

文章编号: 0254-0096(2020)09-0021-08

# 基于启停电锅炉与储热装置协调供热的风电消纳低碳经济调度

杨秋霞, 支成, 袁冬梅, 杨海华

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 为解耦热电厂中热机组“以热定电”的刚性约束, 提高风电消纳能力, 降低碳排放成本, 研究启停电锅炉与储热装置协调供热策略, 建立基于启停电锅炉与储热装置协调供热的风电消纳低碳经济调度模型。该模型以经济环境成本最低为目标, 引入碳排放成本参数, 考虑热机组热电耦合约束, 热、电平衡以及机组爬坡等约束。算例对4种供热方式下系统的风电消纳水平, 煤耗成本以及碳排放成本进行分析。算例结果验证所提模型有效性及准确性。

**关键词:** 成本效益分析; 热电厂; 风电; 储热装置; 电锅炉

**中图分类号:** TK513.5

**文献标志码:** A

## 0 引言

近年来, 中国大力发展“无污染, 零排放”的清洁能源有效地改善了能源供应结构, 减少了环境污染。当前随着风电并网容量的日益增多, 对电力系统的影响越来越明显<sup>[1-2]</sup>。中国的华北、东北、西北(后文简称“三北地区”)既是风能资源丰富的地区, 又是用电量和供热量需求庞大的区域。这些地区冬季供热易出现“风热冲突”的问题, 电网中大量的热机组因“以热定电”的刚性约束导致调峰能力不足, 机组为了满足负荷而低效益强输出, 使风电并网空间不足<sup>[3-4]</sup>。因此, 采取合理的方式消纳风电, 对实现电力系统低碳经济调度具有重要意义。

为提高风电消纳能力, 已有学者研究了配置储热以解耦“以热定电”的刚性约束<sup>[5]</sup>, 提高热机组的调峰能力, 减少弃风电量。文献[6-7]提出基于水源热泵技术的风电消纳模式, 该模式具有良好的经济、社会与环境效益。文献[8]研究热电厂通过配置电锅炉来解耦其“以热定电”约束, 并对国民经济性和潜在效益进行分析。文献[9-10]提出在热机组与集中供热系统协调配合下, 提高电热系统运行的灵活性。国内外学者的研

究主要是单独考虑储热装置与电锅炉供热来提升风电消纳空间, 但很少考虑储热装置与电锅炉协调供热对风电消纳效果的影响。

本文在上述文献研究的基础上, 建立基于启停电锅炉与储热装置协调供热的风电消纳低碳经济调度模型, 推导满足风电消纳的储热装置放热功率与电锅炉启动电功率的关系, 比较了4种供热方式的风电消纳效果, 最后验证启停电锅炉与储热装置协调供热的有效性和实用性。

## 1 热机组运行特性与风电消纳原理

### 1.1 热机组运行特性

热机组分为抽汽式与背压式2种<sup>[11]</sup>, 其发电功率受供热功率所约束, 即“电热特性”, 体现出了与常规机组的区别。目前, 中国热电厂所使用的热机组大多数是大容量抽汽式机组, 因此本文研究的热机组均采用抽汽式机组。抽汽式机组从汽轮机抽取一部分蒸汽进行供热, 另一部分蒸汽流过汽轮机直接做功输出电功率, 如图1所示, A~E点所包围区域为机组运行区域, 可看出机组抽汽量增加, 供热功率会逐渐增加, 供电功率调节范围变窄。其电热特性可表示为:

收稿日期: 2018-03-15

基金项目: 河北省自然科学基金(E2016203092); 国家自然科学基金(61573303)

通信作者: 杨秋霞(1972—), 女, 博士、副教授, 主要从事光伏发电及并网控制, 电力系统保护与控制方面的研究。yangqx\_fly@163.com

$$\begin{cases} \max\{P_{\min} - \gamma h, \alpha h + \beta\} \leq P_e \leq P_{\max} - \gamma h \\ 0 \leq h \leq h_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_{\max}$ 、 $P_{\min}$ ——机组在纯凝工况下最大和最小发电功率, MW;  $\alpha$ ——电热功率弹性系数;  $\gamma$ ——进汽量不变时多抽取单位供热热量下发电功率减少量;  $\beta$ ——常数;  $h_{\max}$ ——机组最大供热功率, MW。

