

基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型

郭丰慧, 胡林猷, 周升或

(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)

摘要: 针对“三北”地区冬季供暖期弃风严重问题,在二级热网配置调峰电锅炉日调峰方案的基础上,探讨应用储热式电锅炉来进一步消纳弃风。在计及热网延时与衰减特性基础上,分析了储热式电锅炉的消纳弃风机理,提出了储热式电锅炉的电热转换启动条件,构建了储热式电锅炉的数学模型以及基于二级热网储热式电锅炉日调峰的热电联合系统调度模型。对比分析了储热式电锅炉配置方式、储热容量、风电渗透率对弃风率的影响。算例分析表明,在二级热网中配置储热式电锅炉可进一步消纳弃风且效果更好。电锅炉的储热容量越大,弃风率越低。

关键词: 电热联合系统; 储热式电锅炉; 调度模型; 热网特性; 弃风率

0 引言

随着风电装机容量的增多,“三北”地区的弃风现象也更加严重^[1-2]。2015 年第一季度,全国风电弃风电量 $1.074\ 3 \times 10^{10}$ kW·h,平均弃风率为 18.6%,超过最严重的 2012 年的 17.12% 平均弃风率^[3]。弃风问题使得大量风电机组在风力大发时闲置,造成了风力资源的浪费,严重影响了风力发电企业的经济效益。

为提高风电消纳率,需解决热电耦合问题。目前,关于研究热电机组解耦的方案包括利用电锅炉将电热负荷转换^[4-6],配置储热装置平移热负荷^[7-14],利用建筑物与热网热动态特性提高机组调峰能力^[15]。文献[4]提出在热电厂配置电锅炉解耦其“以热定电”约束,进而降低强迫出力消纳弃风的方案。文献[5-6]提出了二级热网配置电锅炉日调峰的消纳弃风方案,验证了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,且具有经济可行性。文献[7-10]提出在热电厂配置储热装置消纳弃风,文献[7]提出含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型。文献[8]提出了在大型抽汽式热电厂配置储热来提高机组调峰能力的消纳方案。但受储热装置容量限制,弃风消纳能力有限。文献[9]针对风电不确定性建立了基于多场景的含储热的电热综合调度模型来优化确定蓄热罐运行策略。文献[7-9]虽都为

消纳弃风建立了调度模型,但未将弃风与储热装置储放热状态联系起来,且未考虑储热容量对弃风率的影响。文献[11-12]提出热网结合电锅炉储热装置的优化策略。文献[14]对比了抽水蓄能、风电供热和储热这三种消纳弃风的经济效益和节煤效果,对比得出储热是三种方案中的最优方案。而文献[16]是对长时间周期和更大范围协调消纳,建立优化模型。文献[17]结合大用户直购电市场化改革方案,提出了激励电力用户参与风电消纳的日前市场模式。文献[18]建立了计及热网约束的电热能源集成系统运行优化模型,研究了电热协调运行方式对风电消纳的作用,但论文参照高压输电网建立了全热网环状模型,而实际热网结构却类似配电网。

本文在文献[5-6]方案基础上,探讨应用储热式电锅炉进一步消纳弃风的可能性。在计及热网延时、衰减特性基础上,首先从机理上分析了储热式电锅炉进一步消纳弃风的可行性,然后提出了储热式电锅炉的电热转换启动条件,构建了储热式电锅炉的数学模型以及基于二级热网储热式电锅炉日调峰的热电联合系统调度模型,最后通过算例对比分析了热源处集中配置与二级热网中配置储热式电锅炉,以及储热容量、风电渗透率对弃风率的影响,验证了二级热网中配置储热式电锅炉可进一步消纳弃风且效果更好。

