shiping³, LI Lvman¹, XU Minxing², ZHOU Yingbo¹, MIAO Shihong²

(1. Economic Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430011, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430048, China)

Abstract: As an effective means for power systems to cope with new energy grid integration problems and achieve power balance, the operation and maintenance of electrochemical energy storage power plants is crucial, and it is urgent to formulate a reasonable overhaul plan. In order to improve the economy and reliability of the overhaul plan for electrochemical energy storage plants, an active distribution network energy storage plant overhaul strategy with the participation of multiple types of flexible resources is proposed. Firstly, a multi-type flexible resource operation model including mobile energy storage, emergency power supply vehicle and inverter air conditioning clusters was constructed to provide additional power support for the overhaul work; Secondly, based on the constraints of the active distribution grid system operation and the constraints of the overhaul plan of the energy storage equipment, a multi-objective optimization model for the overhaul of the electrochemical energy storage station was constructed, and the corresponding optimal overhaul plan was solved by the tolerant hierarchical sequential method; Finally, the simulation analysis is carried out based on the IEEE 33-node system. The results show that the proposed strategy balances the need for timely maintenance of equipment with the need for safe and economic operation of the power grid.

Keywords: electrochemical energy storage; active distribution network; multi-type flexible resources; condition-based maintenance; multi-objective optimization deposition

0 引言

随着“双碳”目标的稳步推进，以风电、光伏为代表的新能源渗透率不断提高^[1]。这些新能源出力存在较大的间歇性与波动性，严重影响了电力系统的安全稳定运行。电化学储能凭借响应迅速、双向功率特性等优势，已成为当前电力系统应对大规模新能源接入的有效手段^[2-3]。

然而，电化学储能在长期运行中会不可避免地出现设备老化、劣化的现象，进而发生故障，造成重大的经济损失^[4]。因此，及时开展电化学储能的检修工作，对于提高电化学储能运行可靠性、保障电网的安全稳定运行具有十分重要的意义^[5]。

现阶段，针对电网设备检修计划的研究大多着眼于变压器、电力电缆等常规电网设备。文献[6]综合考虑变压器运行状况与电网运行需求，建立了以最小化检修风险综合费用为优化目标的电网检修决策优化模型；文献[7]研究了变压器突发性故障和劣化故障对状态检修决策的影响，构建了变压器计划维修决策模型；文献[8]量化分析了变压器、电力电缆检修工作与发生故障所造成的电网损失负荷量，并采用风险追踪法确定各设备的检修序列，建立了一种基于最小累积风险度的电网等风险检修决策模型；文献[9]提出了一种考虑原定检修计划随变压器性能意外变化而调整的检修决策模式，并建立了以最小化系统风险与设备风险为目标的变压器状态检修决策模型；文献[10]提出一种量化故障率时变特性的电力电缆故障率矩阵，并将其嵌入检修计划优化编制问题中，提出一种考虑电力电缆故障率时变特性的电网检修计划优化策略；文献[11]采用比例强度模型实时描述变压器的运行工况，并根据最小成本法确定变压器状态检修阈值，提出了一种基于比例强度模型的变压器不完全检修策略。

以上研究综合考虑了故障风险、电网运行需求等因素，提出了相应的检修优化策略，相关成果可为电化学储能的检修计划编制提供了一定的理论支撑。但电化学储能在内外部特性上有别

于常规电网设备，具有明显的电化学生态演变特征^[12-14]，因此无法直接套用常规电网设备检修策略。而目前鲜有针对电化学储能检修工作的研究，仅文献[15]提出了一种基于状态评估的多类型储能检修优化策略。此外，现有研究在制定检修计划时，大多只着眼于设备检修顺序与常规机组出力计划相组合的优化，并未深入挖掘其他类型资源在电网检修过程中的调控潜力，电网检修过程的经济性与可靠性还有待进一步提高。

针对上述问题，本文提出了一种考虑多类型灵活资源参与的储能电站检修优化策略。首先，通过分析移动式储能、应急电源车以及变频空调等不同类型灵活资源的运行原理，搭建多类型灵活资源的运行模型；然后，计及主动配电网系统运行约束与设备检修计划约束条件，综合考虑检修风险性成本和检修经济性成本等相关需求，构建主动配电网储能电站检修多目标优化模型，并采用宽容分层序列法进行求解；最后，基于改进IEEE 33节点系统进行算例分析，仿真结果验证了所建模型的合理性与有效性。

1 多类型灵活资源运行模型

主动配电网（Active Distribution Network, ADN）除内部的新能源机组（Renewable Energy Generator, REG）、可调度机组（Dispatchable Units, DU）以及储能（Energy Storage System, ESS）等常规资源外，还可配置移动式电源（Mobile Power Supply, MPS）用于保障检修过程中的供电，并通过需求响应技术（Demand Response, DR）调节用户的用电策略，实现负荷的移峰填谷，维持系统功率平衡^[16]。基于此，本节针对MPS与DR等典型灵活性资源的运行模型开展分析。

1.1 移动式电源运行模型

当前应用较为广泛的MPS主要包括应急电源车（Emergency Power Supply Vehicle, EPSV）与移动式储能装置（Mobile Energy Storage System, MESS），可在配电网不同节点之间进

行时空转移与能量输送^[17]。因此,需建立基于时空移动约束与能量约束的移动式电源运行模型。

(1) MPS时空移动约束

MPS在ADN节点之间移动的时空约束为

$$\sum_{i \in \Gamma_{CE}} u_{m,i,t}^{AtN} + u_{m,t}^{PM} = 1 \quad (1)$$

$$\sum_{m=1}^{N_{MPS}} u_{m,i,t}^{AtN} \leq 1, \forall i \in \Gamma_{CE} \quad (2)$$

$$u_{m,i,t}^{AtN} + \sum_{t=\tau+1}^{\tau+\tau_{i,j}} u_{m,j,t}^{AtN} \leq 1, \forall i, j \in \Gamma_{CE}, i \neq j \quad (3)$$