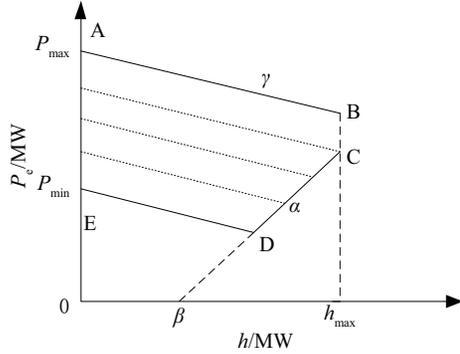


图1 抽汽式机组电热特性图

Fig. 1 Electricity-heat characteristics of extraction unit

## 1.2 配置储热装置消纳风电原理

从图1 热电机组的运行特性可看出机组发电出力与供热出力存在耦合关系,其调峰能力受到很大限制,导致冬季供暖时夜间风电预测出力较大,机组发电出力因“以热定电”约束无法下调,造成严重弃风。通过在机组处加装储热装置可有效打破“以热定电”的刚性约束,在非弃风时段,机组供热同时向储热装置蓄热,在弃风时段,储热装置补充供热,降低机组供电出力,提升风电消纳空间。

## 1.3 电锅炉提升调峰性能的原理

电锅炉作为电热能源系统的耦合元件,一般配置在热网换热站处。在发生弃风时,电锅炉既能作为电负荷,充分利用夜间的廉价电,增加调峰的能力,提高风电上网空间,又能作为热源解耦热电机组的热电约束,满足部分热负荷需求,降低热电机组的强迫出力<sup>[12]</sup>,进一步提高风电上网空间。电锅炉供热特性表示为:

$$h_{EB} = \varphi P_{EB} \quad (2)$$

式中,  $h_{EB}$ 、 $P_{EB}$ ——电锅炉供热功率和电功率, MW;  $\varphi$ ——电热转换系数。

## 1.4 储热装置与电锅炉供热消纳风电原理

在热电机组侧配置储热装置下,能够解耦热电耦合约束,拓展了机组调峰空间,降低机组出力,提高风电并网空间。由于储热装置参数的限制,仅配置储热装置对机组调峰,仍然有一定的弃风存在。此时若在负荷侧

加入电锅炉用于弥补储热装置供热的不足,可进一步提高风电消纳空间。

## 2 优化调度模型

本文以系统经济环境成本最低为目标函数,基于启停电锅炉与储热装置协调供热,建立包含风电、火电机组、热电机组、电锅炉及储热装置的热电联合系统,并以优先调度风电为原则,系统模型如图2所示。

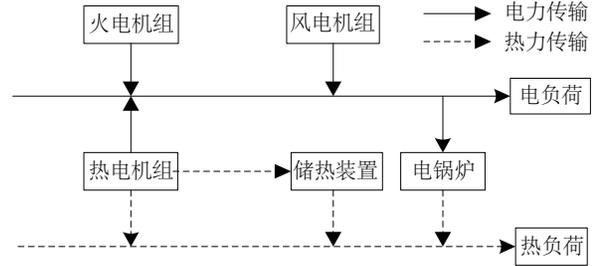


图2 系统模型

Fig. 2 System model

## 2.1 目标函数

火电机组煤耗成本以及碳排放量表示为发电功率的二次函数形式<sup>[13]</sup>为:

$$f_1(P_i^t) = a_i(P_i^t)^2 + b_i P_i^t + c_i \quad (3)$$

$$E_1(P_i^t) = u_i(P_i^t)^2 + v_i P_i^t + w_i \quad (4)$$

式中,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$ ——第  $i$  台机组的煤耗系数;  $u_i$ 、 $v_i$ 、 $w_i$ ——第  $i$  台机组的碳排放量系数;  $P_i^t$ —— $t$  时刻第  $i$  台机组发电出力, MW。

热电机组煤耗成本与碳排放量表示为:

$$f_2(P_i^t) = a_i(P_i^t)^2 + b_i P_i^t + c_i \quad (5)$$

$$E_2(P_i^t) = u_i(P_i^t)^2 + v_i P_i^t + w_i \quad (6)$$

$$P_i^t = P_{ei}^t + \gamma_i h_i^t \quad (7)$$

式中,  $P_i^t$ —— $t$  时刻第  $i$  台机组纯凝工况下发电功率, MW;  $P_{ei}^t$ —— $t$  时刻第  $i$  台机组净发电出力, MW;  $h_i^t$ —— $t$  时刻第  $i$  台机组供热功率, MW。

