

# 碳捕集火电与梯级水电联合优化的低碳节能发电调度

赵东声<sup>1</sup>, 高忠臣<sup>2</sup>, 刘伟<sup>3</sup>

(1. 吉林名门电力实业集团公司, 吉林 长春 130033; 2. 吉林名门水力发电有限公司, 吉林 长春 130033;  
3. 华自科技股份有限公司, 湖南 长沙 410205)

**摘要:** 针对消纳风电过程中造成火电机组频繁调节而产生额外损耗的问题, 引入碳捕集机组与梯级水电联合优化。以更加高效地利用清洁能源、确保传统机组运行平稳、减小系统综合运行成本为目标, 对包含风电、梯级水电、传统机组以及碳捕集机组的风水火联合系统建立多目标优化调度模型。将多目标使用模糊隶属度函数的方法转变为单目标模型, 并使用二次规划法进行求解。算例分析说明通过水电与碳捕集机组的调节, 可在充分消纳风电的基础上减少传统机组的调节量, 维持传统机组的运行稳定性, 降低传统火电机组由于频繁调节而产生的损耗。

**关键词:** 节能发电调度; 低碳; 联合优化; 多目标优化调度模型; 单目标模型

## Low-carbon energy-saving power generation dispatching optimized by carbon capture thermal power and cascade hydropower

ZHAO Dongsheng<sup>1</sup>, GAO Zhongchen<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>3</sup>

(1. Jilin Noble Electric Power Industry Group Company, Changchun 130033, China; 2. Jilin Noble Hydropower Co., Ltd., Changchun 130033, China; 3. HNAC Technology CO., LTD., Changsha 410205, China)

**Abstract:** In order to eliminate the problem of frequent loss of thermal power units during the process of wind power generation, the introduction of carbon capture units and cascade hydropower is optimized. For wind-hydro-thermal power system containing wind power, cascade hydropower, conventional thermal power units, and carbon capture units, the multi-objective optimal operation model is built aiming at more efficient use of clean energy, ensuring the smooth operation of the traditional unit and reducing the comprehensive operation cost of the system. By using the principle of maximum membership, the proposed model is turned into single object optimization problem and solved by quadratic programming. Results of case simulation show that the adjustment role of hydropower based on accommodating all of wind power can reduce the adjustment of the thermal power unit, keep the thermal power unit running smoothly, and reduce the extra loss caused by the frequent adjustment of the thermal power unit.

This work is supported by Science and Technology Development Program of Hunan Province (No. 2018GK4006).

**Key words:** energy-saving power dispatching; low-carbon; joint optimization; multi-objective optimal dispatching model; single-objective model

## 0 引言

低碳发展是我国在面对巨大的碳减排压力时做出的必然选择。在当前提倡低碳绿色发展的背景下, 为了应对全球能源供应紧缺和环境问题, 节能减排是一项十分重要的措施, 而发电领域的 CO<sub>2</sub> 排放量占国内总排放总量的 40%左右<sup>[1]</sup>, 因此实行电力系统低碳运行是我国低碳发展的必然要求。为了促进

电力行业节能减排, 推动电力系统的低碳化, 我国开展了相关的节能调度试点工作<sup>[2]</sup>。

已有相关文献针对节能调度展开了研究, 主要有以下几个方面: 一方面是利用等发电煤耗微增率准则优化火电机组的出力及其机组组合问题<sup>[3]</sup>, 针对该优化问题而提出的相关改进使其适应大电网的节能调度要求, 例如, 采用多目标优化算法将节能调度等效为多目标优化问题。得出其出力的优化分配结果<sup>[4]</sup>、采用最优潮流的研究结果进行节能调度出力优化分配<sup>[5]</sup>。第二方面是通过采用市场机制来

权衡实施节能发电调度将可能引起各方利益的重大调整,但主要针对的是各类火电企业的调度出力<sup>[6]</sup>。第三方面是采用虚拟电厂的建模方法,通过负荷调度将负荷侧可调节资源常态化地纳入到电力系统调度运行中,基于节能发电调度模式<sup>[7]</sup>,创建日前负荷调度模型,实现电力行业更高层次的节能调度<sup>[8]</sup>。但以上均未涉及到风电、水电等可再生清洁能源,而充分开发风电、水电等可再生清洁能源能有效地实现电力系统的节能减排<sup>[9]</sup>,有效推动其低碳运行。

但在大量的消纳风电过程中,必须同时调用其他电源进行配合。在当前的电源结构中,可以充分发挥水电及部分碳捕集机组(Carbon Capture and Storage, CCS)的调节作用。但由于火电机组受运行特性限制,会使得调节的能力有限,并且会造成爬坡较慢的结果,由于不断地调节机组,还会产生额外的损耗<sup>[10]</sup>。通常使用水电来进行调峰<sup>[11]</sup>,弃水将间接带来能量的损耗。如何减少风水火系统中因消纳风电而带来火电机组的能量损耗及提高水能资源的利用效率,是目前亟需探讨的问题。

