

# 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析

邓佳乐<sup>1</sup>, 胡林猷<sup>1</sup>, 李佳佳<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150001;

2. 梅特勒-托利多测量技术有限公司, 江苏省常州市 213025)

**摘要:** 针对中国西北、华北、东北(简称“三北”)地区冬季供暖期弃风现象日益严重的问题,在研究电负荷特性、热负荷特性与风电场出力特性相关性基础上,结合电网调峰、热网调峰特点,提出二级热网配置电锅炉进行日调峰的消纳弃风方案。分析了方案的消纳弃风机理,研究了调峰电锅炉的启停控制策略,构建了基于二级热网电锅炉调峰的电热联合系统优化调度模型,并分析了方案的经济性。研究表明,该方案能在降低热电机组热负荷峰值、“以热定电”必发电功率的同时增加电网负荷谷值,从而为风电上网留出更大空间,提升风电消纳率,且能为整个电热联合系统带来经济收益。

**关键词:** 消纳弃风机理; 二级热网; 调峰电锅炉; 启停控制策略; 经济性分析

## 0 引言

在中国的西北、东北、华北(简称“三北”)地区,冬季供暖普遍采用以热电联产为主的集中供热方式,热电联产机组在该地区占有相当大的比例<sup>[1-2]</sup>。由于热负荷与电负荷有着相反的峰谷特性,且热电机组有“以热定电”的工况约束,导致供热高峰期热电机组必发电功率较大,使得一些火电机组不得不进行深度调峰或直接停机,电力系统调峰非常困难<sup>[3-4]</sup>。近年来,具有反调峰特性的风电大规模并网进一步加剧了调峰难度,致使“三北”地区弃风时常发生,其中,吉林、内蒙古、甘肃等地是弃风最为集中的区域,最高弃风率均在20%以上<sup>[5]</sup>。

大量研究表明,解耦热电机组部分热电耦合能够有效提高电热联合系统的调峰能力及风电消纳率<sup>[6]</sup>。目前,热电机组的热电解耦方案主要分为两类:一类是通过平移热负荷来降低热电机组夜间热负荷,从而降低其“以热定电”的必发电功率<sup>[7-10]</sup>;另一类是通过电热负荷转换来实现削热负荷峰、填电负荷谷的效果<sup>[11-16]</sup>。文献<sup>[10]</sup>研究了热电机组利用储热消纳风电的机理,验证了在热电厂配置储热的可行性,但该方案需要在热负荷低谷时段对蓄热器蓄热,在调度过程中引入了时间耦合,增加了优化难度。文献<sup>[11]</sup>通过空调热泵改变电热负荷的比例,实现了对风电机组和热电机组的节能调度,但该方

案基于智能电网技术及需求侧管理,需新建远程控制系统。文献<sup>[12]</sup>研究了热电机组热电耦合的机理,提出热电厂通过配置电锅炉来解耦其“以热定电”约束的方案,该方案能为风电上网提供更多空间,有效提高风电消纳率。文献<sup>[13]</sup>研究了风电供热原理及运行特点,验证了风电供热有利于提高低谷风电消纳能力,但该方案需配置储热系统,且纯用电能供暖不经济。

热网调峰问题一直是供热领域的研究热点,调峰方式主要分为集中式和分布式两种。基本热源一般选择大型热电厂,调峰热源则可选择在一级热网设置集中燃煤锅炉(集中式调峰)或二级热网设置燃气锅炉(分布式调峰),运行方式上采用阶段性调峰,即采暖初期、末寒期由基本热源承担全部热负荷,严寒期才投入调峰热源<sup>[17]</sup>。研究表明,采用分布式调峰供热方式可以降低一级热网的设计容量,减小远距离传输热损失,更具有灵活性与经济性<sup>[18-19]</sup>。文献<sup>[20]</sup>提出了在二级热网中配置电锅炉作为热网日调峰热源的方案,并通过算例分析验证了该方案消纳弃风的可行性。在此基础上,本文进一步分析了方案的消纳弃风机理及其经济性,并优化了电锅炉启停控制策略。

