

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250670

考虑线路灵活性承载度的储能备用容量多目标优化配置

黄昊^{1,2}, 吴浩²

(1. 国网江苏省电力有限公司扬州供电分公司, 江苏 扬州 225000; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对高比例风电接入引起的系统备用容量不足问题, 提出了一种考虑线路灵活性承载度的储能备用容量多目标优化配置方法。首先, 引入了线路灵活性承载度的概念, 构建了储能备用容量多目标优化配置模型。其次, 针对所构建的多目标优化模型, 提出了一种改进规格化法平面约束法进行求解, 避免了 Pareto 解集中包含局部支配解的情况。最后, 在修改的 IEEE39 节点系统中进行算例分析, 结果表明所提方法不仅可以有效缓解由高比例风电引起的备用不足问题, 而且可以为系统备用留出足够的输送空间。

关键词: 灵活性承载度; 储能优化配置; 多目标优化; 规格化法平面约束法

Multi-objective optimal allocation of energy storage reserve capacity considering line flexibility carrying capacity

HUANG Hao^{1,2}, WU Hao²

(1. Yangzhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Yangzhou 225000, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To address the problem of insufficient system reserve capacity caused by high wind farm penetration, a multi-objective optimal allocation method for energy storage reserve capacity considering line flexibility carrying capacity is proposed. First, the concept of line flexibility carrying capacity is introduced, and a multi-objective optimal model for energy storage reserve capacity allocation is constructed. Second, for solving the constructed multi-objective optimization model, an improved normalized normal constraint is proposed, which avoids the inclusion of locally dominated solutions in the Pareto solution set. Finally, case studies on the modified IEEE39-bus system show that the proposed method can not only effectively alleviate the reserve shortage problem caused by high wind power penetration, but also reserve sufficient transmission margin.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2066601).

Key words: flexibility carrying capacity; optimal allocation of energy storage; multi-objective optimization; normalized normal constraint method

0 引言

在“双碳”目标的持续推进下, 以新能源为主体的新型电力系统正在快速发展。然而, 风电装机容量的持续增长为新型电力系统的安全运行带来了新的挑战^[1-4]。一方面, 风电固有的不确定性使系统的备用需求增大^[5-6]; 另一方面, 传统火电机组被逐渐替代, 导致传统备用容量逐渐减少。电力系统备用不足的问题日益凸显, 深入挖掘现有的备用资源是解决这一问题的关键。

针对风电接入引起的系统备用容量不足的问题, 主要有以下两种解决方法^[7]。1) 利用需求响应: 基于用户与电网企业签订的协议, 需求响应通过经济补偿激励用户参与负荷削减项目, 从而增强系统备用容量^[7-8]。2) 利用风电备用容量: 在电力市场环境下, 由于风电的低成本以及反调峰特性, 能源市场可能会出现低电价甚至负电价的情况, 从而激励风电企业参与辅助服务市场提供备用, 提升收益, 从而缓解系统备用压力^[7,9]。除上述两种解决方案以外, 储能作为灵活性调节资源的典型代表, 可以满足新型电力系统的功率和能量平衡需求^[10], 具备缓解系统备用压力的潜力。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2066601)

现阶段, 已有大量关于储能在不同方面的应用研究。根据应用场景的不同, 储能可以分为电源侧储能、用户侧储能和电网侧储能^[10-11]。1) 电源侧储能的功能主要包括: 平滑新能源出力波动、新能源处理计划跟踪、快速调频等^[12-14]; 2) 用户侧储能的功能主要包括: 参与市场调节、改善电能质量、削峰填谷等^[15-17]; 3) 电网侧储能的功能主要包括: 调峰调频、改善潮流分布、提高系统稳定性等^[18-20]。然而, 在现有的储能应用研究中, 鲜有通过配置储能以缓解系统备用压力的相关研究。目前, 随着储能技术的快速发展, 容量大、放电持续时间长的能量型储能技术应用广泛, 使储能具有向系统提供备用的能力^[10], 通过合理的配置有助于解决系统备用不足的问题。

系统总备用容量需求一般按照最大单机容量、负荷百分比、直流双极闭锁或者多因素相结合的方式确定^[21]。在电力系统传统的调度、规划模型中, 通常仅考虑系统总备用容量约束, 即系统总备用容量不小于总备用需求^[22]。然而, 系统在实际运行过程中可能会出现系统备用充足, 但因网络传输灵活性不足而导致备用不可用的情况^[22-23]。因此, 在解决系统备用不足问题的同时, 有必要考虑网络传输灵活性, 为系统备用资源提供有效的传输通道。线路灵活性承载度(flexibility carrying capacity, FCC)是一个描述网络传输灵活性的综合性指标, 其考虑了新能源、负荷的不确定性, 能够量化线路对系统灵活性资源的承载能力^[24-25]。在规划模型中考虑灵活性承载度可以有效解决传输通道限制导致灵活性不足的问题, 有利于新能源的消纳与电网安全运行^[25]。因此, 在储能优化配置模型中考虑线路灵活性承载度具有切实意义。

本文针对风电接入引起的系统备用容量不足的问题, 提出了一种考虑线路灵活性承载度的储能备用容量优化配置方法。针对所构建的多目标优化配置模型, 提出了一种改进规格化法平面约束(normalized normal constraint, NNC)法进行求解, 并基于模糊隶属度函数选择最优折中解。算例结果验证了本文所提方法的有效性。

1 线路灵活性承载度

线路灵活性承载度用于定量描述电网线路在电力系统灵活性供需平衡中的作用^[24], 具备一定灵活性承载度的线路能为系统资源的调配及新能源消纳提供有效传输通道。线路灵活性承载度与线路灵活性调节容量和线路灵活性需求传输量有关。

1) 线路灵活性调节容量

线路灵活性调节容量是当前时刻线路还能容纳的灵活性调节量, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{l,t}^{\text{ACC},+} = P_l^{\text{max}} - P_{l,t} \\ P_{l,t}^{\text{ACC},-} = P_{l,t} - (-P_l^{\text{max}}) = P_l^{\text{max}} + P_{l,t} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{l,t}^{\text{ACC},+}$ 、 $P_{l,t}^{\text{ACC},-}$ 分别为线路 l 在 t 时段上、下调灵活性调节容量; P_l^{max} 为线路 l 的最大传输容量; $P_{l,t}$ 为线路 l 在 t 时段的传输功率。