综合考虑,本文以系统经济环境成本最低为目标,包括煤耗成本  $F_1$ , 碳排放成本  $F_2$ 。

经济环境成本目标函数为:

$$\min F = F_1 + F_2 \quad (8)$$

其中,

$$F_1 = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_1} f_1(P_i^t) + \sum_{i=1}^{N_2} f_2(P_i^t) \right] \quad (9)$$

$$F_2 = \varepsilon \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{i=1}^{N_1} E_1(P_i^t) + \sum_{i=1}^{N_2} E_2(P_i^t) \right] \quad (10)$$

式中,  $N_1$ 、 $N_2$ ——火电机组数和热电机组数;  $\varepsilon$ ——碳排放成本系数, 元/t。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 系统约束

#### 1) 电力平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_1} P_i^t + \sum_{i=1}^{N_2} P_{ci}^t + P_{wf}^t = P_{EB}^t + P_L^t \quad (11)$$

式中,  $P_L^t$ —— $t$ 时刻用电负荷, MW;  $P_{wf}^t$ —— $t$ 时刻风电调度功率, MW。

#### 2) 热力平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_2} h_i^t + \omega_i h_d^t + h_{EB}^t = h_L^t + (1 - \omega_i) h_c^t \quad (12)$$

式中,  $h_d^t$ 、 $h_c^t$ —— $t$ 时刻储热装置放热和储热功率, MW;  $\omega_i$ ——储热装置储放热控制变量(0为储热, 1为放热)。

#### 3) 风电出力约束

$$P_{wf}^t \leq P_{wf,b}^t \quad (13)$$

式中,  $P_{wf,b}^t$ —— $t$ 时刻风电预测功率, MW。

#### 4) 电锅炉电功率约束

$$0 \leq P_{EB}^t \leq P_{EB,max} \quad (14)$$

式中,  $P_{EB,max}$ ——电锅炉电功率最大值, MW。

#### 5) 储热装置运行约束

$$\begin{cases} S_c^t = S_c^{t-1} + (h_c^t - h_d^t) \\ 0 \leq S_c^t \leq S_{c,max} \\ 0 \leq h_c^t \leq h_{c,max} \\ 0 \leq h_d^t \leq h_{d,max} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $S_c^t$ —— $t$ 时刻储热容量, MWh;  $S_{c,max}$ ——最大储热容量, MWh;  $h_{c,max}$ 、 $h_{d,max}$ ——储热和放热功率的最大值, MW。

### 2.2.2 机组约束

#### 1) 火电机组约束条件

##### ① 火电机组出力约束

$$P_{i,min} \leq P_i^t \leq P_{i,max} \quad (16)$$

式中,  $P_{i,min}$ 、 $P_{i,max}$ ——第 $i$ 台机组最小和最大发电功率, MW。

##### ② 火电机组爬坡约束

$$-P_{di} \Delta t \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq P_{ui} \Delta t \quad (17)$$

式中,  $P_{di}$ 、 $P_{ui}$ ——第 $i$ 台机组向下和向上爬坡率, MW。

#### 2) 热电机组约束条件

##### ① 热电机组供电出力约束

$$\max\{P_{i,min} - \gamma_i h_i^t, \alpha_i h_i^t + \beta_i\} \leq P_{ci}^t \leq P_{i,max} - \gamma_i h_i^t \quad (18)$$

##### 热电机组供热出力上下限的约束

$$h_{i,min} \leq h_i^t \leq h_{i,max} \quad (19)$$

式中,  $h_{i,min}$ 、 $h_{i,max}$ ——第 $i$ 台机组最小热出力和最大热出力, MW。

##### ② 热电机组热爬坡约束

$$\begin{cases} h_i^t - h_i^{t-1} \leq h_{i,up} \Delta t \\ h_i^{t-1} - h_i^t \leq h_{i,do} \Delta t \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $h_{i,do}$ 、 $h_{i,up}$ ——第 $i$ 台机组供热出力向下和向上爬坡率, MW。

##### ③ 热电机组供电出力爬坡约束

$$\begin{cases} P_{ci}^t - P_{ci}^{t-1} \leq P_{ci,up} \Delta t - \alpha_i (h_i^t - h_i^{t-1}) \\ P_{ci}^{t-1} - P_{ci}^t \leq P_{ci,do} \Delta t - \alpha_i (h_i^{t-1} - h_i^t) \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $P_{ci,do}$ 、 $P_{ci,up}$ ——第 $i$ 台机组供电出力向下和向上爬坡率, MW。