## 1 方案及消纳弃风机理

### 1.1 电热负荷与风电出力特性相关性分析

一般来说,电网负荷高峰在白天,而夜晚处于低谷,与热网负荷、风电出力的峰谷特性正好相反,即热网负荷、风电出力与电网负荷的变化趋势成反向

特性,而热网负荷与风电出力的变化趋势则大致成同向特性。由于弃风现象主要发生在夜间风电大发、热负荷高峰、电负荷低谷期间,如果此时能将风电转换成热网调峰热源,则既能提升风电消纳率,又能降低热电机组的供热峰值和“以热定电”必发电功率,提高电网调峰能力。

### 1.2 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案

基于以上相关性分析,本文提出在二级热网中配置电锅炉进行日调峰的消纳弃风方案。二级热网配置调峰电锅炉后,其供热系统结构如图1所示。

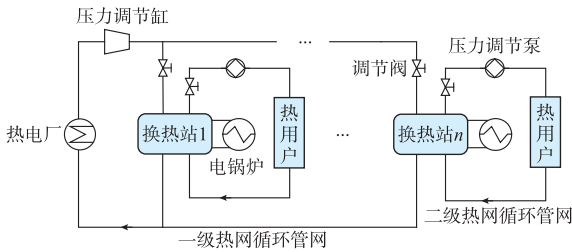


图1 二级热网配置调峰电锅炉供热系统  
Fig.1 Heating system with peak-shaving electric boiler at the secondary heat supply network

电锅炉装设在各个换热站处,开启时通过换热站接入二级热网,与热电厂一起共同对热用户进行供热,此时,热电厂作为主热源(基本热源),承担基础热负荷;电锅炉作为调峰热源,在热负荷高峰时承担各供热区域高峰热负荷。电锅炉启动后,相当于增加了电网电负荷,减小了热电机组热负荷和“以热定电”必发电功率,从而提高了热电机组的调峰能力,为风电等清洁能源的上网留出了更多的空间。

基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案与其他热电解耦方案相比,具有如下优点:①二级热网数量多,调峰电锅炉的容量相对较小,容易实施;②调峰电锅炉分散布置在各二级网,离热负荷中心近,热损失小;③调峰电锅炉可调性好,可随时启停和调节供热量,能够很好地适应热负荷波动。

### 1.3 消纳弃风机理

在电热联合系统中,热电机组的热电耦合使得电与热的调度密不可分。对于抽凝式热电机组,其电功率的上下限随着供热抽汽功率的变化而变化,当供热抽汽功率较大时,热电机组电功率的可调节范围大幅度减小,调峰能力急剧下降。抽凝式热电机组电功率上下限约束可由式(1)表示。

$$\begin{cases} P_{\max} = a_H + b_H D \\ P_{\min} = a_L + b_L D \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$ 分别为抽凝式热电机组电功率的上限和下限; $D$ 为供热抽汽速率; $a_H, b_H, a_L, b_L$ 为拟合系数。

“三北”地区热电、风电并存,且比例较大,弃风现象主要出现在冬季夜间,其弃风机理可用图2加以解释。

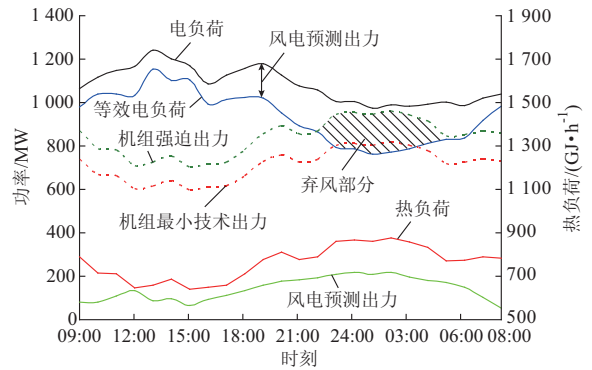


图2 冬季夜间弃风机理示意图  
Fig.2 Schematic diagram of wind power abandoned at night during winter