1 储热式电锅炉调峰电热联合系统工作原理及消纳弃风机理

1.1 储热式电锅炉调峰电热联合系统工作原理

二级热网配置储热式电锅炉进行日调峰的电热

联合系统见附录 A 图 A1。电力系统与热力系统除了通过传统热电机耦合外,还通过储热式电锅炉耦合。

储热式电锅炉装在二级热网换热站,热用户的热负荷由热电厂和储热式电锅炉共同承担,热电厂主为热源,承担基础热负荷,储热式电锅炉为调峰热源。在冬季热负荷高峰期间,储热式电锅炉供热替代了部分本应由热电机承担的热负荷,起到调峰热源的作用,使热电机承担的高峰热负荷降低,对应的机组强迫出力下降。相反,在弃风时段,储热式电锅炉通过电热转化储存热能,增加了电网电负荷,可提升风电上网空间。

1.2 消纳弃风机理分析

二级热网加装电锅炉分布式调峰有利于消纳弃风,其机理见附录 A 图 A2^[19]。电负荷减去风电预测功率得到等效电负荷,纯凝火电机组的最小技术出力为常数,而热电机最小技术出力则与热负荷呈线性关系,机组强迫出力是在最小技术出力基础上预留 8%~10% 的机组旋转备用,若电网的等效电负荷小于机组强迫出力,则一些机组会被迫停机。夜间风电大发使电网等效负荷谷值降低,热负荷峰值使热电机强迫出力增加,导致机组强迫出力高于电网等效电负荷是产生弃风的主要原因^[6,19]。热网延时特性导致热电机供热功率曲线较热负荷曲线左移,二级热网配置电锅炉日调峰后,在热负荷高峰时期启动电锅炉就地供热,热电机的部分热负荷由电锅炉承担,且减少了热网损耗,降低了热电机的热负荷高峰,机组强迫出力也随之降低。另一方面,电热转换又增加了电网电负荷,等效电负荷也相应增加,为风电上网提供了更大空间。此方案可较大幅度提升风电消纳率,但在风电波动、电网峰谷差或热网峰荷较大时,仍然可能出现弃风现象。

储热式电锅炉除完成电、热负荷转换外,还有平移电、热负荷的功能。储热式电锅炉在弃风时段储热,电锅炉的开启增加了电负荷,这些电负荷转换成热负荷后,一部分直接放出,降低了热电机的供热功率,另一部分热则储存起来,在非弃风时段放出。

计及热网延时、衰减特性后,二级热网配置储热式电锅炉分布式调峰进一步消纳弃风的机理分析如图 1 所示。

2 储热式电锅炉数学模型及热网特性

2.1 储热式电锅炉数学模型

1) 储热式电锅炉消耗的电功率

$$P_e = (P_{in1} + P_{in2})f \quad (1)$$

式中: P_{in1} 为储热式电锅炉直供热部分的电功率;

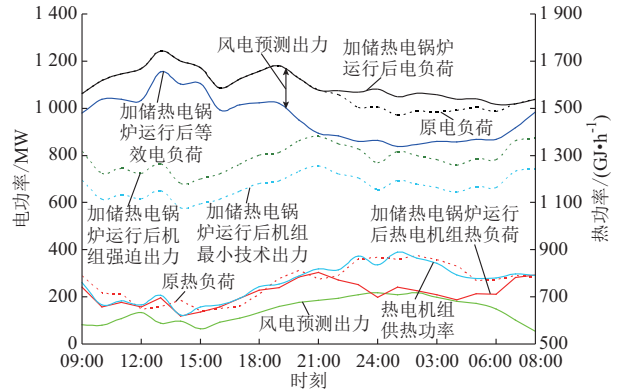


图 1 储热式电锅炉调峰的消纳弃风机理图

Fig.1 Wind power accommodation of heat storage electric boiler for peak-load regulation

P_{in2} 为储热式电锅炉储热部分的电功率; f 为弃风标志(1 表示有弃风,0 表示无弃风)。

2) 储热式电锅炉的供热功率

$$Q_e = Q_{out1}f + Q_{out2}(1-f) \quad (2)$$

$$Q_{out1} = 3.6\eta P_{in1} \quad (3)$$

$$Q_{in2} = 3.6\eta P_{in2} \quad (4)$$

式中: Q_{out1} 为储热式电锅炉的直供供热功率; Q_{out2} 为储热式电锅炉的储热装置放热功率; η 为电锅炉电热转换效率; Q_{in2} 为储热式电锅炉的储热装置储热功率。