## 3 储热装置放热功率与电锅炉启动电功率的关系

储热装置与电锅炉对于系统调峰, 接纳弃风, 在一定程度上改变了电热符合时间尺度上的分布。因此, 解耦热电耦合具有至关重要的作用。但消纳风电的效果往往受储热装置放热功率、储热容量、输送损耗、电锅炉供电功率等因素限制<sup>[14]</sup>。合理启停电锅炉与储热装置协调供热, 不仅可提高消纳风电的效果, 而且能够节约相应的调度成本。弃风问题主要原因是冬季供暖期导致机组强迫出力过高, 下调量不足, 冬季夜间弃风量较高。在弃风时段, 根据该现象作以下假设: 热电机组工作在最小凝汽工况下, 其最小发电出力表达式即:

$$P_{ci,min} = \alpha_i h_i^t + \beta_i \quad (22)$$

电锅炉既能作为热源, 具有快速供热的特点, 又能作为电负荷, 提高机组调峰能力。电锅炉采用启停策略, 即弃风时段开启电锅炉调峰, 相当于通过电锅炉将弃风电量转换成热网调峰的热源, 无弃风时则关闭电锅炉。采用启停电锅炉策略, 一方面可以避免不经济的电热转换, 另一方面降低电锅炉不必要的运行成本。发生弃风的标志<sup>[12]</sup>表示为:

$$J_{flag}^t = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,min}^t + \sum_{i=1}^{N_2} (\alpha_i h_i^t + \beta_i) > P_L^t - P_{wf,b}^t \\ 0, & \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,min}^t + \sum_{i=1}^{N_2} (\alpha_i h_i^t + \beta_i) \leq P_L^t - P_{wf,b}^t \end{cases} \quad (23)$$

$J_{flag}^t = 0$  时, 系统无弃风电量, 储热装置处于蓄热状态, 电锅炉停运状态;  $J_{flag}^t = 1$  时, 系统存在弃风电量, 储热装置处于放热状态, 此时电锅炉启用的标志表示为:

$$H_{\text{flag}}^t = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,\text{min}}^t + \sum_{i=1}^{N_2} [\alpha_i(h_i^t - h_d^t) + \beta_i] > P_L^t - P_{\text{wf},\text{b}}^t \\ 0, & \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,\text{min}}^t + \sum_{i=1}^{N_2} [\alpha_i(h_i^t - h_d^t) + \beta_i] \leq P_L^t - P_{\text{wf},\text{b}}^t \end{cases} \quad (24)$$

当  $H_{\text{flag}}^t = 0$  时,电锅炉保持停运状态,储热装置供热;当  $H_{\text{flag}}^t = 1$  时,储热装置供热,同时开启电锅炉,由此可推出抽汽式机组总供热满足式(25)时,能够完全消纳风电。

$$\sum_{i=1}^{N_2} h_i^t \leq N_2 h_d^t + \frac{P_L^t - \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,\text{min}}^t - P_{\text{wf},\text{b}}^t - N_2 \beta_{\text{max}}}{\alpha_{\text{max}}} = h_{\text{pmax}}^t \quad (25)$$

$$\begin{cases} \alpha_{\text{max}} = \max\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{N_2}\} \\ \beta_{\text{max}} = \max\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{N_2}\} \end{cases} \quad (26)$$

式中,  $h_{\text{pmax}}^t$  ——保证系统不发生风电损失,热电机组  $t$  时刻所能发出的最大供热出力。

为满足供热平衡需求,则有:

$$h_{\text{pmax}}^t + h_d^t + h_{\text{EB},\text{bal}}^t = h_L^t \quad (27)$$

式中,  $h_{\text{EB},\text{bal}}^t$  ——满足供热平衡时电锅炉供热出力, MW。

根据式(27)可推出储热装置放热功率与电锅炉电功率关系,即:

$$P_{\text{EB}}^t \geq \frac{h_L^t - \left( N_2 h_d^t + h_d^t + \frac{P_L^t - \sum_{i=1}^{N_1} P_{i,\text{min}}^t - P_{\text{wf},\text{b}}^t - N_2 \beta_{\text{max}}}{\alpha_{\text{max}}} \right)}{\varphi} = P_{\text{EB},\text{pmin}} \quad (28)$$

式中,  $P_{\text{EB},\text{pmin}}$  ——电锅炉最小启动电功率, MW。

## 4 模型求解

上述模型是一个多维,非线性的优化问题,利用基本粒子群优化算法处理这样的问题收敛速度较慢,计算时间较长,而且容易陷入局部最优。本文在此基础上增加自调节环节<sup>[15]</sup>,通过可行化调整处理系统的约束条件,提高算法的寻优速度,避免陷入局部最优。

