

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.06.001

# 考虑核电灵活参与调峰的多源联合运行低碳经济调度

吴熙<sup>1</sup>, 陈康文<sup>1</sup>, 郭其胜<sup>1</sup>, 刘奕晨<sup>1</sup>, 岳付昌<sup>2</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司连云港供电分公司, 江苏 连云港 222004)

**摘要:**在含高比例核电机组和新能源发电设备的沿海地区电网,系统调峰压力严峻。为了满足系统调峰需求,充分挖掘核电调峰潜力,建立核电灵活出力参与调峰的核-光-储-蓄-火联合运行优化调度模型。首先,针对核电灵活出力的非线性特性,采用0-1变量进行线性化有效约束;然后,充分考虑各电源的运行特性及成本,建立完整的系统运行约束;最后,在传统的以经济调度为优化目标的基础上,引入不同碳交易机制,并兼顾系统新能源消纳水平。算例分析验证了模型的有效性,结果表明,所提优化调度模型充分实现了核电的灵活出力,有效缓解了系统调峰压力,减少常规火电机组的频繁启停,并有效提高了新能源的消纳水平,使系统运行更加经济性和低碳性。

**关键词:**核电机组;核电调峰出力;多源联合运行;调峰策略;碳交易;优化调度

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)06-0001-11

## 0 引言

双碳目标下,我国能源结构加快调整优化,火电逐步退役,光伏、风电等新能源接入规模突增,核电的核准速度和数量也持续攀高,以抽水蓄能为代表的可储能电源迅速发展。随着核电在沿海地区电网中比重的增长、电力需求的放缓以及负荷峰谷差的日益增大,系统可调峰容量逐步减小,系统调峰形势越来越严峻。传统核电带基荷运行严重挤压了其他电源的发电空间,以火电为调峰主体的电网调峰压力进一步加剧,迫使火电等常规机组频繁启停,“弃风弃光”问题严重,核电机组参与系统调峰的需求愈发迫切<sup>[1-5]</sup>。

核电是我国推进建设低碳新型电力系统的重要分支<sup>[6-7]</sup>,其发展势头强劲且已具备相当规模。经国内外核电机组的运行验证,核电机组日负荷跟踪运行具备可行性和可靠性<sup>[8]</sup>。核电机组具备参与系统日调峰能力,但目前国内仍多以基荷方式运行。对于核电占比较高的沿海城市,调峰压力主要在核电机组,因此挖掘现有电源调峰潜力、联合机组调峰是解决系统调峰问题的有效途径,如何发挥核电调峰优势将成为未来发展的重要关注点<sup>[9-11]</sup>。

目前核电机组参与日调峰的出力模式较为固定,对其在调峰时间、调峰深度等方面的灵活性研究不足,未能充分挖掘其调峰潜力,且与多电源联合参与调峰的运行模式研究成果较少。文献[12]

总结法国核电机组运行经验,并依此说明核电出力在功率调节深度和调节速率方面可以有更多选择。文献[13]综述核电参与系统调峰的出力方式,并提出核电机组与其他电源联合运行调峰将是未来电网发展的关键问题。文献[14-15]对核电机组参与联合运行调峰的模式进行综述和总结,并证明核电调峰成本处于较低水平且能够缓解电网调峰压力。文献[16]针对核电参与的联合运行,采取了有偿调峰措施,但仅考虑火电、抽蓄等传统电源参与系统调峰。文献[17]提出核电与抽水蓄能联合运行跟踪日负荷的3种模式,根据电网实际情况进行选择可以提高其联合运行的经济性,但本质上仅是对抽蓄机组灵活性能力的探索。上述文献均忽略了核电机组对于提升系统调峰能力的重要作用。文献[18]对核电机组采用“12-3-6-3”的固定出力模式(12为满出力运行时间,3为线性降功率运行时间,6为低功率运行时间,3为线性升功率运行时间),表明核电机组参与系统日调峰能够明显降低火电运行成本,进而降低总运行成本,但仅利用了核电机组固有的调峰能力。文献[19]提出一种多源优化调度模型,该模型优化调峰时的核电出力,同时使火电、水电等常规电源的出力更加平缓,实现对风电和光伏发电的全部消纳,但是采用的核电调峰模式并不具有灵活性。文献[20]给出的火-蓄-核联合调峰模型在负荷低谷期核电参与调峰可以有效降低电网发电整体成本。文献[21-22]重点考虑核电安全,建立的联合优化运行方案与其他多种传统核电出力方案进行对比,证明该优化方案可以显著提高电力系统调度运行的经济性。文献[23]提出

收稿日期:2024-06-20;修回日期:2024-08-18

基金项目:国家重点研发计划资助项目“交通自洽多类能源技术效能评估方法研究”(2022YFB2603100)

一种电力系统鲁棒调度,计及新能源的消纳水平,建立含核电在内的多类型电源鲁棒调度模型,设置算例证明该鲁棒模型在新能源消纳和运行经济性方面的优势。文献[24]充分考虑核电调峰的出力模型及安全约束,提出一种火-核-蓄联合运行的优化调度模型,但核电出力仅在3档固定调峰深度下进行选择。以上研究针对核电出力模型的处理较为简单,并不能明显体现核电灵活出力参与调峰的优势所在。

此外,我国碳交易市场不断完善,参与碳交易市场也是电力系统减少碳排放量的重要途径。目前采用碳交易机制的模型大多采用单一碳价模型,对阶梯碳价模型使用较少。文献[25]在含风电的优化调度中引入阶梯碳交易机制,对高碳排放量进行分段惩罚。文献[26]完善阶梯碳交易机制,既考虑高排放量的分段惩罚,同时考虑低碳排放量的分段奖励。基于此,文中在已有研究工作基础上,针对系统中不同电源及负荷特性,引入不同碳交易机制,以系统的经济性和低碳性为原则,考虑核电出力在调峰深度和调峰时间的灵活性,同时完善核电灵活出力模型的约束,提出一种核-光-储-蓄-火联合运行优化调度模型,以缓解系统调峰压力,实现系统运行调度的经济低碳性。最后,通过算例验证了该模型的有效性。

## 1 核电灵活出力模型

现代核电机组均设计具备日调峰能力,在安全运行范围内能够通过调节控制棒位移深度实现功率的快速调节。我国常见的CPR1000堆型核电机组属于改进的第二代压水堆堆型,能够实现前80%寿期内进行日调峰;新一代核电机组AP1000和拥有我国自主知识产权的“华龙一号”核电机组具有更优越的运行性能,能够实现全寿期功率调节,且具有更大的调峰深度和更快的调节速率,因此在参与调峰出力上可以更加灵活。

### 1.1 核电参与调峰运行特性分析

一般来说,核电机组功率调节范围与机型、燃料寿期等有关,最高能够实现 $15\%P_N \sim 100\%P_N$  ( $P_N$ 为额定功率)范围内调节,其功率调节速率一般最高可实现 $\pm 5\%P_N/\text{min}$ ,且第三代机型在运行上具备 $\pm 10\%P_N/\text{min}$ 的功率阶跃变化能力,功率灵活调节能力更为突出。但受本身反应堆等安全约束,在核电寿期末的功率调节范围将会变小。此外,核电机组频繁进行功率调节,参与系统调峰会对核电机组中常规岛的寿命和安全都有一定负面作用,且当功