3) 储热装置的储热量

$$E' = E'^{-1} + Q'_{in2}f - Q'_{out2}(1-f) \quad (5)$$

式中: E' 为 t 时段储热式电锅炉中储热装置的储热量; Q'_{in2} 和 Q'_{out2} 分别为 t 时段储热式电锅炉的储热装置储热和放热功率。

4) 储热式电锅炉的电热转换启动条件

本文采用弃风启停的控制策略,弃风启停控制策略主要依据弃风现象的有无来决定储热式电锅炉的调峰控制启停,有弃风时电锅炉可以进行电热转换,无弃风时电锅炉不进行电热转换。在调度之前,可根据负荷预测数据及机组参数大致判断各调度时段是否出现弃风现象,弃风标志表达式为^[19]:

$$f' = \begin{cases} 1 & P'_{CHPF} + P_{CONF} > P'_{load} - P'_{WF} \\ 0 & P'_{CHPF} + P_{CONF} \leq P'_{load} - P'_{WF} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f' 为 t 时段的弃风标志(1 表示有弃风,0 表示无弃风); P'_{CHPF} 为 t 时段所有热电机强迫出力之和(计算其出力下限时各机组平均分配热负荷); P_{CONF} 为所有火电机组强迫出力之和(不考虑爬坡约束); P'_{load} 为 t 时段系统总电负荷; P'_{WF} 为 t 时段风电场预测出力。

所有火电机组的强迫出力之和即为各火电机组输出电功率下限之和:

$$P_{CONF} = \sum P_{CONj}^{\min} \quad (7)$$

式中： $P_{\text{CON}j}^{\min}$ 为第 j 台纯凝火电机组电功率下限。

各热电机组强迫出力之和即为所有热电机组的强迫出力下限之和：

$$P_{\text{CHPF}} = \sum P_{\text{CHPi}}^{\min} \tag{8}$$

式中： $P_{\text{CHPi}}^{\min}$ 为第 i 台热电机组电功率下限。

2.2 热网特性

本文假设热网采用质调节方式，即热网总循环流量不变，通过调节热源节点的供热温度来适应热负荷变化。

1) 热网衰减

热水在流动过程中存在热量损耗，其表达式为：

$$\Delta Q_i = \frac{2\pi\lambda(T_i - T_0)L_i}{\ln\left(\frac{D_i}{d_i}\right)} \tag{9}$$

式中： ΔQ_i 为管道 i 的热量衰减； λ 为管道保温层的导热系数，参见文献[20]； T_i 为管道 i 介质的温度； T_0 为保温层外表面温度； L_i 为管道长度； d_i 和 D_i 分别为管道内径和外径。

2) 热网延时

由于供热传输介质流动速度有限，热量传递需要一定的时间。管道内热水流动时间为^[21]：

$$t_i = \frac{\pi\rho L_i d_i^2}{4m_i} \tag{10}$$

式中： t_i 为热水流经管道 i 的延迟时间； ρ 为水的密度； m_i 为管道 i 的流量。

3 二级热网储热式电锅炉调峰的热电联合调度模型

3.1 目标函数

假设电网中有 R 座热电厂，每座热电厂有 N_i 台热电机组（单抽机组），并与 L_i 个二级网直接相连，有 S 台纯凝机组，以煤耗量最小为目标函数，则一个调度周期内系统的总煤耗可表示为：

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^{N_i} F_{\text{CHP}}^{t,i,n} + \sum_{j=1}^S F_{\text{CON}}^{t,j} \right) \Delta t \tag{11}$$

式中： F 为系统总煤耗量； $F_{\text{CHP}}^{t,i,n}$ 为 t 时段第 i 座热电厂中第 n 台热电机组的煤耗量； $F_{\text{CON}}^{t,j}$ 为 t 时段第 j 台火电机组的煤耗量； T 为一个调度周期总时段数； Δt 为一个调度时段的时间间隔。

