

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.013

## 计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法

梁毅<sup>1</sup>, 李华<sup>1</sup>, 刘航旭<sup>2</sup>, 仲崇飞<sup>1</sup>, 葛磊蛟<sup>2</sup>, 周沫<sup>1</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015;

2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:**为应对大规模可再生能源并网造成的电力系统灵活经济调峰难题,文中提出一种计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法。首先,分析核电低负荷的调峰机理,并考虑其调峰风险量化指标,从而实现核电的经济安全运行;然后,以总运行成本最低为优化目标,在目标中权衡弃风弃光损失和不同电源参与调峰增加的发电成本,建立含风、光、火、核、储的多源互补调峰调度模型,并对模型进行求解;最后,实际算例证明了所提优化调度模型的有效性。算例结果表明,与火电调峰、无储能参与的核电调峰相比,所提模型可使弃风弃光量减少94.17%,碳排放下降1.26%,进而验证了多源互补模式不仅可以提升高比例风光电网调峰能力,而且可以实现多源互补系统的低碳经济运行。

**关键词:**多源互补;调峰;低碳经济;风险量化;核电;抽水蓄能

**中图分类号:**TM76

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2024)02-0124-10

### 0 引言

随着能源结构转型和可再生清洁能源的发展,风电、光伏装置容量不断增长<sup>[1-2]</sup>,但高比例的风光电源导致系统出力不确定性提高,电网向下调峰能力不足成为系统弃风弃光的主要原因;同时负荷需求的扩大以及愈发极端的峰谷差使系统调峰难度增加<sup>[3]</sup>。若只依靠火电机组参与调峰,会产生额外的机组成本<sup>[4]</sup>和大量的碳排放,严重威胁电网运行安全性。考虑到运行安全性和经济性,核电机组通常带基荷运行,不参与辅助调峰<sup>[5-6]</sup>。但随着核电容量的增加,电网的调峰方式也发生变化,核电机组参与调峰的性能和工况已经得到充分研究<sup>[7-8]</sup>。核电机组的调峰容量、深度大,安排清洁无碳的核电机组参与调峰具有显著意义。

文献[7]中提到部分欧美国家核电机组已具备负荷跟踪能力,参与电力系统的峰值负荷调节,以适应负荷需求的日、季变化。我国现有核电设施已具备负荷调峰能力,部分核电机组也有相应经验;文献[8]对核电机组参与调峰的必要性、可行性、运行性能、成本和效益进行充分论证和系统分析。但随着波动性风光电源更高比例的接入,在经济性和稳定性方面对核电调峰提出更高的要求。因此须考虑引入多种调度资源配合协调参与调峰,实现多能源互补互联互济和电力电量平衡。

抽水蓄能电站具备快速制动/启停能力和负荷

跟随能力,有助于保证供电可靠性。除稳定负荷波动外,还可以稳定风光电源出力,从而提高火、核电机组发电效率和风光电源利用率。

为保证核电运行的安全性和经济性,机组在参与调峰时必须符合所对应的安全约束<sup>[9]</sup>,同时因调峰风险存在,为在核电有限的调度能力下保证电网稳定,须寻求更多快速调节电源,弥补核电机组调峰能力不足的问题。因此,可通过配置适当规模的储能电站参与调度,与核电机组协同互补实现捆绑调峰,进一步减少火电机组的爬坡和启停机次数,发挥更优的低碳调度能力。

为此,文献[6,9-11]构建包含核电、火电、波动性新能源的多源优化调度模型。但这类研究主要集中在波动性新能源的不确定性建模,对于核电参与调峰的方式局限于用约束条件将其表达为特定的几种调度曲线和档位,并未考虑其风险量化以进一步提高调度灵活性。然而核电机组在合理范围内参与调峰会诱发0级或1级核安全事件,在一定程度上增加了核电机组运行风险和成本,而不是导致放射性物质泄露等安全问题。因此,如何将核电调峰的可行空间进一步扩展以提高系统经济性是文中的研究重点。

综上所述,文中基于现有研究,为进一步实现经济最优和碳排放量最小,充分挖掘核电调峰潜力,提出计及核电风险量化的多源互补调峰调度方法。首先对核电机组典型运行模式和安全要求进行讨论,完成对调峰风险的量化和对调峰成本的量纲转化,从而确定安全约束条件;进而,构建充分考

收稿日期:2023-09-20;修回日期:2023-11-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52277118)

考虑各发电机组成本、弃风弃光惩罚和碳排放成本的目标函数和约束条件,构建风、光、火、核、储最优调峰调度模型,并提出改进的粒子群算法对上述优化问题进行求解;最后以东北某省典型电源结构为实例进行仿真分析,对比3种不同方案,验证所提调度方法的经济性和优越性。

## 1 核电调峰机理及风险量化模型

为保证安全性和经济性,核电机组通常带基荷运行,并不参与电网调峰<sup>[12]</sup>,但在技术上也具备一定的调峰能力<sup>[13]</sup>。因此可考虑核电机组运行的安全性等刚性约束,对核电参与电网调峰时的运行边界进行分析,发挥核电的调峰能力。

### 1.1 核电机组调峰机理模型

与火电机组不同,核电机组对安全性和经济性要求更高<sup>[14]</sup>,其调峰能力受到部分限制。在日负荷跟踪运行模式下,核电机组出力如图1所示,其中 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 为核电调峰档位。其出力模型可表示为:

$$P_{i,t} = \begin{cases} P_{i,\max} - \Delta P_i & t \in T_d \\ P_{\Delta i} & t \in T_{\Delta P} \\ P_{i,\max} & t \in T_u \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{i,t}$ 为第 $i$ 个核电机组在 $t$ 时刻出力; $P_{i,\max}$ 为第 $i$ 个核电机组的出力上限; $\Delta P_i$ 为第 $i$ 个核电机组的调峰深度; $P_{\Delta i}$ 为核电线性升降时段功率和; $T_d$ 、 $T_{\Delta P}$ 、 $T_u$ 分别为低功率、功率波动和高功率运行时刻集合。