率下调时,随着负荷因子的下降,核电机组的热循环效率降低,厂用电升高,发电效率下降,运行维护成本、燃料成本也会相应升高。因此,核电参与调峰需要综合考虑,在确保核电安全运行前提下搜索核电调度灵活性、经济性和低碳性的寻优空间。

核电机组参与调峰的模式可以分为日负荷跟踪、周负荷跟踪和年负荷跟踪。其中年负荷跟踪模式以核电机组根据年负荷特性进行合理安排投运及停修实现,负荷低谷期核电机组停运数量多,高峰期核电机组停运数量少;周负荷跟踪模式以核电机组长期低功率运行实现,但是该运行方式累计次数和天数均受核电机组自身安全条件限制;日负荷跟踪模式主要分为典型跟踪模式、与储蓄联合跟踪模式、固定调峰深度跟踪模式和灵活出力日负荷跟踪模式。

在上述不同日负荷跟踪方式中,典型跟踪模式为固定调峰深度的“12-3-6-3”“18-2-2-2”和“15-1-7-1”等运行方式,其中“12-3-6-3”的典型跟踪模式如图1所示,该出力模式比较符合电网日负荷变化趋势。

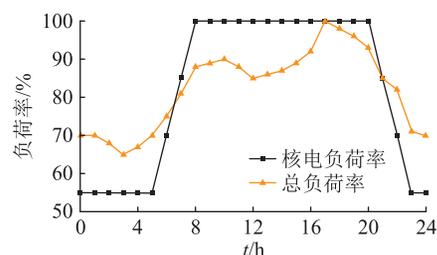


图1 核电机组典型日负荷跟踪模式

Fig.1 Typical daily load tracking pattern for nuclear power units

与储蓄联合跟踪模式是指核电机组始终满功率运行,储能或抽蓄根据负荷的变化,利用其灵活的切换充放电工况的能力进行相应变化出力的调峰;固定调峰深度跟踪模式是指设置例如30%、50%和70%额定功率的几档固定的调峰深度,在调度中只在这固定的档位之间进行优化出力参与系统调峰;灵活出力日负荷跟踪模式是指核电调峰深度、调节速率和高低功率运行时间可在规定范围内根据负荷特性进行灵活选择优化的跟踪模式。

### 1.2 核电灵活出力模型分析

核电机组灵活出力跟踪模式是目前较为理想的参与系统调峰的出力方式。相较于上述其他日负荷跟踪方式,该模式可以在运行约束范围内根据日负荷特性进行出力优化,实现调峰深度、调节速率和高低功率运行时间的精确优化。

具体实现过程如下:在上述核电日负荷跟踪出

力模型的基础上,通过改变调峰深度、调节速率和高功率运行时间灵活参与系统调度运行,建立核电机组的灵活出力模型,如图2所示。

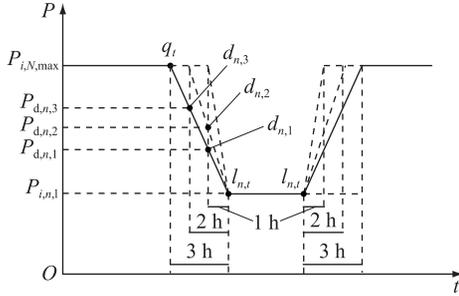


图2 核电机组灵活出力模型

Fig.2 Nuclear power units flexible output model

将核电机组的调峰深度分为  $N$  档,第  $n$  档的调峰深度可表示为:

$$P_{i,n} = (P_{i,N,\max} - P_{i,N,\min})n/N \quad (1)$$

式中: $P_{i,n}$ 为核电机组  $i$  的第  $n$  档调峰深度; $P_{i,N,\max}$ 为核电机组  $i$  的最大出力; $P_{i,N,\min}$ 为核电机组  $i$  的最小出力。

对应档位的核电低功率阶段功率可表示为:

$$P_{i,n,1} = P_{i,N,\max} - P_{i,n} \quad (2)$$

式中: $P_{i,n,1}$ 为核电机组  $i$  的第  $n$  档调峰深度下低功率运行值。

核电机组的功率线性变化时间一般规定为 1~3 h,对应不同功率升降速率阶段有不同的功率过渡值,因此需要在每个档位下设置  $r$  个功率过渡状态  $d_{n,r}$ ,升降功率变化时间为 3 h 时,设置 2 个过渡状态  $d_{n,3}$  和  $d_{n,1}$ ;变化时间为 2 h 时,设置 1 个过渡状态  $d_{n,2}$ ;变化时间为 1 h 时无需设置功率过度状态。

按照功率状态划分其档位调峰深度下对应的核电功率,可表示为:

$$P_{d,n,r} = P_{i,n,1} + P_{i,n}(1+r)/6 \quad (3)$$

式中: $P_{d,n,r}$ 为第  $n$  档调峰深度下的第  $r$  个功率状态下的功率运行值, $r=1,2,3$ 。

由于核电机组的出力不能自由调节,优化时需确定核电的调峰深度及调节速率 2 个变量,而 2 个变量存在乘积耦合,且出力存在时间耦合关系,会造成核电出力的非凸特性,导致求解困难。

为保证核电机组出力的线性化表达,实现模型的高效求解,采用将相乘变为相加的解耦合思路,确定上述 2 个变量中的调峰深度,采取细分调峰深度的方法实现。即确定核电调峰深度为 50%,调峰档数为 50 档,即每档调节 1% 的功率。将核电出力离散化,其表达分为 3 个阶段:满功率阶段、低功率阶段和升降功率阶段,每个阶段分别采用不同的 0-

1 运行标志对核电出力约束进行量化表达。则核电机组  $i$  在第  $t$  时段的功率可表示为:

$$P_{i,t} = q_t P_{i,N,\max} + \sum_{n=1}^{50} l_{n,t} P_{i,n,1} + \sum_{n=1}^{50} \sum_{r=1}^3 d_{n,r,t} P_{d,n,r} \quad (4)$$

式中: $q_t$ 为  $t$  时段满功率运行标志; $l_{n,t}$ 为  $t$  时段第  $n$  档调峰深度下的低功率运行标志; $d_{n,r,t}$ 为第  $n$  档调峰深度下第  $r$  个状态  $t$  时段的升降功率运行标志。所有运行标志均为 0-1 变量。

核电运行须考虑其安全特性进一步精细化出力表达。因核电出力不能随意进行调节,且出力必须满足其时间耦合关系,因此设置如下约束。

(1) 为保证核电机组出力的唯一性,即在同一时刻只允许在一个功率下,应满足如下约束:

$$q_t + \sum_{n=1}^{50} l_{n,t} + \sum_{n=1}^{50} \sum_{r=1}^3 d_{n,r,t} = 1 \quad (5)$$

(2) 核电机组需要在满功率运行和低功率运行状态下满足一定的运行时间,应满足如下约束:

$$q_x \geq q_t - q_{t-1} \quad x \in [t, \min(t + T_h - 1, 24)] \quad (6)$$

$$l_{n,x} \geq l_{n,t} - l_{n,t-1} \quad x \in [t, \min(t + T_l - 1, 24)] \quad (7)$$