纯凝火电机组的耗量特性方程为：

$$F_{\text{CON}} = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 \tag{12}$$

式中： F_{CON} 为纯凝火电机组的煤耗量； a_0, a_1, a_2 为拟合常数； P 为热电机组电功率。

单抽热电机组的耗量特性方程为：

$$F_{\text{CHP}} = e_0 + e_1 P + e_2 D + e_3 P^2 + e_4 PD + e_5 D^2 \tag{13}$$

式中： F_{CHP} 为单抽热电机组煤耗量； e_0 至 e_5 为拟合常数； D 为热电机组抽汽速率。

从热电机组中抽出的热蒸汽通过冷凝将热能传递给下一级热网，其供热功率与抽汽速率的关系式如下：

$$Q_{\text{CHP}} = \frac{D\Delta H}{1\ 000} \tag{14}$$

式中： Q_{CHP} 为热电机组供热功率； ΔH 为蒸汽焓降。

3.2 等式约束

1) 供电平衡约束

$$\sum_{i=1}^R \sum_{n=1}^{N_i} P_{\text{CHP}}^{t,i,n} + \sum_{j=1}^S P_{\text{CON}}^{t,j} + P_{\text{CW}}^t = P_{\text{load}}^t + \sum_{i=1}^R \sum_{l=1}^{L_i} P_e^{t,i,l} \tag{15}$$

式中： $P_{\text{CHP}}^{t,i,n}$ 为 t 时段第 i 座热电厂中第 n 台热电机组的电功率； $P_{\text{CON}}^{t,j}$ 为 t 时段第 j 台火电机组的电功率； P_{CW}^t 为 t 时段风电场的总上网功率； P_{load}^t 为 t 时段系统总电负荷； $P_e^{t,i,l}$ 为 t 时段第 i 座热电厂所带第 l 个换热站的储热式电锅炉供电功率。

2) 供热平衡约束

$$\sum_{n=1}^{N_i} Q_{\text{CHP}}^{t,i,n} = \sum_{l=1}^{L_i} (Q^{t+\tau_{t,l},i,l} - Q_e^{t+\tau_{t,l},i,l}) + \sum_{j=1}^{M_i} \Delta Q^{t,i,j} \quad i=1,2,\dots,R \tag{16}$$

式中： $Q_{\text{CHP}}^{t,i,n}$ 为 t 时段第 i 座热电厂中第 n 台热电机组热功率； $\tau_{t,l}$ 为热水到达第 l 个换热站的延时时时间； $Q^{t+\tau_{t,l},i,l}$ 为 $t+\tau_{t,l}$ 时段第 i 座热电厂所带第 l 个换热站的热负荷； $Q_e^{t+\tau_{t,l},i,l}$ 为 $t+\tau_{t,l}$ 时段第 i 座热电厂所带第 l 个换热站中储热式电锅炉放热功率； $\Delta Q^{t,i,j}$ 为 t 时段第 i 座热电厂所供热网第 j 管道的热量损耗。

3) 储热式电锅炉储热装置的全天总储热量与总放热量相等

$$\sum_{t=1}^{24} Q_{\text{in}2}^t = \sum_{t=1}^{24} Q_{\text{out}2}^t \tag{17}$$

3.3 不等式约束

3.3.1 火电机组电出力约束

$$P_{\text{CON}}^{\min} \leq P_{\text{CON}} \leq P_{\text{CON}}^{\max} \tag{18}$$

式中： $P_{\text{CON}}^{\min}$ 为火电机组出力下限； $P_{\text{CON}}^{\max}$ 为火电机组出力上限。

3.3.2 热电机组出力约束

$$D^{\min} \leq D \leq D^{\max} \tag{19}$$

$$P_{\text{CHP}}^{\min}(D) \leq P_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHP}}^{\max}(D) \tag{20}$$