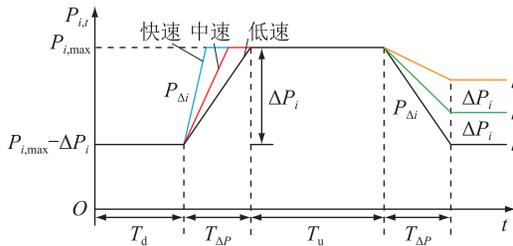


图1 核电机组参与调峰运行

Fig.1 Operation of nuclear power unit participating in peak shaving

从图1也可以看出,核电机组可以设定不同的运行模式,以获得不同的调峰深度、稳定运行时间等性能。因此,可以为核电机组设定多个档位以适应不同的风光、负荷波动情况。

核电调峰设定 $G$ 个档位 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $\dots$ 、 $k_n$ 、 $\dots$ 、 $k_G$ ,可近似认为调峰深度连续,任意档位 $k_n$ 的调峰深度为:

$$\Delta P_i = \frac{k_n (P_{i,\max} - P_{i,\min})}{G} \quad (2)$$

式中: $P_{i,\min}$ 为第 $i$ 个核电机组的出力下限。

调节速率可分为快速( $T_{\Delta P} = 1$  h)、中速( $T_{\Delta P} = 2$  h)、低速( $T_{\Delta P} = 3$  h)3档。功率调节速率为:

$$\eta = \frac{\Delta P_i}{T_{\Delta P}} \quad (3)$$

核电机组经 $k$ 档调峰后,须保持低功率工况稳定运行一段时间,考虑到经济因素,可根据负荷因子的选择结果进行调控,即:

$$T_{di} \leq T_d \leq \frac{(1 - \beta) T P_{i,\max} - 2(P_{i,\max} - P_{\Delta i}) T_{\Delta P}}{\Delta P_i} \quad (4)$$

式中: $T_{di}$ 为低功率运行最小时间; $\beta$ 为负荷因子; $T$ 为调峰运行时段总时长。

与火电机组类似,核电机组的功率变化情况也与时间线性相关。

$$\begin{cases} P_{\Delta i,u} = P_{i,\max} - \Delta P_i + \frac{\Delta P_i}{T_{\Delta P,u}} t & t \in [0, T_{\Delta P,u}] \\ P_{\Delta i,d} = P_{i,\max} - \frac{\Delta P_i}{T_{\Delta P,d}} t & t \in [0, T_{\Delta P,d}] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{\Delta i,u}$ 、 $P_{\Delta i,d}$ 分别为核电机组在功率升、降阶段的实际出力值; $T_{\Delta P,u}$ 、 $T_{\Delta P,d}$ 分别为线性升、降功率的时间区间上限, $T_{\Delta P,u} = T_{\Delta P,d} = T_{\Delta P}$ 。

### 1.2 调峰风险及其量化评定

在核电机组正常运行条件下,可根据技术标准,使核电机组适当参与电网调峰<sup>[15]</sup>。该行为一般不会引发2级—7级核安全事故。但在此过程中,须插拔控制棒来调节反应堆功率,可能会对核反应堆产生局部扰动<sup>[16]</sup>,诱发0级或1级核安全事件,在一定程度上增加核电机组运行风险和成本。核电参与调峰可能引起的风险因素主要包括设备风险和人为风险<sup>[17]</sup>,具体分析如图2所示。

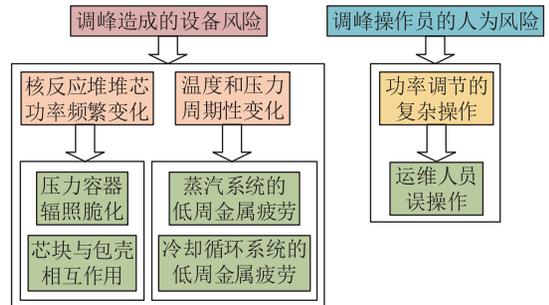


图2 核电机组参与调峰存在的风险因素

Fig.2 Risk factors of nuclear power units participating in peak shaving

核电调峰综合风险量化指标可通过年度故障次数和功率损失进行评估。其中,通过统计停机和维修总时间,可以计算出每年因调峰引起的故障次

数  $f_{i,r}^d$  为:

$$f_{i,r}^d = \frac{t_{i,r}^d}{\bar{T}_r} \quad (6)$$

式中:  $t_{i,r}^d$ 、 $\bar{T}_r$  分别为第  $i$  个核电机组由风险因素  $r$  引起的停机时间、故障平均修复时间。

功率损失为:

$$P_{i,r}^d = t_{i,r}^d P_i^N \quad (7)$$

式中:  $P_{i,r}^d$  为第  $i$  个核电机组由风险因素  $r$  引起的年功率损失量;  $P_i^N$  为第  $i$  个核电机组的额定输出功率。

因此,核电调峰引起的安全风险费用可表示为故障次数、功率损失之和,即:

$$R_{PL} = \frac{\sum_{i=1}^{m_{PL}} \sum_{r=1}^4 (f_{i,r}^d C_r^f + P_{i,r}^d C_r^g)}{m_{PL}} \quad (8)$$

式中:  $R_{PL}$  为核电机组高峰负荷运行带来的安全风险费用;  $m_{PL}$  为参与调峰的核电机组数量;  $C_r^f$  为与风险因素  $r$  相对应的维修费用;  $C_r^g$  为核电在电网中的基准价格。

由上述分析可以看出,与带基荷运行的工作模式对比,带有调峰功能的日负荷跟踪模式会增加风险。含有  $m_{BL}$  台带基荷运行的核电机组,其调峰风险增量为:

$$R_{BL} = \frac{\sum_{i=1}^{m_{BL}} \sum_{r=1}^4 (f_{i,r}^d C_r^f + P_{i,r}^d C_r^g)}{m_{BL}} \quad (9)$$

$$\Delta R_{PL} = R_{PL} - R_{BL} \quad (10)$$

式中:  $R_{BL}$  为带基荷的核电机组的安全风险;  $\Delta R_{PL}$  为核电调峰导致的潜在核安全事件成本。

$$R_{day}^N = \frac{\Delta R_{PL} m_{PL}}{m_{PL}} \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N f_{PL,i}^{day} P_i^N$$

式中:  $R_{day}^N$  为单位调峰风险成本;  $f_{PL,i}^{day}$  为第  $i$  个核电机组的峰值调节率。

则核电调峰风险成本可表示为:

$$C_i^R = \sum_{i=1}^I R_{i,t}^N = R_{day}^N (P_{i,max} - P_{i,t}) \quad (12)$$

式中:  $C_i^R$  为在  $t$  时刻核电调峰安全风险成本;  $I$  为核电机组数目;  $R_{i,t}^N$  为第  $i$  个核电机组在  $t$  时刻的安全风险成本。