式中: $q_x$ 、 $l_{n,x}$ 分别为  $x$  时刻的满功率、 $n$  档调峰深度下的低功率运行标志; $T_h$ 、 $T_l$ 分别为满功率运行下和低功率运行下最小持续时间。

(3) 核电机组在升降功率过程中,要满足严格的升降顺序,即时间耦合约束。以 3 h 下调节功率过程为例,其时间耦合应为从满功率状态  $q_t$  到  $d_{n,3,t}$  运行状态到  $d_{n,1,t}$  运行状态再到低功率运行状态  $l_{n,t}$ ,即  $q_t \rightarrow d_{n,3,t} \rightarrow d_{n,1,t} \rightarrow l_{n,t}$ 。

因此功率线性变化时间为 3 h 的时间耦合约束为:

$$\begin{cases} q_{t+1} \geq d_{n,3,t} + d_{n,1,t-1} - 1 \\ l_{n,t+1} \geq d_{n,1,t} + d_{n,3,t} - 1 \\ d_{n,1,t+1} \geq d_{n,3,t} + q_{t-1} - 1 \\ d_{n,3,t+1} \geq d_{n,1,t} + l_{n,t-1} - 1 \end{cases} \quad (8)$$

功率线性变化时间为 2 h 的时间耦合约束为:

$$\begin{cases} q_{t+1} \geq d_{n,2,t} + l_{n,t-1} - 1 \\ l_{n,t+1} \geq d_{n,2,t} + q_{t-1} - 1 \end{cases} \quad (9)$$

(4) 档位选择互斥约束。上述时间耦合约束仅确保核电在确定档位下的升降顺序约束,当核电在前一时刻进入某一档位后,还要确保随后的时刻在该档位下的满功率、升降功率或低功率阶段,即不能进行跳档选择。相应约束表达为:

$$\begin{cases} l_{n,t-1} \leq q_{n,t} + l_{n,t} + d_{n,1,t} + d_{n,2,t} \\ d_{n,1,t-1} \leq l_{n,t} + d_{n,3,t} \\ d_{n,2,t-1} \leq q_{n,t} + l_{n,t} \\ d_{n,3,t-1} \leq q_{n,t} + d_{n,1,t} \\ q_{n,t-1} \leq q_{n,t} + \sum_{n=1}^{50} l_{n,t} + \sum_{n=1}^{50} d_{n,2,t} + \sum_{n=1}^{50} d_{n,3,t} \end{cases} \quad (10)$$

## 2 核电参与调峰的联合运行优化模型

考虑核电灵活出力参与调峰的联合运行优化模型的运行原则及目的主要有以下3点:一是使系统的运行成本最小,即计及各电源的发电和调峰成本,合理安排各电源的出力和调峰深度,使总运行成本最小;二是实现对所存在的新能源发电,即光电的最大化消纳,若当其他电源参与调峰仍无法满足电网的调峰需求,则考虑适当弃光,但须计及其弃光惩罚成本;三是基于低碳化调度理念,引入碳交易机制,尽量减少系统的碳排放强度。通过对以上3点的考量,最终实现多源运行的协同优化。

### 2.1 考虑弃光惩罚的经济调度目标

系统总运行成本,主要包括各电源的发电成本、调峰产生的额外成本、机组启动或停机产生的成本以及光伏发电弃光所设置的弃光惩罚成本。建立经济调度目标函数为:

$$\min C_1 = C_f + C_{nu} + C_{ps} + C_{es} + C_{curt} \quad (11)$$

式中: $C_1$ 为系统总运行成本; $C_f$ 为火电机组运行成本; $C_{nu}$ 为核电机组运行成本; $C_{ps}$ 为抽水蓄能运行成本; $C_{es}$ 为储能系统运行成本; $C_{curt}$ 为光伏弃光惩罚成本。

(1) 火电机组运行成本。火电机组的运行成本包括燃煤成本和机组启停成本。可表示为:

$$C_f = \sum_{i=1}^T \sum_{j=1}^{N_f} (\alpha_{f,j} P_{f,j,t}^2 + \beta_{f,j} P_{f,j,t} + \gamma_{f,j} + z_{j,s,t} + z_{j,e,t}) \quad (12)$$

式中: $\alpha_{f,j}$ 、 $\beta_{f,j}$ 、 $\gamma_{f,j}$ 为火电机组 $j$ 的燃煤成本系数; $z_{j,s,t}$ 、 $z_{j,e,t}$ 分别为火电机组 $j$ 在 $t$ 时刻启动一次和关机一次的成本; $P_{f,j,t}$ 为火电机组 $j$ 在 $t$ 时刻的出力; $N_f$ 为火电机组的数量; $T$ 为调度周期。

(2) 核电机组运行成本。除考虑正常发电时的发电燃料成本外,如文中1.1节所述,核电参与调峰运行时还需要考虑对其安全性及经济性的影响,将其计为调峰成本。可表示为:

$$C_{nu} = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_{nu}} [a_{nu,i} P_{nu,i,t} + b_{nu,i} + C_R(P_{i,N,max} - P_{nu,i,t})] \quad (13)$$

式中: $a_{nu,i}$ 、 $b_{nu,i}$ 为核电机组 $i$ 的发电成本系数; $C_R$ 为核电机组调峰时发电成本增幅和调峰燃料成本增加所带来的额外成本<sup>[14]</sup>; $P_{nu,i,t}$ 为核电机组 $i$ 在 $t$ 时刻的出力; $N_{nu}$ 为核电机组的数量。

(3) 抽水蓄能运行成本。抽水蓄能机组主要是通过不断切换发电和抽水两种工况进行工作,其运行成本主要包含机组的开机成本,关机成本可忽略不计。可表示为:

$$C_{ps} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{ps}} (z_{g,k} u_{g,k,t} + z_{p,k} u_{p,k,t}) \quad (14)$$

式中: $z_{g,k}$ 、 $z_{p,k}$ 分别为抽水蓄能机组 $k$ 的发电机开机一次和电动机开机一次的成本; $u_{g,k,t}$ 、 $u_{p,k,t}$ 分别为抽水蓄能机组 $k$ 在 $t$ 时刻发电、抽水启停状态标志,为0-1变量,0表示停止,1表示启动; $N_{ps}$ 为抽水蓄能机组的数量。

(4) 储能系统运行成本。考虑储能系统的充放电效率损失,计算其发电成本。当系统放电时计为收益,系统充电时计为收费,从而得出其运行成本。可表示为:

$$C_{es} = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{es}} (C_{ch} P_{es,c,m,t} - C_{dis} P_{es,dis,m,t}) \quad (15)$$

式中: $C_{ch}$ 为储能系统充电成本系数; $C_{dis}$ 为储能系统放电收益系数; $P_{es,c,m,t}$ 、 $P_{es,dis,m,t}$ 分别为储能系统 $m$ 在 $t$ 时刻的充电、放电功率; $N_{es}$ 为储能系统的数量。

(5) 光伏弃光惩罚成本。光伏发电的消纳能力可由调度周期 $T$ 内总的弃光电量进行表征,总弃光电量越少,消纳能力越强。光伏弃光时需要设置弃光惩罚系数量化光伏发电的消纳能力,因此存在弃光成本。可表示为:

$$C_{curt} = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^{N_{pv}} C_V (P_{PV,w,t} - P_{pv,w,t}) \quad (16)$$