式中, m 为MPS的编号索引; i 、 j 为ADN的节点编号; t 为模型的调度时段编号; Γ_{CE} 为ADN内可以接入MPS的节点集合; $u_{m,i,t}^{AtN}$ 为MPS $_m$ 与可接入节点 i 的接入状态 (Access to Network, AtN) 变量, 若 $u_{m,i,t}^{AtN}=1$, 则表示MPS $_m$ 在 t 时段内接入ADN的节点 i , 反之则表示并未接入; $u_{m,t}^{PM}$ 为MPS $_m$ 的移动状态 (Path Moving, PM) 变量, 原理与 $u_{m,i,t}^{AtN}$ 相同; N_{MPS} 为ADN内所配置MPS的数量; $\tau_{i,j}$ 为MPS从可接入节点 i 出发前往可接入节点 j 所需要的时间。

式 (1) 为MPS的时间状态约束, 表明MPS在同一时段内有且仅有一种工作状态, 即要么处于移动状态, 要么处于节点接入状态; 式 (2) 为MPS的空间状态约束, 表明一个ADN节点上仅可接入1台MPS; 式 (3) 为MPS在可接入节点之间移动的时间连续性约束。

(2) MPS能量约束

MPS通过消耗自身能量实现在可接入节点之间的移动。因此, 结合MPS时空移动约束与相应的运行特性, 可以得到MPS能量约束。

EPSV的能量约束为

$$u_{k,t} \leq \sum_{i \in \Gamma_{CE}} u_{k,i,t}^{AtN}, \forall k \in \Gamma_{EPSV} \quad (4)$$

$$\begin{cases} u_{k,t} P_{k,\min} \leq P_{k,t} \leq u_{k,t} P_{k,\max} \\ u_{k,t} Q_{k,\min} \leq Q_{k,t} \leq u_{k,t} Q_{k,\max} \\ -v_{k,\max} \leq P_{k,t} - P_{k,t-1} \leq v_{k,\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} q_{k,t} = q_{k,t-1} - (P_{k,t} + P_k^{PM} u_{k,t}^{PM}) \delta_k \Delta t \\ 0 \leq q_{k,t} \leq q_{k,\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中, Γ_{EPSV} 为ADN内EPSV的集合; k 为ADN内

所配置EPSV的编号索引; $u_{k,t}$ 为EPSV $_k$ 的出力状态变量; $P_{k,t}$ 与 $Q_{k,t}$ 分别为EPSV $_k$ 在 t 时刻有功、无功出力的实际值; $P_{k,\max}$ 与 $Q_{k,\max}$ 分别为EPSV $_k$ 有功、无功出力的上限; $v_{k,\max}$ 为EPSV $_k$ 的最大爬坡速率; P_k^{PM} 为EPSV $_k$ 在单位时间内移动所消耗的功率; δ_k 为EPSV $_k$ 的燃料系数; $q_{k,t}$ 为EPSV $_k$ 的燃料剩余量; $q_{k,\max}$ 为EPSV $_k$ 所携带的燃料量上限; Δt 为相邻调度时段的间隔时长。

MESS的能量约束为

$$u_{w,t}^c + u_{w,t}^d \leq \sum_{i \in \Gamma_{CM}} u_{w,i,t}^{AtN}, \forall w \in \Gamma_{MESS} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,t}^c \leq u_{w,t}^c P_{w,t}^{c,\max} \\ 0 \leq P_{w,t}^d \leq u_{w,t}^d P_{w,t}^{d,\max} \end{cases} \quad (8)$$

$$SOC_{w,t} = SOC_{w,t-1} + \Delta t \frac{(P_{w,t}^c \eta_w^c - P_{w,t}^d / \eta_w^d - P_w^{PM} u_{w,t}^{PM})}{EC_w} \quad (9)$$

$$SOC_w^{\min} \leq SOC_{w,t} \leq SOC_w^{\max} \quad (10)$$

式中, Γ_{MESS} 为ADN内MESS的集合; w 为ADN内所配置MESS的编号索引; $u_{w,t}^c$ 与 $u_{w,t}^d$ 分别为MESS $_w$ 在 t 时刻充、放电状态变量; $P_{w,t}^c$ 与 $P_{w,t}^d$ 分别为MESS $_w$ 在 t 时刻充、放电功率的实际值; $P_w^{c,\max}$ 与 $P_w^{d,\max}$ 分别为MESS $_w$ 充、放电功率的上限; $SOC_{w,t}$ 为MESS $_w$ 的荷电状态; η_w^c 与 η_w^d 分别为MESS $_w$ 的充、放电效率; P_w^{PM} 为MESS $_w$ 在单位调度时段内移动耗电功率; EC_w 为MESS $_w$ 的总容量; $SOC_w^{\max}$ 与 $SOC_w^{\min}$ 分别为MESS $_w$ 荷电状态的上、下限。

1.2 需求响应运行模型

随着需求响应技术的发展, 在用户负荷中占比高、调控性能良好的变频空调逐渐成为当前重要的需求响应资源之一。通过将空调负荷转换为广义储能, 可以使其主动参与配电网调控管理, 提升配电网的经济运行水平。因此, 需要建立考虑变频空调 (Inverter Air Conditioner, IAC) 参与下的需求响应模型, 并提出相应的运行调控约束。

(1) 空调负荷运行约束

空调负荷与所在建筑房间可视为广义储能模型, 其等效荷电状态 $E_{SOC,t}$ 通常被定义为

$$E_{\text{SOC},t} = \frac{T_{\text{room}}^{\max} - T_{\text{room}}^t}{T_{\text{room}}^{\max} - T_{\text{room}}^{\min}} \in [0,1] \quad (11)$$

式中, $T_{\text{room}}^{\max}$ 与 $T_{\text{room}}^{\min}$ 分别为室温变化的上、下限;
 T_{room}^t 为 t 时刻的实际室温。

基于空调负荷及所在建筑房间的热力学相关方程式, 可以进一步得到^[18-19]

$$E_{\text{SOC},t} = \mu_1 E_{\text{SOC},t-1} + \mu_2 P_{\text{IAC},t} + \mu_3 - \mu_4 T_{\text{env},t} \quad (12)$$

式中, μ_1 、 μ_2 、 μ_3 与 μ_4 均为广义储能模型的参数, 具体的计算公式详见文献[18]; $T_{\text{env},t}$ 为广义储能环境温度; $P_{\text{IAC},t}$ 为空调集群消耗的电功率。