2) 线路灵活性需求传输量

线路灵活性需求传输量是节点灵活性需求所引起的线路传输量的变化量。其中, 考虑新能源、负荷的不确定性, 节点灵活性需求量定义如式(2)所示。

$$\begin{cases} D_{i,t}^{\text{N,max}} = (P_{i,t}^{\text{L,max}} - P_{i,t}^{\text{RES,min}}) - (P_{i,t}^{\text{L}} - P_{i,t}^{\text{RES}}) \\ D_{i,t}^{\text{N,min}} = (P_{i,t}^{\text{L,min}} - P_{i,t}^{\text{RES,max}}) - (P_{i,t}^{\text{L}} - P_{i,t}^{\text{RES}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $D_{i,t}^{\text{N,max}}$ 、 $D_{i,t}^{\text{N,min}}$ 分别为节点 i 在 t 时段灵活性需求量的最大、最小值; $P_{i,t}^{\text{L}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{RES}}$ 分别为负荷、新能源的功率预测值; $P_{i,t}^{\text{L,max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{L,min}}$ 分别为负荷功率波动的上、下限; $P_{i,t}^{\text{RES,max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{RES,min}}$ 分别为新能源功率波动的上、下限。

线路灵活性需求传输量和节点灵活性需求量之间通过功率传输分布因子关联, 功率传输分布因子描述了节点注入功率变化对线路传输功率的影响, 可以通过直流潮流模型中的电纳矩阵求逆获得, 在此不作赘述。记 $D_{i,t}^{\text{N}} (D_{i,t}^{\text{N,min}} \leq D_{i,t}^{\text{N}} \leq D_{i,t}^{\text{N,max}})$ 为节点 i 在 t 时段的灵活性需求量, 即节点 i 在 t 时段净负荷的变化量, 则节点 i 在 t 时段注入功率的变化量为 $-D_{i,t}^{\text{N}}$ 。线路 l 在 t 时段的灵活性需求传输量表达式为

$$D_{l,t}^{\text{L}} = \sum_{i=1}^N A_{l,i} (-D_{i,t}^{\text{N}}) \quad (3)$$

式中: $D_{l,t}^{\text{L}}$ 为线路 l 在 t 时段的灵活性需求传输量; N 为节点数量; $A_{l,i}$ 为功率传输分布因子, 即节点 i 注入功率增加 1, 则线路 l 传输功率增加 $A_{l,i}$ 。

记 $D_{l,t}^{\text{L,max}}$ 、 $D_{l,t}^{\text{L,min}}$ 分别为线路 l 在 t 时段灵活性需求传输量的最大、最小值, 由式(3)可知, 当 $A_{l,i} > 0$ 时令 $D_{i,t}^{\text{N}} = D_{i,t}^{\text{N,min}}$ 、 $A_{l,i} < 0$ 时令 $D_{i,t}^{\text{N}} = D_{i,t}^{\text{N,max}}$, $D_{l,t}^{\text{L}}$ 可取到最大值 $D_{l,t}^{\text{L,max}}$; 当 $A_{l,i} > 0$ 时令 $D_{i,t}^{\text{N}} = D_{i,t}^{\text{N,max}}$ 、 $A_{l,i} < 0$ 时令 $D_{i,t}^{\text{N}} = D_{i,t}^{\text{N,min}}$, $D_{l,t}^{\text{L}}$ 可取到最小值 $D_{l,t}^{\text{L,min}}$, 即

$$D_{l,t}^{\text{L,max}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} [A_{l,i} | (D_{i,t}^{\text{N,max}} - D_{i,t}^{\text{N,min}}) - A_{l,i} (D_{i,t}^{\text{N,max}} + D_{i,t}^{\text{N,min}})] \quad (4)$$

$$D_{l,t}^{L,\min} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} [|A_{l,i}| (D_{i,t}^{N,\min} - D_{i,t}^{N,\max}) - A_{l,i} (D_{i,t}^{N,\max} + D_{i,t}^{N,\min})] \quad (5)$$

$$P_{l,t}^{\text{NEED},+} = D_{l,t}^{L,\max}; P_{l,t}^{\text{NEED},-} = -D_{l,t}^{L,\min} \quad (6)$$

式中: $P_{l,t}^{\text{NEED},+}$ 、 $P_{l,t}^{\text{NEED},-}$ 分别为线路 l 在 t 时段上、下调灵活性需求传输量。

综上, 本文定义的线路灵活性承载度为

$$B_{l,t}^+ = \frac{P_{l,t}^{\text{ACC},+} - P_{l,t}^{\text{NEED},+}}{P_l^{\text{max}}} \quad (7)$$

$$B_{l,t}^- = \frac{P_{l,t}^{\text{ACC},-} - P_{l,t}^{\text{NEED},-}}{P_l^{\text{max}}} \quad (8)$$

式中: $B_{l,t}^+$ 、 $B_{l,t}^-$ 分别为线路 l 在 t 时段上、下调灵活性承载度。

2 储能备用容量优化配置模型

本节构建了考虑线路灵活性承载度的储能备用容量优化配置模型。

2.1 目标函数

目标函数包含系统运行成本最小化和系统规划成本最小化: 若仅追求前者最低, 则需配置更多储能, 导致规划成本增加; 若仅追求后者最低, 则更多依赖现有机组的备用能力, 导致运行成本增加。将两者简单相加作为单一目标函数, 难以揭示其内在的权衡关系, 因此本文将储能备用容量优化配置模型构建成一个多目标优化模型进行求解分析。

1) 系统运行成本最小化

$$\min F_1 = F_P + F_U + F_D + F_R^G + F_R^{\text{ES}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} F_P = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [a_i (P_{i,t}^G)^2 + b_i P_{i,t}^G + c_i u_{i,t}] \Delta T \\ F_U = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{i,t}^{\text{G,U}} \Delta T \\ F_D = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_{i,t}^{\text{G,D}} \Delta T \\ F_R^G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (c_i^{\text{G,+}} r_{i,t}^{\text{G,+}} + c_i^{\text{G,-}} r_{i,t}^{\text{G,-}}) \Delta T \\ F_R^{\text{ES}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (c_i^{\text{ES,+}} r_{i,t}^{\text{ES,+}} + c_i^{\text{ES,-}} r_{i,t}^{\text{ES,-}}) \Delta T \end{cases} \quad (10)$$

式中: F_1 为系统运行成本; F_P 、 F_U 、 F_D 、 F_R^G 、 F_R^{ES} 分别为发电成本、开机成本、停机成本、机组备用成本、储能备用成本; T 为调度总时段数; a_i 、 b_i 、 c_i 为机组发电成本系数; $P_{i,t}^G$ 为机组出力; $u_{i,t}$ 为 0-1 变量, 其值为 1 时则节点 i 处机组为开机状态, 反

之则为停机状态; ΔT 为调度时间间隔; $C_{i,t}^{\text{G,U}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{G,D}}$ 分别为机组开、停机费用; $c_i^{\text{G,+}}$ 、 $c_i^{\text{G,-}}$ 和 $c_i^{\text{ES,+}}$ 、 $c_i^{\text{ES,-}}$ 分别为机组、储能提供正负备用的单位容量成本; $r_{i,t}^{\text{G,+}}$ 、 $r_{i,t}^{\text{G,-}}$ 和 $r_{i,t}^{\text{ES,+}}$ 、 $r_{i,t}^{\text{ES,-}}$ 分别为机组和储能提供的正负备用容量。为便于求解, 一般对 F_P 分段线性化, 具体步骤可以参考文献[26], 此处不再赘述。

