

# 计及时空响应特性的电力系统灵活性资源配置优化模型

聂保瑞 鞠立伟 杨慧 齐鑫 瞿斌  
(华北电力大学经济与管理学院 北京市 102206)

**摘要:** 随着我国能源结构逐步低碳转型,风、光等新能源的并网比例将不断扩大,为满足未来新能源装机容量规划的同时保证电力系统的安全可靠运行,在电力系统中需要具备相应调节能力的灵活性资源。为此,提出一种计及时空响应特性的多类型灵活性资源配置优化模型。首先,建立基于空间响应特性和时间响应特性的灵活性评价模型,并构造灵活性平均缺额和灵活性覆盖指数的灵活性评价指标,分别用于电力系统灵活性不足节点筛选和各节点的灵活性充裕性分析。然后,分析多类型灵活性资源的调节特性,建立多类型调节能力模型。最后,考虑时间灵活性评价指标约束,构建灵活性资源两阶段配置优化模型,基于灵活性资源与新能源波动特性的多尺度匹配特性,指导各灵活性不足节点的灵活性资源配置,并以IEEE 9节点系统验证了所提灵活性资源配置方法的有效性和适用性。

**关键词:** 灵活性资源; 时空响应特性; 灵活性评价; 灵活性不足节点; 优化配置

## Optimization Model for Flexible Resource Allocation in Power Systems Considering Spatiotemporal Response Characteristics

NIE Baorui, JU Liwei, YANG Hui, QI Xin, QU Bin

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**ABSTRACT:** As China is gradually transitioning towards a low-carbon energy structure, the proportion of new grid-connected energy sources, such as wind and solar power, continues to increase. To ensure the safe and reliable operation of the power system and meet the capacity planning for future new energy installations, flexible resources are required with corresponding adjustment capabilities in the power system. To this end, this study presents an optimization model for the allocation of multiple types of flexible resources, considering spatiotemporal response characteristics. First, a flexibility assessment model was developed based on the spatial and temporal response characteristics, constructing flexibility evaluation indices such as flexibility average deficit and flexibility coverage index. These indices are used to screen nodes with inadequate flexibility in the power system and analyze the flexibility adequacy at various nodes. Next, the adjustment characteristics of multiple types of flexible resources were analyzed, and a model was established to determine adjustment capabilities. Finally, by considering constraints based on time flexibility evaluation indices, a two-stage optimization model for flexible resource allocation was constructed. This model leverages the multiscale matching characteristics between flexible resources and fluctuation patterns of new energy sources, to guide the allocation of flexible resources to nodes with insufficient flexibility. The effectiveness and applicability of the proposed flexible resource allocation method were validated using the IEEE 9-node system.

This work is supported by the Beijing Social Science Fund (No. 23JCB039).

**KEYWORDS:** flexible resource; spatiotemporal response characteristics; flexibility evaluation; nodes with insufficient flexibility; optimal allocation

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2024)08-0051-11

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2024.08.005

## 0 引言

随着绿色低碳理念的兴起和能源转型不断深入,

为减少对传统化石燃料的依赖并降低碳排放<sup>[1]</sup>,应对气候变化挑战,风、光等新能源的并网比例将不断扩大,其随机性与不确定性对电力系统灵活性提出了更高要求<sup>[2]</sup>。

目前针对含高比例可再生能源电力系统灵活性评价已有较多研究。现有关于灵活性的评价指标及

基金项目:北京市社会科学基金项目“北京市可再生能源替代响应机制及激励政策研究”(23JCB039)

方法大致可分为确定型和概率型两类。文献[3]提出了一种基于能力要素的确定型指标,将各部分资源作为整体来描述系统的灵活性。文献[4]考虑大规模间歇性可再生能源出力和负荷波动的空间性、时间性和方向性的特点,从调度运行角度提出 10 个确定型节点灵活性评价指标。而文献[5]采用概率性评价法,重点研究了电力系统固有灵活性和运行灵活性的量化评价方法。文献[6]认为灵活性定量评价主要从灵活性资源属性打分、生产模拟概率评价、区间评价及微分方程的动态域评价 4 个角度开展。上述文献共同表明灵活性评价方法和指标的应用可以帮助电力系统规划者和运营者更好地理解系统的灵活性,并制定相应的策略来应对可再生能源出力和负荷的波动。同时,电力系统灵活性评价是一个多层次、多维度的问题<sup>[7-8]</sup>,需要综合考虑空间性、时间性、资源属性等因素,因此,有必要从灵活性资源的时空特性出发进行细化评价,为系统灵活性提升和资源配置工作提供新思路。

在灵活性资源配置优化方面,由于灵活性资源在不同尺度调节特性存在较大的差异性,往往需要考虑如何互补配置不同类型灵活性资源以满足新型电力系统不同维度的灵活性需求。文献[9]提出了一种规划-运行双层模型对风光消纳进行调控优化。规划层分配新能源安装位置与灵活性资源改造容量,运行层综合各指标协同调控源荷资源。文献[10]针对新能源发展目标,提出了一种计及新能源不确定性与调峰调频需求的灵活性资源多阶段优化配置方法,实现了运行灵活性的显著提升。文献[11]开展电压全纯函数的幂级数系数分析,建立了基于全纯嵌入潮流的灵活性资源优化配置模型。文献[12]针对省级送端电网电力平衡需求及新能源消纳压力,基于全时序生产模拟法优化储能装置及需求侧响应配置容量。文献[13]提出了一种考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置方法,使方案在满足灵活性需求条件下实现经济性最优。上述文献模型往往综合考虑规划和运行层面的耦合,运算过程比较复杂。同时,现有研究尚未充分探索如何在兼顾经济性和灵活性资源互补特性的同时优化电力系统配置,以最大程度发挥光热电站和储能等灵活性资源的潜力。

针对以上不足,本文提出一种计及时空响应特性的多类型灵活性资源配置优化模型。首先,从各节点的净负荷需求、电力外送需求及资源配置现状出发,基于空间响应特性的灵活性评价模型,筛选灵活性不足节点,确定配置灵活性资源的具体位置;其次,考虑新能源/负荷的多时间尺度波动特性,基于时间响应

特性的灵活性评价约束,以灵活性资源的投资建设成本及运行成本最小为目标,建立多类型灵活性资源配置优化模型。最后,通过 IEEE 9 节点系统仿真验证本文所提配置优化模型的有效性。

## 1 电力系统时空灵活性评价模型

### 1.1 基于空间响应特性的灵活性评价模型

为确定灵活性资源配置的最佳空间位置,需要基于各节点的净负荷需求、电力外送需求及资源配置现状,构建基于空间响应特性的灵活性评价模型。首先,将评价时间尺度设置为 1 h,获取电力系统网络结构、资源配置现状与节点净负荷预测值,以系统灵活性缺额总量最小为目标,构建基于空间响应特性的机组组合优化模型,得出基准出力方案。目标函数为:

$$\min f = \sum_{t=1}^{T_1} \sum_{m \in M} |P_{\text{lack } t}^m| \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{lack } t}^m$  为节点  $m$  在  $t$  时刻的灵活性缺额,取正时表示向下爬坡能力不足,取负时表示向上爬坡能力不足;  $M$  为节点集合。

然后,将周期内的平均灵活性缺额作为评价指标,以反映各节点的灵活性缺失状况,从而为灵活性不足节点的筛选提供参考。

$$P_{\text{lack}}^m = \frac{1}{T_1} \sum_{t=1}^{T_1} |P_{\text{lack } t}^m| \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{lack}}^m$  为节点  $m$  的平均灵活性缺额。