对于火电机组不存在热电耦合约束,可行化处理相对容易。下文主要以抽汽式机组为例,说明热电耦合约束与系统约束可行化处理办法。

1) 供热出力上下限约束:将机组热出力的上下限  $h_{i,\text{max}}$  和  $h_{i,\text{min}}$  做比较,若  $h < h_{i,\text{min}}$ , 则取  $h = h_{i,\text{min}}$ ; 若  $h > h_{i,\text{max}}$ , 则取  $h = h_{i,\text{max}}$ , 这样可保证机组热出力都满足上下限约束。

2) 供热出力爬坡约束:从第二调度时段开始,粒子更新需根据热出力爬坡约束条件进行调整。

3) 供热出力平衡约束:根据式(12)是否满足供热平

衡约束。对于不满足供热平衡约束的时刻进行调整,在满足供热平衡条件下,机组供热出力上调量  $\Delta h_{i,\text{up}}^t$ , 下调量  $\Delta h_{i,\text{do}}^t$  的计算如式(29)所示。

$$\begin{cases} \Delta h_{i,\text{up}}^t = \min\{h_{i,\text{max}}, h_i^{t-1} + h_{i,\text{up}}^t\} - h_i^t \\ \Delta h_{i,\text{do}}^t = h_i^t - \max\{h_{i,\text{min}}, h_i^{t-1} - h_{i,\text{do}}^t\} \end{cases} \quad (29)$$

4) 供电出力约束:调整供热出力满足约束条件之后,供电出力约束条件需要根据已确定的热出力进行计算。根据式(18)计算供电出力的上下限对不满足约束的电出力进行调整,根据式(21)机组供电出力爬坡约束逐一判断爬坡约束并进行调整。

同理,电锅炉消耗电功率,按照式(14)、式(28)约束调节后,将不可行解都会转化为可行解。该改进粒子群自调节优化算法的计算效率相比基本粒子群算法精度、速度大幅度提高,具体流程如图3所示。

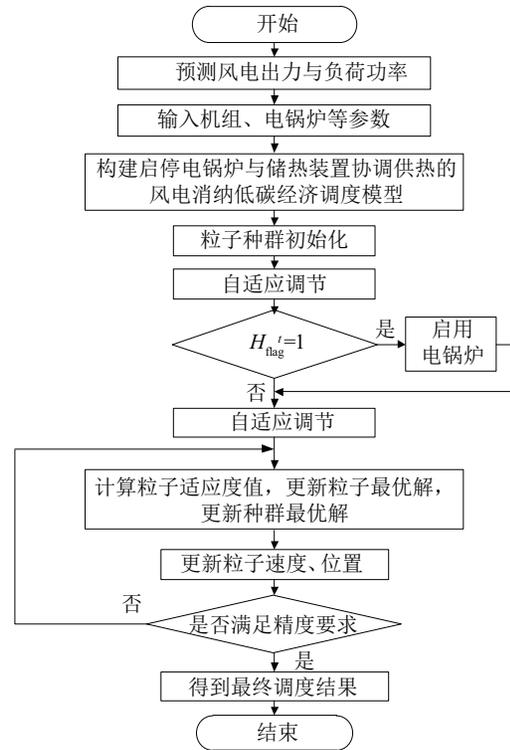


图3 改进粒子群自调节优化算法流程

Fig. 3 Algorithm flowchart of self-regulating improved particle swarm optimization

## 5 算例分析

### 5.1 算例数据

本文采用6机组系统进行仿真,4台抽汽式热电机组,2台火电机组,风电装机容量为300 MW。系统装机容量比例如表1所示,机组相关参数参考文献<sup>[13]</sup>,储

热装置储热容量为 500 MWh,最大储放热量为 60 MW,电锅炉最大供热功率 60 MW,电锅炉电热转换系数  $\varphi$  为 0.95,  $\varepsilon$  取 15 元/t。算例以一天 24 h 为一个调度周期,单位调度时长为 1 h,系统全天热负荷保持不变,设为 1000 MW。系统风电预测功率以及负荷水平分别如图 4 和图 5 所示。算法相关参数设置为:粒子规模  $n=30$ ,  $\omega_{\max}=0.9$ ,  $\omega_{\min}=0.4$ ,  $c_1=c_{12}=0.2$ ,粒子移动速度  $v=1$ ,最大迭代次数 200,最终精度  $\sigma=10^{-4}$ 。