在低碳背景下,针对包含风电场、梯级水电站、碳捕集电厂以及常规火电厂的风水火系统多源结构,基于全额消纳风电<sup>[12]</sup>的背景下,以水电发电量最大、调节火电机组量最小、碳排放综合成本及系统燃料使用量最小为目标函数,建立相应调度模型<sup>[13]</sup>。在该背景下,风电、水电等清洁能源优先上网,尽可能大地激发调峰的能力,使传统机组运行尽可能地稳定,使传统机组出力的曲线趋于平滑,在基于提高水力资源利用效率的背景下,减少系统CO<sub>2</sub>的排放量,再对算例结果进行分析。

## 1 风水火系统机组特性分析

### 1.1 耗量与排放特性

当使用可再生清洁能源生产电能时,如风电、水电,由于不会有二氧化碳气体的排放,且不会消耗化石能源,此时可不考虑风电与水电机组的耗量特性与排放特性的分析。常规火电厂的煤耗特性可用二次函数表示<sup>[14]</sup>,设 $a_j$ 、 $b_j$ 、 $c_j$ 为电厂 $j$ 的煤耗特性系数,则常规火电厂 $j$ 的煤耗特性为

$$F_{thj} = a_j P_{thj}^2 + b_j P_{thj} + c_j \quad (1)$$

式中, $P_{thj}$ 为机组发电功率。

设 $e_j$ 为常规火电厂 $j$ 的单位电量碳排放强度,其CO<sub>2</sub>排放函数<sup>[15]</sup>可表示为

$$E_{thj} = e_j P_{thj} \quad (2)$$

在常规火电厂的基础上做碳捕集改造,即形成了CCS电厂<sup>[16]</sup>。当CCS系统在捕集二氧化碳时会

消耗部分能量。经过对煤碳等化石燃料的燃烧,CCS电厂得到的功率为等效发电功率( $P_n$ ),CCS系统将消耗其中一部分,捕集功率( $P_c$ )即为此部分功率,剩余的部分称为净输出功率( $P_g$ ),即该电厂对外表现的输出功率,对应关系为<sup>[17]</sup>

$$P_n = P_g + P_c \quad (3)$$

运行能耗( $P_{cc}$ )与维持能耗( $P_{cm}$ )组成了捕集能耗,维持能耗可作为定值出力,运行能耗与二氧化碳的捕集量近似成正比例关系,即

$$P_c = P_{cm} + P_{cc} = P_{cm} + wE_c \quad (4)$$

式中: $w$ 为单位时间内捕集二氧化碳(单位为吨)需要的功率; $E_c$ 为单位时间内捕集二氧化碳的量。

设通过消耗化石燃料,CCS电厂产生的二氧化碳量为 $E_n$ ,单位电量的C排放强度为 $e$ ,则

$$E_n = eP_n \quad (5)$$

设CCS电厂的二氧化碳捕集量为 $E_c$ , $\lambda$ 为CCS系统二氧化碳捕集率,则

$$E_c = \lambda E_n \quad (6)$$

联立式(3)一式(6),可得

$$P_n = \frac{P_g}{(1 - w\lambda e)} \quad (7)$$

因此,在碳捕集电厂中,其煤耗特性函数可表示为

$$F = aP_n^2 + bP_n + c \quad (8)$$

碳捕集电厂的CO<sub>2</sub>净排放量 $E_g$ 为

$$E_g = E_n - E_c = eP_n(1 - \lambda) \quad (9)$$

### 1.2 机组调节特性分析

在包含梯级水电站、风电场、CCS电厂以及常规火电厂的风水火系统多源结构中,风电机组的出力具有不确定性,需要系统其他电源进行配合调节。水电机组具有快速调节能力,是系统最为主要的调峰电源,传统火电机组能够通过改变锅炉状态来调节其出力的变化,但其调节速度慢且会带来额外的能量损耗,碳捕集机组能够通过改变碳捕集系统的碳捕集率,迅速调整机组的净输出功率,具有快速调整能力且不会消耗额外的能量<sup>[18]</sup>。

## 2 考虑碳排放的风水火系统节能调度模型

### 2.1 目标函数

为在消纳风电的基础上,充分开发水电,提高水力资源利用效率,且使火电机组尽量保持平稳运行,系统燃料与碳排放综合成本最小,从而实现节能调度的目的,建立如下多目标函数。