## 2 计及风、光、火、核、储的多源互补调峰调度优化模型

考虑风、光、火、核、储的多源互补调峰调度优

化模型主要包含:最大化能量利用率和运行成本的目标函数;依据安全、物理特性限制各类型机组的实际出力;复杂调度模型的优化求解算法。

### 2.1 调度目标函数

含风、光、火、核、储协同调峰的优化调度应符合安全经济原则,最大化风光资源的利用率,实现系统经济最优和节能减排。目标函数为:

$$\min F = \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (f_{i,t}^{ope} + C_{i,t}^{pea} + C_{i,t}^R) + \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (f_{j,t} + S_{j,t}) + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T C_{n,t} + \sum_{t=1}^T C_{Q,t} + \sum_{t=1}^T C_{car,t} \quad (13)$$

式中:  $J$ 、 $N$  分别为火电机组、抽水蓄能机组数量;  $f_{i,t}^{ope}$ 、 $C_{i,t}^{pea}$  分别为第  $i$  个核电机组在  $t$  时刻运行成本和调峰成本;  $C_{i,t}^R$  为第  $i$  个核电机组在  $t$  时刻调峰安全风险成本;  $f_{j,t}$ 、 $S_{j,t}$  分别为第  $j$  个火电机组在  $t$  时刻运行成本和启停成本;  $C_{n,t}$  为第  $n$  个抽水蓄能机组在  $t$  时刻的运行成本;  $C_{Q,t}$  为在  $t$  时刻的弃风弃光惩罚;  $C_{car,t}$  为在  $t$  时刻的碳排放成本。

(1) 核电机组运行成本。核电机组的运行成本可用一次函数表示为:

$$f_{i,t}^{ope} = a_i P_{i,t} + b_i \quad (14)$$

式中:  $a_i$ 、 $b_i$  为第  $i$  个核电机组成本系数。

(2) 核电机组的调峰成本。核电机组的调峰成本包括调峰燃料成本  $C_{i,t}^F$  和调峰安全风险成本  $C_{i,t}^R$ :

$$C_{i,t}^{pea} = C_{i,t}^F + C_{i,t}^R \quad (15)$$

其中调峰燃料成本为:

$$C_{i,t}^F = C_F (P_{i,max} - P_{i,t}) \quad (16)$$

式中:  $C_F$  为单位调峰燃料成本。

(3) 火电机组运行成本。火电机组的运行成本包括燃料成本和机组启停成本,燃料成本可以表示为出力的二次函数<sup>[10]</sup>:

$$f_{j,t} = a_j P_{j,t}^2 + b_j P_{j,t} + c_j \quad (17)$$

式中:  $P_{j,t}$  为第  $j$  个火电机组在  $t$  时刻的出力;  $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$  为第  $j$  个火电机组燃料成本系数。

(4) 火电机组的启停成本。

$$S_{j,t} = \alpha_{j,t} s_{j,on} + \beta_{j,t} s_{j,off} \quad (18)$$

式中:  $\alpha_{j,t}$ 、 $\beta_{j,t}$  为 0、1 变量,当第  $j$  个火电机组在  $t$  时刻启动时  $\alpha_{j,t}$  为 1、 $\beta_{j,t}$  为 0,停机时  $\alpha_{j,t}$  为 0、 $\beta_{j,t}$  为 1;  $s_{j,on}$ 、 $s_{j,off}$  分别为第  $j$  个火电机组的启动和停机成本。

(5) 抽水蓄能机组运行成本。抽水蓄能机组通过电能、势能的相互转换参与系统调度<sup>[18]</sup>,其运行成本表示为:

$$C_{n,t} = P_{n,t}^{GEN} (1/\delta_n - 1) C_{ave} \quad (19)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{GEN}}$  为第  $n$  台抽水蓄能机组在  $t$  时刻参与调峰容量,即为实际发电量;  $\delta_n$  为第  $n$  台抽水蓄能机组的转化效率;  $C_{\text{ave}}$  为系统的平均发电成本。

(6) 弃风弃光成本。为提高风、光电能的利用率,引入弃风弃光惩罚成本:

$$C_{Q,t} = \lambda (P'_{F,t} - P_{F,t} + P'_{G,t} - P_{G,t}) \quad (20)$$

式中:  $P'_{F,t}$ 、 $P'_{G,t}$ 、 $P_{F,t}$ 、 $P_{G,t}$  分别为在  $t$  时刻的风、光的预测、上网功率;  $\lambda$  为单位弃风/弃光惩罚成本。

(7) 碳排放成本。因核电机组和风光电源均不产生碳排放量,火电机组是系统的主要碳排放来源<sup>[19]</sup>,  $t$  时刻的碳排放成本为:

$$C_{\text{car},t} = \delta_t \sum_{j=1}^J (\varphi_j - \lambda_p) P_{j,t} \quad (21)$$

式中:  $\delta_t$  为市场在  $t$  时刻碳排放单位成本;  $\varphi_j$  为第  $j$  个火电机组碳排放强度;  $\lambda_p$  为配额系数。

## 2.2 调度约束条件

(1) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{j=1}^J P_{j,t} + \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{\text{F}} - P_{n,t}^{\text{C}}) + P_{F,t} = P_{L,t} \quad (22)$$

式中:  $P_{n,t}^{\text{C}}$ 、 $P_{n,t}^{\text{F}}$  分别为第  $n$  台抽水蓄能机组在  $t$  时刻抽水耗电功率和排水发电功率;  $P_{L,t}$  为在  $t$  时刻负荷需求。

(2) 核电机组约束。核电机组出力上、下限约束为:

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (23)$$

核电机组其他约束见 1.1 节。

(3) 火电机组约束。火电机组出力上、下限约束<sup>[20]</sup>为:

$$u_{j,t} P_{j,\min} \leq P_{j,t} \leq u_{j,t} P_{j,\max} \quad (24)$$

启停状态维持约束<sup>[21]</sup>为:

$$\begin{cases} (X_{j,t-1}^{\text{on}} - X_{j,\min}^{\text{on}})(u_{j,t} - u_{j,t-1}) \geq T_{j,\min}^{\text{on}} \\ (X_{j,t-1}^{\text{off}} - X_{j,\min}^{\text{off}})(u_{j,t} - u_{j,t-1}) \geq T_{j,\min}^{\text{off}} \end{cases} \quad (25)$$

爬坡速率约束为:

$$-R_{j,t}^{\text{d}} \Delta t \leq P_{j,t} - P_{j,t-1} \leq R_{j,t}^{\text{u}} \Delta t \quad (26)$$