式中： $D^{\min}$ 为热电机组抽汽速率下限； $D^{\max}$ 为热电机组抽气速率上限； $P_{\text{CHP}}^{\min}(D)$ 为热电机组电功率下限； $P_{\text{CHP}}^{\max}(D)$ 为热电机组电功率上限。

3.3.3 风电场出力约束

$$0 \leq P_{CW} \leq P_{WF} \quad (21)$$

式中: P_{WF} 为风电场总预测功率。

3.3.4 机组的爬坡约束

$$-r_{CON}^{down} \Delta t \leq P_{CON}^t - P_{CON}^{t-1} \leq r_{CON}^{up} \Delta t \quad (22)$$

$$-r_{CHP}^{down} \Delta t \leq P_{CHP}^t - P_{CHP}^{t-1} \leq r_{CHP}^{up} \Delta t \quad (23)$$

式中: r_{CON}^{down} 为火电机组单位时间的滑坡功率; r_{CON}^{up} 为火电机组单位时间的爬坡功率; r_{CHP}^{down} 为热电机组单位时间的滑坡功率; r_{CHP}^{up} 为热电机组单位时间的爬坡功率。

3.3.5 储热式电锅炉的约束

1) 容量约束

$$0 \leq E^t \leq E^{\max} \quad (24)$$

式中: $E^{\max}$ 为储热装置最大储热容量。

2) 电锅炉耗电功率限制

$$P_{in1} \leq P_{in1}^{\max} \quad (25)$$

式中: $P_{in1}^{\max}$ 为储热式电锅炉的电锅炉电功率上限。

3) 储、放热功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{in2} \\ 0 \leq P_{in1} \end{cases} \quad (26)$$

$$0 \leq Q_{out2} \leq Q_{out2}^{\max} \quad (27)$$

式中: $Q_{out2}^{\max}$ 为储热式电锅炉储热装置最大放热功率。

4 算例分析

4.1 原始数据

本系统由 2 座热电厂、1 座火电厂、1 座风电场组成。其中热电厂 1 有 2 台抽凝式热电机组,带 3 个换热站;热电厂 2 有 4 台抽凝式热电机组,带 3 个换热站。每个换热站配置相应容量的储热式电锅炉调峰。取每 1 h 为一个调度时段,共 24 个调度时段。火电厂中有 4 台纯凝火电机组,风电场装机容量 220 MW。各机组的耗量特性拟合系数、运行参数以及 24 个调度时段的热负荷、电负荷、风电预测出力详见文献[6],储热式电锅炉参数见附录 A 表 A1,热网管道参数见附录 A 表 A2,拓扑结构如图 2 所示。

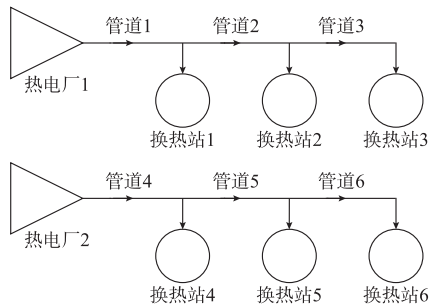


图2 热网拓扑结构

Fig.2 Structure of heating network

4.2 调度结果分析

本文采用粒子群优化算法来求解优化模型。图 3 显示了调度周期内换热站 5 的各种热源功率与总热负荷之间的关系。

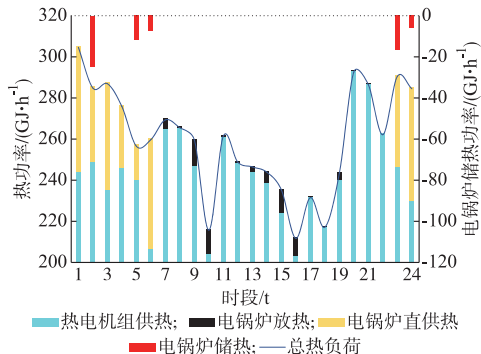


图3 换热站 5 的供热功率优化调度结果
Fig.3 Optimal heating load dispatching results of heat exchanger station 5