1) 水电发电量最大<sup>[19]</sup>

$$f_1 = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I P_{hi,t} \Delta t \quad (10)$$

$$P_{hi,t} = C_{i1} V_{i,t}^2 + C_{i2} Q_{i,t}^2 + C_{i3} V_{i,t} Q_{i,t} + C_{i4} V_{i,t} + C_{i5} Q_{i,t} + C_{i6} \quad (11)$$

式中:  $P_{hi,t}$  表示  $t$  时段水电厂  $i$  的出力;  $\Delta t$  为调度时段时长;  $C_{i1} - C_{i6}$  表示水电厂  $i$  的水电转换系数;  $T$  为调度时段总数;  $I$  表示水电厂总数。

### 2) 火电机组调整量最小

不断地调整传统机组出力会消耗能量, 并且会降低其锅炉的效率, 将不能通过数学模型去体现, 为了表达传统机组出力的平稳性<sup>[20]</sup>, 可观察传统机组相邻时段出力的变动, 以传统机组的出力调整量最小建立调度目标。

$$f_2 = \min \sum_{t=1}^{T-1} \left( \sum_{j=1}^J |P_{thj,t+1} - P_{thj,t}| + \sum_{k=1}^K |P_{kn,t+1} - P_{kn,t}| \right) \quad (12)$$

### 3) 系统燃料与碳排放综合成本最小

在节能低碳背景下, 为发挥碳捕集电厂<sup>[21]</sup>低碳运行的特点, 并实现系统的低能耗、低排放, 将二氧化碳排放成本内部化, 以 C 排放的总成本及系统化石燃料最小建立调度目标, 设  $u_{f,t}$  为  $t$  时段的煤价, 则系统燃料成本  $C_F$  为

$$C_F = \sum_{t=1}^T (u_{f,t} \sum_{j=1}^J (a_j P_{thj,t}^2 + b_j P_{thj,t} + c_j) + \sum_{k=1}^K (a_k P_{kn,t}^2 + b_k P_{kn,t} + c_k)) \quad (13)$$

设  $u_{e,t}$  为  $t$  时段的碳价, 则系统碳排放成本  $C_E$  为

$$C_E = \sum_{t=1}^T (u_{e,t} \sum_{j=1}^J e_j P_{thj,t} + \sum_{k=1}^K e_k P_{kn,t} (1 - \lambda_k)) \quad (14)$$

系统综合成本最小:

$$f_3 = \min (C_F + C_E) \quad (15)$$

## 2.2 约束条件

### 1) 系统约束

$$\sum_{i=1}^I P_{hi,t} + \sum_{j=1}^J P_{thj,t} + \sum_{k=1}^K P_{kg,t} = P_{D,t} - P_{w,t} \quad (16)$$

式中:  $P_{D,t}$  为  $t$  时段的负荷;  $P_{w,t}$  表示  $t$  时段的风电总出力;  $P_{kg,t}$  表示  $t$  时段 CCS 电厂  $k$  的净出力。

### 2) 常规火电厂约束

$$P_{thj \min} \leq P_{thj,t} \leq P_{thj \max} \quad (17)$$

$$D_{thj} \leq P_{thj,t+1} - P_{thj,t} \leq R_{thj} \quad (18)$$

式中:  $P_{thj \max}$ 、 $P_{thj \min}$  分别表示常规火电厂  $j$  的最大、

最小出力;  $R_{thj}$  表示常规火电厂  $j$  的最大上坡速度;  $D_{thj}$  表示常规火电厂  $j$  的最大下坡速度。

### 3) CCS 电厂约束

$$P_{kn \min} \leq P_{kn,t} \leq P_{kn \max} \quad (19)$$

$$D_{kn} \leq P_{kn,t+1} - P_{kn,t} \leq R_{kn} \quad (20)$$

$$0 \leq \lambda_{k,t} \leq \lambda_{k \max} \quad (21)$$

式中:  $P_{kn \max}$  表示 CCS 电厂  $k$  的最大出力;  $P_{kn \min}$  表示最小出力;  $R_{kn}$  表示 CCS 电厂  $k$  的最大上坡速度;  $D_{kn}$  表示最大下坡速度;  $\lambda_{k \max}$  表示 CCS 电厂  $k$  的最大捕集率;  $\lambda_{k,t}$  表示  $t$  时段 CCS 电厂  $k$  的捕集率。

### 4) 水电约束<sup>[17]</sup>

$$P_{hi \min} \leq P_{hi,t} \leq P_{hi \max} \quad (22)$$

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

$$Q_{i \min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i \max} \quad (24)$$

$$H_{i \min} \leq H_{i,t} \leq H_{i \max} \quad (25)$$

$$0 \leq S_{i,t} \leq S_{i \max} \quad (26)$$

$$V_{i,1} = V_{i1}, V_{i,T} = VT_i \quad (27)$$

$$V_{i,t} = V_{i,t-1} + q_{i,t} + Q_{i-1,t-\tau} + S_{i-1,t-\tau} - Q_{i,t} - S_{i,t} \quad (28)$$