式中:  $P_{j,\max}$ 、 $P_{j,\min}$  分别为第  $j$  个火电机组出力的上、下限;  $u_{j,t}$  为第  $j$  个火电机组在  $t$  时刻的状态变量,  $u_{j,t} = 1$ 、 $u_{j,t} = 0$  分别表示运行和停机;  $X_{j,t-1}^{\text{on}}$ 、 $X_{j,t-1}^{\text{off}}$  分别为第  $j$  个火电机组的实际启、停时间;  $X_{j,\min}^{\text{on}}$ 、 $X_{j,\min}^{\text{off}}$  分别为第  $j$  个火电机组的实际启、停时间下限;  $T_{j,\min}^{\text{on}}$ 、 $T_{j,\min}^{\text{off}}$  分别为第  $j$  个火电机组的启、停时间下限;  $R_{j,t}^{\text{u}}$ 、 $R_{j,t}^{\text{d}}$  分别为第  $j$  个火电机组在  $t$  时刻的上、下爬坡速率;  $\Delta t$  为时间段间隔。

(4) 风、光出力约束。

$$0 \leq P_{F,t} \leq P_{F,\max} \quad (27)$$

$$0 \leq P_{G,t} \leq P_{G,\max} \quad (28)$$

式中:  $P_{F,\max}$ 、 $P_{G,\max}$  分别为风、光最大出力。

(5) 抽水蓄能约束。发电约束如式(29)所示<sup>[22]</sup>。

$$P_{\min}^{\text{GEN}} \leq P_{n,t}^{\text{GEN}} \leq P_{\max}^{\text{GEN}} \quad (29)$$

式中:  $P_{\min}^{\text{GEN}}$ 、 $P_{\max}^{\text{GEN}}$  分别为抽水蓄能机组的出力下限、上限。

在抽水工况下,须有出力序列  $P_n^{\text{PU}} = \{P_{n,1}^{\text{PU}}, P_{n,2}^{\text{PU}}, \dots, P_{n,m}^{\text{PU}}\}$ , 其中  $m$  为第  $n$  台抽水蓄能机组出力序列的时刻终点。

在调度周期内抽水蓄能机组还应满足势能平衡约束<sup>[23]</sup>:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{\text{GEN}} = - \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N \delta_n P_{n,t}^{\text{PU}} \quad (30)$$

(6) 旋转备用约束。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^I P_{i,t} + \sum_{n=1}^N \min(P_{n,\max}^{\text{F}}, W_{n,t} - W_{n,\min}) + \\ P_{F,t} + \sum_{j=1}^J u_{j,t} P_{j,\max} \geq P_{L,t}(1+L) \end{aligned} \quad (31)$$

式中:  $P_{n,\max}^{\text{F}}$  为第  $n$  台抽水蓄能机组的最大出力;  $W_{n,t}$ 、 $W_{n,\min}$  分别为第  $n$  台抽水蓄能机组的在  $t$  时刻储存能量及其下限;  $L$  为旋转备用率。

(7) 线路容量约束。

$$\begin{aligned} -P_l^{\max} \leq \sum_{i=1}^I \chi_{i-l} P_{i,t} + \sum_{j=1}^J \chi_{j-l} P_{j,t} + \chi_{n-l} P_{n,t}^{\text{GEN}} + \\ \chi_{F-l} P_{F,t} + \chi_{G-l} P_{G,t} - \sum_{d=1}^D \chi_{d-l} P_{d,t} \leq P_l^{\max} \end{aligned} \quad (32)$$

式中:  $P_l^{\max}$  为线路  $l$  传输断面潮流上限,  $l = 1, 2, \dots, l_{\max}$ ;  $P_{d,t}$  为负荷  $d$  在第  $t$  时刻负荷值;  $\chi_{i-l}$ 、 $\chi_{j-l}$ 、 $\chi_{n-l}$ 、 $\chi_{F-l}$ 、 $\chi_{G-l}$ 、 $\chi_{d-l}$  分别为核电机组  $i$ 、火电机组  $j$ 、抽水蓄能机组  $n$ 、风电、光伏和负荷  $d$  对线路  $l$  的功率转移分布因子<sup>[6]</sup>;  $D$  为负荷数量。

(8) 节点电压约束。

$$U_{o,t}^{\min} \leq U_{o,t} \leq U_{o,t}^{\max} \quad (33)$$

式中:  $U_{o,t}^{\min}$ 、 $U_{o,t}^{\max}$ 、 $U_{o,t}$  分别为节点  $o$  在  $t$  时刻的电压最小值、最大值和实际值。

## 2.3 求解算法

粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法是一种基于群体轨迹的智能算法,适合解决优化函数无法用解析式完整表达的最优化问题<sup>[24]</sup>。但其存在早熟收敛问题,全局搜索能力弱,因此需要进行改进以获得更快的收敛速度和搜索能力。

文中提出一种基于亚群的改进粒子群优化 (improved particle swarm optimization, IPSO) 算法。在 IPSO 中,从可行空间中随机抽样一组点,然后将种群划分成若干亚群,亚群内粒子位置和速度的更新

基于 PSO。在种群周期性的搜索阶段,群内个体位置、速度被随机设定。在经过一定次数的迭代之后,亚群被迫混合,种群所有粒子的位置坐标重新分配给亚群,以实现群内信息交互提高搜索效率。

文中提出的 IPSO 求解 2.1、2.2 节描述的优化调度问题的流程如图 3 所示,具体步骤如下。

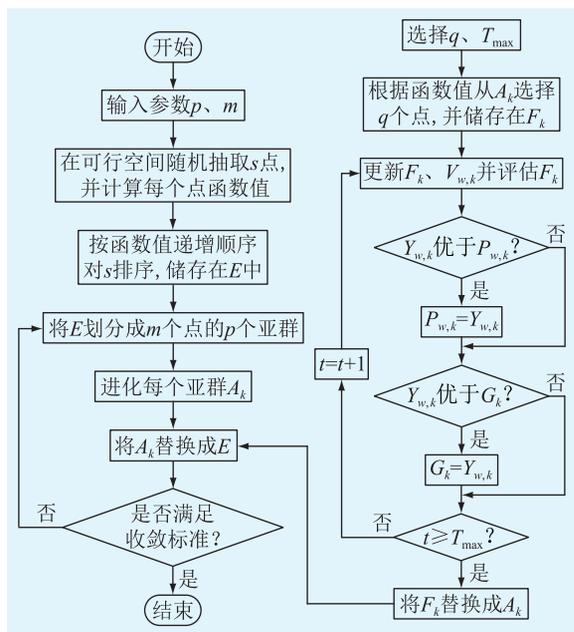


图 3 IPSO 求解流程

Fig.3 Solution flow of IPSO

步骤 1:初始化各项参数。选择  $p \geq 1, m \geq 1$ 。其中  $p$  为亚群的数量;  $m$  为每个复合体中的点数。计算样本  $s = pm$ 。样本  $s$  中的点  $X_1, X_2, \dots, X_g, \dots, X_s$  属于可行空间。计算每个解  $X_g$  的适应函数值  $f_g$ 。