2) 系统规划成本最小化

$$\min F_2 = F_{\text{inv}} + F_{\text{maint}} \quad (11)$$

$$\begin{cases} F_{\text{inv}} = \frac{s(1+s)^{T_{\text{lifc}}}}{365[(1+s)^{T_{\text{lifc}}} - 1]} \sum_{i=1}^N (I_i^P P_i^{\text{ES}} + I_i^E E_i^{\text{ES}}) \\ F_{\text{maint}} = \sum_{i=1}^N I_i^M P_i^{\text{ES}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_2 为系统规划成本, 由日均投资成本 F_{inv} 、日均维护成本 F_{maint} 构成; s 为贴现率; T_{lifc} 为储能的使用年限; I_i^P 、 I_i^E 分别为节点 i 处配置储能的单位功率成本、单位容量成本; P_i^{ES} 、 E_i^{ES} 分别为节点 i 处配置储能的功率、容量; I_i^M 为节点 i 处配置储能的日均单位功率维护成本。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N (P_{i,t}^G + P_{i,t}^W) = \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^L + P_{i,t}^C - P_{i,t}^D) \quad (13)$$

式中: $P_{i,t}^W$ 、 $P_{i,t}^L$ 分别为典型日的风电功率、负荷功率; $P_{i,t}^C$ 、 $P_{i,t}^D$ 分别为储能的充、放电功率。

2.2.2 机组出力约束

$$u_{i,t} P_{i,t}^{\text{G,min}} \leq P_{i,t}^G \leq u_{i,t} P_{i,t}^{\text{G,max}} \quad (14)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{G,max}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{G,min}}$ 分别为机组出力的上、下限。

2.2.3 机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^G - P_{i,t-1}^G \leq R_i^+ \Delta T \\ P_{i,t-1}^G - P_{i,t}^G \leq R_i^- \Delta T \end{cases} \quad (15)$$

式中: R_i^+ 、 R_i^- 分别为机组的上、下爬坡率限值。

2.2.4 机组启停约束

$$\begin{cases} C_{i,t}^{\text{G,U}} \geq \max \{ H_i (u_{i,t} - u_{i,t-1}), 0 \} \\ C_{i,t}^{\text{G,D}} \geq \max \{ J_i (u_{i,t-1} - u_{i,t}), 0 \} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^{h(T_{i,\text{on}}^{\text{min}})-1} u_{i,t+m} \geq (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \cdot h(T_{i,\text{on}}^{\text{min}}) \\ \sum_{m=0}^{h(T_{i,\text{off}}^{\text{min}})-1} (1 - u_{i,t+m}) \geq (u_{i,t-1} - u_{i,t}) \cdot h(T_{i,\text{off}}^{\text{min}}) \\ h(T_{i,\text{on}}^{\text{min}}) = \min \{ T_{i,\text{on}}^{\text{min}}, T - t + 1 \} \\ h(T_{i,\text{off}}^{\text{min}}) = \min \{ T_{i,\text{off}}^{\text{min}}, T - t + 1 \} \end{cases} \quad (17)$$

式中: H_i 、 J_i 分别为机组的启动费用、停机费用;
 $T_{i,on}^{\min}$ 、 $T_{i,off}^{\min}$ 分别为机组最短开机、停机时长。

2.2.5 储能约束

储能约束包含配置数量约束、配置功率约束、配置电量约束, 具体如下所述。

1) 配置数量约束

$$\sum_{i=1}^N \gamma_i \leq N_{ES} \quad (18)$$

式中: γ_i 为储能配置结果的 0-1 变量, 其值为 1 时表示在节点 i 配置储能, 反之则不配置储能; N_{ES} 为储能的允许配置量。

2) 配置功率约束

$$\begin{cases} P_i^{ES} = \gamma_i P_i^{ES,pre} \\ \beta_{i,t}^C + \beta_{i,t}^D \leq \gamma_i \\ 0 \leq P_{i,t}^C \leq \beta_{i,t}^C P_i^{ES} \\ 0 \leq P_{i,t}^D \leq \beta_{i,t}^D P_i^{ES} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_i^{ES,pre}$ 为节点 i 储能所能配置的额定功率;
 $\beta_{i,t}^C$ 、 $\beta_{i,t}^D$ 分别为储能充、放电状态的 0-1 变量: (1) 当 $\beta_{i,t}^C = 1$ 且 $\beta_{i,t}^D = 0$ 时, 储能处于充电状态; (2) 当 $\beta_{i,t}^C = 0$ 且 $\beta_{i,t}^D = 1$ 时, 储能处于放电状态; (3) 当 $\beta_{i,t}^C = 0$ 且 $\beta_{i,t}^D = 0$ 时, 储能既不充电也不放电。

3) 配置电量约束

$$\begin{cases} E_i^{ES,min} \leq E_i^{ES} \leq E_i^{ES,max} \\ S_i^{min} E_i^{ES} \leq e_{i,t} \leq S_i^{max} E_i^{ES} \\ e_{i,t+1} = e_{i,t} + \left(\eta_i^C P_{i,t}^C - \frac{P_{i,t}^D}{\eta_i^D} \right) \Delta T \\ e_{i,0} = e_{i,T} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $E_i^{ES,max}$ 、 $E_i^{ES,min}$ 分别为节点 i 储能配置容量的上、下限; $e_{i,t}$ 为储能的剩余电量; S_i^{max} 、 S_i^{min} 分别为储能荷电状态的上、下限; η_i^C 、 η_i^D 分别为储能的充、放电效率。

2.2.6 系统备用约束

系统的备用容量由常规机组和储能提供, 所提供的总正负备用需要分别能够应对切负荷最劣场景(即负荷向上波动最大、风电向下波动最大)、弃风最劣场景(即风电向上波动最大、负荷向下波动最大)。同时, 常规机组需考虑其爬坡约束和最大功率约束、储能需考虑其最大功率约束和电量约束。具体如下所述。

1) 系统总备用约束

$$\begin{cases} r_{i,t}^{S,+} = \sum_{i=1}^N (r_{i,t}^{G,+} + r_{i,t}^{ES,+}) \\ r_{i,t}^{S,-} = \sum_{i=1}^N (r_{i,t}^{G,-} + r_{i,t}^{ES,-}) \\ r_{i,t}^{S,+} \geq \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{L,max} - P_{i,t}^L) + (P_{i,t}^W - P_{i,t}^{W,min}) \\ r_{i,t}^{S,-} \geq \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{W,max} - P_{i,t}^W) + (P_{i,t}^L - P_{i,t}^{L,min}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $r_{i,t}^{S,+}$ 、 $r_{i,t}^{S,-}$ 分别为系统所需的正、负备用; $r_{i,t}^{G,+}$ 、 $r_{i,t}^{ES,+}$ 分别为机组、储能提供的正备用; $r_{i,t}^{G,-}$ 、 $r_{i,t}^{ES,-}$ 分别为机组、储能提供的负备用; $P_{i,t}^{L,max}$ 、 $P_{i,t}^{L,min}$ 分别为负荷功率波动的上、下限; $P_{i,t}^{W,max}$ 、 $P_{i,t}^{W,min}$ 分别为风电功率波动的上、下限。