图2中,机组最小技术出力曲线是系统中热电机组与纯凝火电机组的最小技术出力之和,纯凝火电机组的最小技术出力是个常数,而热电机组的电出力下限则如式(1)所示随热负荷的变化而变化;热负荷高时增加,热负荷降低时减少。机组强迫出力曲线是在最小技术出力曲线基础上,预留8%~10%的机组旋转备用形成,决定了电网运行中所能承受的最小负荷,若负荷小于机组强迫出力,则一些机组不得被迫停机。图中夜间风电大发使电网等效负荷谷值进一步降低,而热网负荷峰值又使机组强迫出力增加,两者共同作用导致机组强迫出力高于电网等效负荷,为了避免纯凝火电机组停机,风电场不得不弃风。二级热网电锅炉调峰方案消纳弃风机理可由图3说明。

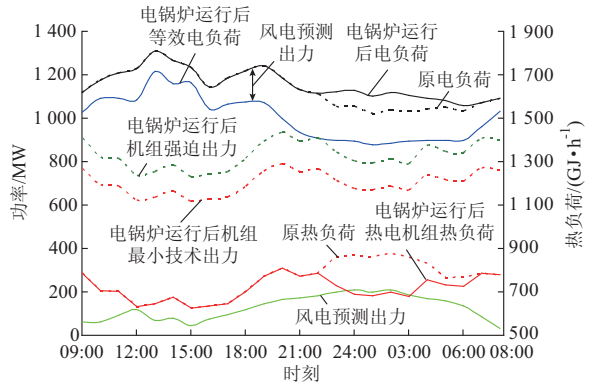


图3 消纳弃风机理示意图  
Fig.3 Schematic diagram of wind power accommodation

图3中,在热负荷高峰期间,调峰电锅炉启动,起到调峰热源的作用,替代了部分本应由热电机组承担的热负荷,使热电机组承担的高峰热负荷降低,

对应的机组强迫出力下降。与此同时,电网电负荷、等效电负荷增加,代表弃风量的等效电负荷曲线与机组强迫出力曲线合围区域减少甚至消失,从而达到了消纳弃风的目的。

## 2 调峰电锅炉启停策略

在二级热网中装设调峰电锅炉是为了在热负荷高峰、电负荷低谷阶段削热电机组热负荷的峰,填电负荷的谷,从而降低热电机组部分“以热定电”必发电功率,提高电网调峰能力和风电消纳能力。因此,电锅炉应该仅在热负荷高峰时启动,承担热网的调峰任务。调峰电锅炉的主要启停策略如下。

策略1:阈值启停<sup>[20]</sup>。先确定各二级热网的基本热负荷,即启停阈值。当热负荷高于阈值时,启动电锅炉调峰,即超出启停阈值部分的热负荷全部由电锅炉承担;当热负荷低于对应阈值时,则关闭电锅炉,全部热负荷由热电厂承担。调峰电锅炉输出为:

$$Q_e = 3.6\eta P_e = \begin{cases} 0 & Q \leq Q_k \\ Q - Q_k & Q > Q_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Q$ 、 $Q_k$ 、 $Q_e$ 分别为二级热网热负荷、调峰电锅炉启停阈值和承担的热负荷; $P_e$ 为调峰电锅炉消耗的电功率; $\eta$ 为调峰电锅炉电热转换效率。

策略2:弃风启停。有弃风时开启调峰电锅炉,无弃风时则关闭调峰电锅炉。调度前先大致由式(3)确定各时段弃风标志。

$$f_t = \begin{cases} 1 & P_{\text{CHPF},t} + P_{\text{CONF}} > P_{\text{load},t} - P_{\text{WF},t} \\ 0 & P_{\text{CHPF},t} + P_{\text{CONF}} \leq P_{\text{load},t} - P_{\text{WF},t} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f_t$ 为 $t$ 时段的弃风标志(1为有弃风,0为无弃风); $P_{\text{CHPF},t}$ 为 $t$ 时段所有热电机组强迫出力之和(计算其出力下限时各机组平均分配热负荷); $P_{\text{CONF}}$ 为所有火电机组强迫出力之和(不考虑爬坡约束); $P_{\text{load},t}$ 为 $t$ 时段系统总电负荷; $P_{\text{WF},t}$ 为 $t$ 时段风电场预测出力。

阈值启停策略简单易行,只需要对所供热区域热负荷进行监测,就可以确定调峰电锅炉的运行状态及其出力大小,且其运行、管理与热网其他部分无关。调峰电锅炉出力在优化调度中无需作为单独的优化变量参与优化,可以大大降低优化问题的复杂程度。该策略中,降低阈值虽可提高风电消纳率,但也存在无弃风、热负荷较高时启动电锅炉调峰的问题,这显然并不经济,因为电锅炉制热过程需要消耗高品位电能,而产生的热能相对来说属于低品位能。用电能制热与直接煤炭燃烧制热相比,由于中间增加了多次能量转换,效率较低。