约束条件为:

1) 假设忽略网络损耗,仅考虑功率平衡,区域内各节点的机组出力安排需要满足预测的总电力需求:

$$\sum_{k=1}^K P_{k t}^m + \sum_{n \in M} P_{mn t} = P_{\text{net } t}^m + P_{\text{lack } t}^m + P_{\text{ex } t}^m \quad (3)$$

式中:  $P_{k t}^m$  为节点  $m$  下机组  $k$  在  $t$  时刻的计划出力,机组类型包括系统内的所有发电资源与灵活性资源;  $P_{mn t}$  为节点  $m$  与节点  $n$  在  $t$  时刻的功率交互;  $P_{\text{net } t}^m$  为节点  $m$  在  $t$  时刻的净负荷预测值;  $P_{\text{ex } t}^m$  为节点  $m$  在  $t$  时刻的电力外送需求。

2) 为防止所有机组的备用出力集中于满足某一节点的灵活性需求,各节点的灵活性缺额需要满足上限约束:

$$\begin{cases} -P_{\text{lack } t}^m \leq P_{\text{lack } t \max}^{\text{up}} & P_{\text{lack } t}^m \leq 0 \\ P_{\text{lack } t}^m \leq P_{\text{lack } t \max}^{\text{dn}} & P_{\text{lack } t}^m > 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{lack } t \max}^{\text{up}}$ 、 $P_{\text{lack } t \max}^{\text{dn}}$  分别为各节点上下行灵活性缺额的上限值。

3) 各机组提供的备用出力需要满足上限约束:

$$\begin{cases} 0 \leq R_{k,t}^{m,up} \leq \Delta P_k^m \\ 0 \leq R_{k,t}^{m,dn} \leq \Delta P_k^m \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $R_{k,t}^{m,up}$ 、 $R_{k,t}^{m,dn}$  分别为节点  $m$  下机组  $k$  在  $t$  时刻可提供的上行和下行备用出力;  $\Delta P_k^m$  为节点  $m$  下机组  $k$  的爬坡速率。

4) 各机组的出力需要满足出力上下限约束和爬坡约束:

$$\begin{cases} s_k^m P_{k,min}^m \leq P_{k,t}^m + R_{k,t}^{m,up} \leq s_k^m P_{k,max}^m \\ s_k^m P_{k,min}^m \leq P_{k,t}^m - R_{k,t}^{m,dn} \leq s_k^m P_{k,max}^m \\ -\Delta P_k^m \leq (P_{k,t}^m + R_{k,t}^{m,up}) - (P_{k,t-1}^m - R_{k,t-1}^{m,dn}) \leq \Delta P_k^m \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{k,max}^m$ 、 $P_{k,min}^m$  分别为节点  $m$  下机组  $k$  的出力上下限;  $s_k^m$  为节点  $m$  下机组  $k$  的运行状态。

5) 节点之间的功率交互受到网络约束的限制:

$$\begin{cases} -P_{mn,max} \leq P_{mn,t} + R_{mn,t}^{up} \leq P_{mn,max} \\ -P_{mn,max} \leq P_{mn,t} - R_{mn,t}^{dn} \leq P_{mn,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{mn,max}$  为节点  $m$  与节点  $n$  之间功率交互的上限;  $R_{mn,t}^{up}$ 、 $R_{mn,t}^{dn}$  分别为节点  $m$  与节点  $n$  在  $t$  时刻可交互的上行和下行备用。

6) 各节点需要满足 1 h 时间尺度上的旋转备用约束:

$$\begin{cases} R_{up,t}^m = \sum_{k=1}^K R_{k,t}^{m,up} + \sum_{n \in M} R_{mn,t}^{up} \geq \alpha_{wpp}^{up} P_{wpp,t}^m + \alpha_{pv}^{up} P_{pv,t}^m + \alpha_{load}^{up} P_{load,t}^m \\ R_{dn,t}^m = \sum_{k=1}^K R_{k,t}^{m,dn} + \sum_{n \in M} R_{mn,t}^{dn} \geq \alpha_{wpp}^{dn} P_{wpp,t}^m + \alpha_{pv}^{dn} P_{pv,t}^m + \alpha_{load}^{dn} P_{load,t}^m \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $R_{up,t}^m$ 、 $R_{dn,t}^m$  分别为节点  $m$  在  $t$  时刻的总上/下行备用出力;  $\alpha_{wpp}^{up}$ 、 $\alpha_{wpp}^{dn}$ 、 $\alpha_{pv}^{up}$ 、 $\alpha_{pv}^{dn}$  和  $\alpha_{load}^{up}$ 、 $\alpha_{load}^{dn}$  分别为风电、光伏与负荷的上、下行旋转备用系数;  $P_{wpp,t}^m$ 、 $P_{pv,t}^m$ 、 $P_{load,t}^m$  分别为节点  $m$  在  $t$  时刻的风电、光伏和负荷的预测值。

### 1.2 基于时间响应特性的灵活性评价模型

为确定不同响应特性灵活性资源的配置容量,需要基于新能源/负荷的多时间尺度波动特性与 1.1 节得出的各节点基准出力方案,以 1 h 和 15 min 为评价时间尺度,构建基于时间响应特性的灵活性评价模型。

假设节点  $m$  调度周期内由新能源/负荷波动产生的(上行或下行)灵活性需求为  $P_{m,t}^{FR}$  ( $P_{m,t}^{FR,up}$  和  $P_{m,t}^{FR,dn}$ ),其可由新能源/负荷的随机波动特性得到<sup>[14]</sup>。然后,基于节点  $m$  现有灵活性资源与火电机组的基准出力方案,根据灵活性资源的多时间尺度响

应特性,计算节点  $m$  在调度周期内能够提供的(上行或下行)灵活性调节能力  $P_{m,t}^{FS}$  ( $P_{m,t}^{FS,up}$  和  $P_{m,t}^{FS,dn}$ )。具体为:

$$\begin{cases} P_{m,t}^{FR,up} = P_{m,t}^{FR,dn} = \xi_{load} P_{load,t}^m + \xi_{wpp} P_{wpp,t}^m + \xi_{pv} P_{pv,t}^m \\ P_{m,t}^{FS,up} = \min\left\{ P_{max}^m - P_t^m, R^m \Delta t, \frac{(E_{max}^m - E_t^m) \eta_{dis} - P_t^m \Delta t}{\Delta t} \right\} \\ P_{m,t}^{FS,dn} = \min\left\{ P_t^m - P_{min}^m, R^m \Delta t, \frac{(E_t^m - E_{min}^m) / \eta_{ch} + P_t^m \Delta t}{\Delta t} \right\} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\xi_{load}$ 、 $\xi_{wpp}$ 、 $\xi_{pv}$  分别为负荷、风电和光伏的随机波动误差系数;  $P_{max}^m$ 、 $P_{min}^m$  分别为运行功率的最大、最小值;  $E_{max}^m$ 、 $E_{min}^m$  分别为储能容量的最大、最小值;  $\eta_{ch}$ 、 $\eta_{dis}$  为充、放电效率;  $P_t^m$ 、 $R^m$ 、 $E_t^m$  分别为节点  $m$  现有灵活性资源与火电机组在  $t$  时刻的出力、爬坡速率及储能灵活性资源储能;  $P_{m,t}^{FS,up}$  和  $P_{m,t}^{FS,dn}$  计算式中的第三项只考虑储能灵活性资源。