为说明配置普通电锅炉、储热式电锅炉及热网特性对热电厂供热功率的影响,图 4 显示了如下 4 种方案下的热电厂 1 供热功率曲线。4 种方案分别如下。

方案 1: 不计及热网特性,不配置电锅炉。

方案 2: 不计及热网特性,二级热网配置储热式电锅炉。

方案 3: 计及热网特性,二级热网配置普通电锅炉。

方案 4: 计及热网特性,二级热网配置储热式电锅炉。

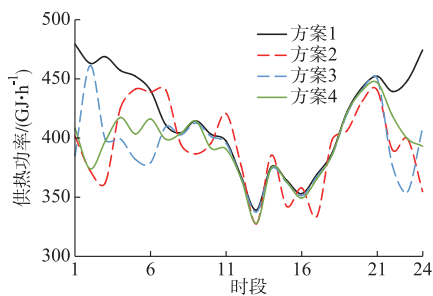


图4 热电厂 1 供热功率对比曲线
Fig.4 Heating power comparison curves of thermal power plant 1

对比方案 1 与方案 3 的日供热曲线可以看出,方案 3 的曲线明显在方案 1 曲线之下,这说明配置电锅炉可以在热负荷高峰时段起到热网调峰热源的作用。对比方案 3 与方案 4 可以看出,方案 4 的部分时段供热功率曲线高于方案 3,而另一部分时段低于方案 3,这是由于储热式电锅炉有平移热负荷的功能。对比方案 2 与方案 4 可以看出,考虑计及热网特性后,热电厂的供热功率曲线整体左移。

图 4 说明,在热用户负荷曲线不变的情况下,是否计及热网特性对热电厂供热功率曲线影响较大,并将进一步影响热电联合系统的调度结果。

方案 2 实际上相当于热源处集中配置储热式电锅炉,表 1 为两种储热式电锅炉配置方式的煤耗量、弃风量对比情况。可见在消纳弃风和减少系统总煤耗量方面,二级热网配置储热式电锅炉方案优于热源处集中配置储热式电锅炉方案。

表 1 两种电锅炉配置方案的经济性
Table 1 Economics of two electric boiler configuration programs

方案	煤耗量/t	弃风量/(MW·h)	风电消纳率/%
热源处集中储热	12 595.49	37.64	98.90
二级热网储热	12 593.06	30.04	99.12

二级热网配置普通电锅炉与储热式电锅炉日调峰方案的电负荷对比曲线见附录 B 图 B1。两种方案都可以在电负荷低谷时段起到填谷作用,且配置储热式电锅炉方案的效果更优。

图 5 为二级热网配置普通电锅炉与储热式电锅炉日调峰方案的风电上网功率对比曲线。相比配置普通调峰电锅炉方案,配置储热式电锅炉方案的风电上网功率曲线与风电功率预测曲线重合度更高,风电消纳率由 98.27% 上升到 99.12%,说明配置储热式电锅炉可进一步消纳弃风。

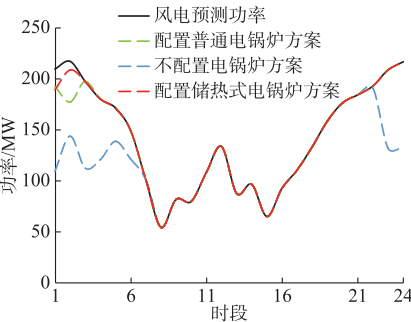


图 5 风电上网功率对比曲线
Fig.5 Comparison curves of wind power accommodation

附录 B 表 B1 展示了各种方案的煤耗及弃风情况,可以看出,二级热网配置储热式电锅炉相较配置普通调峰电锅炉,能进一步降低整个系统的煤耗量,提升风电消纳率。

4.3 储热装置容量对弃风率的影响分析

以 4.1 节中的各储热装置储热容量为基准,储热容量变化时,储热容量与弃风率、总煤耗量的关系见附录 B 图 B2。随着储热装置容量的增加,系统的总煤耗量和弃风率都在减少。储热容量增大至 1.2 倍时,总弃风量由原来的 30.04 MW·h 下降到 26.13 MW·h,这是由于在弃风时段,增大储热装