2) 机组备用约束

$$\begin{cases} 0 \leq r_{i,t}^{G,+} \leq \min\{R_i^+ \Delta t, u_{i,t} P_i^{G,max} - P_i^G\} \\ 0 \leq r_{i,t}^{G,-} \leq \min\{R_i^- \Delta t, P_i^G - u_{i,t} P_i^{G,min}\} \end{cases} \quad (22)$$

式中: Δt 为机组的备用响应时间。

3) 储能备用约束

$$\begin{cases} 0 \leq r_{i,t}^{ES,+} \leq \min\{P_i^{ES}, \frac{\eta_i^D}{\Delta T} (E_{i,t} - S_i^{min} E_i^{ES})\} \\ 0 \leq r_{i,t}^{ES,-} \leq \min\{P_i^{ES}, \frac{1}{\eta_i^C \Delta T} (S_i^{max} E_i^{ES} - E_{i,t})\} \end{cases} \quad (23)$$

2.2.7 系统安全约束

$$-P_l^{max} \leq \sum_{i=1}^N A_{l,i} (P_{i,t}^G + P_{i,t}^W + P_{i,t}^D - P_{i,t}^C - P_{i,t}^L) \leq P_l^{max} \quad (24)$$

式中: $A_{l,i}$ 为节点 i 注入功率对线路 l 的功率转移分布因子。

2.2.8 线路灵活性承载度约束

$$B_{l,t}^+ = \frac{P_{l,t}^{ACC,+} - P_{l,t}^{NEED,+}}{P_l^{max}} \geq \delta \quad (25)$$

$$B_{l,t}^- = \frac{P_{l,t}^{ACC,-} - P_{l,t}^{NEED,-}}{P_l^{max}} \geq \delta \quad (26)$$

式中: δ 为预留的线路灵活性承载度。

3 求解方法

第 2 节中所构建的储能多目标优化配置模型包含系统运行成本最小化、系统规划成本最小化两个目标, 可表示为

$$\begin{cases} \min(F_1, F_2) \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $g(x)$ 、 $h(x)$ 分别为式(13)一式(26)中的等式约

束和不等式约束。

传统的规格化法平面约束法是求解多目标问题的有效方法,其主要缺点是求得的 Pareto 解集中可能包含局部支配解^[27],不利于最终的决策。以式(27)所述最小化问题为例,若 Pareto 解集中有 A 和 B 两组解,假设 F_{Ak} 、 F_{Bk} 分别为 A、B 两组解中第 k 个目标函数的值,若 A 中所有目标函数均不劣于 B,即恒有 $F_{Ak} \leq F_{Bk}$,且 A 中至少有一个目标函数优于 B,即当 $k = k_0$ 时,有 $F_{Ak_0} < F_{Bk_0}$,则称 B 为支配解。针对这一问题,本文提出一种改进 NNC 法求取 Pareto 解集,并基于模糊隶属度函数选取最优折中解。

3.1 改进 NNC 法

3.1.1 NNC 法

NNC 法的基本思想是:在原多目标优化模型中,保留一个主目标函数,并添加由其余目标函数表示并按规律变化的规格化法平面约束^[28-29]。将原多目标优化问题转变为一系列单目标优化问题求解,得到 Pareto 前沿上的各点。以式(27)为例,具体步骤如下。

步骤 1: 分别构建以最小化 F_1 、 F_2 为目标的单目标优化问题。

$$\begin{cases} \min F_1 \\ \text{s.t. } g(x) = 0; \\ \quad h(x) \leq 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \min F_2 \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ \quad h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

求解以最小化 F_1 为目标的单目标优化问题可得到 F_1 的最小值 F_1^{\min} ,此时 F_2 的值为 F_2^{\max} ;求解以最小化 F_2 为目标的单目标优化问题可得到 F_2 的最小值 F_2^{\min} ,此时 F_1 的值为 F_1^{\max} 。

步骤 2: 规格化解空间以 $\bar{F}_1 = \frac{F_1 - F_1^{\min}}{F_1^{\max} - F_1^{\min}}$ 为

纵坐标,以 $\bar{F}_2 = \frac{F_2 - F_2^{\min}}{F_2^{\max} - F_2^{\min}}$ 为横坐标,如图 1 所示。

图 1 中,连接点 $A_1(0,1)$ 和点 $A_2(1,0)$ 的线为乌托邦线,设其中一点的坐标为 $(m,1-m)$,通过该点做乌托邦线的法线,即 $\bar{F}_1 = \bar{F}_2 + 1 - 2m$ 。定义法线左上方的区域为可行域,在约束条件中添加规格化法平面约束 $\bar{F}_1 \geq \bar{F}_2 + 1 - 2m$,即可保证在可行域内寻优,如式(29)所示。

$$\begin{cases} \min F_1 \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ \quad h(x) \leq 0 \\ \quad \bar{F}_1 \geq \bar{F}_2 + 1 - 2m \end{cases} \quad (29)$$

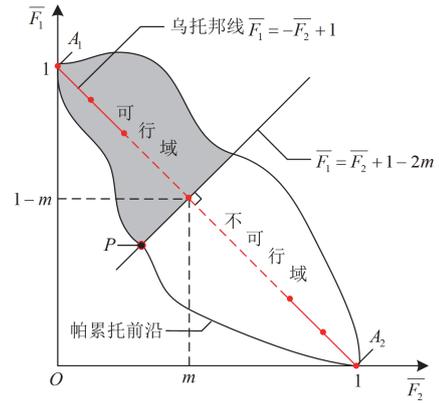


图 1 NNC 法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of NNC method

求解式(29)所述单目标优化问题可得到 Pareto 前沿上的点 P。

步骤 3: 将 m 在 $(0,1)$ 区间内均匀取值,重复求解式(29)则可以依次得到 Pareto 前沿上的各点,形成 Pareto 解集。

3.1.2 改进 NNC 法

尽管 NNC 法可以有效获得 Pareto 前沿上的各点,但由这些点构成的 Pareto 解集中可能包含局部支配解^[27],如图 2 所示。

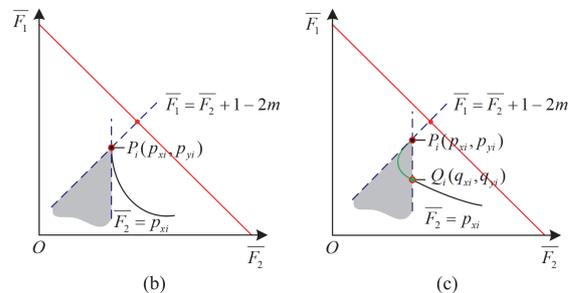
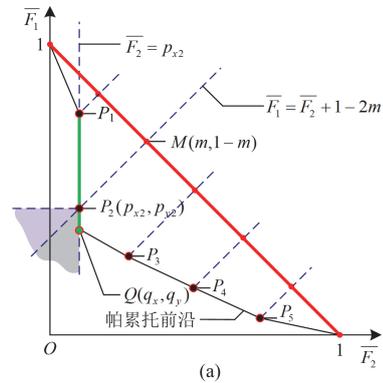