然后,定义灵活性覆盖指数 (flexibility coverage index, FCI),其为电力系统在调度周期的灵活性调节能力与灵活性需求的比值,用于反映各灵活性不足节点在不同时间程度上的灵活性充裕度<sup>[15]</sup>。灵活性覆盖指数的具体计算方式为系统灵活性调节能力形成包络面的面积除以系统灵活性需求形成包络面的面积,具体为:

$$I_m^{FCI} = \frac{\int P_{m,t}^{FS}}{\int P_{m,t}^{FR}} \quad (10)$$

式中:  $I_m^{FCI}$  为灵活性覆盖指数,其示意如图 1 所示。

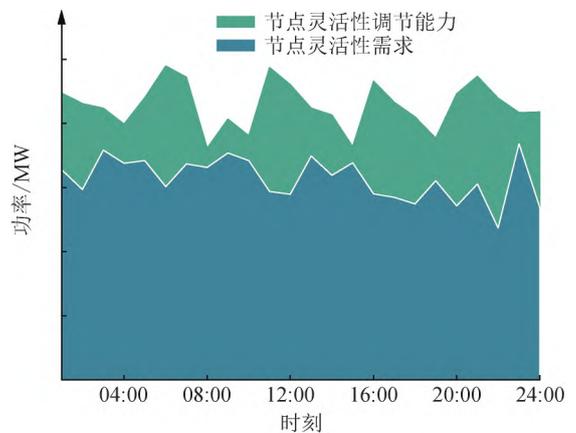


图 1 灵活性覆盖指数示意

Fig. 1 Illustration of flexibility coverage index

最后,将根据不同风险偏好选择合适的灵活性覆盖指数最小值作为时间灵活性评价指标,并将其作为约束条件加入灵活性资源配置优化模型,以指导各灵活性不足节点的灵活性资源配置。

## 2 多类型灵活性资源调节能力建模

本文考虑的灵活性资源包括火电机组、光热电站及氢储能、电化学储能、抽水蓄能等储能设备<sup>[16-17]</sup>。

### 2.1 火电机组

常规火电机组通常表现出稳定的运行特性,能够提供持续的电力输出,并在长时间尺度上满足电力需求,尤其在处理系统范围内大幅度波动或长时间尺度需求时,其优势更为明显。然而,火电机组无法在短时间内实现频繁地充放电,因此在处理高频但低幅度的随机波动时,其响应速度较慢,缺乏足够的灵活性。

常规火电机组的爬坡性能及当时出力和出力功率的上下限值,影响着机组的灵活性调节能力<sup>[18-19]</sup>。因此,常规火电机组在  $\Delta t$  时间尺度下的灵活性为:

$$F_{G \Delta t}^+ = \min\{P_{G \max} - P_{G t} R \Delta t\} \quad (11)$$

$$F_{G \Delta t}^- = \min\{P_{G t} - P_{G \min} R \Delta t\} \quad (12)$$

式中:  $F_{G \Delta t}^+$ 、 $F_{G \Delta t}^-$  分别为常规火电机组在  $\Delta t$  时间尺度下的上行和下行灵活性供给;  $P_{G t}$ 、 $P_{G \max}$ 、 $P_{G \min}$  分别为机组  $t$  时刻的出力及最大、最小运行出力;  $R$  为机组的爬坡速率。

### 2.2 光热电站

光热电站通常具有可控的热能释放特性,可以根据电力系统的需求来调整能量释放速率和持续时间。这种可控性使得其能够灵活参与电力系统的响应调度,根据需求提供电力。其在  $\Delta t$  时间尺度下的灵活性为<sup>[20-21]</sup>:

$$F_{\text{esp} \Delta t}^+ = \min\left\{P_{\text{esp} \max}^+ \frac{(E_t - E_{\min} + P_{\text{SF-HTF}} \Delta t) \eta_{\text{RC}}}{\Delta t}\right\} \quad (13)$$

$$F_{\text{esp} \Delta t}^- = \min\left\{P_{\text{esp} \max}^- \frac{(E_{\max} - E_t - P_{\text{SF-HTF}} \Delta t) \eta_{\text{EH}}}{\Delta t}\right\} \quad (14)$$

式中:  $F_{\text{esp} \Delta t}^+$ 、 $F_{\text{esp} \Delta t}^-$  分别为光热电站在  $\Delta t$  时间尺度下的上行和下行灵活性供给;  $P_{\text{esp} \max}^+$ 、 $P_{\text{esp} \max}^-$  分别为光热电站的最大发电和蓄热功率;  $E_t$ 、 $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$  分别为  $t$  时刻光热电站的储热量和储存热量上下限;  $P_{\text{SF-HTF}}$  为光场采集到的热功率;  $\eta_{\text{EH}}$ 、 $\eta_{\text{RC}}$  为充、放热效率。

### 2.3 储能设备

储能设备不仅可以作为性能优良的响应电源,满足电网侧大规模、系统级应用,亦可以在短时间内频繁进行电能转换提供双向的调节灵活性,有效地平稳处理高频、低幅度的随机波动。其在  $\Delta t$  时间尺度下的灵活性为<sup>[22]</sup>:

$$F_{\text{es} \Delta t}^+ = \min\left\{P_{\text{es} \max}^{\text{d}} - P_{\text{es} t} \frac{(S_t - S_{\min}) \eta_{\text{dis}} - P_{\text{es} t} \Delta t}{\Delta t}\right\} \quad (15)$$

$$F_{\text{es} \Delta t}^- = \min\left\{P_{\text{es} \max}^{\text{c}} + P_{\text{es} t} \frac{(S_{\max} - S_t) / \eta_{\text{ch}} + P_{\text{es} t} \Delta t}{\Delta t}\right\} \quad (16)$$

式中:  $F_{\text{es} \Delta t}^+$ 、 $F_{\text{es} \Delta t}^-$  分别为储能设备在  $\Delta t$  时间尺度下的上行和下行灵活性供给;  $P_{\text{es} \max}^{\text{d}}$ 、 $P_{\text{es} \max}^{\text{c}}$  分别为储能设备的最大放电、充电功率;  $P_{\text{es} t}$  为  $t$  时刻储能设备的功率,正表示放电,负表示充电;  $S_t$ 、 $S_{\max}$ 、 $S_{\min}$  分别为  $t$  时刻储存的等效电量和装置容量的上下限。

本文考虑抽水蓄能电站<sup>[23]</sup>、氢储能系统和电化学储能<sup>[24-25]</sup>作为储能设备配置主体。其中,抽水蓄能机组容量效益强、响应速率快、响应深度大,能够有效对净负荷进行削峰填谷;氢储能系统以氢能为媒介大规模地存储电能,同样可以对净负荷进行削峰填谷,同时也能快速响应净负荷的波动,但现阶段能量转换效率较低;电化学储能的响应速率极高,可以平抑净负荷的高频随机波动,但其装机规模受到技术特性和成本因素限制,导致其响应深度有限。

## 3 灵活性资源两阶段配置优化模型

### 3.1 两阶段配置优化框架体系

本文首先根据空间灵活性评价指标筛选灵活性不足节点;其次,考虑时间灵活性评价指标约束,根据灵活性资源在不同时间尺度上的调节特性,分阶段配置不同类型的灵活性资源,以分别满足电力系统在长时间尺度和短时间尺度上的灵活性需求<sup>[26-28]</sup>。其中,第一阶段主要考虑配置抽水蓄能电站、光热电站、氢储能系统等调节深度较高、持续时间较长的灵活性资源,满足长时间尺度下的爬坡或削峰填谷需求;第二阶段主要考虑电化学储能等响应速率极快的灵活性资源,以应对新能源与负荷的实时高频波动。灵活性资源两阶段配置框架如图 2 所示。