置容量后的系统消耗了更多电负荷,提高了风电上网空间。

4.4 风电渗透率对弃风率的影响分析

以 4.1 节中的风电场装机容量为基准,风电场的装机容量变化时,风电渗透率与弃风率、总煤耗量的关系见附录 B 图 B3。随着风电场装机容量的增加,系统的总煤耗量减少,弃风率增加。这是因为风电装机容量变化会引起消纳风电所需的上网空间变化,进而改变弃风时段、弃风总量,如本算例中,当风电装机容量减少 20% 时,弃风时段由 9 h 降低为 6 h。而风电占比下降,导致在相同电负荷情况下,煤电机组的供电量加大,系统总煤耗量更多。

4.5 储放热启动控制策略对弃风率的影响分析

弃风启停、随机启停两种储热式电锅炉控制策略的经济性指标对比情况见附录 B 表 B2。可以看出,弃风启停控制策略的各项指标更优。采用随机启停控制策略时,储热式电锅炉在非弃风时段(时段 10,13,15,18,21)开启了储热,而弃风时段储热减少。在风电全部利用的时段通过电转化成热储存,热电机组与火电机组承担的电负荷增加,煤耗增加,因此弃风时段储热、非弃风时段放热是最优的启停控制策略。

5 结语

- 1)与二级热网配置普通电锅炉日调峰方案相比,二级热网配置储热式电锅炉进行热网日调峰方案可进一步消纳系统弃风。
 - 2)二级热网配置储热式电锅炉方案优于热源处集中配置储热式电锅炉方案,且储热式电锅炉的储热容量越大,系统风电消纳率越高,煤耗量越少。
 - 3)储热式电锅炉弃风启停控制策略,在经济性和消纳弃风方面都优于随机启停控制策略。
- 二级热网配置储热式电锅炉增加了用电的灵活性,为突出负荷侧灵活调整对消纳弃风的影响,下一步研究中将考虑电网的制约作用。

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

参 考 文 献

[1] 国家电力监管委员会.重点区域风电消纳监管报告[R].北京:国家电力监管委员会,2012.
State Electricity Regulatory Commission. Report on supervision of wind power accommodation in key regions[R]. Beijing: State Electricity Regulatory Commission, 2012.

[2] 国家能源局.关于做好 2013 年风电并网和消纳相关工作的通知[R].北京:国家能源局,2013.
National Energy Administration. Notice on completion of wind

