

# 考虑碳交易的火风光蓄联合系统随机经济调度

廖志军<sup>1</sup>, 黄李赢<sup>1</sup>, 曹韵<sup>2</sup>, 田珺玲<sup>3</sup>, 荣娜<sup>3</sup>

(1. 贵州电网有限责任公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 国网湖南省电力有限公司超高压变电公司, 湖南 长沙 414004; 3. 贵州大学 电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** 双碳背景下, 碳排放交易机制与多种能源互补发电机制是中国实现碳减排目标和可持续发展的重要机制, 提出了一种计及碳交易的多能源系统优化模型, 在缓解火电机组调峰压力的同时, 减少二氧化碳的排放。首先, 根据碳排放量构建碳交易成本模型, 同时考虑煤耗成本、投油和损耗成本以及环境成本, 形成最优目标函数, 并将其分段线性化。其次, 构建火风光蓄联合优化调度模型。第一阶段, 以净负荷波动最小为目标, 利用蚁群搜索算法计算出各梯级水电站的发电量, 优化日负荷出力曲线; 第二阶段, 以综合成本最小为目标, 并借助场景法描述风电随机性, 构建考虑碳交易机制的火风光蓄联合优化调度模型。最后, 在修改的 IEEE 7机57节点系统中验证所提模型的有效性。

**关键词:** 分层调度; 辅助调峰; 火风光蓄联合系统; 碳交易机制; 蚁群搜索算法

**中图分类号:** TK01 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd25043

## Economic Dispatch of Hydro-Thermal-Wind-Photovoltaic Power System Considering Carbon Trading

LIAO Zhijun<sup>1</sup>, HUANG Liying<sup>1</sup>, CAO Yun<sup>2</sup>, TIAN Junling<sup>3</sup>, RONG Na<sup>3</sup>

(1. Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 500002, Guizhou, China; 2. State Grid Hunan Extra High Voltage Substation Company, Changsha 414004, Hunan, China; 3. Department of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** In the context of dual carbon, carbon trading mechanism and various energy complementary power generation mechanism are important mechanisms for China to achieve carbon emission reduction goals and sustainable development. A multi-energy system optimization model was proposed that takes into account carbon trading to reduce carbon dioxide emissions while relieving the pressure of thermal power unit peaking. Firstly, a cost model of carbon trading was constructed based on carbon emissions, taking into account coal consumption cost, fuel input and loss cost and environmental cost, to form an optimal objective function and linearize it by segments. Secondly, the model for hydro-thermal-wind-photovoltaic power system was constructed. In the first stage, with the objective of minimizing net load fluctuation, the generation capacity of each hydropower station of the terrace was calculated using the moth search (MS) algorithm, and the daily load output curve was optimized. In the second stage, with the objective of minimizing the integrated cost and describing the stochasticity of wind power with the help of scenario method, a dispatching model of power system considering carbon trading mechanism was constructed. Finally, the validity of the proposed model was verified in a modified IEEE 7-machine 57-bus system.

**Key words:** tiered scheduling; auxiliary peaking; hydro-thermal-wind-photovoltaic power system; carbon trading mechanism; moth search (MS) algorithm

近年来, 因地制宜加强光伏、风电等可再生能源开发利用, 是实现我国碳达峰碳中和战略目标的重要举措<sup>[1-3]</sup>。面对电网日负荷峰谷差的加

大以及可再生能源的不确定性和不可调度性, 电力系统的调峰压力不断加大。传统的解决办法仅依靠火电调峰, 机组的单位煤耗率不断上升,

**基金项目:** 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2021]一般277)

**作者简介:** 廖志军(1979—), 男, 硕士研究生, 高级会计师, 主要研究方向为电价管理, Email: 26091246@qq.com

**通讯作者:** 田珺玲(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制, Email: tj\_okk@163.com

不仅附加产生相应的投油损耗成本,还会增加CO<sub>2</sub>及其他污染气体的排放,因此,寻找新的低碳经济优化调度模型迫在眉睫。

一方面,在政策方面,碳交易机制的加入能够有效兼顾低碳性与经济性。文献[4]在园区中引入阶梯式碳交易,改变了用户的需求响应方式,降低了碳排放量和综合成本。文献[5]考虑了小型核电机组和碳交易机制,提高了整个综合能源系统的灵活性,并产生了良好的低碳环保效益。文献[6]在经济成本中引入碳交易成本和绿色证书交易成本,进一步促进了系统调度中污染物排放的减少。文献[7]计及需求侧碳交易,分别对主网层和微网层建立协同调度模型,实现了多能源系统的低碳经济运行。