### 3.2 灵活性资源两阶段配置优化模型

#### 3.2.1 第一阶段配置优化模型

阶段 1 以 1 h 为时间尺度,主要用于满足各节点的总电力需求,保证新能源的全额消纳,目标函数为投资建设成本及运行成本最小。

$$\begin{cases} \min C_{\text{cb} \text{ total}}^m = C_{\text{cb} \text{ inv}}^m + C_{\text{cb} \text{ ope}}^m \\ C_{\text{cb} \text{ inv}}^m = \sum_{i \in N_{\text{cb}}} \frac{r(1+r)^{Y_i}}{(1+r)^{Y_i} - 1} (c_{\text{cb} i}^{\text{p}} P_{\text{cb} i \max}^m + c_{\text{cb} i}^{\text{e}} E_{\text{cb} i \max}^m) \\ C_{\text{cb} \text{ ope}}^m = \sum_{i=1}^{T_1} \left( \sum_{i \in N_{\text{cb}}} c_{\text{cb} i}^{\text{ope}} P_{\text{cb} i t}^m + \sum_{k \in N_{\text{g}}} C_{\text{g} k}^m \right) \end{cases} \quad (17)$$

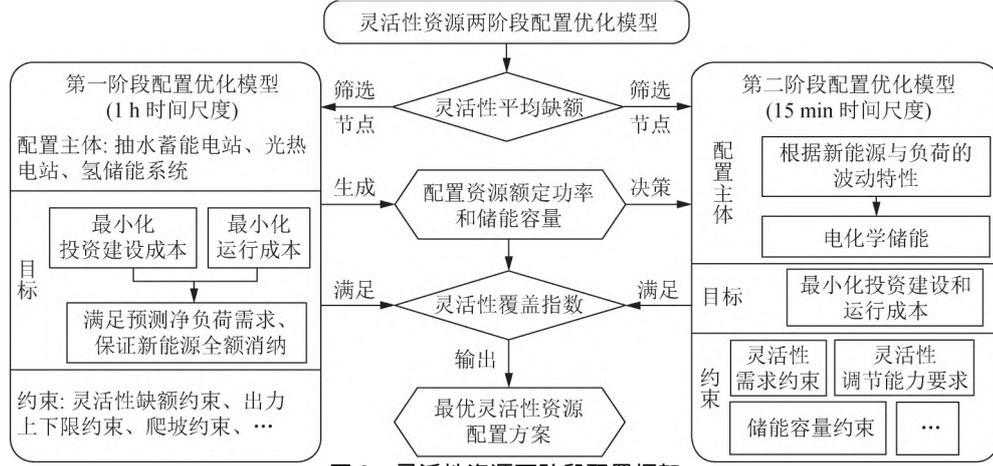


图 2 灵活性资源两阶段配置框架

Fig. 2 Two-stage framework for flexible resource allocation

式中:  $C_{cb\_total}^m$  为节点  $m$  灵活性资源的总成本;  $C_{cb\_inv}^m$ 、 $C_{cb\_ope}^m$  分别为节点  $m$  灵活性资源的投资建设成本和运行成本;  $N_{cb}$  和  $N_g$  分别为爬坡灵活性资源和常规火电机组的集合;  $r$  为贴现率;  $y_i$  为第  $i$  种资源的寿命周期;  $c_{cb\_i}^p$ 、 $c_{cb\_i}^e$  分别为第  $i$  种资源单位额定功率和单位储能容量的投资建设成本;  $P_{cb\_i\_max}^m$ 、 $E_{cb\_i\_max}^m$  分别为节点  $m$  第  $i$  种资源的额定功率和储能容量;  $c_{cb\_i}^{ope}$  为第  $i$  种资源单位运行功率的成本;  $P_{cb\_i\_j}^m$  为节点  $m$  第  $i$  种资源在  $t$  时段的运行功率;  $C_{g\_k\_t}^m$  为节点  $m$  机组  $k$  在  $t$  时段的运行成本。

约束条件为:

1) 在配置灵活性资源后, 需要满足节点的总电力需求, 并保证不会产生灵活性缺额:

$$\sum_{i \in N_{cb}} P_{cb\_i\_j}^m + \sum_{k \in N_g} P_{g\_k\_t}^m + \sum_{n \in M} P_{mn\_t} = P_{net\_t}^m + P_{ex\_t}^m \quad (18)$$

式中:  $P_{g\_k\_t}^m$  为节点  $m$  在  $t$  时刻阶段 1 配置火电机组  $k$  的运行功率。

2) 抽水蓄能电站、氢储能系统为储能装置, 还需要满足储能容量约束:

$$\begin{cases} E_{cb\_i\_t}^m = E_{cb\_i\_t-1}^m + \eta_{cb\_i}^{ch} P_{cb\_i\_t}^{ch} \Delta t - \frac{P_{cb\_i\_t}^{dis} \Delta t}{\eta_{cb\_i}^{dis}} \\ 0 \leq E_{cb\_i\_t}^m \leq E_{cb\_i\_max}^m \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $E_{cb\_i\_t}^m$  为节点  $m$  灵活性资源  $i$  在  $t$  时刻储存的等效电量;  $\eta_{cb\_i}^{ch}$ 、 $\eta_{cb\_i}^{dis}$  为灵活性资源  $i$  的充放电效率;  $P_{cb\_i\_t}^{ch}$ 、 $P_{cb\_i\_t}^{dis}$  分别为节点  $m$  灵活性资源  $i$  在  $t$  时刻的充、放电功率。

$$\begin{cases} P_{cb\_i\_t}^{ch} = -\min\{P_{cb\_i\_t}^m, 0\} \\ P_{cb\_i\_t}^{dis} = \max\{P_{cb\_i\_t}^m, 0\} \end{cases} \quad (20)$$

此外, 还需要考虑灵活性资源与现有资源的出力上下限约束、备用出力上限约束、爬坡约束、旋转备用

约束, 这里不再赘述。各节点之间的传输功率和备用出力  $P_{mn\_t}$ 、 $R_{mn\_t}^{up}$ 、 $R_{mn\_t}^{dn}$  为 1.1 节中优化得到基准出力方案中的结果值。最后,  $P_{cb\_i\_max}^m$  和  $E_{cb\_i\_max}^m$  为优化得到的各类型灵活性资源的配置结果,  $P_{cb\_i\_j}^m$  将作为参数传递给第二阶段配置优化模型。

### 3.2.2 第二阶段配置优化模型

阶段 2 的短时间尺度配置优化模型在初始阶段出力方案的基础上, 形成 15 min 时间尺度的基准出力方案。然后, 根据新能源与负荷的波动特性, 优化配置调节速率快的机组。投资建设成本及运行成本最小的目标函数为:

$$\begin{cases} \min C_{fm\_total}^m = C_{fm\_inv}^m + C_{fm\_ope}^m \\ C_{fm\_inv}^m = \sum_{j \in N_{fm}} \frac{r(1+r)^{y_j}}{(1+r)^{y_j} - 1} (c_{fm\_j}^p P_{fm\_j\_max}^m + c_{fm\_j}^e E_{fm\_j\_max}^m) \\ C_{fm\_ope}^m = \sum_{t=1}^{T_2} \left( \sum_{j \in N_{fm}} c_{fm\_j}^{ope} P_{fm\_j\_t}^m + \sum_{i \in N_{cb}} c_{cb\_i}^{ope} \Delta P_{cb\_i\_t}^m \right) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $C_{fm\_total}^m$  为节点  $m$  灵活性资源的总成本;  $C_{fm\_inv}^m$ 、 $C_{fm\_ope}^m$  分别为节点  $m$  灵活性资源的投资建设成本和运行成本;  $N_{fm}$  为电化学储能机组集合;  $P_{fm\_j\_t}^m$  为节点  $m$  阶段 2 配置的灵活性资源  $j$  在  $t$  时刻的运行功率; 其余变量与阶段 1 灵活性资源配置优化模型的一致, 这里不再赘述。  $P_{fm\_j\_max}^m$ 、 $E_{fm\_j\_max}^m$  为优化得到的电化学储能机组的配置结果。