式中: $C_V$ 为弃光惩罚系数; $P_{PV,w,t}$ 、 $P_{pv,w,t}$ 分别为光伏电站 $w$ 在 $t$ 时刻的并网发电功率和实际发电功率; $N_{pv}$ 为光伏电站的数量。

### 2.2 引入碳交易机制的低碳化目标

引入碳交易机制能够实现能源结构的优化配置,在碳排放总量受到严格控制的情况下,政府对一对碳排放权进行分配<sup>[27]</sup>。发电机组可以根据自身实际碳排放量通过碳交易市场购买或出售相应的碳排放权。文中采用基于发电量的免费初始碳排放权分配方法<sup>[28]</sup>。则该系统所分配的碳排放配额为:

$$E_c = \sum_{i=1}^T \varepsilon P_i \quad (17)$$

式中: $\varepsilon$ 为单位电量碳排放分配系数,由该系统所在区域的电量边际排放因子和容量边际排放因子加

权平均得到; $P_t$ 为 $t$ 时刻所有发电机组的有功出力。

文中所提核电灵活出力参与调峰的调度模型中,核电、抽蓄、储能及光电均可看作清洁、无污染的绿色能源,因此系统中的碳排放主要来源于火电机组。系统的碳排放量为:

$$E_{\text{out}} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_f} \varphi_j P_{f,j,t} \quad (18)$$

式中: $\varphi_j$ 为火电机组 $j$ 单位出力的碳排放强度。

针对碳交易机制,可以对比基准碳价交易模型和考虑奖惩系数的阶梯碳交易模型<sup>[26]</sup>。

对于碳交易价格始终不变的基准碳价交易模型,系统的调度周期内的碳交易成本可表示为:

$$C_2 = C_c(E_{\text{out}} - E_c) \quad (19)$$

式中: $C_c$ 为碳交易价格。

而在阶梯碳价模型中,碳交易价格根据碳排放量进行区间划分,碳排放量越大的区间的碳价越高,这意味着对碳排量大的系统要进行惩罚;同理,对于碳排放量低的系统,要进行一定的奖励。因此,阶梯碳交易价格 $C'_c$ 可表示为:

$$C'_c = \begin{cases} C_c(1+2L) & E_{\text{out}} < E_c - 2p \\ C_c(1+L) & E_c - 2p \leq E_{\text{out}} < E_c - p \\ C_c & E_c - p \leq E_{\text{out}} < E_c + p \\ C_c(1+F) & E_c + p \leq E_{\text{out}} < E_c + 2p \\ C_c(1+2F) & E_{\text{out}} \geq E_c + 2p \end{cases} \quad (20)$$

式中: $L$ 、 $F$ 分别为碳交易价格的奖励、惩罚系数; $p$ 为碳交易量区间长度。

此时在上述5个区间段的各个碳交易成本可分别表示为:

$$C_2 = \begin{cases} C_c(1+2L)(E_{\text{out}} - E_c + 2p) - C_c(2+L)p & E_{\text{out}} < E_c - 2p \\ C_c(1+L)(E_{\text{out}} - E_c + p) - C_cp & E_c - 2p \leq E_{\text{out}} < E_c - p \\ C_c(E_{\text{out}} - E_c) & E_c - p \leq E_{\text{out}} < E_c + p \\ C_c(1+F)(E_{\text{out}} - E_c - p) + C_cp & E_c + p \leq E_{\text{out}} < E_c + 2p \\ C_c(1+2F)(E_{\text{out}} - E_c - 2p) - C_c(2+F)p & E_{\text{out}} \geq E_c + 2p \end{cases} \quad (21)$$

综合考虑以上因素,系统总的低碳经济优化目标可表示为:

$$\min C = \min(C_1 + C_2) \quad (22)$$

### 2.3 优化模型的约束条件

在系统联合运行优化过程中,约束条件主要考

虑系统的功率实时平衡约束、系统正负旋转备用容量约束及各电源运行特性约束。

(1) 功率实时平衡约束。

$$P_{\text{load},t} = \sum_{i=1}^{N_{\text{nu}}} P_{\text{nu},i,t} + \sum_{j=1}^{N_f} P_{f,j,t} + \sum_{k=1}^{N_{\text{ps}}} P_{\text{ps},k,t} + \sum_{m=1}^{N_{\text{es}}} P_{\text{es},m,t} + \sum_{w=1}^{N_{\text{pv}}} P_{\text{pv},w,t} \quad (23)$$

式中: $P_{\text{load},t}$ 为在 $t$ 时刻的负荷功率; $P_{\text{ps},k,t}$ 为抽水蓄能机组 $k$ 在 $t$ 时刻的功率; $P_{\text{es},m,t}$ 为储能系统 $m$ 在 $t$ 时刻的功率。

(2) 系统正负旋转备用容量约束。

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{N_f} (P_{f,j,\text{max}} - P_{f,j,t}) \geq L_u P_{\text{load},t} \\ \sum_{j=1}^{N_f} (P_{f,j,t} - P_{f,j,\text{min}}) \geq L_d P_{\text{load},t} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $L_u$ 为系统正旋转备用系数; $L_d$ 为系统负旋转备用系数; $P_{f,j,\text{max}}$ 、 $P_{f,j,\text{min}}$ 分别为火电机组 $j$ 的最大、最小出力。

(3) 火电机组运行约束。火电机组的运行约束主要为出力上下限约束、爬坡约束、启动和最小启停持续时间约束。

运行出力上下限约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{f,j,t} \geq u_{f,j,t} P_{f,j,\text{min}} \\ P_{f,j,t} \leq u_{f,j,t} P_{f,j,\text{max}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $u_{f,j,t}$ 为火电机组 $j$ 在 $t$ 时刻的运行状态,为0-1变量,0表示停止,1表示运行。

出力爬坡约束可表示为:

$$-R_{f,j,\text{down}} \leq P_{f,j,t} - P_{f,j,t-1} \leq R_{f,j,\text{up}} \quad (26)$$

式中: $R_{f,j,\text{up}}$ 、 $R_{f,j,\text{down}}$ 分别为火电机组 $j$ 的最大上、下坡功率。

需要特别强调,在实际运行中,火电机组在启动或停机时刻的功率值变化往往允许大于所规定的最大上下爬坡速率,因此须在启停时刻设置相应的最大启停升降功率。

最小启停持续时间约束可表示为:

$$\begin{cases} u_{f,j,x} \geq u_{f,j,t} - u_{f,j,t-1} \\ x \in [t, \min(t + T_{j,\text{on}} - 1, 24)] \\ u_{f,j,x} \geq 1 - (u_{f,j,t-1} - u_{f,j,t}) \\ x \in [t, \min(t + T_{j,\text{off}} - 1, 24)] \end{cases} \quad (27)$$

式中: $T_{j,\text{on}}$ 、 $T_{j,\text{off}}$ 分别为火电机组 $j$ 的最小启动和停机持续时间。

(4) 抽水蓄能机组运行约束。抽水蓄能机组 $k$ 在 $t$ 时刻的出力可表示为:

$$P_{\text{ps},k,t} = u_{g,k,t} P_{g,k,t} - u_{p,k,t} P_{p,k,t} \quad (28)$$

式中: $P_{g,k,t}$ 为抽水蓄能机组 $k$ 在 $t$ 时刻发电功率值;