$P_{\text{IAC},t}$ 满足约束条件为

$$\begin{cases} P_{\text{IAC},\min} \leq P_{\text{IAC},t} \leq P_{\text{IAC},\max} \\ Q_{\text{IAC},t} = P_{\text{IAC},t} \tan(\arccos(\varphi_{\text{IAC}})) \end{cases} \quad (13)$$

式中, $P_{\text{IAC},\max}$ 与 $P_{\text{IAC},\min}$ 分别为广义储能有功功率的上、下限, 由空调的电功率参数决定; $Q_{\text{IAC},t}$ 为广义储能的无功功率需求; φ_{IAC} 为广义储能的功率因数。

(2) 空调负荷调控约束

为了保障用户的舒适度, 调控过程中需要限制室温的变化幅度, 因此广义储能的等效荷电状态需要满足的约束条件为

$$|E_{\text{SOC},t} - E_{\text{SOC},t-1}| \leq \Delta E_{\text{SOC},\max} \quad (14)$$

式中, $\Delta E_{\text{SOC},\max}$ 为相邻时段内广义储能等效荷电状态变化的最大值。

此外, 若要保持建筑房间内的温度恒定, 则根据式(12), 空调集群的功率需满足

$$P_{\text{IAC},t}^{\text{base}} = \frac{(1-\mu_1)E_{\text{SOC},\text{ini}} - \mu_3 + \mu_4 T_{\text{env},t}}{\mu_2} \quad (15)$$

式中, $P_{\text{IAC},t}^{\text{base}}$ 为空调集群在 t 时刻的基准功率; $E_{\text{SOC},\text{ini}}$ 为广义储能等效荷电初始值。

2 电化学储能检修优化模型

现有的电力行业相关标准中, 电化学储能电站的检修工作通常针对电池簇而不是电池单体开展^[20]。这是因为当储能电站内部电池单体数量较多且发生故障时, 会在其所在电池簇的运行状况中有所体现。以某地区 110 kV 电化学储能电站为例, 其建设形式为预制舱式, 内部电池单体以串

联的方式组成电池簇, 并通过电池管理单元进行集中控制与检查。因此, 本文选择电池簇作为储能电站的主要检修对象。

2.1 目标函数

检修优化模型的目标为最小化检修过程的经济性成本和风险性成本, 即

$$\min C = (C_{\text{econ}}, C_{\text{risk}}) \quad (16)$$

式中, C_{econ} 为检修过程中 ADN 的设备检修成本与运行成本之和; C_{risk} 为待检修设备突发故障导致的负荷断供期望值。

C_{econ} 的计算公式为

$$C_{\text{econ}} = C_{\text{DU}} + C_{\text{ESPS}} + C_{\text{sup}} + C_{\text{DR}} + C_{\text{IMR}} + C_{\text{MPS}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} C_{\text{DU}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{l=1}^{N_{\text{DU}}} c_l P_{l,t} \\ C_{\text{ESPS}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{e=1}^{N_{\text{ESPS}}} c_e (P_{e,t}^{\text{BES,c}} + P_{e,t}^{\text{BES,d}}) \\ C_{\text{sup}} = \sum_{t=1}^{N_T} c_{\text{sup},t} P_{\text{sup},t} \\ C_{\text{DR}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i \in \Gamma_{\text{DR}}} c_{\text{DR},t} |P_{i,t} - P_{i,t}^{\text{base}}| \\ C_{\text{MPS}} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{m=1}^{N_{\text{MPS}}} c_{\text{MPS},t} P_{m,t} \\ C_{\text{IMR}} = \sum_{b \in \Gamma_{\text{IMR}}} C_b^{\text{IMR}} + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{z=1}^{N_{\text{MC}}} u_{z,b,t}^{\text{MC}} C_{z,t}^{\text{MC}} \end{cases} \quad (18)$$

式中, C_{DU} 、 C_{ESPS} 、 C_{sup} 、 C_{DR} 、 C_{MPS} 以及 C_{IMR} 分别为可调度机组运行成本、储能电站运行成本、上级电网购电成本、需求响应补贴成本、可移动电源购电成本以及检修工作成本; l 、 e 、 z 与 b 分别为可调度机组、储能电站、检修工作班组与电池簇的编号索引; c_l 、 c_e 、 $c_{\text{sup},t}$ 、 $c_{\text{DR},t}$ 与 $c_{\text{MPS},t}$ 分别为可调度机组的燃料成本系数、储能电站充放电成本系数、上级电网购电成本系数、需求响应补贴成本系数与移动式电源购电成本系数; N_{DU} 、 N_{ESPS} 与 N_{MC} 分别为 ADN 内的可调度机组数目、电化学储能数目与检修工作班组数目; N_T 为总调度时段数; Γ_{DR} 与 Γ_{IMR} 分别为 ADN 内可进行需求响应调控的负荷节点集合与待检修设备集合; C_b^{IMR} 与 $C_{z,t}^{\text{MC}}$ 分别为设备检修费用与检修人员工作成本。考虑到 MPS 在节点之间移动所消耗的是自身

所配置的燃料/电能，因此不纳入本文经济性目标中，只考虑其向ADN输送的电能。

风险性成本 C_{risk} 的计算公式为

$$C_{\text{risk}} = \sum_{s \in \Gamma_{\text{Fail}}} \sum_{t=1}^{N_T} \varepsilon_{s,t} P_{s,t}^{\text{cut}} \Delta t \quad (19)$$

式中， Γ_{Fail} 为待检修设备故障事件的集合； $P_{s,t}^{\text{cut}}$ 为 t 时刻待检修设备故障事件 s 导致系统功率损失的期望值； $\varepsilon_{s,t}$ 为 t 时刻待检修设备故障事件 s 对应的发生概率，可通过各个待检修设备的故障概率计算，公式为

$$\varepsilon_{s,t} = f(\varepsilon_{1,t}, \varepsilon_{2,t}, \dots, \varepsilon_{b,t}) \quad (20)$$