约束条件为:

1) 部分阶段 1 配置的灵活性资源也能提供一定的调节能力, 两者需要满足 15 min 时间尺度上的灵活性需求:

$$\begin{cases} \sum_{j \in N_{fm}} P_{fm\_j\_t}^m + \sum_{i \in N_{cb}} \Delta P_{cb\_i\_t}^m = \delta_m^{net} \\ \Delta P_{cb\_i\_t}^m = \tilde{P}_{cb\_i\_t}^m - \tilde{P}_{cb\_i\_t-1}^m \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $\Delta P_{cb,ij}^m$  为节点  $m$  阶段 1 配置的灵活性资源  $i$  在  $t$  时刻的功率变化量, 15 min 时间尺度下的  $\tilde{P}_{cb,ij}^m$  根据第一阶段传递的  $P_{cb,ij}^m$  经过线性插值处理得到, 其仍旧需要满足灵活性资源  $i$  的出力上限约束、爬坡约束(抽水蓄能、氢储能系统还需要满足储能容量约束)这里不再赘述;  $\delta_{m,j}^{net}$  为净负荷在 15 min 时间尺度上的波动特性, 为方便起见可由历史数据得出。

2) 各节点在 15 min 时间尺度上的灵活性调节能力需要大于风电、光伏、负荷在 15 min 时间尺度上的随机波动:

$$\begin{cases} F_{up,t}^m = \sum_{j \in N_{fm}} F_{fm,j,t}^{m,up} + \sum_{i \in N_{cb}} F_{cb,i,t}^{m,up} \geq \beta_{wpp} P_{wpp,t}^m + \beta_{pv} P_{pv,t}^m + \beta_{load} P_{load,t}^m \\ F_{dn,t}^m = \sum_{j \in N_{fm}} F_{fm,j,t}^{m,dn} + \sum_{i \in N_{cb}} F_{cb,i,t}^{m,dn} \geq \beta_{wpp} P_{wpp,t}^m + \beta_{pv} P_{pv,t}^m + \beta_{load} P_{load,t}^m \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $F_{up,t}^m$ 、 $F_{dn,t}^m$  分别为节点  $m$  在  $t$  时刻的向上/下灵活性调节能力;  $F_{fm,j,t}^{m,up}$  和  $F_{fm,j,t}^{m,dn}$  是阶段 2 配置的灵活性资源  $j$  在  $t$  时刻的向上/下灵活性调节能力;  $F_{cb,i,t}^{m,up}$ 、 $F_{cb,i,t}^{m,dn}$  分别为阶段 1 配置的灵活性资源  $i$  在  $t$  时刻的向上、向下灵活性调节能力;  $\beta_{wpp}$ 、 $\beta_{pv}$ 、 $\beta_{load}$  分别为风电、光伏与负荷在 15 min 时间尺度上的随机波动系数<sup>[29]</sup>。

3) 灵活性资源需要满足出力上下限约束、爬坡约束, 且电化学储能还需要考虑储能容量约束, 这里不再赘述。

4) 为提高系统应对新能源/负荷随机波动的能力, 2 个阶段的灵活性资源配置优化模型还需要满足灵活性指标约束<sup>[30]</sup>:

$$\begin{cases} I_{m,s}^{FCI,up} \geq \varepsilon_{FCI,s}^{up} \\ I_{m,s}^{FCI,dn} \geq \varepsilon_{FCI,s}^{dn} \end{cases} \quad s \in S \quad (24)$$

式中:  $S$  表示考虑的时间尺度集合, 包括 1 h 时间尺度和 15 min 时间尺度;  $\varepsilon_{FCI,s}^{up}$ 、 $\varepsilon_{FCI,s}^{dn}$  为尺度  $s$  下为灵活性覆盖指数设置的阈值, 通常可取 1.0~1.2。时间灵活性指标阈值的具体取值视决策者对系统可靠性与灵活性的要求而定。

### 3.3 模型求解

本文计及时空响应特性的多类型灵活性资源配置方法求解步骤如图 3 所示。

1) 获取系统的网络结构、资源配置现状、节点净负荷预测、资源技术参数等信息。

2) 根据基于空间响应特性的灵活性评价模型, 生成各节点基准出力方案, 并计算各节点空间灵活性

指标以判断节点类型。若某节点的指标值小于阈值, 则为灵活性充足节点, 否则为灵活性不足节点。

3) 根据多类型灵活性资源与新能源波动特性的多尺度匹配特性, 构建灵活性资源容量配置优化模型, 并基于时间响应特性的灵活性评价模型, 指导形成考虑时间灵活性约束的灵活性资源配置方案。

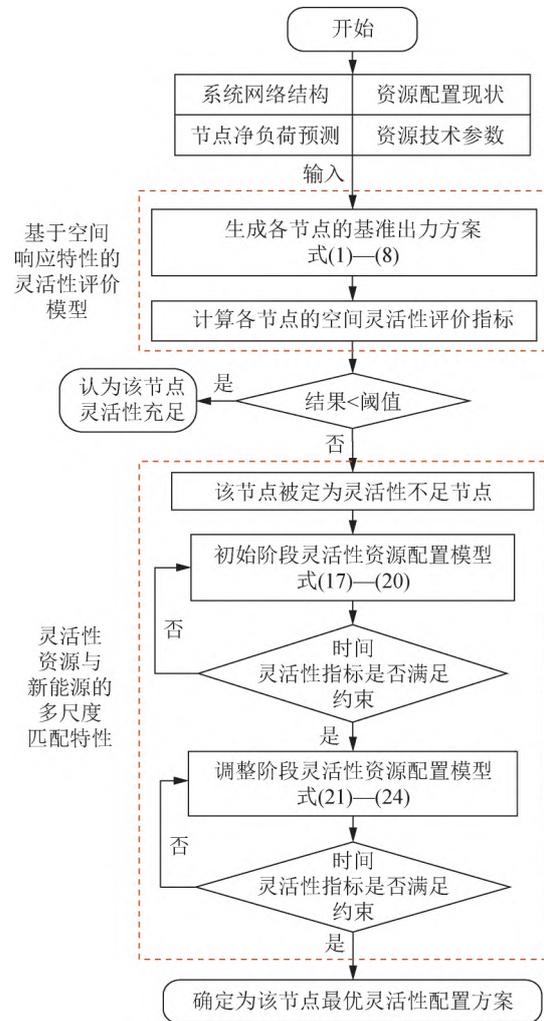


图 3 灵活性资源配置步骤流程

Fig. 3 Flowchart of flexible resource allocation steps

## 4 算例分析

### 4.1 基础数据

为简化计算, 节省仿真计算时间, 本文采用图 4 所示的 IEEE 9 节点网络系统进行仿真分析, 在 Matlab R2022a 上进行算例仿真, 通过 Yalmip 工具箱调用 Cplex 求解器对模型进行求解, 以验证本文所提灵活性资源配置方法的有效性和适用性, 理论上可以根据需要扩展节点数量, 以适应更大规模的系统。