弃风启停策略则可以避免不必要的多次能量转换,只在热负荷较高且有弃风的时段才启动电锅炉

调峰,相当于通过电锅炉将风电转换成了热网调峰热源,提高了风电消纳率和电热联合系统运行经济性。但电锅炉的运行方式涉及电网与热网的联合调度,其最佳开启功率也需作为一个优化变量处理,运行、管理比较复杂。

## 3 优化调度模型及经济性分析

### 3.1 目标函数

为了鼓励风电上网,在调度模型中不计风力发电成本,以系统总煤耗量最小为目标函数:

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^{N_i} F_{\text{CHP},t,i,n} + \sum_{j=1}^S F_{\text{CON},t,j} \right) \Delta t \quad (4)$$

式中: $F$ 为系统总煤耗量; $F_{\text{CHP},t,i,n}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 座热电厂第 $n$ 台热电机组煤耗量; $F_{\text{CON},t,j}$ 为 $t$ 时段第 $j$ 台火电机组煤耗量; $T$ 为一个调度周期的总时段数; $\Delta t$ 为一个调度时段的时间间隔; $R$ 为热电厂总数; $N_i$ 为第 $i$ 座热电厂热电机组数量; $S$ 为火电机组总数。

纯凝火电机组耗量特性方程为:

$$F_{\text{CON}} = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \quad (5)$$

式中: $P$ 为发电功率; $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 为拟合系数。

单抽热电机组耗量特性方程为:

$$F_{\text{CHP}} = e_0 + e_1 P + e_2 D + e_3 P^2 + e_4 PD + e_5 D^2 \quad (6)$$

式中: $D$ 为供热抽汽量; $e_0 \sim e_5$ 为拟合系数。

### 3.2 约束条件

1) 供电平衡

$$\sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^{N_i} P_{\text{CHP},t,i,n} + \sum_{j=1}^S P_{\text{CON},t,j} + P_{\text{CW},t} = P_{\text{load},t} + \sum_{i=1}^R \sum_{l=1}^{L_i} P_{e,t,i,l} \quad (7)$$

式中: $P_{\text{CHP},t,i,n}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 座热电厂第 $n$ 台热电机组的电功率; $P_{\text{CON},t,j}$ 为 $t$ 时段第 $j$ 台火电机组电功率; $P_{\text{CW},t}$ 为 $t$ 时段风电场总上网功率; $P_{e,t,i,l}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 座热电厂所带第 $l$ 个换热站调峰电锅炉消耗的电功率; $L_i$ 为第 $i$ 座热电厂所带换热站总数。

2) 供热平衡

若不计供热系统一级网与二级网之间的换热损失,则供热系统按供热区域分别平衡<sup>[20]</sup>:

$$\sum_{n=1}^{N_i} Q_{\text{CHP},t,i,n} = \sum_{l=1}^{L_i} Q_{t,i,l} - \sum_{l=1}^{L_i} Q_{e,t,i,l} \quad (8)$$

式中: $Q_{t,i,l}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 座热电厂所带第 $l$ 个换热站(二级热网)热负荷; $Q_{e,t,i,l}$ 为 $t$ 时段第 $i$ 座热电厂所带第 $l$ 个换热站(二级热网)调峰电锅炉热功率;



$Q_{\text{CHP},t,i,n}$  为  $t$  时段第  $i$  座热电厂第  $n$  台热电机组供热功率,其表达式为

$$Q_{\text{CHP},t,i,n} = \frac{D_{t,i,n} \Delta H}{1\ 000} \quad (9)$$

$D_{t,i,n}$  为  $t$  时段第  $i$  座热电厂第  $n$  台供热机组的抽汽量;  $\Delta H$  为蒸汽焓降。

3) 机组出力约束

$$P_{\text{CON}}^{\min} \leq P_{\text{CON}} \leq P_{\text{CON}}^{\max} \quad (10)$$