图 2 改进 NNC 法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of improved NNC method

图 2(a)中绿色线段为 Pareto 前沿上各支配解的集合,由支配解定义可知,该线段上各点均被端点

Q 所支配。不难看出, NNC 法所得 Pareto 解集中 P_1 、 P_2 为支配解, 且 P_2 支配 P_1 。为保证 Pareto 解集中各解均为非支配解, 在利用 NNC 法求得 Pareto 前沿上第 i 个点 $P_i(p_{xi}, p_{yi})$ 后, 应判断其是否为支配解并寻找支配 P_i 的最优解。

由支配解的定义可知, 若 Pareto 前沿存在支配 P_i 的解, 应在图 2(a) 所示的紫色区域和灰色区域内寻优, 由于 NNC 法已在紫色区域进行寻优, 故而此时仅需在灰色区域寻优, 即

$$\begin{cases} \min F_1 \\ \text{s.t. } g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \\ \bar{F}_1 \leq \bar{F}_2 + 1 - 2m \\ \bar{F}_2 \leq p_{xi} \end{cases} \quad (30)$$

求解式(30), 所得的优化结果为 $Q_i(q_{xi}, q_{yi})$ 。

若 $P_i(p_{xi}, p_{yi})$ 不是支配解, 则优化结果仍为 (p_{xi}, p_{yi}) , 即 $Q_i = P_i$, 如图 2(b) 所示; 若 (p_{xi}, p_{yi}) 被 Pareto 前沿上的其他点所支配, 则优化结果为寻优空间中支配 (p_{xi}, p_{yi}) 的最优解 $Q_i(q_{xi}, q_{yi})$, 如图 2(c) 所示。

综上所述, 改进 NNC 法的求解流程如图 3 所示, 具体步骤如下所述。

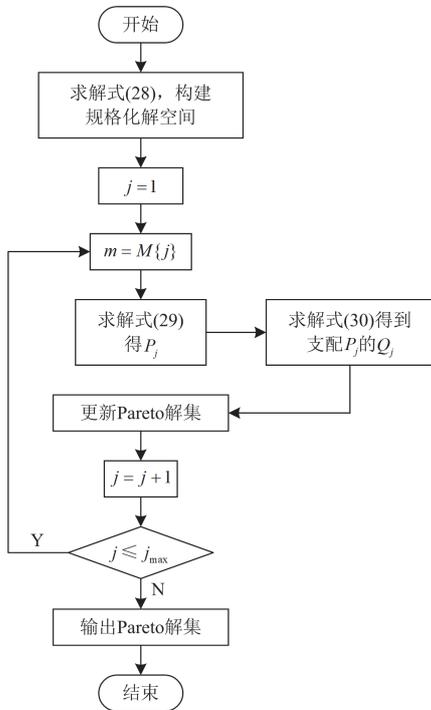


图 3 改进 NNC 法流程图

Fig. 3 Flowchart of improved NNC method

1) 求解式(28), 确定 F_1^{\min} 、 F_1^{\max} 、 F_2^{\min} 和 F_2^{\max} , 从而构建规格化解空间;

2) 设定 m 的取值集合 M , 其中 $M\{j\}$ 表示集合中的第 j 个元素, 从 $j=1$ 开始取值;

3) 将 $m = M\{j\}$ 代入式(29)求得 $P_j(p_{xj}, p_{yj})$;

4) 将 $m = M\{j\}$ 、 p_{xj} 代入式(30)求得 $Q_j(q_{xj}, q_{yj})$;

5) 将 $Q_j(q_{xj}, q_{yj})$ 加入 Pareto 解集, 并判断 m 是否已遍历集合 M : 令 $j = j + 1$, 若 $j \leq j_{\max}$, 则返回步骤 3); 反之, 则输出 Pareto 解集。

3.2 基于模糊隶属度函数选择最优折中解

在获取 Pareto 解集后, 决策者需要从中选取最优折中解以形成最终决策方案, 通过模糊隶属函数可以分析各解的满意度。由于本文的储能优化配置模型是一个以目标函数最小化为目标的优化模型, 因此选用最小值型模糊隶属度函数进行分析^[30], 如式(31)和式(32)所示。

$$\varphi_{jk} = \begin{cases} 1 & F_{jk} \leq F_k^{\min} \\ \frac{F_k^{\max} - F_{jk}}{F_k^{\max} - F_k^{\min}} & F_k^{\min} < F_{jk} < F_k^{\max} \\ 0 & F_{jk} \geq F_k^{\max} \end{cases} \quad (31)$$

$$\phi_j = \frac{1}{N_F} \sum_{k=1}^{N_F} \varphi_{jk} \quad (32)$$

式中: φ_{jk} 为 Pareto 解集中第 j 组解的第 k 个目标函数的满意度; F_{jk} 为第 j 组解的第 k 个目标函数的值; N_F 为目标函数的个数; ϕ_j 为第 j 组解的综合满意度。

综合满意度反映了解的优劣, 其值越大, 表明对应的解越好; 反之则越差^[30]。综合满意度最大的解为 Pareto 解集中最优折中解。

4 算例仿真

4.1 算例情况

本文采用修改的 IEEE39 节点系统进行优化分析, 该系统包含 10 个常规机组、2 个风电场和 46 条线路, 拓扑结构如图 4 所示。

10 个常规机组的出力、爬坡率等参数如表 1 所示, 其余参数见文献[22]; 两个风电场分别接于节点 2 和节点 6; 风电和负荷在典型日的预测功率如图 5 所示; 风电、负荷功率的波动范围均为预测值的 10%; 46 条线路中, 线路 5-6、30-2、6-31、32-10、20-19、33-19、34-20、35-22、36-23、37-25、38-29 的最大传输容量为 360 MW, 其余线路为 180 MW; 常规机组和储能的正、负备用成本均为 20 美元/MWh;