- power integration and accommodation work in 2013 [R]. Beijing: National Energy Administration, 2013.
- [3] 中国电力新闻网.一季度平均弃风率 18.6%同比上升 6.6 个百分点[EB/OL]. [2015-04-28]. http://www.cpnw.com.cn/zdyw/201504/t20150428_797858.html. China Power News Network. The average rate of wind curtailment in the first quarter rose by 6.6 percentage points from 18.6% year-on-year[EB/OL]. [2015-04-28]. http://www.cpnw.com.cn/zdyw/201504/t20150428_797858.html.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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. DOI:10.7500/AEPS20151001001.
- DENG Jiale, HU Linxian, LI Jiajia. 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. DOI: 10.7500/AEPS20151001001.
- [7] 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):4072-4080.
- 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): 4072-4080.
- [8] 吕泉,陈天佑,王海霞,等.配置储热后热电厂调峰能力分析[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.
- [9] 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.
- [10] 于炎娟,陈红坤,姜欣,等.促进风电消纳的蓄热罐运行策略[J].电力系统自动化,2017,41(7):37-43. DOI: 10.7500/AEPS20160510006.
- YU Yanjuan, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. Operation strategy for heat storage tank to improve wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 37-43. DOI: 10.7500/AEPS20160510006.
- [11] HUANG Xianzheng, XU Zhaofeng, SUN Yong, et al. Heat and power load dispatching considering energy storage of district heating system and electric boilers [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 1-12.
- [12] DIMOULKAS I, AMELIN M, LEVIHN F. District heating system operation in power systems with high share of wind power[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(6): 1-13.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李平,王海霞,王漪,等.利用建筑物与热网热动态特性提高热电联产机组调峰能力[J].电力系统自动化,2017,41(15):26-33. DOI:10.7500/AEPS20161117003.
- LI Ping, WANG Haixia, WANG Yi, et al. Improvement of peak load regulation capacity of combined heat and power units considering dynamic thermal performance of buildings and district heating pipelines network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 26-33. DOI: 10.7500/AEPS20161117003.
- [16] 刘秋华,郑亚先,杨胜春.长周期大范围风电消纳的电力电量联合优化模型与应用[J].电力系统自动化,2015,39(18):145-150. DOI:10.7500/AEPS20141209003.
- LIU Qiu-hua, ZHENG Yaxian, YANG Shengchun. A power and energy joint optimization model and its application for long-term large-range wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 145-150. DOI: 10.7500/AEPS20141209003.
- [17] 夏叶,康重庆,陈天恩,等.电力用户参与风电消纳的日前市场模式[J].电力系统自动化,2015,39(17):120-126. DOI: 10.7500/AEPS20150317009.
- XIA Ye, KANG Chongqing, CHEN Tianen, et al. Day-ahead market mode with power consumers participation in wind power accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 120-126. DOI: 10.7500/AEPS20150317009.
- [18] 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.

[19] 邓佳乐. 电热联合系统多时间尺度滚动调度策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

DENG Jiale. Research on the multi-time scale rolling scheduling method for combined heat and power system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[20] LIU Xuezh, JENKINS N, WU Jianzhong, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Energy Procedia, 2016, 61: 1238-1250.

[21] 袁闪闪. 集中供热系统的热动态特性研究[D]. 天津: 天津大学,

2010.

YUAN Shanshan. Research on dynamic performance of centralized heat-supply system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

郭丰慧(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化调度。E-mail: h5975d@163.com

胡林献(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向: 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

周升成(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统优化调度。

(编辑 孔丽蓓)

Dispatching Model of Wind Power Accommodation Based on Heat Storage Electric Boiler for Peak-load Regulation in Secondary Heat Supply Network

GUO Fenghui, HU Linxian, ZHOU Shengyu

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: There is a serious problem of wind power abandoning during winter heat supply period in Northeast, North, and Northwest China. The application of heat storage electric boiler to further accommodate wind power is discussed based on the strategy of peak-load regulation by installing a heat storage electric boiler in the secondary heat supply network. Based on the delay and attenuation characteristics of heating network, the mechanism to improve wind power accommodation through the heat storage electric boiler is analyzed. The condition of electro-thermal conversion start-stop for the heat storage electric boiler is proposed. The mathematical model of the heat storage electric boiler and the dispatching model of the electricity-heating combined system based on the heat storage electric boiler for daily peak-load regulation at the secondary heat supply network are developed. The influence of configuration modes of heat storage electric boiler, heat storage capacity and wind power penetration capacity on the rate of wind power curtailment are compared and analyzed. The case analysis shows that configuring the heat storage electric boiler at the secondary heat supply network can further accommodate wind power and provide better results. The larger heat storage capacity of electric boiler, the lower the rate of wind power curtailment.

Key words: combined heat and power system; heat storage electric boiler; dispatching model; heating network characteristics; rate of wind power curtailment

- 行业动态、两刊最新文章全部“一手掌握”
- SCI论文抢“鲜”看
- 好文章分享一下
- 自己的文章在朋友圈炫一下
- 名家大师真知灼见全收藏
- 期刊动态、征文通知、有奖调查问卷等互动内容
- 随时查看稿件状态
- 还有更多新内容，等您来发现……



官方微信

微信号: AEPS-1977



《电力系统自动化》**微信**

至简成精 见**微**知著