$$D^{\min} \leq D \leq D^{\max} \quad (11)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\min}(D) \leq P_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHP}}^{\max}(D) \quad (12)$$

$$0 \leq P_{\text{CW}} \leq P_{\text{WF}} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{CON}}^{\max}$  和  $P_{\text{CON}}^{\min}$  分别为火电机组出力上限和下限;  $D^{\max}$  和  $D^{\min}$  分别为热电机组供热抽汽速率上限和下限;  $P_{\text{CHP}}^{\max}(D)$  和  $P_{\text{CHP}}^{\min}(D)$  分别为热电机组供热抽汽速率为  $D$  时其电出力上限和下限;  $P_{\text{WF}}$  为风电场预测功率。

4) 机组爬坡约束

$$-r_{\text{CON}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CON},t} - P_{\text{CON},t-1} \leq r_{\text{CON}}^{\text{up}} \Delta t \quad (14)$$

$$-r_{\text{CHP}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CHP},t} - P_{\text{CHP},t-1} \leq r_{\text{CHP}}^{\text{up}} \Delta t \quad (15)$$

式中:  $r_{\text{CON}}^{\text{up}}$  和  $r_{\text{CON}}^{\text{down}}$  分别为火电机组的爬坡和滑坡速率;  $r_{\text{CHP}}^{\text{up}}$  和  $r_{\text{CHP}}^{\text{down}}$  分别为热电机组的爬坡和滑坡约束。

5) 电锅炉出力约束

$$P_e^{\min} \leq P_e \leq P_e^{\max} \quad (16)$$

式中:  $P_e^{\max}$  和  $P_e^{\min}$  分别为电锅炉电功率上限和下限。

3.3 方案经济性分析

本文方案需要增设调峰电锅炉,其经济可行性取决于运行费用与节煤效益的大小。

运行费用主要包括电锅炉初期投资折旧、运行成本和维护成本。其中,初期投资折旧为:

$$M_{\text{year}} = \frac{I(1+I)^n}{(1+I)^n - 1} M_{\text{init}} \quad (17)$$

式中:  $M_{\text{year}}$  为电锅炉每年的折旧费用;  $I$  为贷款利率;  $n$  为使用年限;  $M_{\text{init}}$  为电锅炉初期投资,可表示为

$$M_{\text{init}} = C_E \sum_{i=1}^R \sum_{l=1}^{L_i} V_{E,i,l} \quad (18)$$

$C_E$  为电锅炉单位容量建设成本;  $V_{E,i,l}$  为第  $i$  座热电厂所带第  $l$  个换热站配置电锅炉容量。

电锅炉的运行成本主要是用电费用,将电热联合系统作为整体分析时,用电增加的成本已经反映在整个系统的煤耗中,故无需单独计算。

电锅炉的维护成本  $C_0$  可表示为:

$$C_0 = \beta M_{\text{init}} \quad (19)$$

式中:  $\beta$  为维护费用比率。

若考虑电锅炉的年利用天数为  $K$ ,则电锅炉折算到一日的总费用  $M_{\text{day}}$  为:

$$M_{\text{day}} = \frac{M_{\text{year}} + C_0}{K} \quad (20)$$

配置电锅炉后,电热联合系统对外的电能和热能销售量并没有改变,而该方案通过消纳弃风可以降低总煤耗量。因此,本文方案的系统新增利润  $\Delta P_{\text{system}}$  为:

$$\Delta P_{\text{system}} = C_C \Delta F - M_{\text{day}} \quad (21)$$

式中:  $C_C$  为标煤价格;  $\Delta F$  为系统的日节煤量。

4 算例分析

4.1 原始数据

本算例包含 2 座热电厂、1 座火电厂、1 个风电场。其中热电厂 1 有 2 台抽凝式热电机组,编号 c1 和 c2,带 3 个换热站,编号 h1, h2, h3; 热电厂 2 有 4 台抽凝式热电机组,编号 c3~c6,带 3 个换热站,编号 h4, h5, h6。每个换热站中配置 1 台调峰电锅炉。火电厂中有 4 台纯凝火电机组,编号 c7~c10,风电场装机容量 220 MW。热电机组的耗量特性拟合系数见附录 A 表 A1,火电机组的耗量特性拟合系数见附录 A 表 A2,各机组的运行参数见附录 A 表 A3,各调峰电锅炉容量见附录 A 表 A4。调度周期为 1 d,取每 1 h 为一个调度时段,共 24 个调度时段,其典型的热负荷、电负荷、风电预测出力见附录 A 表 A5。电锅炉的转换效率取 0.95,各热网焓降取 2 327.53 kJ/kg。