$P_{p,k,t}$  为抽水蓄能机组  $k$  在  $t$  时刻抽水功率值。

抽水蓄能机组的运行约束主要为出力上下限约束、运行状态互斥约束、抽水/发电和水流量耦合约束、上下水库容量耦合约束、上下水库容量约束和水量平衡约束。

发电和抽水出力上下限约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{k,\min} \leq P_{g,k,t} \leq P_{k,\max} \\ P'_{k,\min} \leq P_{p,k,t} \leq P'_{k,\max} \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $P_{k,\min}$ 、 $P_{k,\max}$ 、 $P'_{k,\min}$ 、 $P'_{k,\max}$  分别抽水蓄能机组  $k$  的最小、最大发电和抽水功率, 由于抽水工况下功率一般为定值, 抽水运行状态下的约束条件可以忽略<sup>[29]</sup>。

运行状态互斥约束为在任意时刻, 机组只能运行在抽水状态、发电状态、停机状态中的某一种状态。

机组抽水/发电功率和水流量的耦合约束可表示为:

$$\begin{cases} P_{g,k,t} = f_g(Q_{g,k,t}, H_t, \eta_{ps}) \\ P_{p,k,t} = f_p(Q_{p,k,t}, H_t) \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $f_g$ 、 $f_p$  分别为抽水蓄能机组发电、抽水功率函数;  $Q_{g,k,t}$ 、 $Q_{p,k,t}$  分别为抽水蓄能机组  $k$  在  $t$  时刻的发电、抽水流量;  $H_t$  为抽水蓄能机组  $t$  时刻的扬程;  $\eta_{ps}$  为抽水蓄能机组的发电效率。

上下水库容量耦合约束可表示为:

$$\begin{cases} Z_{k,t} = Z_{k,t-1} + Q_{p,k,t} - Q_{g,k,t} \\ S_{k,t} = S_{k,t-1} + Q_{g,k,t} - Q_{p,k,t} \end{cases} \quad (31)$$

式中:  $Z_{k,t}$ 、 $S_{k,t}$  分别为抽水蓄能机组  $k$  在  $t$  时刻上、下水库的库容量。

上下水库容量约束可表示为:

$$\begin{cases} Z_{k,\min} \leq Z_{k,t} \leq Z_{k,\max} \\ S_{k,\min} \leq S_{k,t} \leq S_{k,\max} \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $Z_{k,\min}$ 、 $Z_{k,\max}$  分别为抽水蓄能机组  $k$  上水库的最小、最大库容量;  $S_{k,\min}$ 、 $S_{k,\max}$  分别为抽水蓄能机组  $k$  下水库的最小、最大库容量。

水量平衡约束为在一个调度周期内应确保抽水量和发电用水量的平衡, 从而保证抽蓄能够连续运行。可表示为:

$$\sum_{t=1}^T P_{g,k,t} = \eta_{ps} \sum_{t=1}^T P_{p,k,t} \quad (33)$$

(5) 储能系统运行约束。储能系统  $m$  在  $t$  时刻的功率可表示为:

$$P_{es,m,t} = u_{es,dis,m,t} P_{es,dis,m,t} - u_{es,c,m,t} P_{es,c,m,t} \quad (34)$$

式中:  $u_{es,c,m,t}$ 、 $u_{es,dis,m,t}$  分别为储能系统  $m$  在  $t$  时刻充电、放电状态标志, 为 0-1 变量, 0 表示停止, 1 表示运行。

储能系统的运行约束主要包括电量耦合约束、最大充放电功率约束、运行状态互斥约束、电池荷电状态约束和电容量平衡约束。

电量耦合约束为当前电量受其先前时段的充放电影响, 存在功率和时间的相互耦合。充电和放电状态下的电量耦合约束表示为:

$$E_{m,t+1} = E_{m,t} - P_{es,m,t} \eta_C \Delta t \quad (35)$$

$$E_{m,t+1} = E_{m,t} - \frac{P_{es,m,t} \Delta t}{\eta_D} \quad (36)$$

式中:  $E_{m,t}$  为储能系统  $m$  在  $t$  时刻的电量;  $\eta_C$ 、 $\eta_D$  分别为储能系统的充、放电效率;  $\Delta t$  为时间间隔。

最大充放电功率约束可表示为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{es,c,m,t} \leq P_{c,m,\max} \\ 0 \leq P_{es,dis,m,t} \leq P_{dis,m,\max} \end{cases} \quad (37)$$

式中:  $P_{c,m,\max}$ 、 $P_{dis,m,\max}$  分别为储能系统  $m$  的最大充、放电功率。

运行状态互斥约束为储能系统某一时刻只能运行在充电状态、放电状态、停机状态中的某一种状态。

电池荷电状态约束是对储能系统的电池容量进行一定约束, 当电池容量过低或过高时, 会对电池设备产生不利影响, 需要避免设备的过渡充电和深度放电<sup>[30]</sup>。

电容量平衡约束为在一个调度周期  $T$  始末保持其电容量一致, 从而保证储能系统在调度中能够连续不断运行, 可表示为:

$$E_{m,T,s} = E_{m,T,e} \quad (38)$$

式中:  $E_{m,T,s}$ 、 $E_{m,T,e}$  分别为调度周期  $T$  始、末时刻储能系统  $m$  的剩余电量。

(6) 光伏发电站运行约束。由于光伏预测出力总存在误差, 一般光伏实际出力数据与日前预测数据有  $\pm 10\%$  的预测误差。因此采取光伏不确定模型, 即实际出力  $P_{pv,w,t}$  为预测出力在误差允许范围内的随机值。此时并网发电出力功率不大于光伏电站的实际出力功率, 可表示为:

$$0 \leq P_{PV,w,t} \leq P_{pv,w,t} \quad (39)$$

(7) 核电机组运行约束。关于核电机组的运行约束, 已在 1.2 节进行了详细阐述, 具体约束见式 (5) 一式 (10)。

### 3 算例分析和验证

#### 3.1 算例描述

为验证所建立的优化模型的可行性和有效性, 以我国某地区典型的能源结构为依据进行算例构造, 其中包含 3 组共 9 台不同参数的火电机组

(G1—G9)、2台 660 MW 的核电机组(核电机组 1、核电机组 2)、1台 300 MW 的抽水蓄能站、1个 200 MW 的储能设备和 1个 500 MW 的光伏电站。

核电调峰深度规定为 50%,调峰档数设置为 50 档,系统正负旋转备用率为 5%,由火电机组承担,弃光成本为 800 元/(MW·h),各电源机组具体参数、系统典型日负荷预测数据及光伏预测出力曲线详见参考文献[24]。

设置碳交易基准价格为 100 元/t,阶梯碳价奖励系数为 0.15,惩罚系数为 0.25,碳交易区间间隔值取 10 000 t,单位电量碳排放分配系数则为 0.802 5<sup>[28]</sup>。