式中:  $H_{i,t}$ 、 $V_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 、 $S_{i,t}$ 、 $q_{i,t}$  分别表示  $t$  时段水电厂  $i$  的水头、蓄水容量、发电流量、弃水量、天然降水量;  $V_{i,t-1}$  表示  $t-1$  时段水电厂  $i$  的蓄水容量;  $V_{i1}$ 、 $VT_i$  表示水电厂  $i$  在调度周期始末的蓄水容量;  $\tau$  表示上游水电厂下泄流量到相邻水电厂的时滞系数;  $P_{hi \max}$  表示水电厂  $i$  的最大出力;  $P_{hi \min}$  表示最小出力;  $V_{i \max}$  表示水电厂  $i$  允许的最大库容;  $V_{i \min}$  表示最小库容;  $Q_{i \max}$  表示水电厂  $i$  允许的最大发电流量;  $Q_{i \min}$  表示最小发电流量;  $H_{i \max}$  表示水电厂  $i$  允许的最大运行水头;  $H_{i \min}$  表示其最小运行水头;  $S_{i \max}$  表示水电厂  $i$  允许产生的最大弃水流量。

## 3 模型求解策略与步骤

### 3.1 多目标转换策略

通过使用 Fuzzy 数学原理<sup>[22-23]</sup>的方法去求解该多目标问题, 对每个目标函数, 均能创建对应的隶属度函数。为了便于结果的求出, 将水电发电量最大调节为负值最小, 由于三个目标均有越小越好的特点, 无下限但有上限, 目标的值越小, 其对应会有越大的隶属度。所以文中各目标的隶属度函数使用降半梯形的形式, 其表达式为

$$u_i = \begin{cases} 1, & f_i \leq R_i \\ \frac{R_i + \delta_i - f_i}{\delta_i}, & R_i < f_i \leq R_i + \delta_i \\ 0, & R_i + \delta_i < f_i \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $u_i$  表示第  $i$  个目标相应的隶属度;  $R_i$  表示第  $i$  个目标的理想值;  $\delta_i$  表示第  $i$  个目标可接受的伸缩值。将多目标问题通过最大隶属度原理转化为单目标问题:

$$\min -u \quad (30)$$

$$\text{s.t. } f_1 + \delta_1 u \leq R_1 + \delta_1 \quad (31)$$

$$f_2 + \delta_2 u \leq R_2 + \delta_2 \quad (32)$$

$$f_3 + \delta_3 u \leq R_3 + \delta_3 \quad (33)$$

$$0 \leq u \leq 1 \quad (34)$$

约束条件还包括式(16)一式(28)。

### 3.2 求解步骤

1) 首先对三个单目标问题进行求解<sup>[17]</sup>。在目标为水电发电量负值最小时, 对调度模型进行求解, 可以得到以下量: 系统综合成本  $R'_3$ 、 $R_1$  及对应的传统机组出力调整量  $R'_2$ ; 在目标为传统机组出力调整量最小时, 对调度模型进行求解, 可得出系统综合成本  $R''_3$ 、 $R_2$  及对应水电发电量负值  $R'_1$ ; 当目标为风水火系统综合成本最小时, 调度模型的求解可以得到  $R''_1$  传统机组出力调整量  $R''_2$ 、 $R_3$  及对应水电发电量负值。

2) 基于决策者的需求, 确定  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$  后, 可进行不同程度的伸缩, 其取值范围分别为

$$0 \leq \delta_1 \leq \max(R'_1, R''_1) - R_1 \quad (35)$$

$$0 \leq \delta_2 \leq \max(R'_2, R''_2) - R_2 \quad (36)$$

$$0 \leq \delta_3 \leq \max(R'_3, R''_3) - R_3 \quad (37)$$

3) 使用模糊隶属度函数<sup>[24]</sup>的方法, 可以将多目标优化模型转变为单目标优化模型, 并用二次规划(Quadratic Programming)的方法进行求解。

## 4 算例分析

### 4.1 不同水电利用策略的水火电节能调度

#### 1) 算例参数<sup>[17]</sup>

算例中小型水火电力系统由 3 座火电厂和 4 座水电站(Hydroelectric Power Station/Hydropower Plant, HPP)组成, 对系统验证传统机组参数, 如表 1 所示, 水电机组参数如表 2、表 3 所示, 选取了处于丰水期、枯水期的典型日(由于来水情况的不同)进行优化计算。