步骤 2:排列。按适应度递增的顺序对所有位置坐标进行排序,将其储存在集合  $E = \{X_g, f_g \mid g = 1, 2, \dots, s\}$  中。

步骤 3:分区。将  $E$  分成  $p$  个亚群  $A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_p$ , 每个子群包含  $m$  个点。

$$A_k = \{X_{h,k}, f_{h,k} \mid X_{h,k} = X_{k+p(h-1)}; f_{h,k} = f_{k+p(h-1)}; h = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p\} \quad (34)$$

步骤 4:进化。分别使用 PSO 进化每个亚群  $A_k$ 。

步骤 4.1:初始化。设定种群规模  $q$  和最大迭代次数  $T_{max}$ 。

步骤 4.2:选择。根据函数值从  $A_k$  选择  $q$  个不同点  $Y_{1,k}, Y_{2,k}, \dots, Y_{q,k}$  来构造子群。 $A_k$  中更好的点被选中的概率更大。将其储存在  $F_k = \{Y_{w,k}, V_{w,k}, u_{w,k} \mid w = 1, 2, \dots, q\}$  中,其中  $V_{w,k}$  为粒子  $Y_{w,k}$  的速度;  $u_{w,k}$  为相应的函数值。找出每个粒子  $P_{w,k}$  的最佳前访问位置和整个种群  $G_k$  的个体最优位置。

步骤 4.3:比较。比较每个粒子  $Y_{w,k}$  和  $P_{w,k}$  之间的函数值。若  $Y_{w,k}$  优于  $P_{w,k}$ , 则  $Y_{w,k} = P_{w,k}$ 。比较每个粒子  $Y_{w,k}$  和  $G_k$  之间的函数值。若  $Y_{w,k}$  优于  $G_k$ , 则  $Y_{w,k} = G_k$ 。

步骤 4.4:更新。按照经典 PSO 的位置速度更新公式更新每个粒子,文中不再赘述。

步骤 4.5:迭代。重复步骤 4.3 和 4.4 迭代。

步骤 5:子群洗牌。将  $A_1, A_2, \dots, A_p$  替换为  $E$ , 按照函数值递增的顺序对  $E$  排序。

步骤 6:收敛判别。如果满足收敛标准则停止, 否则返回步骤 4。

### 3 仿真分析

#### 3.1 参数设置

仿真参数参照东北某省电源装机结构,各电源装机容量及其占比见表 1,包含 6 台火电机组、2 台核电机组、1 个风电场、1 个光伏电站以及 1 个抽水蓄能机组。核电机组和其他机组的详细参数参考文献 [6, 9, 11], 其具体参数见表 2—表 4。核电机组单位容量调峰燃料成本取 129.79 元/(MW·h); 单位调峰风险成本取 315.75 元/(MW·h); 弃风弃光惩罚成本取 2 437.63 元/(MW·h); 单位火电出力碳排放强度取 0.95; 碳配额系数取 0.7; 碳交易价格取 712.76 元/t。

表 1 东北某省电源类型及装机容量

Table 1 Type and installed capacity of power supply in Northeast China

电源分类	装机容量/MW	电源占比/%
火电机组	3 000	56.617
核电机组	700	13.228
风力发电	900	16.971
光伏发电	400	7.532
抽水蓄能机组	300	5.652

表 2 火电机组参数

Table 2 Thermal power unit parameters

参数	机组 1	机组 2
机组容量/MW	600	300
机组数量/台	4	2
出力上限/MW	600	300
出力下限/MW	200	100
最小停机时间/h	4	3
最小开机时间/h	6	4
爬坡限值/(MW·h <sup>-1</sup> )	200	150
$a_j$ /(元·MW <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	0.025	0.100
$b_j$ /(元·MW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	807.77	823.24
$c_j$ /(元·h <sup>-1</sup> )	49 893.09	33 927.30

表3 核电机组参数  
Table 3 Nuclear power unit parameters

参数	机组 1	机组 2
机组容量/MW	400	300
机组数量/台	1	1
出力上限/MW	400	300
出力下限/MW	120	90
最小低功率持续时间/h	4	4
最小满功率持续时间/h	6	6
爬坡限值/(MW·h <sup>-1</sup> )	280	210
$a_i$ /(元·MW <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	465.50	465.50
$b_i$ /(元·h <sup>-1</sup> )	365 217.39	328 695.65

表4 抽水蓄能机组参数  
Table 4 Pumped storage unit parameters

参数	数值	参数	数值
机组容量/MW	300	出力下限/MW	50
机组数量/台	1	机组效率/%	75
出力上限/MW	300	抽水功率/MW	300

风电、光伏出力和负荷曲线参考东北某省实际夏季典型日的预测曲线,如图4、图5所示。

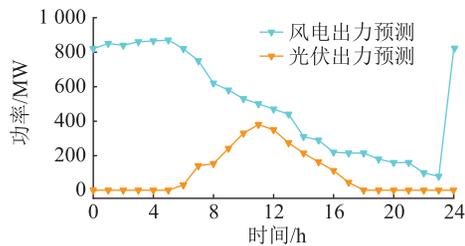


图4 夏季典型日负荷风光出力预测

Fig.4 Wind and photovoltaic power output forecast of typical daily load in summer