### 3.2 模型求解

基于上述对目标函数及约束条件的分析,可知多源联合运行优化调度是一个高维数、多约束条件的非线性问题。文中采用在 MATLAB 平台中调用 YALMIP 工具箱并借助求解器 CPLEX 实现高效求解的方法。具体的优化模型求解流程如图 3 所示。

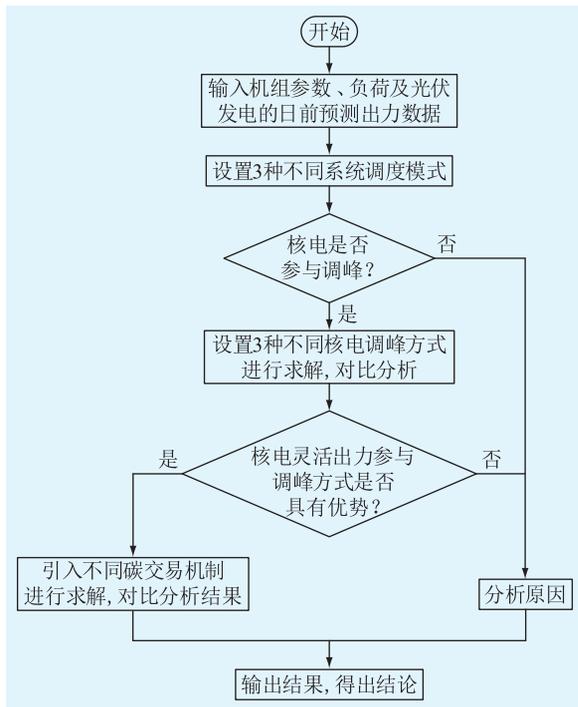


图 3 多源联合运行优化调度求解流程

Fig.3 Multi-source combined operation optimized dispatch solution process

### 3.3 不同系统调度模式对比

为验证上述所提核电灵活参与调峰的多源联合运行的经济性,文中构造多种调度模式,将优化结果进行对比分析,分析不同调度运行模式下系统运行的经济性及对新能源光伏发电的消纳水平。具体构建调度模式如下:

模式 1,核-火联合调峰运行;

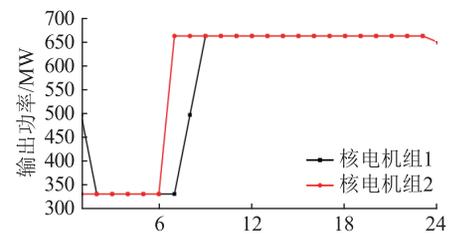
模式 2,核-火-蓄联合调峰运行;

模式 3,核-火-储-蓄联合调峰运行。

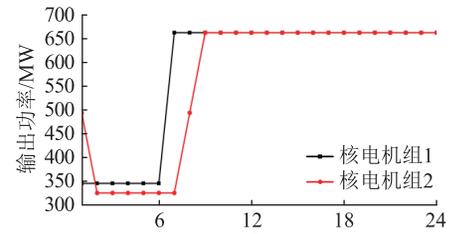
对各模式下成本进行求解,得到对比结果如表 1 所示,各模式下的核电机组出力如图 4 所示,各模式下的火电机组总出力如图 5 所示。

表 1 各模式下的成本对比  
Table 1 Cost comparison of each mode

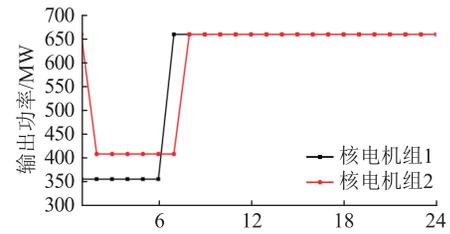
模式	火电启停次数	核电调峰成本/万元	核电总运行成本/万元	火电总运行成本/万元	弃光率/%	总运行成本/万元
1	12	30.646 4	455.310 1	496.606 5	0.14	951.122 9
2	2	29.615 5	455.227 4	429.460 9	0	885.108 4
3	2	23.617 4	454.746 8	429.168 7	0	878.766 7



(a) 模式1



(b) 模式2



(c) 模式3

图 4 各模式核电机组出力

Fig.4 Output of nuclear power units of each mode

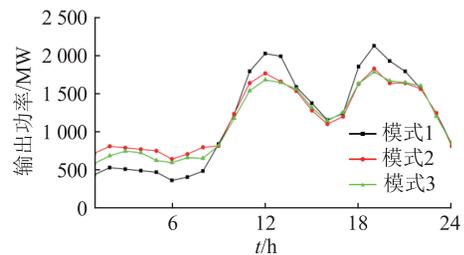


图 5 各模式火电机组总出力

Fig.5 Total output of thermal power units of each mode

由图 4、图 5 可知,随着抽水蓄能机组和储能设

备的投入,系统可利用调峰资源增多,火电机组总出力逐渐平稳,波动性逐渐减小,火电启停次数减少,火电运行成本大幅度减小;核电机组的调峰深度降低,调峰成本减小;核电机组的出力方式得到改善,核电机组运行的安全性得到增强;弃光率也有所减小,能够实现新能源的最大消纳。总运行成本进而大幅减小。

### 3.4 不同核电调峰模型对比

在模式3的基础上,为进一步体现文中核电灵活出力模型的优势,设置以下4种核电调峰模型。

模型1:核电机组均以90%恒功率承担基荷出力运行模型。

模型2:核电机组均采用降50%功率的“12-3-6-3”固定运行模型。

模型3:核电机组均采用3档固定调峰深度和3种调节速率的运行模型<sup>[24]</sup>。

模型4:核电机组均采用所提灵活出力模型。

通过对比上述调峰模型对调度优化结果的影响,分析核电参与系统调峰的经济性。得到不同核电调峰模型下的成本对比如表2所示。

表2 不同核电调峰模型下的成本对比  
Table 2 Cost comparison of different nuclear power peaking models

模型	火电启停次数	核电调峰成本/万元	核电总运行成本/万元	总运行成本/万元
1	14	0	452.888 2	987.167 2
2	2	42.174 0	456.233 9	901.359 3
3	4	24.211 0	454.794 3	879.676 3
4	2	23.617 4	454.746 8	878.766 7

由表2的各成本结果对比可知,当核电承担基荷运行时,会在负荷低谷时段加大调峰压力,导致低谷时期系统必须以光伏弃光、火电机组强迫停机的方式跟随负荷变化,大幅增加了总运行成本;当核电以固定模式参与调峰时,体现了一定的调峰能力,但因在负荷低谷时段只是固定的降出力运行,核电调峰深度不能随低谷时段实际负荷量进行灵活选择,从而也会导致出现弃光及火电机组频繁启停;当核电采取3档固定调峰深度和调节速率时,核电的调峰能力进一步增强,总成本与模型2相比降低较多;当核电采用文中所提的灵活调峰模型时,核电参与调峰的深度及调节速率选择性增多,可以根据负荷变化的规律选择相应的调峰深度及速率,从而大大减缓负荷低谷时期的调峰压力,有效的避免光伏弃光以及火电机组的启停,从而使系统运行总成本大幅度降低。

因此,核电灵活调节调峰深度和速率的出力模型能够更好地与系统其他电源相互配合,共同跟踪日负荷曲线。同时该灵活出力模型也可以根据不同的日负荷数据优化出力模式,有更好的系统鲁棒性和更灵活的调峰能力。