式中， $f(\cdot)$ 为故障事件发生概率的函数； $\varepsilon_{b,t}$ 为待检修电池簇 b 在 t 时刻发生故障的概率，公式为

$$\varepsilon_{b,t} = \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \left(\frac{t}{\gamma_2} \right)^{\gamma_3} + \varepsilon_{b,\text{ini}} \right) u_{b,t}^{\text{pIMR}} \quad (21)$$

式中， γ_1 、 γ_2 与 γ_3 为待检修电池簇故障率的特征参数，通常由对应设备的历史统计数据拟合得到； $\varepsilon_{b,\text{ini}}$ 为待检修电池簇的初始故障率； $u_{b,t}^{\text{pIMR}}$ 为待检修设备的待检修状态变量，满足

$$u_{b,t}^{\text{pIMR}} = \begin{cases} 0, & t \geq t_b^{\text{IMR,begin}} \\ 1, & 0 < t < t_b^{\text{IMR,begin}} \end{cases} \quad (22)$$

式中， $t_b^{\text{IMR,begin}}$ 为待检修电池簇 b 检修工作开始的时间。

2.2 约束条件

所提储能电站检修优化模型的约束条件主要包括检修工作班组（Maintenance Crew, MC）工作约束与ADN运行约束两个方面。

2.2.1 MC工作约束

(1) 设备检修状态约束

$$\sum_{b \in \Gamma_{\text{IMR}}} u_{b,t}^{\text{IMR}} \leq N_{\text{MC}} \quad (23)$$

$$u_{b,t}^{\text{IMR}} = \begin{cases} 0, & t < t_b^{\text{IMR,begin}} \cup t \geq t_b^{\text{IMR,begin}} + \tau_b^{\text{IMR}} \\ 1, & t_b^{\text{IMR,begin}} \leq t < t_b^{\text{IMR,begin}} + \tau_b^{\text{IMR}} \end{cases} \quad (24)$$

式中， $u_{b,t}^{\text{IMR}}$ 为待检修电池簇 b 的检修状态变量； τ_b^{IMR} 为待检修电池簇 b 检修工作所持续的时长。

(2) 检修人员工作约束

$$\begin{cases} \sum_{b \in \Gamma_{\text{IMR}}} u_{b,t}^{\text{MC}} \leq 1 \\ \sum_{z=1}^{N_{\text{MC}}} u_{z,b,t}^{\text{MC}} \leq u_{b,t}^{\text{IMR}} \end{cases} \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} \sum_{z=1}^{N_{\text{MC}}} u_{z,b,t}^{\text{MC}} = \tau_b^{\text{IMR}} \quad (26)$$

$$\begin{cases} t_{z,b}^{\text{IMR,begin}} \geq t_b^{\text{IMR,begin}} \\ t_{z,b}^{\text{IMR,end}} \leq t_b^{\text{IMR,begin}} + \tau_b^{\text{IMR}} \\ t_{z,b}^{\text{IMR,end}} - t_{z,b}^{\text{IMR,begin}} \leq \tau_{z,\text{max}} \end{cases} \quad (27)$$

$$u_{z,b,t}^{\text{MC}} = \begin{cases} 0, & t < t_{z,b}^{\text{IMR,begin}} \\ 1, & t_{z,b}^{\text{IMR,begin}} \leq t \leq t_{z,b}^{\text{IMR,end}} \end{cases} \quad (28)$$

式中， $u_{z,b,t}^{\text{MC}}$ 为检修班组 z 对于待检修电池簇 b 的工作状态； $t_{z,b}^{\text{IMR,begin}}$ 与 $t_{z,b}^{\text{IMR,end}}$ 分别为检修班组 z 针对待检修电池簇 b 检修工作的开始、结束时刻； $\tau_{z,\text{max}}$ 为检修班组 z 持续工作时长的上限。

2.2.2 ADN运行约束

(1) 潮流约束

采用线性化的DistFlow方法建立ADN潮流约束，具体的约束形式详见文献[21]。

(2) 常规机组运行约束

$$\begin{cases} P_{l,\text{min}} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\text{max}} \\ Q_{l,\text{min}} \leq Q_{l,t} \leq Q_{l,\text{max}} \\ -v_{l,\text{max}} \leq P_{l,t} - P_{l,t-1} \leq v_{l,\text{max}}, \quad \forall t \geq 2 \end{cases} \quad (29)$$

式中， $P_{l,\text{max}}$ 与 $P_{l,\text{min}}$ 分别为可调度机组 l 有功出力的上、下限； $Q_{l,\text{max}}$ 与 $Q_{l,\text{min}}$ 分别为可调度机组 l 无功出力的上、下限； $P_{l,t}$ 与 $Q_{l,t}$ 为可调度机组 l 在 t 时刻有功与无功出力的实际值； $v_{l,\text{max}}$ 为可调度机组 l 的最大爬坡速率。

(3) 分布式电源运行约束

$$\begin{cases} P_{h,t} = P_{h,t}^{\text{pre}} + P_{h,t}^{\text{err}} \\ -\delta_{h,t} P_{h,t}^{\text{err,max}} \leq P_{h,t}^{\text{err}} \leq \delta_{h,t} P_{h,t}^{\text{err,max}} \\ \sum_{h=1}^{N_{\text{REG}}} \delta_{h,t} = \sigma_t \\ |Q_{h,t}| \leq P_{h,t}^{\text{pre}} \tan(\arccos(\varphi_h)) \end{cases} \quad (30)$$

式中， h 为分布式电源的编号索引； N_{REG} 为ADN内分布式电源的数目； $P_{h,t}$ 、 $P_{h,t}^{\text{pre}}$ 、 $P_{h,t}^{\text{err}}$ 、 $P_{h,t}^{\text{err,max}}$ 与 $\delta_{h,t}$ 分别为分布式电源 h 在 t 时刻有功出力的实际值、预测值、预测误差、预测误差最大值以及误差区间调节系数； σ_t 为分布式电源的鲁棒成本系数； $Q_{h,t}$ 为分布式电源 h 在 t 时刻无功出力的实际值； φ_h 为分布式电源 h 的功率因数。