4.2 调度结果分析

本文采用粒子群优化算法求解优化调度模型。为研究二级热网配置电锅炉后对电热联合系统调度的改善情况,本文对比分析了含电锅炉和不含电锅炉两种情况下的调度结果。图 4 所示为装设电锅炉前后系统等效电负荷对比曲线,图 5 所示为装设电锅炉前后热电厂 2 供热区域等效热负荷对比曲线。

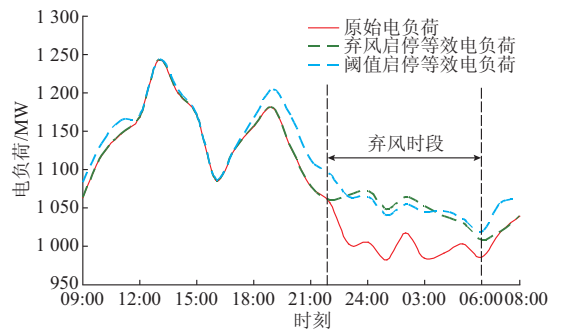


图 4 等效电负荷对比曲线  
Fig.4 Contrast curves of equivalent electric load

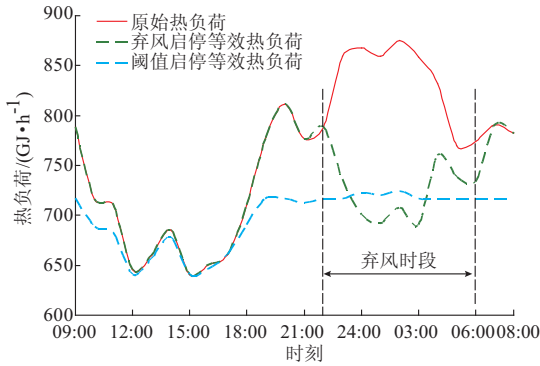


图5 等效热负荷对比曲线  
Fig.5 Contrast curves of equivalent thermal load

由图4和图5可以看出,电锅炉运行后,在热负荷高峰、电负荷低谷时段确实能将部分热负荷转换为电负荷,不仅起到了调峰热源的作用,还相应增加了低谷电负荷,有效降低了电网负荷、热电机组热负荷的峰谷差。对比两种不同的启停方式可以发现,阈值启停策略完全根据热负荷的大小来调节电锅炉的开启功率,即使在非弃风时段,热负荷较高时电锅炉也会开启;而弃风启停策略下,电锅炉只在弃风时段且热负荷较高时适当开启。

图6所示为装设电锅炉前后风电上网功率对比曲线。

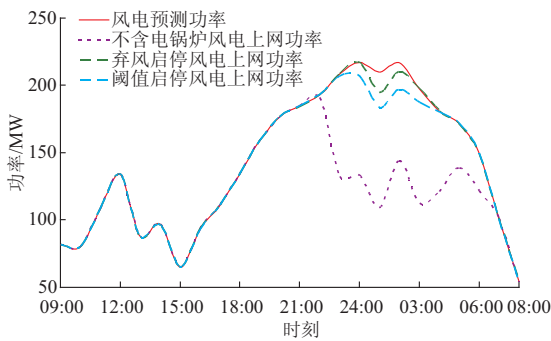


图6 风电上网功率对比曲线  
Fig.6 Contrast curves of wind power accommodation

由图6可以看出,没有装设电锅炉情况下,01:00—06:00和22:00—24:00期间存在大量弃风,而装设电锅炉后,两种启停方式下消纳弃风效果都非常明显,风电上网功率曲线与风电预测功率曲线基本重合,达到了最大程度消纳弃风的效果,证明了二级热网装设调峰电锅炉消纳弃风方案的可行性。