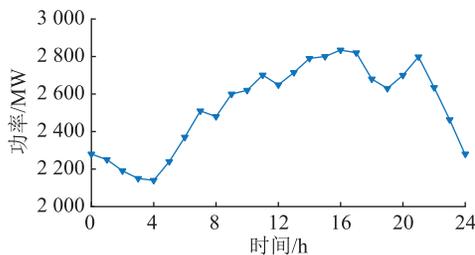


图5 夏季典型日负荷功率预测

Fig.5 Power forecast of typical daily load in summer

仿真验证根据核电机组是否参与调峰及是否考虑储能电站,设置3个方案进行对比。

方案1:火电机组参与调峰,不考虑抽水蓄能机组,核电机组以带基荷方式运行。

方案2:火电机组参与调峰,不考虑抽水蓄能机组,核电机组以日负荷跟随方式运行。

方案3:考虑风、光、火、核、储5种能源参与调

度,且核电机组参与调峰。

### 3.2 仿真结果

文中考虑上述3种方案下的系统调度结果,对比分析核电和储能捆绑调峰的优势。3种方案下各机组出力调度结果如图6—图8所示。

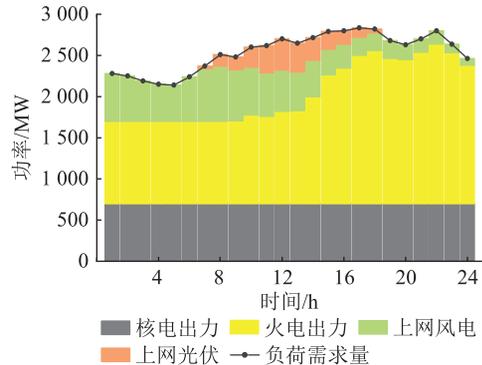


图6 方案1下各种类型机组出力区间

Fig.6 Output range of various types units in case 1

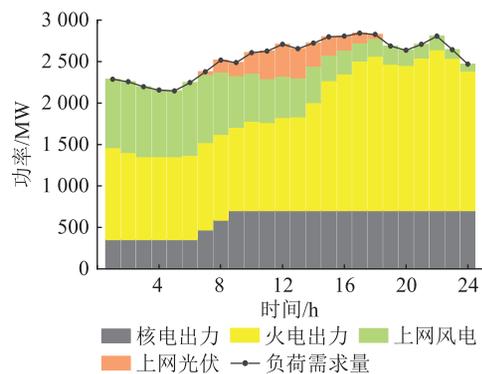


图7 方案2下各种类型机组出力区间

Fig.7 Output range of various types units in case 2

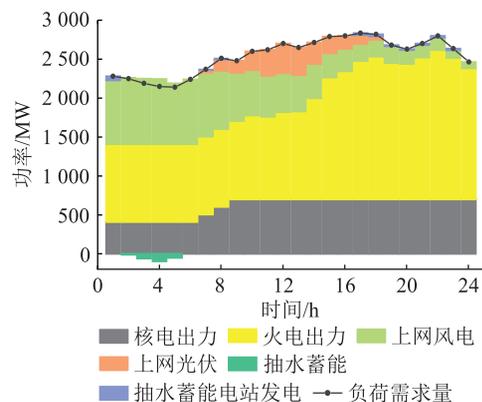


图8 方案3下各种类型机组出力区间

Fig.8 Output range of various types units in case 3

从图6可以看出,在方案1条件下,因核电的不可调节和火电的出力限制,风光的反调峰特性明显,在负荷较小且风光出力较大的时段,出现较大幅度的弃风弃光情况。

对比图6、图7可知,方案2考虑核电机组参与

调峰运行,因核电存在向下调峰能力,在负荷低谷时段,核电机组 1、2 在 0 时—8 时参与电网调峰,相对方案 1 风光上网量明显增加,弃风弃光量相对方案 1 降低 94.17%,说明核电参与调峰有利于促进风光资源的高效利用。

对比图 7、图 8 可知,方案 3 在方案 2 的基础上考虑增加适当容量的抽水蓄能机组参与系统调峰。对比前 2 个方案,在负荷低谷和风光充足时段,方案 3 的核电调峰幅度减缓,抽水蓄能机组运行于抽水状态,将部分风光电能存储起来,使得核电向下调峰的需求降低,在负荷高峰时段,风光出力不足,抽水蓄能机组提供部分电量支持高峰用电,有效降低风光出力不确定性影响。

3 种方案下核电机组的出力情况见图 9。方案 2 和方案 3 均考虑核电参与调峰,在负荷低谷时段 0 时—7 时,核电机组 1、2 降低出力调峰,其中方案 2 调峰深度达到了 50%,共计调峰量 2 450 MW·h。相比于方案 2,引入抽水蓄能机组后,核电机组 1、2 参与调峰的调峰深度为 50%和 30%,调峰深度减小,因为抽水蓄能机组的参与,系统具备充电工况,增加调峰能力,从而减小核电的调峰压力,有利于降低核电的调峰风险。

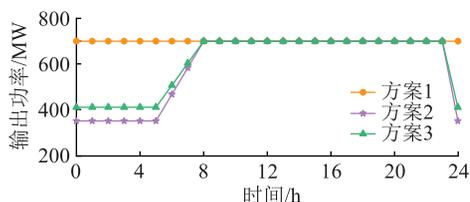


图 9 3 种方案核电机组出力情况

Fig.9 Output of nuclear power units in three cases

不同方案下的系统风光调度情况如图 10 所示。方案 2 和方案 3 的风光调度出力均较高,方案 1 未考虑核电和抽水蓄能机组捆绑调峰,弃风弃光量很大,说明文中所提模型可有效促进新能源的消纳。

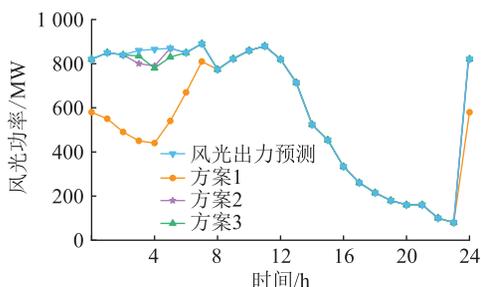


图 10 3 种方案风光功率

Fig.10 Wind and photovoltaic power in three cases

3 种方案下调度成本比较如表 5、表 6 所示。从表 5 可以看出,方案 2、方案 3 分别比方案 1 的

表 5 各方案设备成本对比

Table 5 Comparison of equipment cost of each case

方案	核电机组运行成本/元	火电机组运行成本/元	抽水蓄能机组运行成本/元	设备运行成本/元
1	193 149.5	3 681 832.6	0	3 874 982.1
2	153 149.5	3 046 170.5	0	3 199 320.0
3	126 895.9	2 951 300.7	4 506.9	3 082 703.5

表 6 各方案总成本对比

Table 6 Comparison of total cost of each case

方案	核电调峰风险成本/元	弃风弃光成本/元	碳排放成本/元	碳排放量/t
1	0	791 832.60	809 485.3	30 760.43
2	93 149.5	46 170.54	816 227.5	31 016.64
3	86 895.9	51 300.75	806 107.5	30 632.08