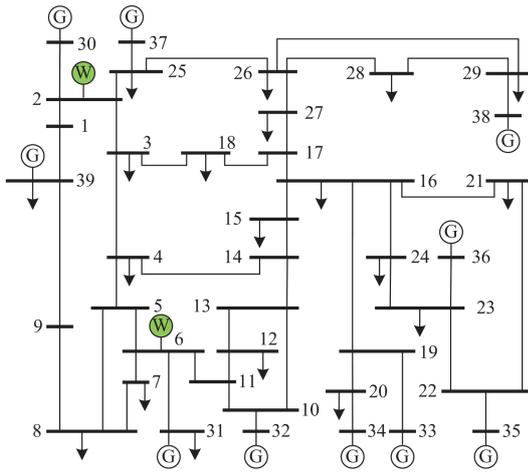


图 4 修改的 IEEE39 节点系统拓扑图

Fig. 4 Topology of modified IEEE39-bus system

表 1 常规机组参数

Table 1 Parameters of conventional units

机组	节点	$P_{i,j}^{G,max}/MW$	$P_{i,j}^{G,min}/MW$	R_i^+/MWh	R_i^-/MWh
1	30	300	150	100	100
2	31	300	150	100	100
3	32	130	20	40	40
4	33	130	20	40	40
5	34	162	25	55	55
6	35	80	20	30	30
7	36	85	25	30	30
8	37	55	10	20	20
9	38	55	10	20	20
10	39	55	10	20	20

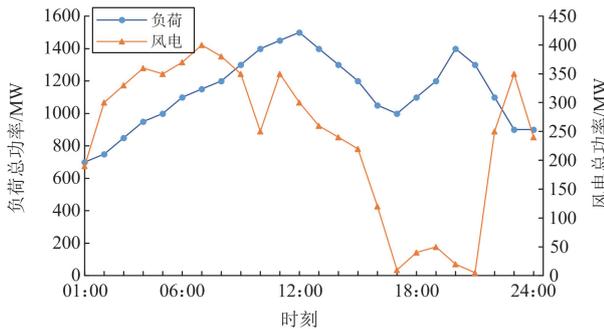


图 5 风电和负荷的功率预测值

Fig. 5 Predicted power value of wind farms and loads

调度总时段数 T 为 24 h; 调度时间间隔 ΔT 为 1 h; 机组的备用响应时间 Δt 为 15 min。

以风电、负荷功率水平较高的 12:00 为例, 此时风电、负荷功率分别为 300 MW 和 1500 MW。由于本文假设两者波动范围均为预测值的 10%, 由式 (21) 和式 (22) 可知此时系统所需的正、负备用均为

180 MW, 而常规机组所能提供的正、负备用均为 113.75 MW, 此时无法满足式 (21) 的总备用约束, 优化问题无解。其他时段存在类似情况, 合理配置储能有望改善现状。储能配置的相关参数如表 2 所示。

表 2 储能相关参数

Table 2 Relevant parameters of energy storage

参数名称	数值
储能额定功率/MW	50
储能容量规划范围/MWh	[75,150]
储能配置数量上限	3
储能单位功率成本/(美元/MW)	150 000
储能单位容量成本/(美元/MWh)	300 000
储能运行维护成本/(美元/MW)	20
储能充放电效率/%	95
储能 SOC 范围	[0.1,0.9]
初始 SOC	0.3
贴现率/%	8

基于本文所提模型, 在 MATLAB R2021b 上进行编程, 利用 Yalmip 工具包及 GUROBI 求解器进行建模及求解, 硬件环境为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @ 2.20 GHz 处理器, 8 GB 内存。

4.2 优化配置结果分析

4.2.1 优化配置结果

按照第 4 节所述流程对储能优化配置模型进行求解, 得到的 Pareto 解集如表 3 所示。

表 3 优化配置模型的 Pareto 解集

Table 3 Pareto solution set of the optimal allocation model

m	NNC		改进 NNC		综合满意度
	F_1 /美元	F_2 /美元	F_1 /美元	F_2 /美元	
0.1	690 970	30 252	654 510	30 252	0.5000
0.2	676 590	30 252	654 510	30 252	0.5000
0.3	662 210	30 252	654 510	30 252	0.5000
0.4	648 520	30 336	647 140	30 336	0.6802
0.5	642 520	31 357	642 270	31 357	0.7319
0.6	639 930	32 793	639 920	32 793	0.6940
0.7	637 640	34 265	637 640	34 265	0.6457
0.8	635 950	35 811	635 950	35 811	0.5804
0.9	634 710	37 411	634 710	37 411	0.5000

从表 3 看出, NNC 法所求得 Pareto 解集中存在支配解, 以 $m = 0.1$ 、0.2 和 0.3 时所对应的解为例, 三者对应的系统规划成本 F_2 一致, 但系统运行成本 F_1 随 m 增大而减小, 显然三者 Pareto 前沿的局部支配解线段上。而在改进 NNC 法处理后, $m = 0.1$ 、0.2 和 0.3 所对应的解均被修正为非支配解 (654 510, 30 252), $m = 0.4$ 、0.5 和 0.6 同理, Pareto 解集中不再含有支配解。基于模糊隶属度函数计算 Pareto 解集中各组解的综合满意度, m 取值为 0.5 时对应的

综合满意度最大，故而选为最优折中解。

依据最优折中解配置储能后，系统所需的正、负备用容量由常规机组和储能提供，如图 6 所示。配置储能后，系统的备用需求得到了满足。

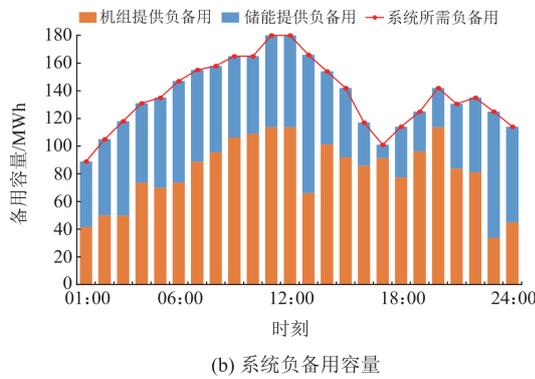
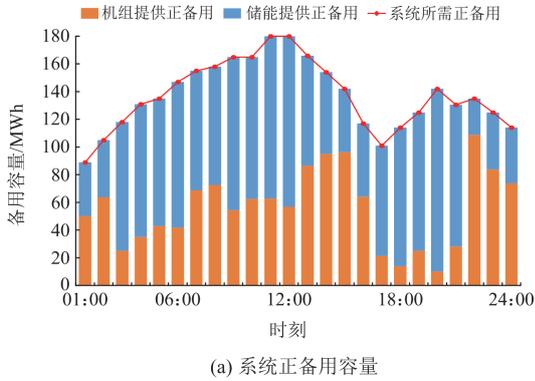


图 6 系统备用容量

Fig. 6 System reserve capacity

4.2.2 有效性分析

为验证所提模型的有效性，在上述算例的基础上，设置两个储能优化配置方案。

方案 1：考虑线路灵活性承载度。

方案 2：不考虑线路灵活性承载度。

其中，方案 1 即为 4.2.1 节所述算例；方案 2 与方案 1 相比，在优化配置模型中未考虑式(25)和式(26)所述线路灵活性承载度约束。不同方案的优化配置结果如表 4 所示。