表1展示了电锅炉不同运行方式下调度结果的数据对比。

由表1可以看出,二级热网配置调峰电锅炉可以有效地提升风电消纳率、降低整个系统的煤耗量,且弃风启停控制策略优于阈值启停控制策略,与前

文分析结果一致。

表1 不同运行方式下的结果对比  
Table 1 Contrasting result of different operating modes

运行方式	煤耗量/t	弃风量/(MW·h)	风电消纳率/%
不含电锅炉	12 756.59	582.24	82.93
含电 阈值启停	12 698.81	70.51	97.93
锅炉 弃风启停	12 568.28	24.54	99.28

### 4.3 经济性分析

若电锅炉单位容量建设成本取100万元/MW,维护费用比率为1%,使用年限为20年,贷款利率取6%,年利用天数取180d,标煤价格取750元/t。则由式(17)至式(21)计算可得:当调峰电锅炉采用阈值启停控制策略时,系统日新增利润为0.2万元;采用弃风启停控制策略时,系统日新增利润为10.0万元。由此可见,二级热网配置电锅炉调峰消纳弃风方案具有较好的经济收益,且调峰电锅炉采用弃风启停控制策略相比于阈值启停控制策略的节煤量更大,经济效益更好。

## 5 结论

1)在换热站二级网侧装设电锅炉进行热网日调峰,可以通过电热负荷的转换,在供暖期热负荷高峰、电负荷低谷时段降低热电机组热负荷、增加电负荷,从而降低热电机组“以热定电”发电功率,为风电留出更多上网空间,提升风电消纳率和系统调峰能力。

2)调峰电锅炉弃风启停控制策略仅在弃风时段开启电锅炉,避免了不经济的电热转换,在弃风消纳量、节煤量等方面都要优于阈值启停控制策略。

3)二级热网电锅炉调峰消纳弃风方案可以降低系统煤耗量,为整个电热联合系统带来一定的经济收益,具有经济可行性。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

[1] 严旭,吴锴,周孟戈,等.基于不同可调度热源的风电出力平滑模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(21):122-128.  
YAN Xu, WU Kai, ZHOU Mengge, et al. Model of smoothing wind power based on various dispatchable heat sources[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 122-128.

[2] 黄大为,郭君宜.热电联产机组参与系统调峰的调度策略[J].电力系统及其自动化学报,2014,26(3):35-39.  
HUANG Dawei, GUO Junyi. Peak-load regulation strategy of power grid with cogeneration units[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(3): 35-39.

[3] 王晓海,乔颖,鲁宗相,等.供暖季风电电量消纳能力的评估新方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2112-2119.