另一方面,在技术方面,可利用多种能源的特性,优先将新能源进行发电的同时减少火电机组调峰压力<sup>[8-9]</sup>。抽水蓄能作为高质量的调峰电源,能灵活调节其内部水库容量并迅速响应负荷需求,并减少煤炭的使用<sup>[10-11]</sup>。文献[12]构建了一个风光水火蓄的多能源联合调度系统,并利用改进的自适应遗传算法进行求解,有效地提高了可再生能源的消纳能力。文献[13]借助梯级水电来响应风光出力的波动性,构建了一个基于机会约束的水风光互补模型,保障了系统安全运行能力并提升了风光消纳能力。文献[14]建立了一个电量共享协调优化模型,以此对含有抽蓄、梯级水电和光伏的多能源电力系统中的各电源进行调控,以此实现了利益最大化分配。文献[15]依靠抽水蓄能削峰填谷的能力,平滑风光出力的间歇性,有效降低了风电反调峰特性对电网的影响。

因此,本文考虑碳交易机制及火电机组深度调峰特性,借助场景法生成随机风电场景,建立了考虑碳交易的多能源联合经济调度模型。利用蛾群搜索(moth search, MS)算法<sup>[16]</sup>及Matpower优化调度工具(Matpower optimal scheduling tools, MOST)<sup>[17-18]</sup>对一个修改的IEEE 7机57节点系统进行求解,分析了考虑碳交易的梯级水火风光系统的经济性与环保性。

## 1 碳交易模型

### 1.1 二碳排放模型

在水火风光耦合系统中,CO<sub>2</sub>主要由火电机组产生,随着系统负荷率的不断降低,机组在响应负荷时,机组及各个辅机的运行工况会大幅偏

离设计值,标煤耗率与碳排放量将迅速升高。碳排放强度与机组负荷状态成反比。碳排放量关系与火电机组*i*出力表达式如下<sup>[19]</sup>:

$$E_p = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T M_{i,t} P_{i,t} \quad (1)$$

式中:*N*为机组总数量;*E<sub>p</sub>*为*T*时段内系统总碳排放量;*P<sub>i,t</sub>*为机组*i*在*t*时段内的出力;*M<sub>i,t</sub>*为机组*i*在*t*时段的碳排放强度。

### 1.2 碳交易成本模型

根据《2021、2022年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案(发电行业)》,碳排放配额按照免费分配方式,并采用基准法核算机组的配额量。因此在调度周期*T*时段内,碳排放额度*E<sub>q</sub>*和碳交易成本*f<sub>c</sub>*分别为

$$E_q = \varepsilon \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \eta P_{i,t} \quad (2)$$

$$f_c = \sigma (E_p - E_q) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$ 为调度周期*T*内的负荷率修正系数; $\eta$ 为单位电量排放基准,将电量边际系数与容量边际排放系数加权平均而得; $\sigma$ 为单位电量的碳交易价格。

## 2 考虑碳交易的火风光蓄模型建立及求解

### 2.1 上层优化调度模型

#### 2.1.1 目标函数

在梯级水电调度中以电网净负荷方差最小为目标函数,其表达式如下:

$$\min F_1 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (P_{net,t} - P_{net,av})^2 \quad (4)$$

$$P_{net,t} = P_{d,t} - \sum_{m=1}^M (P_{hg,mt} - P_{hp,mt}) \quad (5)$$

式中:*F<sub>1</sub>*为电网净负荷方差;*P<sub>net,t</sub>*为*t*时段净负荷;*P<sub>net,av</sub>*为整个调度周期内净负荷的平均值;*T*为调度周期;*P<sub>d,t</sub>*为*t*时段的原始负荷;*P<sub>hg,mt</sub>*,*P<sub>hp,mt</sub>*分别为第*m*个抽水蓄能电站在*t*时段内的发电、抽水功率;*M*为抽水蓄能电站个数。

#### 2.1.2 约束条件

在不同时段进行求解时,需要满足下列约束条件:

1) 抽蓄电站出力约束:

$$P_{hg,min} < P_{hg,mt} < P_{hg,max} \quad (6)$$

$$P_{hp,min} < P_{hp,mt} < P_{hp,max} \quad (7)$$

式中:*P<sub>hg,max</sub>*,*P<sub>hg,min</sub>*,*P<sub>hp,max</sub>*,*P<sub>hp,min</sub>*分别为抽蓄电站在

$t$ 时段内的发电、抽水功率的上、下限。

2) 水库水位变动约束:

$$E_{h,t+1} = E_{h,t} + (\eta_p P_{hp,t} - P_{hg,t} / \eta_g) \quad (8)$$

式中: $E_{h,t}$ 为在 $t$ 时段内的上水库水位; $\eta_p, \eta_g$ 分别为抽水、发电水量的单位转换系数。

3) 库容约束:

$$E_{h,\min} \leq E_{h,t} \leq E_{h,\max} \quad (9)$$

式中: $E_{h,\max}, E_{h,\min}$ 为上水库库容的上、下限。

## 2.2 下层优化调度模型

### 2.2.1 目标函数

将上层模型优化得到的净负荷输入下层模型的功率平衡约束中,考虑碳交易成本、煤耗成本、机组损耗成本、投油成本、调峰补偿收益、环境成本,建立目标函数。

1) 煤耗成本。考虑火电机组不同调峰深度下煤耗特性,拟合所得二次函数如下:

$$f(P_{it}) = a_i \cdot P_{it}^2 + b_i \cdot P_{it} + c_i \quad (10)$$

式中: $P_{it}$ 为火电机组 $i$ 在 $t$ 时段的有功出力值; $a_i, b_i$ 和 $c_i$ 为火电机组 $i$ 的煤耗成本系数。

2) 碳交易成本详见1.2节。

3) 环境成本。本文主要考虑脱硫脱硝成本及污染气体排放成本,其表达式如下:

$$f_e = f_{eT} + f_{eP} = (C_s T_s + C_N T_N) + (w_s E_s + w_N E_N) \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} E_s = 2kb\beta S(1 - \eta_s) \\ E_N = \frac{30.8}{14} kb \frac{N_\gamma}{m} (1 - \eta_N) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $f_{eT}, f_{eP}$ 分别为脱硫脱硝成本与污染气体排放成本; $C_s, C_N$ 分别为脱除单位质量 $SO_2$ 与 $NO_x$ 的成本; $T_s, T_N$ 分别为脱除 $SO_2$ 与 $NO_x$ 的质量; $w_s, w_N$ 分别为 $SO_2$ 与 $NO_x$ 的排放价格; $E_s, E_N$ 分别为 $SO_2, NO_x$ 的排放量; $k$ 为供电量; $\beta, \gamma$ 分别为硫硝元素转换为 $SO_2, NO_x$ 转换率; $S, N$ 分别为收到基含硫、氮质量分数; $\eta_s, \eta_N$ 分别为脱硫、脱硝效率; $m$ 为燃煤产生的 $NO_x$ 占总 $NO_x$ 排放量的比例。

4) 调峰补偿收益。当火电机组调峰深度大于50%,将产生调峰补偿收益,其表达式如下:

$$f_b(P_{it}) = (P_{\min} - P_{it})C_b \quad (13)$$

式中: $P_{\min}$ 为常规调峰最低出力; $C_b$ 为单位电量调峰补偿价格。

火电机组进行调峰时所产生的投油及损耗成本详见文献[20]。综上,火电机组目标函数可以表示为

$$F = \begin{cases} f(P_{it}) + f_e + f_c & P_{\min} < P \leq P_{\max} \\ f(P_{it}) + S(P_{it}) + f_e + f_b + f_c & P_a < P \leq P_{\min} \\ f(P_{it}) + S(P_{it}) + C_{oil} + f_e + f_b + f_c & P_b < P \leq P_a \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_a$ 为不投油深度调峰最低出力; $P_b$ 为投油调峰最低出力。

### 2.2.2 约束条件

正如前面所述,模型中在任意时刻都需满足其约束条件,以保证系统安全稳定运行,各约束条件如下:

1) 系统功率平衡约束:

$$\begin{cases} g_{ij}(\theta_{ij}, V_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}) = 0 \\ h_{ij}(\theta_{ij}, V_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中: $g_{ij}$ 为 $t$ 时刻场景 $j$ 下的非线性交流潮流方程; $h_{ij}$ 为 $t$ 时刻场景 $j$ 下的传输线、电压和其他约束; $\theta_{ij}, V_{ij}, P_{ij}, Q_{ij}$ 分别为 $t$ 时刻场景 $j$ 下的电压相角、电压幅值、机组 $i$ 的有功出力和无功出力。

2) 火电机组出力约束:

$$\begin{cases} u_{it} P_{ij,\min} \leq p_{ij} \leq u_{it} P_{ij,\max} \\ u_{it} Q_{ij,\min} \leq q_{ij} \leq u_{it} Q_{ij,\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{ij,\max}, P_{ij,\min}, Q_{ij,\max}, Q_{ij,\min}$ 分别为 $t$ 时段场景 $j$ 下机组 $i$ 的有功和无功出力上、下限。

3) 备用容量约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij,\max} - p_{ij} \leq R_{ij,\max} + \\ 0 \leq p_{ij} - P_{ij,\min} \leq R_{ij,\max} - \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{ij,\max}, P_{ij,\min}$ 分别为 $t$ 时段场景 $j$ 下机组 $i$ 的最大、最小有功出力; $R_{ij,\max}, R_{ij,\max}$ 分别为 $t$ 时段的备用容量上、下限。

4) 爬坡约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \delta_{ij+} \leq \delta_{it,\max} + \\ 0 \leq \delta_{ij-} \leq \delta_{it,\max} - \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\delta_{ij+}, \delta_{ij-}$ 分别为机组 $i$ 在 $t$ 时刻场景 $j$ 下向上增加、向下减少的爬坡容量; $\delta_{it,\max}, \delta_{it,\max}$ 分别为机组 $i$ 在 $t$ 时段内最大的向上增加、向下减少的爬坡容量。

5) 风电机组出力约束:

$$0 \leq P_{jt,w} \leq P_{jt,w,\max} \quad (19)$$

式中: $P_{jt,w}$ 为在场景 $j$ 下 $t$ 时段内的风电实际出力; $P_{jt,w,\max}$ 为通过风电预测在场景 $j$ 下 $t$ 时段内的最大出力值。

## 2.3 求解方法

本文所提模型求解流程图如图1所示。

在上层优化阶段,通过MS优化算法对梯级水电站群进行求解,计算出梯级水电站群的最优

出力,使其内部有序地进行协调,达到整体调峰能力最大,平滑负荷曲线。首先,初始化MS优化算法参数,以净负荷方差最小为目标,根据各水电站之间的约束得到初始目标函数适应值,并通过排序将种群分为两个种群,分别通过飞蛾 Lévy 飞行算子与趋光性算子更新子群1、子群2,合并两个子群即可得到新种群,重复迭代至迭代次数最大值,最后,输出各水电站的最优出力以及净负荷。

在下层优化阶段,为描述风电出力的随机性,输入历史风速数据,通过双参数威布尔分布拟合得到风速概率密度函数,将风速作为随机变量,采用拉丁超立方抽样法分层抽取风速场景形成采样矩阵,采样值在进行威布尔逆变换后,利用后向场景削减法对场景进行削减以避免维数灾难的产生,最后,通过风速-风功率转换公式得到不同概率下的风电出力场景集。随后联合煤耗成本、机组损耗成本、投油成本、环境成本、调峰补偿收益及碳交易成本,并将其分段线性化作为下层模型目标函数。最后,通过 MOST 和 CPLEX 求解器求解所提模型,得出各能源出力情况。