表 1 火电机组参数

编号	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$P_{j\max}/\text{MW}$	$P_{j\min}/\text{MW}$
1	0.000 175	0.11	3.0	250	40
2	0.000 230	0.15	5.0	175	20
3	0.000 116	0.07	7.0	285	50

注:  $a_j/(t/\text{MW})^2 \cdot \text{h}$ ,  $b_j/(t/\text{MWh})$ ,  $c_j/(t/\text{h})$

表 2 水电机组水电转换参数

编号	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1	-0.004 2	-0.42	0.030	0.90	10.0	-50
2	-0.004 0	-0.30	0.015	1.14	9.50	-70
3	-0.003 0	-0.30	0.025	1.05	10.5	-80
4	-0.003 0	-0.31	0.027	1.44	14.0	-90

表 3 水电机组参数

编号	$P_N/\text{MW}$	$\tau/t$	$V_{\max}/\text{m}^3$	$V_{\min}/\text{m}^3$	$Q_{\max}/\text{m}^3$	$Q_{\min}$
1	120	2	150	80	15	6
2	120	3	120	60	15	6
3	240	4	240	100	30	10
4	350	0	160	70	20	6

#### 2) 不同水电利用策略的调度结果分析

对比水电在不同调度策略下, 水火联合系统在丰水期和枯水期的典型日的优化结果如表 4、表 5 所示。

由表 4 与表 5 可以得出, 在水电丰水期采取水电调峰策略时, 其会产生更多弃水, 且由于火电机

表 4 丰水期典型日调度结果

	火电调整量/ $(\times 10^3 \text{ MW})$	火电燃料消耗量/ $(\times 10^3 \text{ t})$
水电调峰	1.247	1.601
火电调峰	1.406	1.538
	水电发电量/ $(\times 10^3 \text{ MW} \cdot \text{h})$	弃水量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$
水电调峰	15.46	98.1
火电调峰	16.11	29.8

表 5 枯水期典型日调度结果

	火电调整量/ $(\times 10^3 \text{ MW})$	火电燃料消耗量/ $(\times 10^3 \text{ t})$
水电调峰	0.718	1.768
火电调峰	1.479	1.836
	水电发电量/ $(\times 10^3 \text{ MW} \cdot \text{h})$	弃水量/ $(\times 10^4 \text{ m}^3)$
水电调峰	10.89	0
火电调峰	11.77	0

组的调整量变化不大,但由于水电的弃水增加,从而导致其发电量减少,因而造成火电机组的燃料消耗量增加。当在水电枯水期时,由于水量较少,在两种水电调度策略中,都没有产生弃水的现象,但是采用水电调峰策略时,传统机组的调整量减小约50%,大幅降低了其燃料的消耗。

#### 4.2 考虑碳捕集机组的风水火联合协调优化节能调度

##### 1) 算例参数

算例包含3级梯级HPP、6座火力发电站(其中一座被改造成CCS电厂)以及1座大型风电场,当其参与调度时,进行优化分析。图1所示为系统日负荷预测曲线,图2所示为大型风电场出力的预测,调度周期取24h。表6—表8展示了传统机组的数据和水电机组数据,其中六号火电厂被改造成CCS电厂,  $\lambda_{\max}=0.9$ ,  $w=0.23 \text{ MW}\cdot\text{h}/\text{t}$ , CCS系统维持能耗  $P_{\text{cm}}=15 \text{ MW}$ 。

##### 2) 计算结果及分析

对优化模型进行求解,各时段系统负荷、风电出力、水电出力、常规传统火电出力以及CCS机组净出力如图3所示。可知,水电出力的变化趋势与CCS机组净出力变化整体趋势一致,大部分时段,