(4) ESPS运行约束

$$\begin{cases} u_{e,t}^{\text{BES,d}} + u_{e,t}^{\text{BES,c}} \leq 1 \\ u_{b,t}^{\text{d}} \leq u_{e,t}^{\text{BES,d}}, \forall b \in \Gamma_{\text{BES},e} \\ u_{b,t}^{\text{c}} \leq u_{e,t}^{\text{BES,c}}, \forall b \in \Gamma_{\text{BES},e} \end{cases} \quad (31)$$

式中, $\Gamma_{\text{BES},e}$ 为储能电站 e 内电池簇的集合; $u_{e,t}^{\text{BES,c}}$ 与 $u_{e,t}^{\text{BES,d}}$ 分别为储能电站 e 整体的充、放电状态变量; $u_{b,t}^{\text{c}}$ 与 $u_{b,t}^{\text{d}}$ 分别为储能电站 e 内电池簇 b 在 t 时刻的充、放电状态变量。

当电池簇 b 的检修工作开始后, 有

$$u_{b,t}^{\text{d}} = u_{b,t}^{\text{c}} = 0, \quad t_b^{\text{IMR,begin}} \leq t < t_b^{\text{IMR,begin}} + t_b^{\text{IMR}} \quad (32)$$

检修过程中, 电池簇的能量约束与正常运行情况相同, 此处不作赘述。而储能电站 e 的能量约束为^[22]

$$\begin{cases} P_{e,t}^{\text{BES}} = P_{e,t}^{\text{BES,d}} - P_{e,t}^{\text{BES,c}} \\ P_{e,t}^{\text{BES,d}} = \sum_{b \in \Gamma_{\text{BES},e}} P_{b,t}^{\text{d}} \\ P_{e,t}^{\text{BES,c}} = \sum_{b \in \Gamma_{\text{BES},e}} P_{b,t}^{\text{c}} \end{cases} \quad (33)$$

$$\sum_{t=1}^{N_T} P_{e,t}^{\text{BES,c}} \eta_e^{\text{c}} \Delta t + \sum_{t=1}^{N_T} \frac{P_{e,t}^{\text{BES,d}}}{\eta_e^{\text{d}}} \Delta t \leq I_{e,\text{max}} \quad (34)$$

式中, $P_{b,t}^{\text{c}}$ 与 $P_{b,t}^{\text{d}}$ 分别为电池簇 b 在 t 时刻充、放电功率的实际值; $P_{e,t}^{\text{BES,c}}$ 与 $P_{e,t}^{\text{BES,d}}$ 分别为储能电站 e 在 t 时刻充、放电功率的实际值; η_e^{c} 与 η_e^{d} 分别为储能电站 e 的充、放电效率; $I_{e,\text{max}}$ 为储能电站 e 日最大电能转移量。

(5) 上级电网购电功率约束

$$0 \leq P_{\text{sup},t} \leq P_{\text{sup},\text{max}} \quad (35)$$

式中, $P_{\text{sup},t}$ 为ADN在 t 时刻的购电功率; $P_{\text{sup},\text{max}}$ 为ADN的上级电网购电功率上限。

(6) 系统功率平衡与备用约束

系统确定性备用约束及其不确定边界公式为^[23]

$$\sum_{m=1}^{N_{\text{MPS}}} P_{m,t} + \sum_{l=1}^{N_{\text{DU}}} P_{l,t} + P_{\text{sup},t} + \sum_{e=1}^{N_{\text{ESPS}}} P_{e,t}^{\text{BES}} \leq \frac{1}{L+1} \left(\sum_{l=1}^{N_{\text{DU}}} P_{l,\text{max}} + P_{\text{sup},\text{max}} + \sum_{e=1}^{N_{\text{ESPS}}} P_{e,\text{max}}^{\text{BES,d}} + \right. \quad (36)$$

$$\left. \sum_{m=1}^{N_{\text{MPS}}} u_{m,t} P_{m,\text{max}} - L(\lambda_{1,t} + \lambda_{2,t}) \sum_{h=1}^{N_{\text{REG}}} \delta_{h,t} P_{h,t}^{\text{err,max}} \right) \quad (37)$$

$$\sum_{h \in N_{\text{REG}}} Q_{h,t} + \sum_{l \in N_{\text{DU}}} Q_{l,t} = \sum_{i \in N_{\text{Load}}} Q_{i,t}^{\text{Load}} + Q_{\text{AC},t}$$

式中, L 为ADN负荷的预测误差; $\lambda_{1,t}$ 与 $\lambda_{2,t}$ 为拉格朗日对偶变量, 可通过可调鲁棒优化方法计算得到。

(7) 多类型灵活资源运行约束

EPSV、MESS与DR等灵活资源的约束参考式(1)~式(15), 此处不作赘述。

3 模型求解方法

本文的优化模型为多目标优化模型, 存在不同优化目标的量纲差异导致解析法难以求解的问题, 且涉及到混合整数线性规划问题的求解。因此, 本文采用宽容分层序列法与Gurobi优化求解器相结合的方法进行求解^[24]。其中, 宽容分层序列法的基本原理为: 对多个模型优化目标进行重要度排序并求得相应的最优值, 然后通过给定相应的宽容系数 ξ 以设置不同目标最优值的允许偏差, 并进行逐层求解, 最终得到可以兼顾多个模型优化目标的理想解。宽容系数 ξ 的取值表征了对于模型不同优化目标的重视程度, 可依据实际情况在求解过程中按需调整。