其中, 将全年的数据经过合适比例缩放得到各节点全年 365×24 h 的风电出力、光伏出力与负荷水平

数据。由于我国能源资源与能源需求市场分布极不均衡,该系统考虑电力外送情形,且为充分发挥区域内的可再生能源供能潜力,设置较大的区域电力外送需求,其 1 个调度周期内的电力外送需求如图 5 所示。

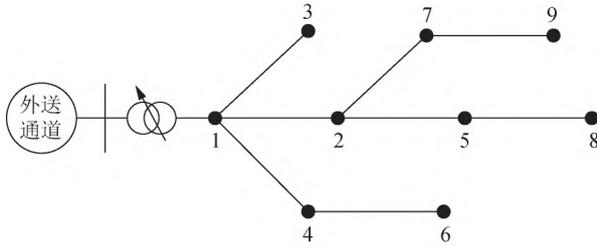


图 4 IEEE 9 节点网络  
Fig. 4 IEEE 9-node network

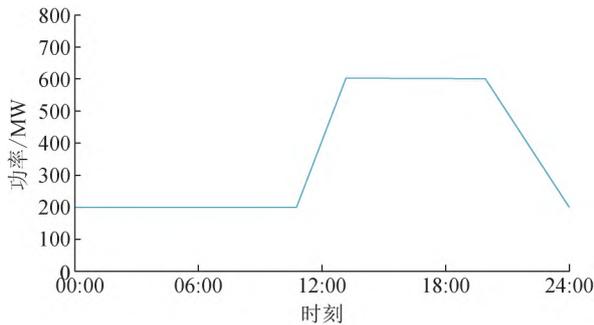


图 5 1 个调度周期内的电力外送需求  
Fig. 5 Electricity export demand within one scheduling cycle

此外,各节点的新能源装机及灵活性资源配置如表 1 所示,目前只采用火电机组和水电机组来进行灵活性调节。由于节点 4、5、7 没有水电机组,本文假定上述节点水资源较贫乏,无法配置抽水蓄能机组。不同类型灵活性资源的成本参数见表 2。相关不等式约束参数见表 3。

表 1 各节点新能源装机及灵活性资源配置现状  
Table 1 Current status of new energy installations and flexible resource allocation at each node

节点	装机容量/MW			
	风电	光伏	火电	水电
1	0	50	10	120
2	0	150	25	160
3	50	100	20	150
4	200	50	30	0
5	0	200	20	0
6	0	200	10	180
7	100	100	20	0
8	200	100	15	200
9	200	100	10	200

表 2 不同类型灵活性资源成本参数  
Table 2 Cost parameters for various types of flexible resources

类型	寿命周期/a	成本/(万元/MW)		
		单位额定功率投资	单位储能容量投资	单位运行功率运行
氢储能系统	10	200	60	200
抽水蓄能电站	50	600	84	120
光热电站	30	300	0	150
电化学储能	5	165	127	80

表 3 相关不等式约束参数  
Table 3 Parameters of related inequality constraints

参数	数值
$P_{lack,max}^{up}$ /MW	50
$P_{k,max}^m$	机组额定功率
$P_{k,min}^m$	机组额定功率的 30%(火电) 0(水电)
$\Delta P_k^m$ /(%/h)	40(火电) 100(水电)
$\xi_{load}$ /%	10
$\xi_{wpp}$ /%	6
$\xi_{pv}$ /%	3
$\eta_{EH}$ /%	98
$\eta_{RC}$ /%	45
$\eta_{dis}$ /%	40(氢储能系统)
	90(抽水蓄能)
	95(电化学储能)
$\eta_{ch}$ /%	70(氢储能系统)
	85(抽水蓄能)
	95(电化学储能)

### 4.2 结果分析

本文主要考虑光热、抽水蓄能、氢储能系统、电化学储能 4 种灵活性资源,并将光热、抽水蓄能、氢储能系统作为初始阶段配置的灵活性资源,将电化学储能作为调整阶段配置的灵活性资源。

首先,通过 1.1 节的基于空间响应特性的灵活性评价模型,得出各节点目前的灵活性缺额,筛选灵活性不足节点。调度周期内各时段的灵活性缺额如图 6 所示。各节点之间的电能与灵活性的互济如图 7 所示。

结合图 6 和图 7 可知,该系统不存在上行灵活性缺额;除节点 4 外的其他节点都存在下行灵活性缺额,且集中在 10:00—14:00 时段;节点 3、8、9 等节点的水电资源较为丰富,灵活性调节能力较为富余,会通

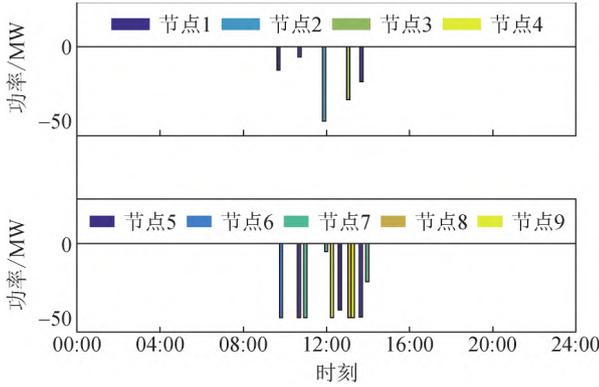


图 6 各节点调度周期内灵活性缺口

Fig. 6 Flexibility deficit chart for each node within the scheduling period

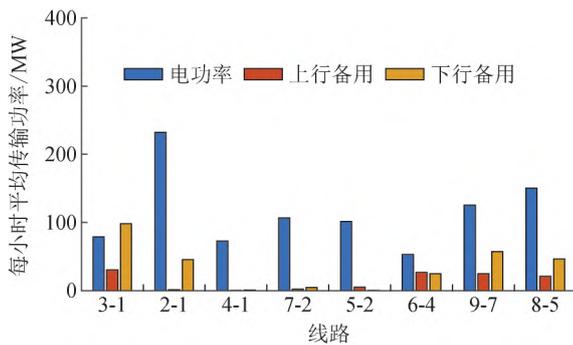


图 7 各节点之间电能及灵活性传输

Fig. 7 Electricity and flexibility transfer diagram among nodes

过区域电网互济为其他节点提供一定的上行备用和下行备用。在此基础上,计算各节点的空间灵活性指标——平均灵活性缺口,结果如表 4 所示。

表 4 各节点平均灵活性缺口

Table 4 Average flexibility deficit across nodes

节点	$P_{\text{lack}}^m / (\text{MW}/\text{h})$	节点	$P_{\text{lack}}^m / (\text{MW}/\text{h})$
1	1.91	6	2.08
2	2.08	7	3.42
3	1.49	8	2.08
4	0	9	4.17
5	6.04		

假设各节点平均灵活性缺口的阈值设定为 2 MW/h,筛选出灵活性不足节点 2、5、6、7、8、9。然后,采用两阶段配置优化模型,为节点配置所需各类型灵活性资源。将阶段 1 和阶段 2 的灵活性资源配置优化模型的灵活性覆盖指数阈值分别设置为 1.05 和 1.10。各节点优化得到的灵活性资源配置结果如图 8 所示,所需投资建设成本及运行成本如表 5 所示。