表 4 不同方案下储能配置结果

Table 4 Results of optimal allocation of energy storage under different cases

方案	选址节点	配置功率/MW	配置容量/MWh
1	7	50	140.6192
	37	50	75
	39	50	75
2	1	50	121.2171
	25	50	136.6452

从表 4 结果可知，为了满足线路灵活性承载度约束，方案 1 较方案 2 多配置了 1 个储能，牺牲经济性以保证线路有足够的灵活性承载度。

以线路 1-39、线路 4-5 为例，图 7 展示了不同方案下线路 1-39 的上调灵活性承载度和线路 4-5 的下调灵活性承载度。不难看出，方案 2 中，在 08:00—14:00 时段、20:00 时刻，线路 1-39 的上调灵活性承载度不足；在 04:00—09:00 时段，线路 4-5 的下调灵活性承载度不足。因此，虽然方案 2 能够满足系统的备用需求且经济性更优，但并没有为系统备用资源提供有效的传输通道，线路灵活性承载度严重不足；而方案 1 中，线路 1-39、线路 4-5 的线路灵活性承载度始终保持在 5% 以上，提高了系统的备用可用性。

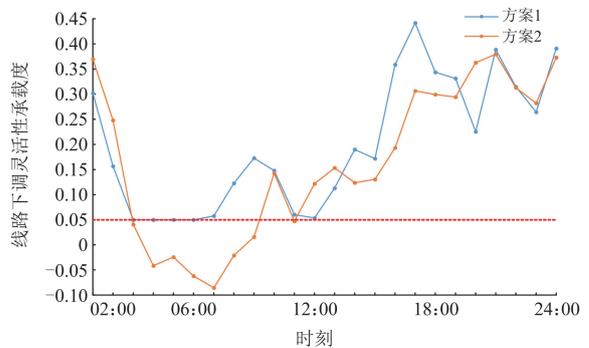
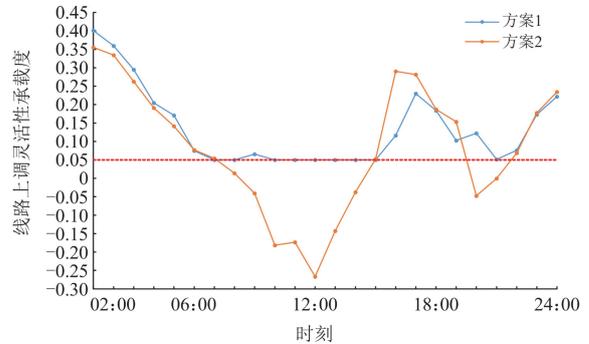


图 7 部分线路灵活性承载度

Fig. 7 Flexibility carrying capacity of some lines

4.3 参数对配置结果的影响分析

4.3.1 δ 对配置结果的影响

δ 为预留的线路灵活性承载度。表 5 给出了不同 δ 下的储能配置结果。

由于配置储能的额定功率为定值 50 MW 且单位功率成本较高，为了使规划成本最小，储能的配置个数会尽可能少。因此，在 δ 取值较小时仅在节点 7 和节点 39 配置储能，且 $\delta = 2.5\%$ 时的配置结

表 5 不同线路灵活性承载度下储能配置结果

Table 5 Results of optimal allocation of energy storage under different flexibility carrying capacity of some lines

$\delta/\%$	选址节点	配置功率/MW	配置容量/MWh
5	7	50	140.6192
	37	50	75
	39	50	75
2.5	7	50	150
	39	50	150
0	7	50	150
	39	50	127.4432

果和 $\delta = 0\%$ 时的配置结果相比, 仅在 39 节点的配置容量上有所增加, 并未额外配置储能。而当 δ 升高至 5% 时, 仅在节点 7、节点 39 配置储能已无法满足系统预留 5% 的线路灵活性承载度这一需求, 故外在节点 37 处配置储能, 同时为了保证经济性, 节点 37、39 处储能的配置容量均为规划范围的最小值 75 MWh。

4.3.2 储能备用成本对配置结果的影响

备用成本影响着储能在电力系统中的应用, 研究备用成本对配置结果的影响, 可指导未来储能投资与使用。4.2 节所述算例中, 常规机组和储能的正、负备用成本均为 20 美元/MWh, 由式(9)和式(10)可知, 系统运行成本 F_1 可分为两个部分: 机组成本 $F_1^G = F_p + F_u + F_d + F_r^G$ 、储能成本 $F_1^{ES} = F_r^{ES}$ 。表 6 给出了不同备用成本下的储能配置结果。

表 6 不同备用成本下储能配置结果

Table 6 Results of optimal allocation of energy storage under different reserve costs

储能备用成本/ (美元/MWh)	F_1 /美元	F_1^G /美元	F_1^{ES} /美元	F_2 /美元	配置总容量/ MWh
20	642 270	576 460	65 810	31 357	290.6192
10	594 960	547 230	47 730	31 703	297.8205
0	545 240	545 240	0	31 911	302.1609

随着储能备用成本的不断降低, 系统所需的备用容量倾向于由备用成本较低的储能来承担, 因此储能配置总容量和系统规划成本 F_2 均不断增大。此外, 储能配置总容量的增大使机组备用压力减小, 因此 F_1^G 不断减小, 同时储能备用成本的降低使得 F_1^{ES} 不断减小, 最终导致系统运行成本 F_1 呈现不断降低的趋势。

5 结语

本文针对高比例风电接入引起的备用容量不足的问题, 提出了一种考虑线路灵活性承载度的储能备用容量多目标优化配置方法。为求解所构建的多

目标优化模型, 提出了一种改进 NNC 法, 并基于模糊隶属度函数选择最优折中解。为验证所提方法的有效性, 在修改的 IEEE39 节点系统中进行仿真, 结果表明: 1) 所提改进 NNC 法可以有效地获得 Pareto 解集, 避免解集中包含 Pareto 前沿上的支配解; 2) 考虑储能提供备用容量并对其合理配置, 可以满足系统的备用需求, 解决系统备用不足的问题; 3) 考虑线路灵活性承载度约束, 可以为系统备用留出足够的输送空间。

本文在构建储能备用容量优化配置模型时, 为更好地突显储能向系统提供备用的能力, 简化了部分因素: 1) 仅考虑机组和储能的备用容量, 未考虑风电的备用容量; 2) 仅考虑将储能的容量作为优化变量而固定了其额定功率; 3) 采用直流潮流模型无法体现电压越限问题。将风电备用、储能功率-容量联合优化模型与交流潮流模型纳入现有的框架, 是后续研究的重要方向。