为求解得到兼顾风险性成本与经济性成本的检修策略, 设定检修风险性成本为一级优化目标, 检修经济性成本为二级优化目标。具体流程如图1所示。

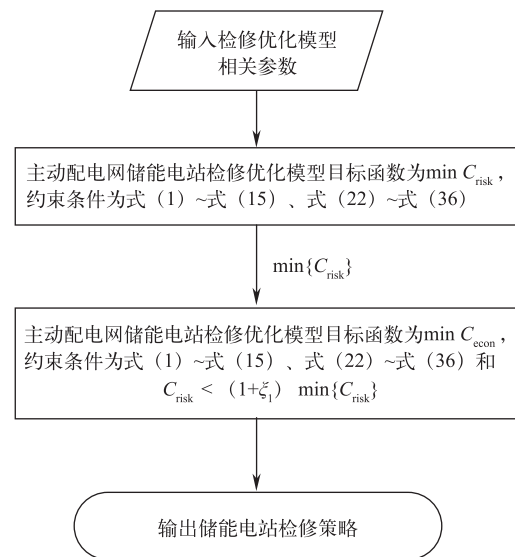


图1 模型求解流程

Fig. 1 Model solving process

4 算例分析

4.1 算例参数设置

(1) 主动配电网参数设置

改进IEEE 33节点系统作为主动配电网的拓扑，如图2所示。

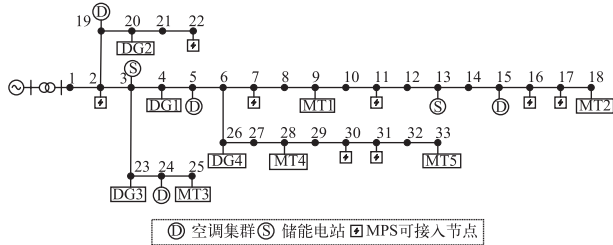


图2 算例拓扑图

Fig. 2 Topology of simulation system

系统在节点9、18、25、28及33处分别设有微型燃气轮机发电机组，编号依次为MT1~MT5，具体参数见文献[25]；储能电站接入节点3与节点13，其具体参数见表1；在节点4、20、23以及26处接入光伏机组，依次命名为DG1~DG4，其容量依次为0.7 MW、0.8 MW、0.5 MW与0.4 MW。

表1 储能电站参数

Tab. 1 Parameters of the ESPS

参数	ESPS1 取值	ESPS2 取值
电池簇数目	10	5
电池簇容量/MW·h	1.0	2.0
电池簇最大功率/MW	0.5	1.0
充放电效率	0.9	0.85
SOC 变化幅度	0.1/0.9	0.1/0.9
初始 SOC	0.6	0.6
最大电能转移量/MW·h	20	18

常规负荷需求及光伏出力数据选取我国华中某地区典型日的相关数据，其预测曲线如图3所示。负荷总需求值为 $(10.65+j1.80)$ MV·A，负荷与新能源出力的预测误差限值设置为10%。

算例所用的空调集群位于节点5、15、19与24处，其中空调参数具体见表2。所用EPSV与MESS的参数设置是基于文献[26]的算例数据。

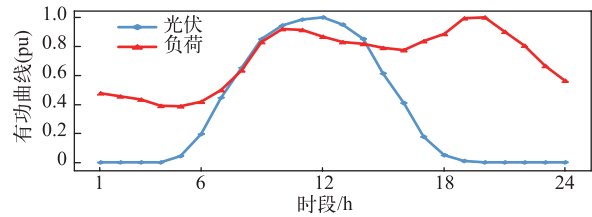


图3 负荷需求与光伏出力预测曲线

Fig. 3 Load demands and PV output forecast curves

表2 空调集群参数

Tab. 2 Parameters of IAC cluster

参数	IAC1	IAC2	IAC3	IAC4
μ_1	0.286 5	0.249 4	0.360 4	0.263 6
μ_2/MW^{-1}	0.713 5	0.720 6	0.716 4	0.736 4
μ_3	3.863 6	4.064 1	3.464 6	3.987 6
$\mu_4/^{\circ}\text{C}^{-1}$	0.142 7	0.150 1	0.127 9	0.147 3
$E_{\text{SOC,ini}}$	0.48	0.36	0.58	0.64
$P_{\text{IAC,min}}/\text{MW}$	0.016	0.014	0.012	0.012
$P_{\text{IAC,max}}/\text{MW}$	0.256	0.224	0.192	0.192
$T_{\text{room}}^{\text{max}}/T_{\text{room}}^{\text{min}}$	27/22			

(2) 检修工作参数设置

算例设置4个待检修设备与2个检修班组，检修工作周期为1年，分为24个时段。待检修设备的参数见表3，对应的故障概率曲线如图4所示。

表3 待检修设备参数

Tab. 3 Parameters of the equipment to be overhauled

待检修设备编号	所在位置	检修所需时长/h
1	节点3 (ESPS1)	4
2	节点3 (ESPS1)	4
3	节点13 (ESPS2)	5
4	节点13 (ESPS2)	6

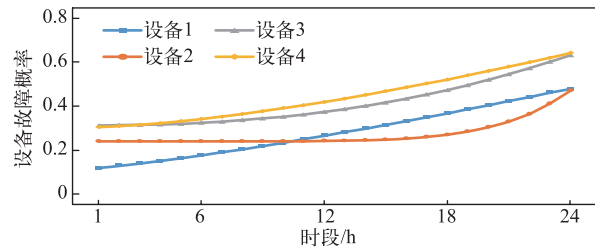


图4 设备故障概率曲线

Fig. 4 Equipment failure probability curves

4.2 算例结果分析

为说明所提检修优化策略的有效性，设置如下3个算例：

1) 算例A以最小化检修经济性成本与风险性成本为优化目标, 但不考虑多类型灵活资源的参与。

2) 算例B考虑多类型灵活资源的参与, 但仍以最小化检修经济性成本为优化目标。

3) 算例C为本文所提策略。

为探究宽容系数对于优化模型求解结果的影响, 本文基于算例A、算例C, 针对不同取值情况下宽容系数 ξ_1 对于检修风险性成本与经济性成本变化趋势的影响开展了分析。