从图 8 可知,由于氢储能系统和抽水蓄能电站能大规模存储电能的同时兼顾经济性,故在灵活性缺

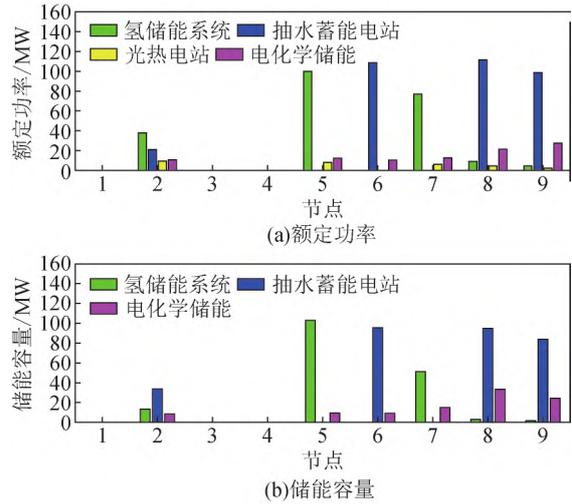


图 8 各节点的灵活性资源配置优化结果

Fig. 8 Optimization results for flexible resource allocation at each node

表 5 各节点的投资建设成本及运行成本

Table 5 Investment and operating costs for each node

节点	总成本	投资建设成本	运行成本
			万元
1	0	0	0
2	16 057.96	2 775.19	13 282.77
3	0	0	0
4	0	0	0
5	8 037.12	4 295.99	3 741.13
6	11 834.24	4 689.42	7 144.82
7	7 350.75	3 422.61	3 928.14
8	22 455.10	6 232.61	16 222.49
9	19 834.91	5 568.35	14 266.56

额较大时,各节点会首先配置抽水蓄能电站;而不能配置抽水蓄能电站的节点,会选择配置氢储能系统。而光热电站虽然具有一定的灵活性,但仍然受到日照条件的限制,因此在夜间或多云天气下,它们的调节能力会受到影响,具有一定局限性,各节点的配置容量较小。此外,为了平抑净负荷在更短时间尺度上的随机波动,各节点会配置一定容量的电化学储能,且配置容量随节点所在区域可再生能源装机规模的增加而增大。

然后,将灵活性覆盖指数阈值指标分别设为 1.00、1.05、1.10、1.15、1.20,计算在阶段 2 配置电化学储能各节点所需投资建设成本及运行成本总和,如表 6 所示,配置优化结果如图 9 所示。对配置优化结果进行处理,以阈值 1.10 下的配置结果为基准值,分析配置节点储能容量的相对变化如图 10 所示。

由表 6 可知,随着灵活性覆盖指数阈值的增大,总投资建设成本不断增加,总运行成本保持不变,这

表 6 节点系统阶段 2 所需投资建设成本及运行成本总和

Table 6 Total investment and operating costs for node system in stage 2

阈值	总成本	总投资建设成本	总运行成本
1.00	13 682.12	6 320.94	7 361.17
1.05	13 788.23	6 427.06	7 361.17
1.10	13 894.35	6 533.17	7 361.17
1.15	14 000.46	6 639.29	7 361.17
1.20	14 106.58	6 745.41	7 361.17

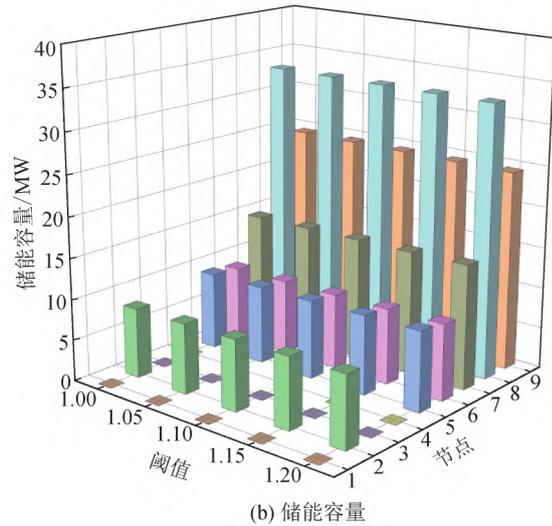
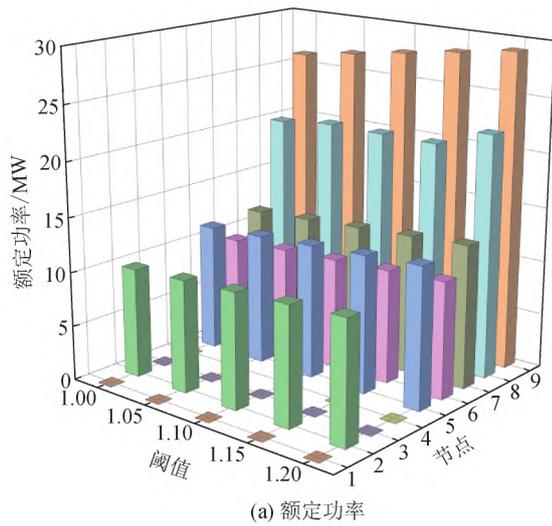


图 9 不同阈值下阶段 2 各节点灵活性资源配置优化结果  
Fig. 9 Optimization results for flexible resource allocation at each node in stage 2 under different thresholds

是由于随着阈值的增加,要求备用资源能够更好地应对负荷和风光出力的不确定性,需要扩充备用容量,从而增加了总建设成本。而由于运行成本只与资源的运行功率和单位运行功率成本有关,而不受配置备用容量变化的影响,所以无论如何改变配置,运行成本都保持不变。

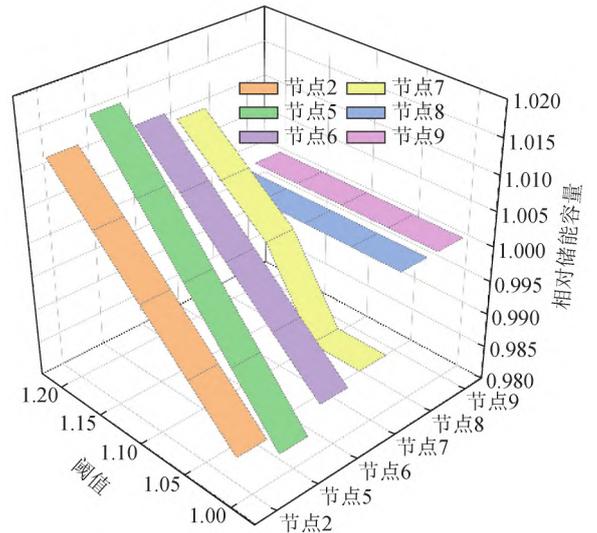


图 10 不同阈值下阶段 2 各节点配置灵活性资源的相对储能容量  
Fig. 10 The relative energy storage capacity of flexibility resources allocated to nodes in stage 2 at different thresholds

### 5 结论

为提高未来新能源电力系统的安全可靠性,本文提出了一种计及时空响应特性的多类型灵活性资源配置优化模型,考虑多类型灵活性资源的调节特性,对电力系统中的灵活性资源优化配置,得到最优规划方案。其仿真算例结果表明:

- 1) 本文基于设定的平均灵活性缺额指标法的空间灵活性评价,允许系统运营者或规划者集中资源和关注力于那些最需要额外灵活性资源的节点,从而有针对性地节点配置适当类型的灵活性资源。
- 2) 本文提出的灵活性资源容量两阶段配置优化模型,通过考虑多类型灵活性资源的不同调节特性和相互协作,分阶段配置灵活性资源使决策更加灵活,可以帮助电力系统更好地吸纳和集成新能源,减少对传统化石燃料的依赖。
- 3) 本文提出的灵活性覆盖指数阈值能够有效地指导各灵活性不足节点的灵活性资源配置方案,且随着灵活性覆盖指数阈值的增加,对灵活性资源配置容量的要求提高,导致总投资建设成本增加。

### 6 参考文献

[1] 武昭原,周明,王剑晓,等. 双碳目标下提升电力系统灵活性的市场机制综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7746-7763.  
WU Zhaoyuan, ZHOU Ming, WANG Jianxiao, et al. Review on market mechanism to enhance the flexibility of power system under the dual-carbon target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7746-7763.