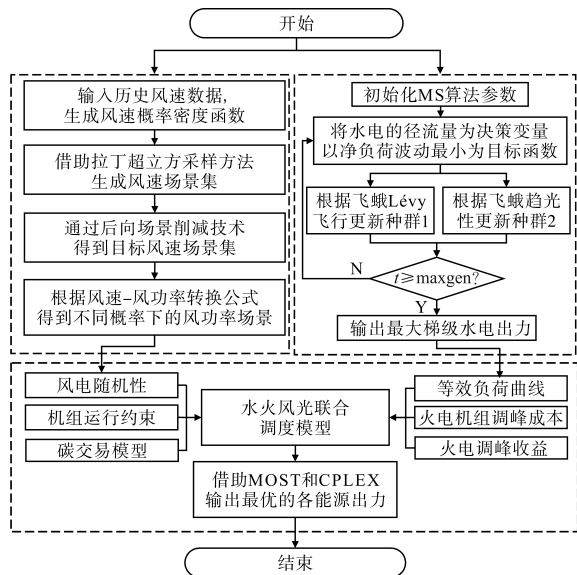


图1 火风光蓄联合系统求解流程图

Fig.1 The flow chart of hydro-thermal-wind-photovoltaic power system

### 3 实验分析

本文采用一个修改的 IEEE 7机 57节点系统进行仿真,算例系统图如图 2 所示。选取机组 1 和机组 2 为调峰机组,其余电场为普通机组,火电机组详细参数如表 1 所示。在节点 6 同时接入一

个 300 MW 的风电场和一个 300 MW 的光伏电场,风光互补发电,风光总渗透率为 30%,在节点 53 接入同一流域内的 4 台抽水蓄能电站,详细参数见文献[21]。

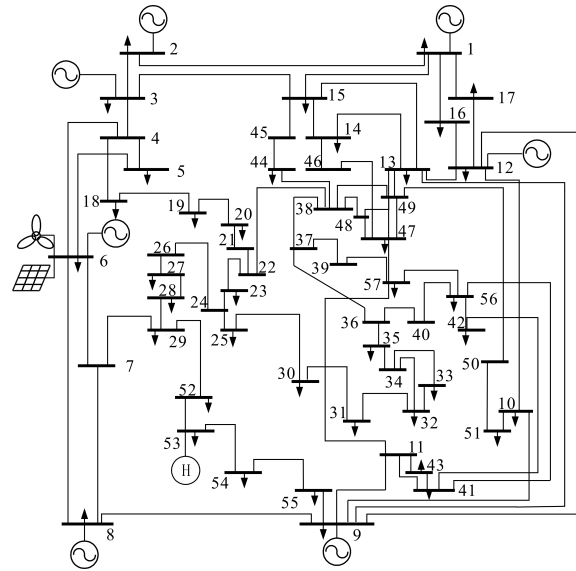


图2 修改的 IEEE 7机 57节点系统

Fig.2 The modified IEEE 7-machine 57-bus system

表 1 火电机组参数

Tab.1 Thermal power unit data

机组	最大出力/ MW	最小出力/ MW	机组爬坡率/ (MW·h <sup>-1</sup> )	标煤价格/ (元·t <sup>-1</sup> )
1	575.88	/	143.97	470
2	100	/	25	474
3	140	70	35	476
4	100	50	25	478
5	550	275	137.5	440
6	100	82	25	472
7	410	205	102.5	470

计算过程中碳交易价格取 40 元/t,单位电量排放基准参考国家公布的“基准线排放因子”;投油阶段耗油 4.8 t/h,油价 6 130 元/t;调峰补偿费用根据调峰深度而变化,调峰深度在 50%~60% 时补偿 18 元/(MW·h),调峰深度在 60% 以上时补偿 36 元/(MW·h)。

#### 3.1 MS算法与其他算法的比较

为验证抽水蓄能电站参与系统调峰的有效性,以及 MS 算法求解上层模型时的优越性,同时应用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法以及正余弦优化算法 (sine cosine algorithm, SCA) 对上层模型进行求解,其结果如图 3 所示,负荷波动对比如表 2 所示。

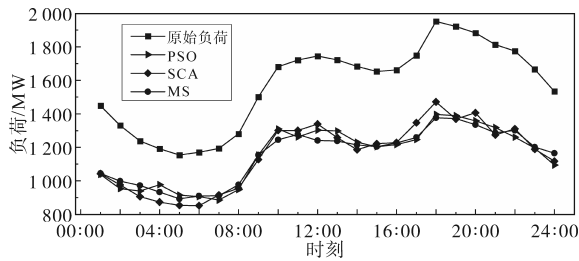


图3 不同算法优化后净负荷曲线图

Fig.3 Net load curves after optimization under different algorithms

表2 不同算法下负荷波动对比

Tab.2 Comparison of load fluctuations under different algorithms

	波动方差	峰谷差/MW
原始负荷	1.516 3e+06	798
PSO	8.578 2e+05	613
SCA	8.516 3e+05	619
MS	5.426 0e+05	483