ξ_1 在 $[0.1, 7]$ 之间变化时, 算例A与算例C的检修风险性成本与检修经济性成本变化趋势如图5所示。

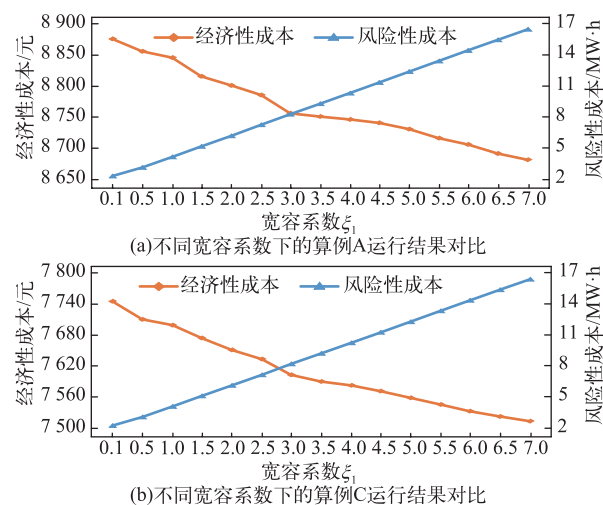


图5 不同宽容系数下的经济性成本与风险性成本对比结果

Fig. 5 Results of economic and risky costs under various tolerance factors

由图5可知, 检修经济性成本随着 ξ_1 的增大而逐渐减小。这是由于在以检修经济性成本为目标函数进行计算时, ξ_1 越大, 针对检修风险性成本的约束越松弛, 即系统允许延后的设备检修工作越多。因此, 检修工作过程中的系统功率缺口越小, 那么系统对于常规机组出力、空调需求响应以及向上级电网购电等计划的调整就越少, 进而越靠近ADN系统的经济最优检修方案, 使得检修经济性成本下降。而检修风险性成本则随着 ξ_1 的减小而逐渐减小。这是由于 ξ_1 越小, 针对检修风险性成本的约束越严格, ADN系统选择在

较早时段内开展各个设备的检修工作以获得更优的安全性, 从而使得检修风险性成本下降。

对比图5a与图5b可知, 在 $\xi_1 < 3$ 时, 检修经济性成本下降得较快, 且检修风险性成本的值相对较小; 而 $\xi_1 \geq 3$ 时, 检修经济性成本下降得较慢, 且检修风险性成本的值较大。检修工作应当兼顾电网运行的安全性与经济性, ξ_1 的取值应体现出较低的检修经济性成本与检修风险性成本。因此, 本文设定算例A与算例C的宽容系数 ξ_1 取值为3。

基于所设定的宽容系数, 求解得到算例A、算例B与算例C对应的检修经济性成本与风险性成本计算结果, 见表4。

表4 检修经济性成本与风险性成本对比

Tab. 4 Comparison of overhaul economical cost and risk cost

算例	检修经济性成本 / 元	检修风险性成本 / MW·h
A	8 755.40	8.164 1
B	7 500.49	17.548 8
C	7 591.11	8.084 2

由表4可以看出, 算例B的检修经济性成本最低, 但对应的检修风险性成本最高; 算例A的检修经济性成本最高, 但是检修风险性成本较低; 算例C的检修经济性成本介于算例A与算例B之间, 相应的检修风险性成本则最低。这也符合这3个算例的设置情况: 算例B的优化目标并未包含检修风险性成本, 求解得到的检修工作计划只考虑了经济性的需求, 没有考虑电化学储能及时检修的需求; 而算例A与算例C的优化目标综合考虑了检修经济性成本与风险性成本, 实现了电网经济运行与设备及时检修需求的平衡, 但算例A并未考虑移动式储能等资源的辅助, 因此经济性成本相对较高。对比算例A, 算例C在检修经济性成本上减少了13.30%; 对比算例B, 算例C在检修风险性成本上减少了53.93%。

对应的储能电站检修计划安排情况对比如图6所示。

结合图6b分析可知, 算例B获得的经济最优检修方案将储能电站的检修工作安排在光伏高发时段附近, 此时可以最大程度上使用新能源出

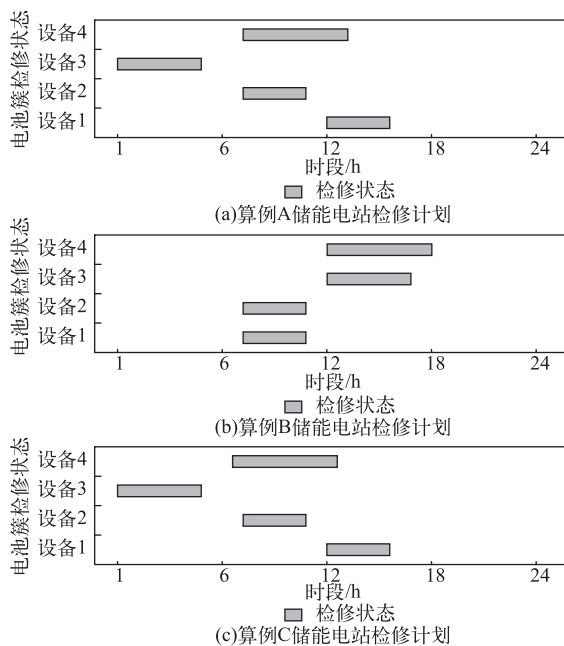


图6 储能电站检修计划对比

Fig. 6 Overhaul plans for energy storage power stations

力,满足配电网因安排设备检修而产生的功率需求缺额,尽可能减少上级电网购电量与需求响应调节量,以提升配电网整体的经济性。

而算例A与算例C为了降低电池簇未及时检修引发的故障风险,会尽可能提前安排故障概率较高、容量较大的电池簇进行检修,图6a与图6c中各设备的检修顺序与图4中的故障概率也有所对应。此外,算例A与算例C为了保障检修工作的经济性,也会安排在光伏高发时段进行部分检修工作,既降低了电池簇未及时检修所带来风险,又避免了因电池簇大规模停运检修而出现过大的配电网功率缺额问题。

为进一步验证多类型灵活资源对于检修工作的支撑作用,进行不同场景下算例A与算例C的对比,具体设置见表5。

表5 检修场景设置

Tab.5 Overhaul scenario setting

场景	具体情况设置
基准场景	本文算例场景
场景1	各电池簇的运行状况恶化,所需检修时长均延长2 h,故障概率提高20%
场景2	ESPS2增加一组待检修电池簇,参数与设备4相同

在不同场景下,算例A、算例C的检修结果

对比情况见表6、表7。

表6 不同场景下检修经济性成本对比

Tab. 6 Comparison of overhaul economical cost under different scenarios

(单位:元)

场景	算例A经济性成本	算例C经济性成本
基准场景	8 755.40	7 591.11
场景1	8 995.44	7 816.10
场景2	9 520.44	8 341.00

表7 不同场景下检修风险性成本对比

Tab. 7 Comparison of overhaul risk cost under different scenarios

(单位: MW·h)