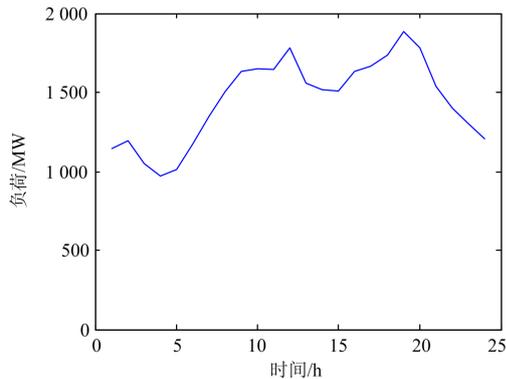


图1 负荷曲线

Fig. 1 Load curve

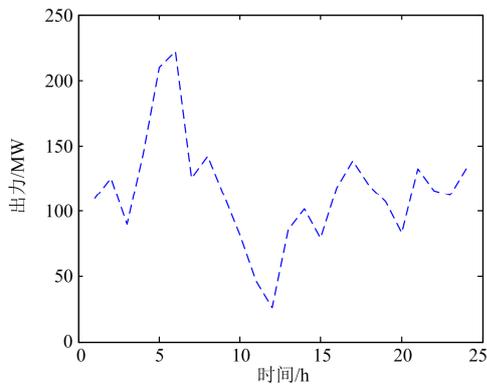


图2 风电出力曲线

Fig. 2 Wind power output curve

表6 火电厂相关参数

Table 6 Related parameters of thermal power plant

编号	$a_j$	$b_j$	$c_j$	$P_{j\max}/\text{MW}$	$P_{j\min}/\text{MW}$
1	0.000 251	0.120	2.5	150	50
2	0.000 396	0.191	2.5	80	20
3	0.000 293	0.185	4.0	300	100
4	0.000 382	0.170	3.2	120	35
5	0.000 261	0.154	7.2	280	75
6	0.000 208	0.121	8.2	450	125

表7 火电机组单位电量碳排放强度

Table 7 Unit power carbon emission intensity of thermal power unit

$e_i$	1	2	3	4	5	6
	0.803	0.921	0.776	0.812	0.792	0.771

表8 水电机组参数

Table 8 Hydropower unit parameters

编号	$P_N/\text{MW}$	$\tau/\text{t}$	$V_{\max}/\text{m}^3$	$V_{\min}/\text{m}^3$
1	160	1	120	60
2	240	2	240	100
3	360	0	180	70

续表8 水电机组参数

Table 8 (continued) Hydropower unit parameters

编号	$P_N/\text{MW}$	$\tau/\text{t}$	$V_{\max}/\text{m}^3$	$V_{\min}/\text{m}^3$
1	80	70	15	6
2	70	170	30	10
3	120	150	20	6

常规火电出力均较为平缓,可知当水电与燃气蒸汽联合循环发电机组能够满足调峰需求时,负荷与风电的波动主要由水电与CCS机组来进行调节,在某些负荷变动剧烈的时段,调峰需求不能得以满足,此时也需要用传统火电机组进行调节。

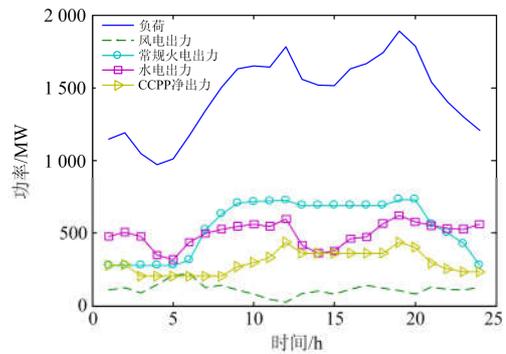


图3 各时段系统负荷及各类电源出力

Fig. 3 System load and various types of power output at various times

如图4所示为各调度时段 CCS 机组的净出力、捕集功率、等效发电出力。可以看出大部分时段 CCS 机组等效发电出力比较平稳, 而其净出力与负荷的变化趋势一致。由于引入 CCS 系统为 CCS 机组提供了快速调节能力, 调峰任务的部分可以被解决。故而在负荷低谷阶段时, CCS 机组处于高捕集率状态, 在负荷高峰时, CCS 机组处于低捕集率状态, 其捕集功率与净出力的变化趋势相反。

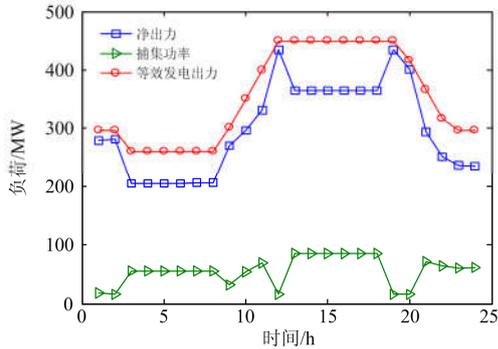


图4 碳捕集机组净出力、捕集功率、等效发电出力  
Fig. 4 Carbon capture unit net output, capture power, and equivalent power generation output

如图5所示为系统中所有水电机组在各调度时段的出力情况, 水电负责主要的调峰任务, 其中来水较丰富、装机容量较大的2号和3号水电厂位于下游, 可调节库容较大, 与第一级的水电厂相比调节能力更好, 故2、3号水电厂的出力变化较大。

如图6所示为各传统机组的出力曲线。当不能通过水电与 CCS 机组达到调峰需求的某些时段, 必须对传统火电机组进行调节, 抑制负荷及风电的波动。当处于最低出力水平时, 即在凌晨1点至6点的负荷低谷时期, 进入深度调峰状态, 要使得负荷平衡, 不断增加负荷, 使得传统火电机组出力增加。但纵观整个调度周期, 传统火电机组的出力整体较为平稳。