同时从模型1、模型2、模型3对比中也可以看出,核电由于要考虑安全性及经济,其在参与调峰过程中对本身的运行成本是不利的。核电以满功率运行不参与调峰对自身而言是最经济的,但在整个多源联合运行系统中,核电灵活出力参与调峰避免了光伏弃光和火电机组频繁启停,使总的运行成本大大降低,这是核电参与调峰优势的根本原因。因此在实际核电是否参与调峰的问题上,要对核电本身及整个系统进行综合考量和评价,应在确保核电安全运行的前提下,对两者经济性进行对比分析,从而确定核电是否参与调峰。

### 3.5 不同碳交易模型对比

在模式3的基础上,为进一步体现文中所提出的兼顾低碳和经济的优化调度模型的优势和特点,将文中所提低碳经济调度模型与只考虑经济调度模型进行对比,建立以下3种模型进行研究和对比。

模型5:常规调度模型,以总运行成本最低为目标函数,即文中所提调度模式3。

模型6:综合考虑经济性和低碳性,采用基准碳交易模型。

模型7:综合考虑经济性和低碳性,采用阶梯碳交易模型。

对各模型进行求解,不同碳交易模型下的成本对比如表3所示,各模型下的各个火电机组24h的有功出力总量情况如图6所示。

表3 不同碳交易模型下的成本对比  
Table 3 Cost comparison of different carbon trading models

模型	碳排放量/万t	碳交易成本/万元	发电运行成本/万元	总运行成本/万元
5	3.044 0	-171.060 0	878.465 0	707.405 0
6	2.120 4	-263.416 8	906.703 3	643.286 5
7	2.110 9	-298.681 0	907.925 7	609.244 7

由表3可知,当不考虑碳排放量时,此时系统优先调用发电成本最低的火电机组进行出力,系统的发电成本最低,但碳排放量最高;考虑碳排放交易成本时,系统将兼顾发电成本和碳排放量,碳排放量低的火电机组出力增大,系统的发电成本有一定升高,碳排放量下降,系统从碳交易中获得收益,系统总运行成本大幅下降。采用基准碳交易模型的

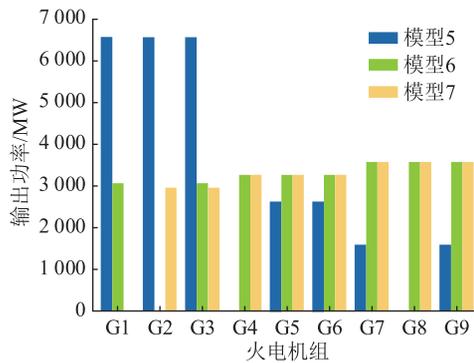


图6 各模型下的各火电机组出力

Fig.6 Output of each thermal power unit in each model

碳排放量相较于模型5减少了9236 t,但发电成本仅增加了28.2383万元;采用阶梯碳交易模型后,碳排放量进一步降低,系统减排作用更加突出,总成本也进一步降低,提高了系统运行的经济和低碳性。

由图6中各模型下各火电机组的出力情况来看,同样可以验证上述结论。其中G1、G2、G3机组的发电成本系数最低,而碳排放量系数最高,而G7、G8、G9正好相反,G4、G5、G6各系数处于中间。当系统只考虑运行经济性时,可以看到G1、G2、G3机组的出力最多,而当引入碳交易机制后,此时G7、G8、G9机组的出力开始增多,而G1、G2、G3机组出力减少,从而降低了系统的碳排放量。此外,阶梯碳交易模型更加重视系统低碳性,因此对火电机组的碳排放量调节作用更加突出。

#### 4 结论

文中重点考虑核电灵活参与调峰的出力模型,引入不同的碳交易机制,同时结合系统中其他电源出力特性,在满足系统各电源运行约束条件下,以系统发电运行成本和碳交易成本最低为目标函数,获得兼顾低碳和经济性的多源系统优化调度结果。通过分析,得出以下结论:

(1) 建立并完善核电机组的灵活出力模型,能够更好地匹配日负荷特性,在负荷低谷时提高系统的下调峰能力,可以有效减少火电机组的启停次数,改善弃光问题,大幅降低系统总运行成本,有效提高系统运行经济性及新能源消纳水平。

(2) 当系统可调峰资源增多时,优先调用不会产生额外调峰成本的抽蓄、储能等资源进行调峰,能够使核电调峰深度下降,核电调峰成本降低,改善了核电的出力方式,从而使核电运行更加平稳。

(3) 建立的考虑碳交易成本的低碳经济调度模型,通过调节优化火电机组的出力,有效降低系统的碳排放量。此外,碳交易价格会影响系统的碳排

放量。相较于单一经济调度模型,该模型能够较好地满足经济和环境效益,更加符合实际系统运行意义。

#### 参考文献:

- [1] 和萍,宫智杰,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.
- [2] 郑洁云,宋倩芸,吴桂联,等. 基于Q学习的区域综合能源系统低碳运行策略[J]. 电力科学与技术学报,2022,37(2):106-115,128.  
ZHENG Jieyun, SONG Qianyun, WU Guilian, et al. Low-carbon operation strategy of regional integrated energy system based on the Q learning algorithm [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2):106-115, 128.
- [3] 刘蓉晖,王乐凯,孙改平,等. 考虑不确定性的风光-储合作联盟参与含需求响应的主辅联合市场的竞价交易模型[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(11):96-107.  
LIU Ronghui, WANG Lekai, SUN Gaiping, et al. Bidding transaction model of wind-solar-storage cooperative alliance participating in the main and auxiliary joint market with demand response considering uncertainty [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11):96-107.
- [4] 周鑫,程松,任景,等. 含储热型热电联产机组的电力系统源荷联合优化调峰方法[J]. 电力科学与技术学报,2023,38(5):12-21.  
ZHOU Xin, CHENG Song, REN Jing, et al. A source-load joint optimization peak regulation method of power system with heat storage combined heat and power units [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5):12-21.
- [5] 陈传彬,杨首晖,王良缘,等. 考虑风-氢-电的混合能源系统容量规划与运行优化[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(1):165-172.  
CHEN Chuanbin, YANG Shouhui, WANG Liangyuan, et al. Capacity planning and operation optimization of wind-hydrogen-battery hybrid energy system [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(1):165-172.
- [6] 叶奇蓁. 后福岛时期我国核电的发展[J]. 中国电机工程学报,2012,32(11):1-8.  
YE Qizhen. China's nuclear power development after Fukushima nuclear power plant accident [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(11):1-8.
- [7] 张蕴. 双碳目标下我国核电发展趋势分析[J]. 核科学与工程,2021,41(6):1347-1351.  
ZHANG Yun. Analysis on the development trend of nuclear energy in China under the dual carbon target [J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(6):1347-1351.
- [8] LEE S S, YOON Y T, MOON S I, et al. Smart grid based nuclear load-following operation strategies in the South Korean power