参考文献

- [1] 陈阅海, 彭乔, 刘天琪, 等. 考虑电压恢复的风电系统改进分段协调频率控制[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 160-171, 196.
CHEN Yuehai, PENG Qiao, LIU Tianqi, et al. Improved piecewise coordinated frequency control of wind power generation system considering voltage restoration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(2): 160-171, 196.
- [2] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 260-272.
LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, et al. Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 260-272.
- [3] 孙建华, 王佳旭, 杜晓勇, 等. 考虑频率安全约束的高比例风电电力系统储能优化配置策略[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(5): 151-162.
SUN Jianhua, WANG Jiayu, DU Xiaoyong, et al. Optimization strategy for energy storage configuration in high proportion wind power system considering frequency safety constraints[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 151-162.
- [4] 崔嘉雁, 杨苹, 李丰能, 等. 电力市场环境基于 IGDT 的风电场储能优化配置[J]. 电力工程技术, 2025, 44(3): 18-29.
CUI Jiayan, YANG Ping, LI Fengneng, et al. Optimal configuration of wind farm energy storage based on IGDT in the power market environment[J]. Electric Power

- Engineering Technology, 2025, 44(3): 18-29.
- [5] 王志欣, 王明强, 杨明, 等. 考虑风电备用可靠性的电力系统备用优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(15): 142-150.
WANG Zhixin, WANG Mingqiang, YANG Ming, et al. Reserve optimization for power system considering reliability of wind power reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15): 142-150.
- [6] 寇洋, 武家辉, 江欢, 等. 计及碳捕集和旋转备用配置的低碳优化运行[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 102-111.
KOU Yang, WU Jiahui, JIANG Huan, et al. Low carbon optimized operation considering carbon capture and spinning reserve capacity[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 102-111.
- [7] 陈哲, 王槽裕, 郭创新, 等. 计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 50-58.
CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Robust optimization of multiple reserve resources considering reserve capacity of wind power and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 50-58.
- [8] 陈志杰, 李凤婷, 黄蓉. 计及需求响应的含风电电力系统旋转备用优化配置策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 117-122.
CHEN Zhijie, LI Fengting, HUANG Rong. Spinning reserve optimal configuration strategy of a wind power system with demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 117-122.
- [9] LI Z, WU W, SHAHIDEHPOUR M, et al. Adaptive robust tie-line scheduling considering wind power uncertainty for interconnected power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2701-2713.
- [10] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.
- [11] CALERO F, CAÑIZARES C A, BHATTACHARYA K, et al. A review of modeling and applications of energy storage systems in power grids[J]. Proceedings of the IEEE, 2023, 111(7): 806-831.
- [12] 黄冬梅, 吴冰, 时帅, 等. 基于 CEEMDAN-SAOA 的平抑风电波动混合储能系统定容优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(15): 59-70.
HUANG Dongmei, WU Bing, SHI Shuai, et al. Capacity optimization of a hybrid energy storage system for wind power fluctuation suppression based on CEEMDAN-SAOA[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(15): 59-70.
- [13] WEI Q, SHI G, SONG R, et al. Adaptive dynamic programming-based optimal control scheme for energy storage systems with solar renewable energy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5468-5478.
- [14] LIU D, YANG Q F, CHEN Y, et al. Optimal parameters and placement of hybrid energy storage systems for frequency stability improvement[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2025, 10(2): 40-53
- [15] 徐爽, 万靖, 崔世常, 等. 不对称信息下新型储能容量租赁市场的博弈均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 13-24.
XU Shuang, WAN Jing, CUI Shichang, et al. Game equilibrium analysis of energy storage leasing market with asymmetric information[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 13-24.
- [16] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 47-56.
LI Junhui, SUN Daming, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 47-56.
- [17] 和萍, 刘鑫, 宫智杰, 等. 高比例可再生能源电力系统源荷储联合调峰分层优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 112-122.
HE Ping, LIU Xin, GONG Zhijie, et al. Hierarchical optimization operation model for joint peak-load regulation of source-load-storage in a high proportion of renewable energy power system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 112-122.
- [18] 贺慳, 郭罗权, 谭庄熙, 等. 高比例新能源电网中储能调频死区优化设定控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 65-75.
HE Li, GUO Luoquan, TAN Zhuangxi, et al. Improved dead zone setting of a frequency regulation strategy for energy storage with high penetration of RESs[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 65-75.
- [19] 王琦, 易俊, 刘丽平, 等. 基于直流侧储能的新型统一潮流控制器优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4371-4378.
WANG Qi, YI Jun, LIU Liping, et al. Optimal design of a novel unified power flow controller incorporated with a battery energy storage system at DC side[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2015, 35(17): 4371-4378.
- [20] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3315-3325.
LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [21] 许丹, 黄海煜, 程虔, 等. 计及安全风险的互联电网发电-备用两阶段联合优化模型[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 624-637.
XU Dan, HUANG Haiyu, CHENG Qian, et al. Generation-reserve two-stage joint optimization model for interconnected power grid with considering the security risk[J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 624-637.
- [22] 梁访, 潘毅, 许丹, 等. 基于极限场景分析的电力系统有功功率和备用协调调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 101-109.
LIANG Fang, PAN Yi, XU Dan, et al. Coordinated dispatching of active power and reserve for power system based on extreme scenario analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 101-109.
- [23] 雷雪姣, 潘士娟, 管晓宏, 等. 考虑传输安全裕度的电力系统发电经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5651-5658.
LEI Xuejiao, PAN Shijuan, GUAN Xiaohong, et al. Transmission safety margin constrained unit commitment in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5651-5658.
- [24] 林芝羽, 李华强, 苏韵掣, 等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 46-57.
LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche, et al. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 46-57.
- [25] 马英浩, 刘琛, 谢开贵, 等. 电力系统网络传输灵活性及其评价综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5429-5441.
MA Yinghao, LIU Chen, XIE Kaigui, et al. Review on network transmission flexibility of power system and its evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5429-5441.
- [26] 谢胤喆, 郭瑞鹏. 考虑风电机组无功特性的安全约束机组组合方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 113-118.
XIE Yinzhe, GUO Ruipeng. Security-constrained unitcommitment considering reactive power performance of wind turbine generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 113-118.
- [27] BAGHERI B, AMJADY N. Stochastic multiobjective generation maintenance scheduling using augmented normalized normal constraint method and stochastic decision maker[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(2).
- [28] MESSAC A, ISMAIL-YAHAYA A, MATTSON C A. The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2003, 25(2): 86-98.
- [29] 陈苏豪, 吴越, 曾伟, 等. 基于NNC法和DMC算法的CCHP型微电网两阶段调度[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 171-182.
CHEN Suhao, WU Yue, ZENG Wei, et al. Two-stage dispatch of CCHP microgrid based on NNC and DMC[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 171-182.
- [30] 朱健宇, 潘学萍, 王正风, 等. 兼顾碳减排和新能源消纳的火电机组深度调峰与复合储能协调规划[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 17-23.
ZHU Jianyu, PAN Xueping, WANG Zhengfeng, et al. Coordinated planning of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage considering carbon emission reduction and new energy consumption [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 17-23.

收稿日期: 2025-06-20; 修回日期: 2025-11-18

作者简介:

黄昊(1999—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统运行与优化; E-mail: 22110015@zju.edu.cn

吴浩(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制以及负荷特性分析、建模及调控。

(编辑 张颖)