结合图3和表2中数据可以发现,未考虑抽水蓄能电站接入系统前,原始负荷波动方差为1.516 3e+06,峰谷差为798 MW。而在考虑抽水蓄能电站调峰后,无论是应用哪种算法进行求解,其波动方差和峰谷差相较于原始负荷均存在一定程度上减小,且负荷曲线更为平滑。由此可以看出,抽水蓄能电站调度起到了削峰填谷的作用,缓解了系统的调峰压力。此外,MS算法所取得峰谷差最小,为483 MW,相较于PSO和SCA算法,净负荷峰谷差分别降低了130 MW和136 MW,由此验证了MS算法求解优化模型的优越性。

### 3.2 不同模型下的经济性和环保性

为验证所提模型的经济性和环保性,在下列两种情况下进行仿真分析。模型1:考虑深度调峰特性,不考虑碳交易;模型2:考虑深度调峰特性,考虑碳交易。两种模型优化结果对比如表3所示。

分析表3数据发现,两种模型下的CO<sub>2</sub>排放

表3 两种模型下优化结果对比

Tab.3 Comparison of optimization results under two models

模型	模型1			模型2		
	50%	60%	70%	50%	60%	70%
煤耗成本/千元	3 481.7	3 477.7	3 475.6	3 473	3 471.6	3 470.5
环境成本/千元	16.35	16.368	16.38	16.065	16.063	16.063
碳交易成本/千元	563.4	569.77	575.7	560.01	559.32	559.08
投油+损耗/千元	0	1.32	446.47	0	0.40	192.36
调峰补偿/千元	0	11.958	42.90	0	3.51	13.80
调峰总成本/千元	0	-10.636 9	403.57	0	-3.11	178.56
综合成本/千元	4 061.45	4 053.20	4 471.26	4 049.08	4 047.38	4 238.00
CO <sub>2</sub> 排放量/千吨	22.21	22.23	22.26	21.82	21.82	21.82

量均随着调峰深度的上升而上升,这是因为火电机组在进行过深度调峰时,煤耗相较于常规调峰时煤耗率相对增长,相应的CO<sub>2</sub>排放量及其污染气体排放量均有所增加。并且随着火电机组深度调峰,会产生一定的投油及损耗成本,当调峰深度小于等于60%时,调峰补偿大于机组损耗成本,在进行调峰时反而会有一定的经济性,而当调峰深度大于60%时,巨大投油成本的产生会导致调峰总成本大幅上涨,此时调峰不具有经济性。

有无碳交易时火电机组出力对比如图4所示。

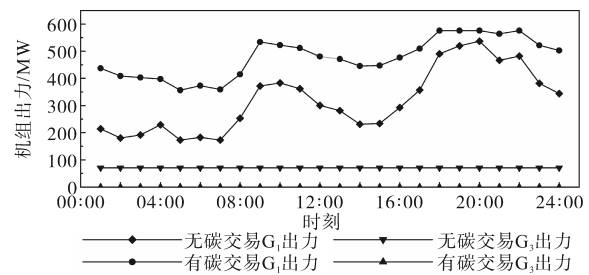


图4 有无碳交易时火电机组出力对比

Fig.4 Comparison of thermal units output

with and without carbon trading

在不考虑碳交易机制时,为满足经济最小的目标,会优先选择运行成本较低的G<sub>1</sub>和G<sub>5</sub>机组优先进行出力,运行成本较高的G<sub>3</sub>和G<sub>4</sub>为满足负荷需求保持在最小出力状况。考虑到碳交易机制后低碳低成本机组优先出力,G<sub>1</sub>的成本水平虽然与G<sub>5</sub>的成本水平相近,但在相同负荷水平下,其碳排放强度低于G<sub>5</sub>的碳排放强度,G<sub>1</sub>的出力上升,G<sub>5</sub>的出力下降,高碳高成本的G<sub>3</sub>和G<sub>4</sub>的出力下降为0。并且,结合表1数据,模型2的碳排放量与综合成本相较模型1均有所降低,碳排放强度较低的机组得到有效利用,发电功率增加,减少了碳排放及碳交易成本。碳交易机制的考虑促进了火电机组出力的重新分配,有效地降低了运行成本,并满足环保运行要求。

### 3.3 不同碳交易价格影响分析

在碳交易市场的引入中,碳交易价格的制定仍然对碳交易市场的可持续发展起着十分重要的影响。改变碳交易的价格,在考虑火电机组深度调峰煤耗特性情况下,调峰深度为70%,仿真所得不同碳交易价格下优化调度结果如图5所示。