- [2] 曹子珣. 含高比例风电系统的灵活性资源优化配置与调度[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.  
CAO Zixun. Optimal flexible resources allocation and dispatch of grid with high proportion of wind power [D]. Wuhan: Wuhan University, 2021.
- [3] 白帆, 陈红坤, 陈磊, 等. 基于确定型评价指标的电力系统调度灵活性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 52-60.  
BAI Fan, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Research on dispatching flexibility of power system based on deterministic evaluation index [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 52-60.
- [4] 周光东, 周明, 孙黎滢, 等. 含波动性电源的电力系统运行灵活性评价方法研究[J]. 电网技术, 2019, 43(6): 2139-2146.  
ZHOU Guangdong, ZHOU Ming, SUN Liying, et al. Research on operational flexibility evaluation approach of power system with variable sources [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2139-2146.
- [5] 郭通. 电力系统灵活性评价及灵活性改造规划研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.  
GUO Tong. Research on evaluation of power system flexibility and flexibility retrofit planning [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [6] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [7] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 1-8.  
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources [J]. Smart Power, 2023, 51(1): 1-8.
- [8] LIU Z J, ZHU S Z, ZHANG P, et al. Flexibility evaluation index system and calculation method of active distribution network with high proportion of renewable energy [C]//2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE). IEEE, 2022: 720-724.
- [9] YU X W, LING X, ZHOU X G, et al. Flexibility evaluation and index analysis of distributed generation planning for grid-source coordination [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1019352.
- [10] 余轶, 陈峰, 曾杨, 等. 计及新能源发展目标的电力系统灵活资源多阶段优化配置[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023: 1-17. (2023-08-29) [2023-10-24]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20230829.1048.002>.  
YU Yi, CHEN Feng, ZENG Yang, et al. Multi-stage optimal planning of flexible resources in power system considering renewable energy developing target [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023: 1-17. (2023-08-29) [2023-10-24]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1675.T.20230829.1048.002>.
- [11] 丁豪杰, 李宏仲. 基于全嵌入线性潮流的配电网灵活性资源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2024, 36(3): 107-117.  
DING Haojie, LI Hongzhong. Optimal configuration of flexible resources in distribution network based on holomorphic embedding linear power flow [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(3): 107-117.
- [12] 马鑫. 基于全时序生产模拟的灵活性资源配置方法[J]. 宁夏电力, 2022(1): 7-12, 37.  
MA Xin. Flexible resource allocation method of power grid based on full time series production simulation [J]. Ningxia Electric Power, 2022(1): 7-12, 37.
- [13] 鉴庆之, 刘晓明, 杨金叶, 等. 考虑需求响应的电力系统灵活性资源优化配置[J]. 现代电力, 2021, 38(3): 286-296.  
JIAN Qingzhi, LIU Xiaoming, YANG Jinye, et al. Optimal allocation of power system flexible resources considering demand response [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(3): 286-296.
- [14] HEGGARTY T, BOURMAUD J Y, GIRARD R, et al. Multi-temporal assessment of power system flexibility requirement [J]. Applied Energy, 2019, 238: 1327-1336.
- [15] GLAZUNOVA A, SEMSHIKOV E, NEGNEVITSKY M. Real-time flexibility assessment for power systems with high wind energy penetration [J]. Mathematics, 2021, 9(17): 2056.
- [16] DEGEFA M Z, SPERSTAD I B, SLE H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources [J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107022.
- [17] TANG H, WANG S W, LI H X. Flexibility categorization, sources, capabilities and technologies for energy-flexible and grid-responsive buildings: state-of-the-art and future perspective [J]. Energy, 2021, 219: 119598.
- [18] GUO T, GAO Y J, ZHOU X J, et al. Optimal scheduling of power system incorporating the flexibility of thermal units [J]. Energies, 2018, 11(9): 2195.
- [19] LU Z X, LI H B, QIAO Y. Probabilistic flexibility evaluation for power system planning considering its association with renewable power curtailment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3285-3295.
- [20] YANG H J, ZHOU M, WU Z Y, et al. Exploiting the operational flexibility of a concentrated solar power plant with hydrogen production [J]. Solar Energy, 2022, 247: 158-170.
- [21] ELLINGWOOD K, MOHAMMADI K, POWELL K. Dynamic optimization and economic evaluation of flexible heat integration in a hybrid concentrated solar power plant [J]. Applied Energy, 2020, 276: 115513.
- [22] ZHANG T, MA Y Z, WU Y N, et al. Optimization configuration and application value assessment modeling of hybrid energy storage in the new power system with multi-flexible resources coupling [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 62: 106876.
- [23] HAN X N, CHEN X Y, MCELROY M B, et al. Modeling formulation and validation for accelerated simulation and flexibility assessment on large scale power systems under higher renewable penetrations [J]. Applied Energy, 2019, 237: 145-154.
- [24] LI H, WANG Z, HONG T Z, et al. Energy flexibility of residential buildings: a systematic review of characterization and quantification methods and applications [J]. Advances in Applied Energy, 2021, 3: 100054.
- [25] AYESHA, NUMAN M, BAIG M F, et al. Reliability evaluation of energy storage systems combined with other grid flexibility options: a review [J]. Journal of Energy Storage, 2023, 63: 107022.

- [26] REN Z J , GUO H X , YANG P , et al. Bi-level optimal allocation of flexible resources for distribution network considering different energy storage operation strategies in electricity market [J]. IEEE Access , 2020 , 8: 58497-58508.
- [27] JIAN J , LI P , JI H R , et al. DLMP-based quantification and analysis method of operational flexibility in flexible distribution networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy , 2022 , 13 ( 4) : 2353-2369.
- [28] FENG J W , YANG J Y , WANG H X , et al. Optimal dispatch of high-penetration renewable energy integrated power system based on flexible resources [J]. Energies , 2020 , 13( 13) : 3456.
- [29] POURAHMADI F , HOSSEINI S H , FOTUHI-FIRUZABAD M. Economically optimal uncertainty set characterization for power system operational flexibility [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics , 2019 , 15( 10) : 5456-5465.
- [30] PAPAETHYMIU G , HAESSEN E , SACH T. Power system

flexibility tracker: indicators to track flexibility progress towards high-RES systems [J]. Renewable Energy , 2018 , 127: 1026-1035.

收稿日期: 2024-01-24

作者简介:

聂保瑞( 2001) 男, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为能源系统建模与优化, E-mail: 3125343877@ qq.com;

鞠立伟( 1989) 男, 博士后, 副教授, 主要从事电力系统的相关研究工作;

杨慧( 1999) 女, 硕士研究生, 主要从事电力系统的相关研究工作;

齐鑫( 2000) 男, 硕士研究生, 主要研究方向为能源经济;

瞿斌( 1971) 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为不确定决策。

( 编辑 景贺峰)