设备运行成本降低 17.4%和 20.4%。这表明核电机组参与调峰,可通过降低核电机组和火电机组运行成本进而降低设备运行成本。对比方案 2、方案 3,抽水蓄能机组参与,核电机组和火电机组运行成本分别降低 17.1%和 3.1%。因此,可以推断随着未来火电机组比例的进一步降低,抽水蓄能或其他储能技术对于调峰的经济性优势会更加显著。

由表 6 各指标对比可知,方案 1 核电不参与调峰,核电调峰成本为 0,方案 3 的核电调峰风险成本相对方案 2 降低 6.71%,说明抽水蓄能的参与可增强核电调峰的安全性,进一步提高调度灵活性。方案 2 弃风弃光量相对方案 1 减少 94.17%。而方案 2 的碳排放量要相对方案 3 增加 384.56 t,即为 1.26%,主要是因为核电的调峰灵活性的制约,在降低出力调峰时,会出现部分时段需要火电增加出力来弥补核电的功率缺额,使得碳排放量相对增加,方案 3 下碳排放量最低。对比 3 种方案下调峰风险成本,方案 1 由于核电出力最多,风险成本最低,但总成本最高,方案 3 调峰风险成本虽然不是最低,但是考虑抽水蓄能调峰之后,相比方案 2 的调峰风险成本显著下降。各方案中,总运行成本方案 3 最低,方案 2 次之,方案 1 最高,进一步验证了核电和抽水蓄能捆绑调峰所具备的低碳经济优势。

### 3.3 优化算法及核电风险建模对比

为证明文中所提核电调峰的风险量化模型的优越性,将其与文献[11]在方案 3 下对优化调度成本进行对比。优化结果的调度成本如表 7 所示。

在文献[11]中,除设备参数外,参与优化调度的能源种类与文中完全一致。但对于核电参与调峰的建模只局限于符合跟踪模式,并没有考虑对 0 级或 1 级核安全事件进行成本量化,因此没有核电

表7 文献[11]优化调度总成本

Table 7 Total cost of optimized scheduling in ref.[11]

参数	数值
核电机组运行成本/元	172 832.2
抽水蓄能机组运行成本/元	7 071.3
弃风弃光成本/元	82 696.8
火电机组运行成本/元	3 399 898.4
碳排放成本/元	808 243.7
碳排放量/t	30 713.3
设备运行成本/元	3 579 801.9

调峰风险成本。但从表7可以看出,相比文中所提方法,不考虑核电风险量化的调度策略使设备运行成本增加16.1%。与表6对比可知,将核电机组设置为负荷跟踪模式会弱化风电、光伏的发电效益,迫使核电和火电机组发出更多的电能以追踪负荷曲线。这表明文中的优化调度模型中核电机组具有更宽广的可调空间,能够提高核电调峰的灵活性和经济性。

为证明文中提出的IPSO的优越性,将其与经典PSO进行对比,种群规模都设置为50,迭代次数为500,测试软件为MATLAB 2018a,计算平台中央处理器为AMD R5900,内存为32 GB。收敛曲线如图11所示。

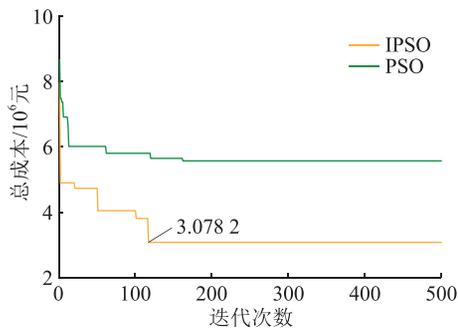


图11 优化算法总成本对比

Fig.11 Total cost comparison of optimization algorithm

由图11中可以看出,文中提出的IPSO具有更快的收敛速度和搜索精度。至迭代结束,IPSO和PSO用时分别为20.809 s和20.563 s,IPSO的总成本收敛结果比PSO低44.78%。由于迭代过程中的主要计算时间都在优化模型的仿真和计算,因此相比原理简单的PSO,IPSO复杂度提升对计算成本的影响极小。

## 4 结论

在当前能源转型背景下,文中通过构建核电调峰的经济风险量化模型,并加入抽水蓄能辅助核电的调峰行为,建立含风、光、火、核、储的多源互补调

峰调度模型。在现有调度资源基础上,考虑核电和抽水蓄能捆绑参与调峰,计及核电的调峰风险,在安全的基础上以期达到低碳和经济的双赢,同时实现风光清洁能源高比例消纳。仿真分析得到如下结论:

(1) 考虑核电以档位可调方式参与调峰,可以降低系统对火电调峰的依赖性,在提高系统新能源利用率能力的同时使弃风弃光量相对基本模式减少94.17%。但是由方案1、方案2的碳排放量对比可以看出,如果不配置储能装置,核电参与调峰会引导火电机组出力更多,只是通过减少启停频次来减少运行成本,本质上是火电参与调峰和核电承担基荷的工作内容进行一定的均衡。因此缺乏储能情况对于双碳政策的推进是不利的。

(2) 相比PSO,基于亚群的IPSO提高了搜索精度,使方案3下的设备运行成本降低44.78%。由于优化模型的泛函数非凸,因此无法得到全局最优,但是通过对种群的深度划分、协同进化可以提高局部最优解的性能。这种优化思路可以被迁移到绝大部分的基于种群行为的启发式算法中。

(3) 抽水蓄能的参与可提高核电调峰的灵活性和安全性,并缓解在低功率运行状态出现需要火电补足出力的情况,使碳排放量减少1.26%。该现象的原因是储能装置可提高发电设备的利用率。但是储能装置应该如何配置容量有待进一步研究。而且不同地区可利用的储能装置类型、容量不尽相同,应考虑当地负荷曲线、风光并网容量等因素合理进行容量配置优化,这也是未来的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等. 新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J]. 电网技术,2022,46(3):821-833.  
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3):821-833.
- [2] GE L J, LIU H X, YAN J, et al. Optimal integrated energy system planning with DG uncertainty affine model and carbon emissions charges[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2022, 13(2):905-918.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):171-191.
- [4] 徐帆,李利利,陈之栩,等. 平抑机组出力波动的发电计划模型及其应用[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):45-50,102.