表 1 电网装机容量

Table 1 Installed capacities of power grid

机组类型	装机容量/MW	所占比例/%
火电机组	2×300	26
热电机组	4×350	61
风电机组	300	13

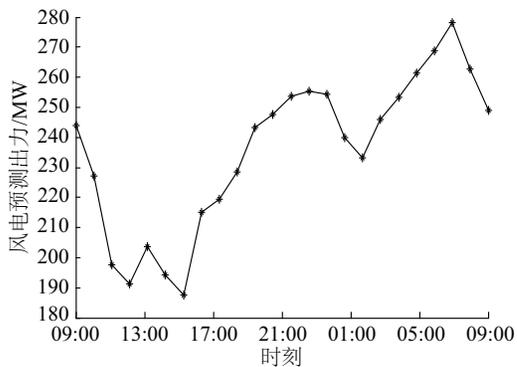


图 4 风电预测结果

Fig. 4 Wind power forecast result

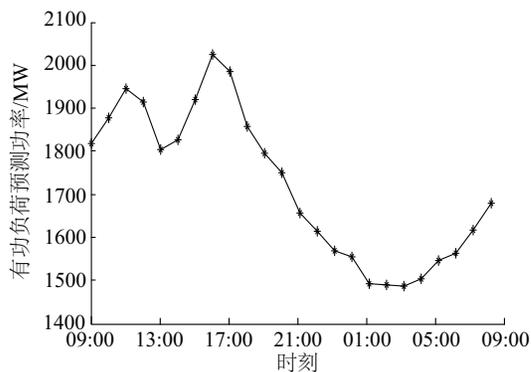


图 5 有功负荷预测结果

Fig. 5 Active load forecast result

算例分别采用以下 4 种供热方式进行仿真,分析风电消纳作用以及系统经济环境性能:方式 1,储热装置与电锅炉均不供热;方式 2,仅由储热装置供热;方式 3,电锅炉与储热装置独立供热;方式 4,电锅炉与储热装

置协调供热。

## 5.2 算例结果及分析

### 5.2.1 风电消纳情况分析

图 6 所示为 4 种方式的风电消纳效果的对比。由图 6 可知,方式 1 在负荷低谷时段(22:00~次日 06:00)弃风量达到 628 MWh。方式 2 热电机组仅配置了储热装置,弃风量为 230 MWh,弃风情况大大缓解。方式 3 电锅炉与储热装置供热,弃风量仅有 95 MWh。方式 4 通过启停电锅炉与储热装置协调供热,实现对弃风量完全消纳。4 种供热方式下风电消纳情况的对比可表明,通过加装储热装置能在一定程度上打破“以热定电”的刚性约束,但是受储热装置储/放热容量、输送损耗等影响,其供热能力不足以消纳全部弃风。然而,电锅炉与储热装置独立供热,由于两者缺少一定的协调性,也会出现少量的弃风。

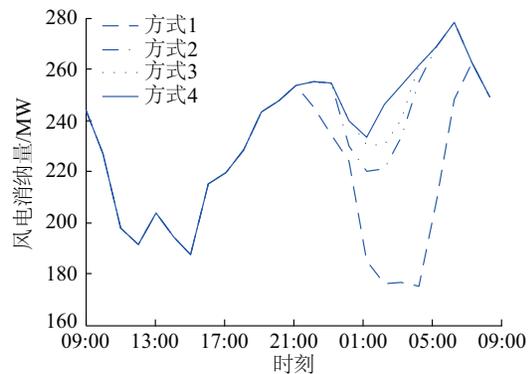


图 6 风电消纳效果对比

Fig. 6 Comparison of wind power accommodation

### 5.2.2 储热装置储放热情况分析

图 7 为方式 2~方式 4 储热装置储放热对比。3 种方式储热容量分别达到 467、385 和 420 MWh。由图 7 可见,储热装置在非弃风时段储热,弃风时段放热。方式 2

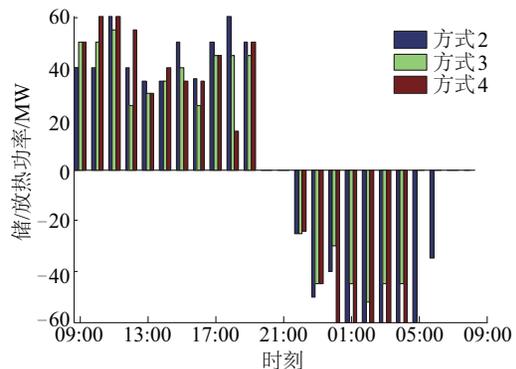


图 7 储热装置储放热情况

Fig. 7 Heat storage condition of heat accumulator

在 01:00~04:00 时段储热装置放热功率达到 60 MW, 受最大放热功率限制, 机组出力下调不足, 容易出现弃风。方式 3 和方式 4, 相比方式 2 储热容量少, 原因是启用电锅炉对系统供热。方式 4 相比方式 3 储热容量多, 原因是电锅炉加了启停策略, 开启电锅炉时段缩小了, 且电锅炉电功率较小。