场景	算例A风险性成本	算例C风险性成本
基准场景	8.164 1	8.084 2
场景1	13.933 6	12.868 4
场景2	18.038 8	17.531 2

对比表6与表7的数据可以看出,算例A与算例C对应的经济性成本与风险性成本会随着储能设备运行状况的恶化与检修任务的加重而逐渐上升,说明检修场景越恶劣,电化学储能检修的经济成本就越高,面临的风险也越大。此外,场景1与场景2下,算例C在检修风险性成本方面分别下降了1.065 2 MW·h与0.507 6 MW·h,在检修经济性成本方面则分别下降了1 179.34元与1 179.44元,相较于基准场景的降幅均有所增加,说明检修场景的逐步恶化会凸显多类型灵活资源对于电化学储能检修工作的辅助效果,证明了本文所提优化策略的有效性。

5 结束语

本文针对配电网电化学储能的检修计划优化问题,建立了考虑多类型灵活资源辅助的电化学储能电站检修多目标优化模型。通过分析不同类型灵活资源运行特性与电网检修工作需求,提出了一种综合考虑经济性与安全性的电化学储能检修策略。通过算例仿真验证,所得结论如下:

1) 多类型灵活资源可以在配电网检修过程中提供额外的功率支撑,显著提高了配电网检修工作的经济性,证明了其在实际配电网中的应用潜力。

2) 所提电化学储能电站检修优化策略在提升配电网检修工作经济性的同时, 可以尽可能减少因储能设备检修不及时所带来的风险性成本, 对于实际工程具有一定的参考价值。

3) 不同检修场景下, 在保障安全性的同时, 所提策略对于电化学储能检修工作经济性的提升效果并未随着检修场景的恶化而减弱, 证明了所提策略针对不同检修场景的适用性与优越性。

需要注意的是, 本文着眼于电化学储能检修优化策略的研究和验证, 未考虑变压器、电力电缆等设备发生故障的情况, 经济性与风险性成本的计算中也未考虑市场变化等因素的影响。后续可在此基础上研究电网设备检修协同优化策略, 以进一步提升电网检修工作的经济性与安全性。

参考文献

- [1] 魏韡, 范越, 谢睿, 等. 平抑高比例新能源发电功率波动的风-光-储容量最优配比[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 138-147.
- [2] 赵立军, 张秀路, 韩丽维, 等. 基于多场景的配电网分布式光伏及储能规划[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 460-468.
- [3] 林毅, 林威, 吴威, 等. 电化学储能和抽水蓄能电站参与多市场联合运行价值分析[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 175-185.
- [4] LIU W, XU Y. Data-driven online health estimation of Li-ion batteries using a novel energy-based health indicator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1715-1718.
- [5] 唐学军, 谭忠富, 李智威, 等. 基于AHP-熵权法的配电网设备资产运检成本优化配置模型[J]. 电力建设, 2022, 43(10): 166-172.
- [6] 潘乐真, 鲁国起, 张焰, 等. 基于风险综合评判的设备状态检修决策优化[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 28-32, 66.
- [7] 徐波, 韩学山, 李业勇, 等. 电力设备机会维修决策模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6379-6388, 6603.
- [8] 袁野, 王慧芳, 应高亮, 等. 基于最小累积风险度的电网等风险检修决策[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 151-155.
- [9] 许易经, 韩学山, 王勇, 等. 关联设备时变性能的状态检修决策模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1457-1466.
- [10] 陈丽光, 何绍洋, 俞晓峰, 等. 考虑设备故障率时变特性的电网检修计划优化编制[J]. 智慧电力, 2020, 48(12): 109-115.
- [11] 赵洪山, 李宇昊. 基于比例强度模型的变压器不完全检修策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 179-183, 191.
- [12] 陈亭轩, 徐潇源, 严正, 等. 基于深度强化学习的光储充电站储能系统优化运行[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 90-98.
- [13] WEN J Y, LIU J, LONG Y. Solution to short-term frequency response of wind farms by using energy storage systems[J]. IET Renewable Power generation, 2016, 10(5): 669-678.
- [14] NING Z, HU Z, BO S, et al. A source-grid-load coordinated power planning model considering the integration of wind power generation[J]. Applied Energy, 2016, 168: 13-24.
- [15] 王廷涛, 苗世洪, 张松岩, 等. 基于状态评估的多类型储能系统检修优化策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 234-243.
- [16] 谭鸣骢, 王玲玲, 蒋传文, 等. 考虑负荷聚合商调节潜力的需求响应双层优化模型[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 32-44.
- [17] 李可铭, 王育飞. 考虑移动式储能辅助的有源配电网多目标孤岛运行策略[J/OL]. 现代电力, 1-12[2024-07-21].
- [18] 刘志伟, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 计及温度不确定性的配电网广义储能分层调控策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(21): 5794-5807.
- [19] 吴桐, 惠红勋, 张洪财. 商业建筑空调系统参与城市电网负荷调控综述[J]. 中国电力, 2023, 56(7): 1-11.
- [20] 中国电力企业联合会. 电化学储能电站检修试验

- 规程：GB/T 42315—2023[S]. 北京：中国电力出版社，2023.
- [21] 张世旭，李姚旺，刘伟生，等. 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J]. 电力系统自动化，2024，48(1)：21-30.
- [22] 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.
- [23] 叶畅，苗世洪，李姚旺，等. 基于改进不确定边界的主动配电网鲁棒优化调度[J]. 电工技术学报，2019，34(19)：4084-4095.
- [24] 武姝凝，李华强，刘洋，等. 考虑供热系统精细化建模的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 电网技术，2023，47(5)：1979-1992.
- [25] 张进，胡存刚，芮涛. 基于交替方向乘子法的主
- 动配电网日前两阶段分布式优化调度策略[J]. 中国电力，2021，54(5)：91-100.
- [26] JIANG X, CHEN J, ZHANG W, et al. Two-step optimal allocation of stationary and mobile energy storage systems in resilient distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4)：788-799.

作者简介

蔡杰（1980—），男，硕士，高级工程师，研究方向为电网规划及设备运维。

何立钢（1998—），男，硕士研究生，研究方向微电网与配电网技术。

（收稿日期：2024-10-31）