- XU Fan, LI Lili, CHEN Zhixu, et al. Generation scheduling model and application with fluctuation reduction of unit output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(5): 45-50, 102.
- [5] SUI X, LU S Y, HE H, et al. Wind-thermal-nuclear-storage combined time division power dispatch based on numerical characteristics of net load [J]. Energies, 2020, 13(2): 364.
- [6] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化 [J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119, 2121.
- LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119, 2121.
- [7] ELIASI H, MENHAJ M B, DAVILU H. Robust nonlinear model predictive control for nuclear power plants in load following operations with bounded xenon oscillations [J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(2): 533-543.
- [8] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究 [J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.
- LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [9] 王骏, 赵洁, 刘涤尘, 等. 考虑核电参与的调峰优化运行模型 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1665-1674, 1903.
- WANG Jun, ZHAO Jie, LIU Dichen, et al. Optimal scheduling model of peak load regulation considering participation of nuclear power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1665-1674, 1903.
- [10] 胡弘, 韦化, 李昭昱. 风电接入下核电参与电力系统调峰的协调优化模型 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 31-39.
- HU Hong, WEI Hua, LI Zhaoyu. Coordinated optimization model considering nuclear power participating in peak load regulation of power system with wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 31-39.
- [11] 侯文庭, 韦化. 考虑核电可调度性的风-光-核-水-火多源协调短期优化调度 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2873-2882.
- HOU Wenting, WEI Hua. A multi-source coordinated short-term dispatch model considering the dispatchability of nuclear power plants [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(12): 2873-2882.
- [12] LIU Q, ZHAO J E, SHAO Y G, et al. Multi-power joint peak-shaving optimization for power system considering coordinated dispatching of nuclear power and wind power [J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4801.
- [13] WANG J, ZHAO J E, YE X L, et al. Safety constraints and optimal operation of large-scale nuclear power plant participating in peak load regulation of power system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(13): 3332-3340.
- [14] GEORGE-WILLIAMS H, LEE M, PATELLI E. Probabilistic risk assessment of station blackouts in nuclear power plants [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(2): 494-512.
- [15] 宁阳天, 罗翠云, 赵梓淇, 等. 计及核电调峰的新能源电力系统两阶段随机优化调度 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(2): 66-74, 126.
- NING Yangtian, LUO Cuiyun, ZHAO Ziqi, et al. A two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of renewable energy uncertainty [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2): 66-74, 126.
- [16] 和萍, 官智杰, 靳浩然, 等. 高比例可再生能源电力系统调峰问题综述 [J]. 电力建设, 2022, 43(11): 108-121.
- HE Ping, GONG Zhijie, JIN Haoran, et al. Review of peak-shaving problem of electric power system with high proportion of renewable energy [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 108-121.
- [17] 白青峰. 可再生能源发电与核电协调调度及发展 [J]. 中国电力, 2020, 53(2): 105-111.
- BAI Qingfeng. Coordinative dispatch and development of renewable energy and nuclear power generation [J]. Electric Power, 2020, 53(2): 105-111.
- [18] 李相俊, 赵珊珊, 惠东. 面向新型电力系统的大型储能电站关键技术发展趋势分析与展望 [J]. 供用电, 2022, 39(7): 2-8, 24.
- LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong. Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 2-8, 24.
- [19] ZANTYE M S, ARORA A, FARUQUE HASAN M M. Renewable-integrated flexible carbon capture: a synergistic path forward to clean energy future [J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(7): 3986-4008.
- [20] 周刚. 考虑核电参与的多类型电源联合调峰优化方法 [J]. 电网技术, 2019, 43(3): 928-935.
- ZHOU Gang. An approach on coordinative peaking optimization for power system with nuclear power plant participation [J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 928-935.
- [21] 安磊, 王绵斌, 齐霞, 等. “风、光、火、蓄、储”多能源互补优化调度方法研究 [J]. 可再生能源, 2018, 36(10): 1492-1498.
- AN Lei, WANG Mianbin, QI Xia, et al. Optimal dispatching of multi-power sources containing wind/photovoltaic/thermal/hydro-pumped and battery storage [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(10): 1492-1498.
- [22] NTOMARIS A V, BAKIRTZIS A G. Stochastic scheduling of hybrid power stations in insular power systems with high wind penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3424-3436.
- [23] 陈伟伟, 张增强, 张高航, 等. 计及需求响应及抽水蓄能的含风电系统鲁棒机组组合 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 75-82.

CHEN Weiwei, ZHANG Zengqiang, ZHANG Gaohang, et al. Robust unit commitment of power systems integrated wind power considering demand response and pumped storage units [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41 (2): 75-82.

[24] 游广增, 杭志, 陈凯, 等. 基于改进粒子群算法的风机频率控制研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3):43-50.

YOU Guangzeng, HANG Zhi, CHEN Kai, et al. Wind turbine generator frequency control based on improved particle swarm optimization[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020,

39(3):43-50.

作者简介:



梁毅

梁毅(1980),男,硕士,高级工程师,从事新型电力系统电网规划工作(E-mail: 163wally@163.com);

李华(1986),女,硕士,高级工程师,从事输电网规划工作;

刘航旭(1999),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统、分布式系统特性辨识。

## Multi source complementary peak shaving scheduling method considering nuclear power risk quantification

LIANG Yi<sup>1</sup>, LI Hua<sup>1</sup>, LIU Hangxu<sup>2</sup>, ZHONG Chongfei<sup>1</sup>, GE Leijiao<sup>2</sup>, ZHOU Mo<sup>1</sup>

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** To address the flexible and economical peak shaving issue of power grid in the presence of large-scale renewable energy penetration, a multi-source complementary peak shaving scheduling method with detailed consideration of nuclear power risk quantification is proposed. Firstly, the mechanism of low load peak shaving for nuclear power is analyzed, and its peak shaving risk quantitative indicators are considered to balance its economical efficiency and safety. Secondly, a wind-solar-thermal-nuclear-storage based multi source complementary peak shaving scheduling model is established, which takes the minimum total operating cost as the optimization goal, and considers the loss of wind and solar power waste and the increased power generation cost of different power sources participating in peak shaving, and the model is solved. Finally, case study demonstrates the effectiveness of the proposed optimization scheduling model and its superiority. The results show the proposed method can achieve a 94.17% reduction in wind and solar waste compared to thermal power peak shaving and nuclear power peak shaving without energy storage participation, and a 1.26% reduction in carbon emissions. This indicates a significant improvement of the peak shaving ability of a high proportion of wind and solar power grid within multi source complementary mode. The proposed method provides a practical approach to realize economical and low carbon economy operation of multi source complementary system.

**Keywords:** multi source complementarity; peak shaving; low carbon economy; risk quantification; nuclear power; pumped storage

(编辑 吴昊)