### 5.2.3 电锅炉供热出力情况分析

由图 8 可知, 在弃风期间, 方式 3 与方式 4 电锅炉热出力分别是 220 和 120 MWh, 电锅炉承担了一部分热负荷, 拓展风电并网的空间。方式 4 在弃风时段, 电锅炉最小启动电功率为 33.7 MW, 并以最小启动电功率开始运行时, 能够实现风电的完全消纳。

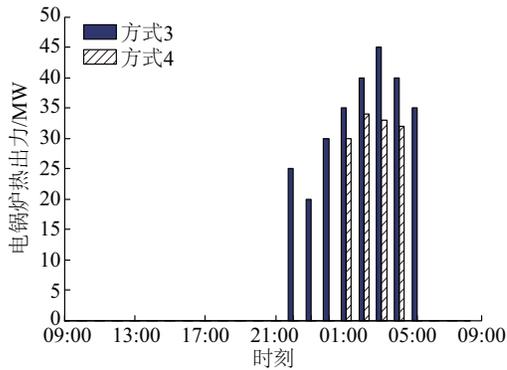


图 8 电锅炉热出力

Fig. 8 Electric boiler heat output

### 5.2.4 热电机组供电出力情况分析

不同方式下热电机组供电出力对比效果如图 9 所示, 方式 1 在弃风阶段(22:00~次日 06:00)无储热装置, 热电机组提供的最小发电出力维持 800 MW。方式 2, 热电机组加装储热装置后, 由于储热装置解耦热电耦合约束, 热电机组供电出力在弃风时段大幅度下调。方式 3 和方式 4 在启用电锅炉在供热的时候, 承担了一部分风电的消纳。方式 4 在弃风时段, 电锅炉与储热装置协调供热, 相比方式 2, 热电机组调峰能力提高。

### 5.2.5 4 种运行方式低碳经济调度比较

4 种运行方式调度结果如表 2 所示, 当储热装置无法完全消纳风电时, 采用启停电锅炉与储热装置协调供热方式, 系统经济环境成本达到最小值为 1011.21 万元, 且完全消纳风电, 碳排放成本最低。方式 3 相比于方式 2, 其煤耗成本和碳排放成本提高, 原因为方式 3 采用电锅炉与储热装置单独供热消纳了一定的弃风, 但是电锅炉与储热装置缺少协调性, 造成电锅炉开启时段较长, 电锅炉电功率偏高, 耗能较多。当采用方式 4 时, 电锅炉处于最佳运行状态, 弃风电量能够完

全被消纳, 系统实现经济环境成本最优。

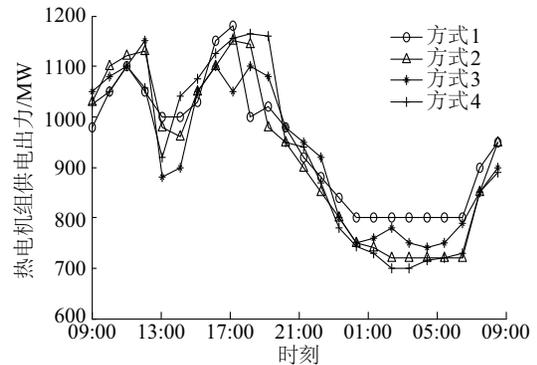


图 9 热电机组供电出力对比

Fig. 9 Electric power of cogeneration unit

表 2 调度结果比较

Table 2 Comparison of dispatch results

方式	煤耗成本/ 万元	碳排放量/ t	碳排放 成本/万元	经济环境 成本/万元
1	969.45	50413.33	75.62	1045.07
2	956.32	45946.67	68.92	1025.24
3	963.54	46946.67	70.42	1033.96
4	950.23	40653.33	60.98	1011.21

## 6 结论

针对“三北地区”冬季夜间弃风问题, 研究了基于启停电锅炉与储热装置协调供热的消纳风电低碳经济调度模型, 通过算例比较了 4 种不同供热方式下调度结果, 得到以下结论:

1) 通过加装储热装置能够在一定的程度上打破以热定电的刚性约束, 降低热电机组强迫出力, 提高了热电机组的调峰能力, 促进风电消纳, 系统经济环境成本比不加储热装置将减少了 1.9%。