根据图5,我们可以发现,随着碳交易价格的不断上升,综合成本与碳交易价格呈现正比例增长,然而在碳交易价格小于40元时,碳排放量会因价格的不断提高而减少,优先选择低碳低成本的机组出力;在碳交易价格大于40元时,低碳低成本的机组出力已趋于饱和,碳交易价格对于碳排放量的影响逐渐减少,碳排放量不再减少。

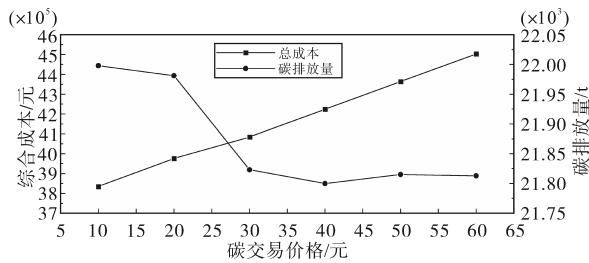


图5 综合成本和碳排放量变化曲线

Fig.5 Combined cost and carbon emission change curves

### 3.4 不同可再生能源接入容量影响分析

可再生能源在系统中渗透率的不同对系统的安全性与稳定性的影响不同,对比不同渗透率下优化调度结果如图6所示,调峰机组的调峰深度为70%。

根据图6可以发现,随着越来越多的可再生能源进入系统,由于其清洁低能耗的性质,火电机组的煤耗成本及环境成本在不断降低。并且可再生能源容量的增加也会促使火电机组的调峰深度不断上升,其产生的投油+损耗成本也不断升高。但是综合来看,系统的综合成本仍然呈现一个下降的趋势,这说明在考虑碳交易及火电机组深度调峰情况下,不断增加可再生能源的接入容量,系统的经济性和环保性都有一定的提升。

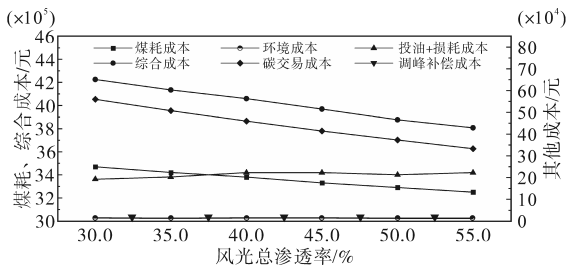


图6 不同风光总渗透率下优化结果

Fig.6 Optimization results for different wind and solar energy penetration rates

## 4 结论

在双碳背景下,面对系统高渗透率新能源的不确定性,本文提出了一种考虑碳交易的火风光蓄联合优化调度模型,在一个修改的IEEE 7机57节点系统中验证该模型的有效性,主要结论如下:

1) 本文采用抽水蓄能电站并结合火电机组深度调峰特性,提出了一种考虑碳交易的火风光蓄联合优化调度模型,利用MS优化算法和MOST工具包,简化火风光蓄系统求解的复杂性,提升了系统调峰能力。

2) 在传统经济调度中碳交易机制的考虑可以促进火电机组出力的再分配,兼顾经济性和低碳性。在一定范围内,可以通过控制碳交易的初始价格对系统的碳排放量进行控制,进一步贴近碳中和目标。

3) 增加新能源在系统中的渗透率虽然会给系统带来较大的随机性,并引起深度调峰成本,但从综合角度来看,煤耗成本、环境成本、碳交易成本均呈现下降趋势,具有低碳经济效益。

### 参考文献

- [1] TALARI S, SHAFIE-KHAH M, OSÓRIO G J, et al. Stochastic modelling of renewable energy sources from operators' point-of-view: a survey[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(P2):1953-1965.
- [2] 郭创新,刘祝平,冯斌,等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3394-3404. GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
- [3] ZHANG L, LIU D, CAI G, et al. An optimal dispatch model for virtual power plant that incorporates carbon trading and green certificate trading[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 144: 108558.
- [4] 曾艾东,邹宇航,郝思鹏,等. 考虑阶梯式碳交易机制的园区工业用户综合需求响应策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4352-4363. ZENG Aidong, ZOU Yuhang, HAO Sipeng, et al. Comprehensive demand response strategy of industrial users in industrial parks considering stepped carbon trading mechanism[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4352-4363.
- [5] LI Y, BU F, GAO J, et al. Optimal dispatch of low-carbon integrated energy system considering nuclear heating and carbon trading[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 378: 134540.
- [6] WANG X, WANG J, TIAN B, et al. Economic dispatch of the low-carbon green certificate with wind farms based on fuzzy