- system [C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2013:1-5.
- [9] 林毅, 潘玺安, 林章岁, 等. 含高比例核电的电力系统调峰技术综述[J]. 现代电力, 2020, 37(1):51-58.  
LIN Yi, PAN Xi'an, LIN Zhangsui, et al. Review of peak regulation for power system with a high penetration of nuclear power [J]. Modern Electric Power, 2020, 37(1):51-58.
- [10] 肖项涛, 郝亮亮, 梁郑秋, 等. 核电 RAM 系统不正常工况分析及失磁保护优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15):109-118.  
XIAO Xiangtao, HAO Liangliang, LIANG Zhengqiu, et al. Analysis of abnormal working conditions and optimization of loss of field protection of a nuclear power plant RAM system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15):109-118.
- [11] 吴任博, 刘淑琴. 考虑市场交易的新型电力系统调度辅助决策方法研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11):81-89.  
WU Renbo, LIU Shuqin. Research on dispatching assistant decision-making method for novel power system considering market transaction [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11):81-89.
- [12] CANY C, MANSILLA C, MATHONNIÈRE G, et al. Nuclear power supply: going against the misconceptions. Evidence of nuclear flexibility from the French experience [J]. Energy, 2018, 151:289-296.
- [13] 叶鹏, 马晓东, 朱钰, 等. 核电机组参与电网联合调峰策略研究综述[J]. 东北电力技术, 2014, 35(9):55-59, 62.  
YE Peng, MA Xiaodong, ZHU Yu, et al. A research summary on combined peaking load strategies of nuclear power plant [J]. Northeast Electric Power Technology, 2014, 35(9):55-59, 62.
- [14] 赵洁, 刘涤尘, 杨楠, 等. 核电机组参与电网调峰的运行方式及效益分析[J]. 电网技术, 2012, 36(12):250-255.  
ZHAO Jie, LIU Dichen, YANG Nan, et al. Operation mode and benefits of nuclear power plant participating in peak load regulation of power system [J]. Power System Technology, 2012, 36(12):250-255.
- [15] 吴萍, 杨艳晨, 陈昊, 等. 第三代核电堆型 AP1000 运行特点及堆芯仿真研究[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1196-1202.  
WU Ping, YANG Yanchen, CHEN Hao, et al. Research on operational characteristics and core simulation of the third-generation nuclear reactor AP1000 [J]. Power System Technology, 2014, 38(5):1196-1202.
- [16] 卢洵, 左郑敏, 林勇, 等. 广东“十三五”电源调峰联合运行策略优化[J]. 广东电力, 2018, 31(7):98-105.  
LU Xun, ZUO Zhengmin, LIN Yong, et al. Strategy optimization for combined operation of power source and peak load regulation in the 13th five-year plan period of Guangdong province [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7):98-105.
- [17] 赵洁, 刘涤尘, 雷庆生, 等. 核电机组参与电网调峰及与抽水蓄能电站联合运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7):1-6.  
ZHAO Jie, LIU Dichen, LEI Qingsheng, et al. Analysis of nuclear power plant participating in peak load regulation of power grid and combined operation with pumped storage power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7):1-6.
- [18] 孙闻, 徐衍会, 陈世和, 等. 考虑核电调峰的广东电网机组组合[J]. 南方电网技术, 2012, 6(3):53-56.  
SUN Wen, XU Yanhui, CHEN Shihe, et al. The unit commitment of Guangdong power grid in consideration of the nuclear power taking part in load regulation [J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(3):53-56.
- [19] 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.
- [20] 曾森. 核电机组参与电网调峰的经济性分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
ZENG Sen. Economic analysis of nuclear power units participating in peak shaving of power grid [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] WANG J, ZHAO J, 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.
- [22] ZHAO J, MA Y H, LIU Q, et al. A multi-source coordinated optimal operation model considering the risk of nuclear power peak shaving and wind power consumption [J]. IEEE Access, 2020, 8:189702-189719.
- [23] 王勇超, 陈皓勇, 裯培正, 等. 基于最优场景集的含多类型电源鲁棒调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2):354-362.  
WANG Yongchao, CHEN Haoyong, XUAN Peizheng, et al. A robust scheduling with multiple types of power sources based on optimal scenario set [J]. Power System Technology, 2016, 40(2):354-362.
- [24] 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.
- [25] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11):85-93.  
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):85-93.
- [26] 吴含欣, 董树锋, 张祥龙, 等. 考虑碳交易机制的含风电电力系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2024, 48(1):70-80.  
WU Hanxin, DONG Shufeng, ZHANG Xianglong, et al. Optimal dispatching of power system with wind power considering

- carbon trading mechanism [ J ]. Power System Technology, 2024,48(1):70-80.
- [27] 马燕峰,范振亚,刘伟东,等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[ J ]. 电网技术,2016,40(2):412-418.
- MA Yanfeng,FAN Zhenya,LIU Weidong,et al. Environmental and economic dispatch considering carbon trading credit and randomness of wind power and load forecast error[ J ]. Power System Technology,2016,40(2):412-418.
- [28] 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.
- [29] 关玉衡,张经纬,张轩,等. 美国电力市场环境下抽水蓄能调度模式分析及启示[ J ]. 电力系统自动化,2021,45(13):1-11.
- GUAN Yuheng,ZHANG Jingwei,ZHANG Xuan,et al. Analysis and enlightenment of pumped storage dispatch modes under American electricity market[ J ]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(13):1-11.
- [30] ALNASER S W,OCHOA L F. Optimal sizing and control of energy storage in wind power-rich distribution networks [ J ]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 ( 3 ): 2004-2013.

作者简介:



吴熙

吴熙(1987),男,博士,教授,研究方向为电力系统宽频振荡溯源与抑制技术、交/直流灵活输电系统规划运行(E-mail:wuxi@seu.edu.cn);

陈康文(2001),男,硕士在读,研究方向为新型电力系统规划与运行优化等;

郭其胜(1995),男,博士在读,研究方向为新型电力系统规划与运行优化等。

## A multi-source combined operation low carbon economy dispatch considering flexible participation of nuclear power in peaking

WU Xi<sup>1</sup>, CHEN Kangwen<sup>1</sup>, GUO Qisheng<sup>1</sup>, LIU Yichen<sup>1</sup>, YUE Fuchang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Lianyungang Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Lianyungang 222004, China)

**Abstract:** In the coastal power grid with a high proportion of nuclear power units and new energy power generation equipment, the pressure of peak regulation on system is severe. In order to achieve the demand of system peak regulation and fully explore the capacity of nuclear power peak regulation, the optimized dispatch model of nuclear-photovoltaic-electrochemical energy storage-pumped storage-thermal multi-source combined operation with flexible output of nuclear power to participate in peak regulation is established. Firstly, 0-1 variables are used to accurately linearize the flexible address to nonlinear output of nuclear power. Secondly, complete system operation constraints is established, considering the operating characteristics and cost composition of each power unit. Finally, based on traditional economic optimization goal, different carbon trading mechanisms are introduced, considering the system's new energy level. The simulation example verifies the effectiveness of the proposed model. The results show that the proposed scheduling model effectively alleviates the system's peak pressure and reduces the frequent start-stop of thermal power units by the flexible output of nuclear power, thus improving the consumption level of new energy. The system operation is economical and low-carbon.

**Keywords:** nuclear power unit; nuclear peak regulation capacity; multi-source combined operation; peak regulation strategies; carbon trade; optimized dispatch

(编辑 吴昊)