2) 仅配置储热装置供热, 比配置储热装置与电锅炉独立供热, 经济环境成本减少 0.84%。

3) 采用启停电锅炉与储热装置协调供热方式, 当电锅炉电功率以最小启动电功率开始运行时, 可实现系统经济环境成本最优。

### [参考文献]

- [1] 国家能源局. 国家能源局关于做好 2016 年度风电消纳工作有关要求的通知 [EB/OL]. (2016-03-11). [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201603/t20160317\\_2208.html](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201603/t20160317_2208.html). National Energy Administration. Notice of the national energy administration on 2016 wind power consumption

- work related requirements [EB/OL]. (2016- 03- 11). [http://zfxgk.nea.gov.cn / auto87 / 201603 / t20160317\\_2208.html](http://zfxgk.nea.gov.cn / auto87 / 201603 / t20160317_2208.html).
- [2] 龚道仁, 陈迪, 袁志钟. 光伏发电系统碳排放计算模型及应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(9): 1-4.  
GONG D R, CHEN D, YUAN Z Z. Mathematics calculation model and application of CO<sub>2</sub> emission of photovoltaic(PV) power generation system[J]. Renewable energy resources, 2013, 31(9): 1-4.
- [3] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.  
XU F, MIN Y, CHEN L, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [4] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.  
CHEN L, XU F, WANG X, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [5] STRECKIENE G, MARTINAITIS V, ANDERSEN A N, et al. Feasibility of CHP-plants with thermal stores in the German spot market[J]. Applied energy, 2009, 86(11): 2308-2316.
- [6] 李群英, 冯利民, 许宇辉, 等. 基于水源热泵技术的风电消纳模式[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 25-27.  
LI Q Y, FENG L M, XU Y H, et al. Accommodation mode of wind power based on water source heat pump technology[J]. Automation of electric power systems, 2012, 36(17): 25-27.
- [7] 龙虹毓, 徐瑞林, 何国军, 等. 基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 30-34.  
LONG H Y, XU R L, HE G J, et al. Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. Electric power automation equipment, 2013, 33(4): 30-34.
- [8] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.  
LYU Q, JIANG H, CHEN T Y, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [9] NUYTTEN T, CLAESSENS B, PAREDIS K, et al. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating [J]. Applied energy, 2013, 104: 583-591.
- [10] LI Z G, WU W C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE transactions on sustainable energy, 2016, 7(1): 12-22.
- [11] LI J H, FANG J K, ZENG Q, et al. Optimal operation of the integrated electrical and heating systems to accommodate the intermittent renewable sources [J]. Applied energy, 2016, 167: 244-254.
- [12] 邓佳乐, 胡林献, 李佳佳. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41-47.  
DENG J L, HU L X, LI J J. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network [J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(18): 41-47.
- [13] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41-51.  
LU Z G, SUI Y S, FENG T, et al. Wind power accommodation low-carbon economic dispatch considering heat accumulator and carbon capture devices [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 41-51.
- [14] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.  
GU Z P, KANG C Q, CHEN X Y, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [15] 张雪雯, 李艳君. 基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 8-13.  
ZHANG X W, LI Y J. Self-adjusted particle swarm optimization algorithm based economic load dispatch of power system [J]. Power system technology, 2006, 30(18): 8-13.

## WIND POWER ACCOMMODATION LOW-CARBON ECONOMIC DISPATCH BASED ON COORDINATION BETWEEN AUTOMATIC START-STOP ELECTRIC BOILER AND HEAT ACCUMULATOR

Yang Qiuxia, Zhi Cheng, Yuan Dongmei, Yang Haihua

(*College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

**Abstract:** In order to decouple thermoelectric coupling constraints of cogeneration units in cogeneration plants, improve the capacity of wind power consumption, and reduce the carbon emission cost, the coordinated heating supply strategy of start-stop electric boiler and heat accumulator is studied in this paper. Wind power accommodation low-carbon economic dispatch based on coordination between automatic start-stop electric boiler and heat accumulator heating supply model is established. This model aims at minimizing the economic and environmental cost, introducing carbon emission cost parameter and considering the thermoelectric coupling of cogeneration units, the heat and electric power balance, the units ramp rate, etc. The wind power accommodation, the cost of coal consumption and carbon emission cost in four different ways of heating supply are analyzed. The effectiveness and validity of the proposed model are verified by the results of the numerical examples.

**Keywords:** cost benefit analysis; cogeneration plants; wind power; heat accumulator; electric boiler