- chance constraints[J]. *Energies*, 2018, 11(4): 1-19.
- [7] 陈俊先,贾燕冰,韩肖清,等. 考虑需求侧碳交易机制的多微能网分布式协同优化调度[J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2196-2206.  
CHEN Junxian, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing, et al. Distributed coordinated optimal scheduling scheduling of multi-micro integrated energy systems considering demand-side carbon trading mechanism[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2196-2206.
- [8] KLEMM C, VENNEMANN P. Modeling and optimization of multi-energy systems in mixed-use districts: a review of existing methods and approaches[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 135(C): 110206.
- [9] ZENG B, LIU Y, XU F, et al. Optimal demand response resource exploitation for efficient accommodation of renewable energy sources in multi-energy systems considering correlated uncertainties[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288(3): 125666.
- [10] 李咸善,杨拯,李飞,等. 基于梯级水电调节的风光水联盟与区域电网联合运行优化调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(6): 2234-2247.  
LI Xianshan, YANG Zheng, LI Fei, et al. Optimization dispatching strategy of wind-water alliance and regional power grid joint operation based on cascade hydropower regulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(6): 2234-2247.
- [11] 申建建,王月,程春田,等. 风光多能互补发电调度问题研究现状及展望[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(11): 3871-3885.  
SHEN Jianjian, WANG Yue, CHENG Chuntian, et al. Research status and prospect of hydropower dispatching problem [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(11): 3871-3885.
- [12] 肖白,于龙泽,刘洪波,等. 基于生成虚拟净负荷的多能源电力系统日前优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(21): 7237-7249.  
XIAO Bai, YU Longze, LIU Hongbo, et al. Day-ahead optimal scheduling of multi-energy power systems based on generating virtual net load[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(21): 7237-7249.
- [13] 蔡绍荣,沈力,江粟,等. 考虑水风光互补与机会约束的电力系统源网荷协调扩展规划研究[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(11): 134-145.  
CAI Shaorong, SHEN Li, JIANG Li, et al. Research on coordinated load expansion planning of power system based on water-wind complementarity and opportunity constraint[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(11): 134-145.
- [14] 夏依莎,刘俊勇,刘继春,等. 基于电量共享的梯级水光蓄联合发电系统优化调度策略[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 118-125.  
XIA Yisha, LIU Junyong, LIU Jichun, et al. Optimal scheduling strategy of cascade water-optical storage combined power generation system based on power sharing[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 118-125.
- [15] 沈琛云,王明俭,李晓明. 基于风-光-蓄-火联合发电系统的多目标优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(11): 74-82.  
SHEN Chenyun, WANG Mingjian, LI Xiaoming. Multi-objective optimal scheduling based on wind-light-accumulation-fire combined power generation system[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(11): 74-82.
- [16] FENG Y H, WANG G G. A binary moth search algorithm based on self-learning for multidimensional knapsack problems[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2022, 126: 48-64.
- [17] ZIMMERMAN R D, MURILLO-S'ANCHEZ C E, THOMAS R J. Matpower: steady state operations, planning and analysis tools for power systems research and education[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(12): 12-19.
- [18] MURILLO-S'ANCHEZ C E, ZIMMERMAN R D, ANDERSON C L, et al. Secure planning and operations of systems with stochastic sources, energy storage and active demand[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(4): 2220-2229.
- [19] 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. Research on three-stage joint peaking strategy of nuclear-fire-virtual power plants accounting for carbon trading mechanism[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [20] 王淑云,娄素华,吴耀武,等. 计及火电机组深度调峰成本的大规模风电并网鲁棒优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 118-125.  
WANG Shuyun, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Robust optimization scheduling of large-scale wind power grid-connected based on depth peak regulation cost of thermal power units[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(1): 118-125.
- [21] ZHANG Z, WU X Y, LIAO S L, et al. An ultra-short-term scheduling model for cascade hydropower regulated by multi-level dispatch centers suppressing wind power volatility[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022, 134: 107467.

收稿日期:2023-03-21

修改稿日期:2023-05-16