- WANG Xiaohai, QIAO Ying, LU Zongxiang, et al. A novel method to assess wind energy usage in the heat-supplied season [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2112-2119.
- [4] 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 Zepeng, KANG Chongqing, CHEN Xinyu, 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.
- [5] 王赵宾.中国弃风电报告[J].能源,2014(7):42-48.
- WANG Zhaobin. Wind power abandoned rationing report of China[J]. Energy, 2014(7): 42-48.
- [6] 吕泉,李玲,朱全胜,等.三种弃风消纳方案的节煤效果与国民经济性比较[J].电力系统自动化,2015,39(7):75-83. DOI: 10.7500/AEPS20140125001.
- LYU Quan, LI Ling, ZHU Quansheng, et al. Comparison of coal-saving effect and national economic indices of three feasible curtailed wind power accommodating strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 75-83. DOI: 10.7500/AEPS20140125001.
- [7] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.配置储热后热电机组调峰能力分析[J].电力系统自动化,2014,38(11):34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
- LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41. DOI: 10.7500/AEPS20130724002.
- [8] 吕泉,王海霞,陈天佑,等.考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):23-29. DOI: 10.7500/AEPS20140829001.
- LYU Quan, WANG Haixia, CHEN Tianyou, et al. Operation strategies of heat accumulator in combined heat and power plant with uncertain wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 23-29. DOI: 10.7500/AEPS20140829001.
- [9] 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 Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [10] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.含储热的电力系统电热综合调度模型[J].电力自动化设备,2014,34(5):79-85.
- LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Combined heat and power dispatch model for power system with heat accumulator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 79-85.
- [11] 龙虹毓,马建伟,吴锴,等.含热电联产和风电机组的电网节能调度[J].电力自动化设备,2011,31(11):18-22.
- LONG Hongyu, MA Jianwei, WU Kai, et al. Energy conservation dispatch of power grid with mass cogeneration and wind turbines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18-22.
- [12] 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. DOI: 10.7500/AEPS201206124.
- LYU Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, 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. DOI: 10.7500/AEPS201206124.
- [13] 王彩霞,李琼慧,谢国辉.风电供热提高低谷风电消纳能力评估[J].中国电力,2013,46(12):100-106.
- WANG Caixia, LI Qionghui, XIE Guohui. Evaluation of wind power heating in facilitating wind power integration capability during valley load period[J]. Electric Power, 2013, 46(12): 100-106.
- [14] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等.基于热风电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 Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. SHAPF model based on LADRC and its current tracking control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4): 30-34.
- [15] 龙虹毓,何国军,徐瑞林,等.计及分布式电源热泵的热电联产协调优化调度与能效分析[J].电力系统自动化,2013,37(14):38-42.
- LONG Hongyu, HE Guojun, XU Ruilin, et al. Cogeneration coordination optimal dispatch and energy efficiency analysis containing distributed electric heat pumps[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 38-42.
- [16] 郭宇航,胡博,万凌云,等.含热泵的热电联产型微电网短期最优经济运行[J].电力系统自动化,2015,39(14):16-22. DOI: 10.7500/AEPS20141127011.
- GUO Yuhang, HU Bo, WAN Lingyun, et al. Optimal economic short-term scheduling of CHP microgrid incorporating heat pump [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 16-22. DOI: 10.7500/AEPS20141127011.
- [17] 王海超.多热源联合供热系统调峰方式及综合优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [18] 张群力,狄洪发.集中供热系统不同供热调峰方式的技术经济性分析[J].建筑科学,2012,28(8):46-49.
- ZHANG Qunli, DI Hongfa. Technical and economic analysis on different peak heating load regulation methods for district heating system[J]. Building Science, 2012, 28(8): 46-49.
- [19] 曲世俊,朱宴琳,郑雪晶,等.供热二级网侧设置燃气调峰锅炉的探讨及节能分析[J].暖通空调,2007,37(1):48-51.
- QU Shijun, ZHU Yanlin, ZHENG Xuejing, et al. Discussion and energy efficiency analysis of installing peak-shaving gas boilers in secondary heat supply network side[J]. HV&AC, 2007, 37(1): 48-51.
- [20] 李佳佳,胡林献.基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J].电网技术,2015,39(11):3286-3291.
- LI Jiajia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3286-3291.

系统优化调度。E-mail: jiale\_deng@163.com

胡林献(1966—),男,通信作者,博士,教授,研究方向:

高压直流输电系统运行与控制、电力系统稳定性分析与控制、发电厂过程自动化。E-mail: linxian\_hu@163.com

李佳佳(1990—),女,助理工程师,主要研究方向:电力

系统优化调度。

(编辑 章黎)

## 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

DENG Jiale<sup>1</sup>, HU Linxian<sup>1</sup>, LI Jiajia<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Mettler-Toledo Measurement Technology Ltd., Changzhou 213025, China)

**Abstract:** Confronted by the ever-deteriorating problem of wind power abandoning during winter heat supply period in Northeast, North, and Northwest China, the solution of wind power accommodation by installing an electric boiler in the secondary heat supply network for daily peak-load regulation is proposed by referring to the characteristics of peak-load regulation of power grid and heat supply network following a study of the characteristics of electrical load, thermal load and wind power output. The mechanism of the scheme to improve wind power accommodation is analyzed as is the start-stop operation strategy for the peak-shaving electric boiler. An energy-saving model for the joint heat and power system based on the electric boiler for peak-load regulation at the secondary heat supply network is developed with the economic operation taken into account. The simulation result shows that this plan can reduce heat load peak value and forced power output determined by the heat of cogeneration units while increasing the valley value of electrical load. In this way, more reserve of power grid is left to enhance wind power accommodation for even greater economic benefits of the whole system.

This work is supported by National Key Technologies R&D Program (No. 2015BAA01B00).

**Key words:** mechanism of curtailed wind power accommodation; secondary heat supply network; peak-shaving electric boiler; start-stop operation strategy; economic operation analysis