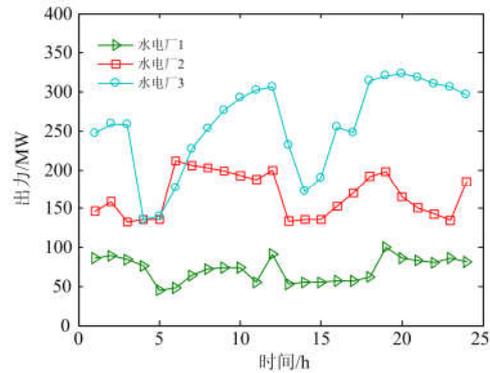


图5 各水电厂出力  
Fig. 5 Hydro power plants output

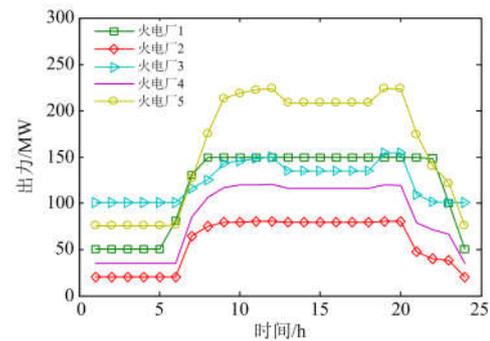


图6 各火电厂出力  
Fig. 6 Thermal power plant output

为表现出 CCS 电厂参与风水火联合调度后所产生的影响, 对以下两种情况进行优化计算。场景1中, 大部分传统机组与水电厂均能够正常运行, 其中6号火电厂以传统方式运行, 其 CCS 系统不工作。场景2中, 大部机组运行方式都与场景1一致, 仅6号火电厂 CCS 系统保持运行。两个场景下的优化调度结果如表9所示。可看出, 水电发电量升高了, 二氧化碳排放减少, 火电也调整较小, 这些均得益于引入了 CCS 系统。由于 CCS 机组良好的调节特性, 部分调峰任务得到了完成, 提高了水力资源的利用效率, 减少传统机组的调节。

表9 场景1、2优化调度结果

Table 9 Optimal scheduling results for each scenario

	水电发电量/ $(\cdot 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h})$	火电调整量/ $(\cdot 10^3 \text{ MW})$	CO <sub>2</sub> 排放量/ $(\times 10^3 \text{ t})$	燃料消耗/ $(\times 10^3 \text{ t})$	综合成本/ $(\times 10^6 \text{ 元})$
场景1	1.201	1.626	10.365	4.578	2.766
场景2	1.247	1.555	7.885	4.793	2.796

## 5 结论

以更加高效地利用清洁能源、减小系统综合运行成本、确保传统机组运行平稳为目标, 对包含风电、传统机组、梯级水电以及碳捕集(CCS)机组的风水火联合系统建立多目标优化调度模型。研究表明:

1) 合理的水电调度策略能够提高水电的利用率, 降低系统中火电机组的燃煤消耗。

2) 通过水电与碳捕集机组的调节作用, 传统机组的调节量减小, 传统机组的稳定运行得以保障, 传统机组不断调节所产生的损耗得到减小, 并且能

够全额地消纳风电。

3) CCS 机组能缓解水电的调峰压力, 提高水力资源的利用效率, 从而发挥碳捕集机组低碳运行的特点, 有效减少系统 CO<sub>2</sub> 的排放量。

### 参考文献

- [1] 黎灿兵, 刘珂, 曹一家, 等. 低碳发电调度与节能发电调度的一致性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 94-101.  
LI Canbing, LIU Yu, CAO Yijia, et al. Consistency evaluation of low-carbon generation dispatching and energy-saving generation dispatching[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 94-101.
- [2] 霍卫卫. 火电机组节能发电调度智能优化算法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.  
HUO Weiwei. Research on intelligent optimization algorithms for energy-saving generation dispatch of thermal power units[D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [3] 许建中, 王乐, 井皓, 等. 混合 MMC 等微增率子模块冗余配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5804-5811, 5937.  
XU Jianzhong, WANG Le, JING Hao, et al. Equal incremental principle based sub-module redundancy configuration of hybrid MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5804-5811, 5937.
- [4] 王立健, 何青. 燃煤碳捕集机组技术经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 1-7.  
WANG Lijian, HE Qing. Technical economic analysis of carbon capture units after combustion[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 1-7.
- [5] BURADE P G, HELONDE J B. A novel approach for optimal power dispatch using artificial intelligence (AI) methods[C] // International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conservation, June 4-6, 2009, Perundurai, India: 1-6.
- [6] 尚金成, 庞博, 王清敏, 等. 节能发电调度经济补偿机制市场模型及算法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 62-68.  
SHANG Jincheng, PANG Bo, WANG Qingmin, et al. Market model and algorithms for economic compensation mechanism of energy-saving generation dispatch[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 62-68.
- [7] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.  
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [8] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 节能发电调度下基于虚拟机组的日前负荷调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3691-3699.  
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. Model of day-ahead load scheduling based on virtual generator unit in energy-saving power generation dispatching[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3691-3699.
- [9] 田贺平, 孙舟, 王伟贤, 等. 考虑节能效益的企业分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 38-47.  
TIAN Heping, SUN Zhou, WANG Weixian, et al. Enterprises distributed power optimization allocation considering energy-saving benefit[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 38-47.
- [10] ABDALLAH T, FARHAT A, DIABAT A, et al. Green supply chains with carbon trading and environmental sourcing: formulation and life cycle assessment[J]. Applied Mathematical Modeling, 2012, 36(9): 4271-4285.
- [11] 陈森林, 梁斌, 李丹, 等. 水电机组定负荷的发电流量递推计算方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 219-226, 336.  
CHEN Senlin, LIANG Bin, LI Dan, et al. Derivation and application of recursive calculation method for hydro-unit generating flow under constant load[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 219-226, 336.
- [12] 吕素, 黎灿兵, 曹一家, 等. 基于等综合煤耗微增率的火电机组节能发电调度算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(32): 1-8.  
LÜ Su, LI Canbing, CAO Yijia, et al. An energy-saving generation dispatching algorithm for thermal power units based on equal comprehensive coal consumption incremental principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(32): 1-8.
- [13] 曹宇, 汪可友, 石文辉, 等. 风-光-海水抽蓄联合发电系统的调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 16-23.  
CAO Yu, WANG Keyou, SHI Wenhui, et al. Study on dispatching strategies of a wind-solar-seawater pumped storage hybrid power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 16-23.
- [14] 李霞, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及调度一致性的含风电系统备用容量优化分配[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 40-46.  
LI Xia, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Optimal distribution model for system reserve capacity with wind power connection regarding consistency performance of reserve dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2013, 37(16): 40-46.
- [15] 李绍金, 周任军, 周胜瑜, 等. 电力系统环保经济负荷分配的模糊自修正粒子群算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 15-21.  
LI Shaojin, ZHOU Renjun, ZHOU Shengyu, et al. Fuzzy self-correction particle swarm optimization of environmental economic load[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 15-21.
- [16] 李晖, 马瑞, 曾婷, 等. 含风电与碳捕集电厂的电力系统多目标动态最优潮流[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 30-37.  
LI Xuan, MA Rui, ZENG Ting, et al. Multi-objective dynamic optimal power flow for power system considering wind farm and carbon capture power plant[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 30-37.
- [17] 尹权. 考虑清洁能源接入系统的节能调度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.  
YIN Quan. Research of energy-saving dispatching of power systems considering clean energy integration[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [18] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.  
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 22-28.
- [19] 葛晓琳, 张粒子, 舒隽. 风水火系统长期优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 153-161, 24.  
GE Xiaolin, ZHANG Lizi, SHU Jun. A long-term optimal scheduling method for wind-hydro-thermal power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 153-161, 24.
- [20] 贺建波, 胡志坚, 仇梦林, 等. 考虑系统实时响应风险水平约束的风-火-水电力系统协调优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1898-1906.  
HE Jianbo, HU Zhijian, ZHANG Menglin, et al. Coordinated optimal dispatching of wind-thermal-hydro power system considering constraint of real-time expected demand not supplied[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1898-1906.
- [21] 朱勇, 裴杰, 曹传钊, 等. 塔式太阳能辅助燃煤发电系统技术经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 16-24.  
ZHU Yong, PEI Jie, CAO Chuanzhao, et al. Techno-economic analysis of solar tower aided coal-fired power generation system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 16-24.
- [22] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.  
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [23] 刘方, 杨秀, 黄海涛, 等. 含热电联产热电解耦运行方式下的微网能量综合优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 51-57.  
LIU Fang, YANG Xiu, HUANG Haitao, et al. Energy comprehensive optimization of micro-grid including CHP with thermoelectric decoupling operation mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2016, 28(1): 51-57.
- [24] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 等. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3479, 3675.  
DAI Yuanhang, CHEN Lei, MIN Yong, et al. Optimal dispatch for joint operation of wind farm and combined heat and power plant with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3470-3479, 3675.

收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-11-30

作者简介:

赵东声(1965—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为水电运营管理及优化升级; E-mail: 459684058@qq.com

高忠臣(1964—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为水力发电与电气工程自动化;

刘伟(1975—), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统自动化控制。

(编辑 葛艳娜)