

电、煤锅炉联合供暖消纳弃风策略及效益分析

葛维春^{1,2}, 程珊珊², 孙 鹏², 李家珏³, 邵宝珠³, 贺 欢⁴

(1. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110004; 2. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110006; 4. 国网辽宁省电力有限公司鞍山供电公司, 鞍山 114000)

摘 要: 针对当前中国“三北”地区风电大规模快速发展而存在的大量弃风问题, 研究基于电储热锅炉和燃煤锅炉联合供暖的弃风消纳策略, 并建立起综合效益分析模型。根据电网运行管理部门的风电出力与负荷预测数据, 建立特定时间段内弃风电量计算模型, 并在此基础上研究电储热锅炉利用弃风电量储热、放热的“电-热”能量转换模型, 提出利用弃风电量替代燃煤锅炉进行供暖的调度策略。根据热网所需总热量及电储热锅炉调度策略, 研究燃煤锅炉最佳节煤运行方式, 进一步提出电、煤锅炉联合供暖消纳弃风协调调度控制策略。研究电储热锅炉所消纳弃风电量与同等热量下燃煤锅炉煤耗间换算模型, 建立电、热锅炉联合消纳弃风的综合效益分析模型。以风电供暖工程实例进行的仿真分析表明, 该文提出的电、煤锅炉联合供暖消纳弃风策略可有效提高弃风消纳能力, 同时能大幅减少燃煤锅炉煤耗, 提升经济和环境效益。

关键词: 风电; 调度; 电储热锅炉; 节煤效果

中图分类号: O325/TK79 **文献标识码:** A

0 引 言

风电是技术最为成熟、开发规模最大的清洁能源, 经过十余年大力发展, 中国风电并网规模已超过 1.7 亿 kW。随着风电渗透率的提高, 受火电和热电机组调节裕度限制, 电网灵活性大幅下降, 导致弃风现象日益严重。探索大规模风、光发电最大化消纳的新途径已成为当前研究的热点问题^[1-4]。

考虑采用弃风电进行供热, 不仅可消纳多余风电, 还可节约煤炭消耗, 避免资源浪费的同时还可缓解生态环境问题与能源消耗之间的矛盾。由于风力发电及其并网技术不断成熟, 导致热网热源种类及数量也随之增加, 热网已由单一燃煤热源供热向多种类热源协调供热发展^[5-7]。以消纳弃风电及节约煤耗为目标, 结合电储热锅炉能源转换效率高的特点, 研究利用电储热锅炉消纳弃风电进行储热, 进一步与燃煤锅炉联合向热网供热这一方式, 对提高电力和热力行业的经济和环境效益具有重要意义^[8-10]。

目前, 已有研究利用弃风电进行供热以提升经

济性的相关文献。文献[11]提出通过配置大容量电锅炉来参与风电调峰策略, 建立经济性模型, 实现弃风消纳。文献[12]根据弃风消纳机理, 建立 3 种弃风消纳方案经济分析模型, 根据其相关优势对经济性进行对比。文献[13]介绍了通过为热电联产机组配置热泵和电锅炉来实现弃风消纳, 并分别对 2 种方法的机理和经济性进行对比。文献[14]针对日渐突出的弃风问题, 根据电网日用电负荷使用情况, 分析利用弃风供暖对电网负荷影响, 研究建立利用弃风进行供暖方法模型, 证明了弃风供暖可减少煤耗, 提升环境效益。文献[15]建立一种风电-氢储能模型, 针对风电与其他形式能量联合应用进行分析, 提出对经济性评估的方法, 证实了风电的利用对经济效益的影响。

本文基于电网运行管理部门的风电出力预测数据与电网负荷预测数据, 研究建立特定时间段内弃风电量计算模型。结合弃风电量, 研究电储热锅炉利用弃风电量进行储热、放热的“电-热”能量转换模型, 并在此基础上, 提出电储热锅炉消纳弃风调度策略。根据热网所需总热量及电储热锅炉调度策略, 研究燃煤锅炉最佳节煤运行方式, 并提出电、

收稿日期: 2018-07-30

基金项目: 国家重点专项基金项目(2017YFB0902100); 国家电网公司科技项目(2018YF-06)

通信作者: 葛维春(1961—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事新能源电力系统与多能源协调调度方面的研究。sygdty@163.com

煤锅炉联合供暖消纳弃风协调调度控制策略。研究电储热锅炉所消纳弃风电量与同等热量下燃煤锅炉煤耗间换算模型,建立电、热锅炉联合消纳弃风的综合效益分析模型。以风电供暖工程实例进行的仿真分析结果表明,本文提出的电、煤锅炉联合供暖消纳弃风策略可有效提高弃风消纳能力,同时能大幅减少燃煤锅炉煤耗,减少碳排放,提升经济效益和环境效益。

1 电储热锅炉弃风消纳模型

结合风电场出力情况及电储热锅炉工作方式,在负荷低谷时段,利用弃风电给电储热锅炉供电,此时电储热锅炉消耗弃风电产生热源去替代燃煤锅炉进行供暖。如果电储热锅炉产生的热量不能满足热网需求,则需联合燃煤锅炉一同供热。电储热锅炉也可存储多余的热量,以便负荷尖峰时段电锅炉不从电网消耗电能时使用。电储热锅炉在供热系统中工作示意图如图1所示。

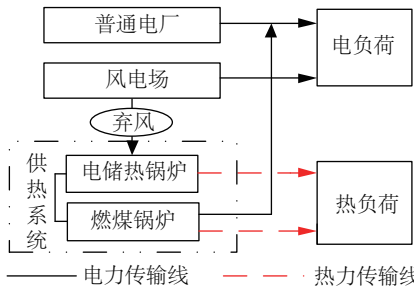


图1 电储热锅炉在供热系统中工作示意图

Fig. 1 Working diagram of electric heat storage boiler in heating system

1.1 弃风电量计算

弃风产生原理示意图如图2所示。

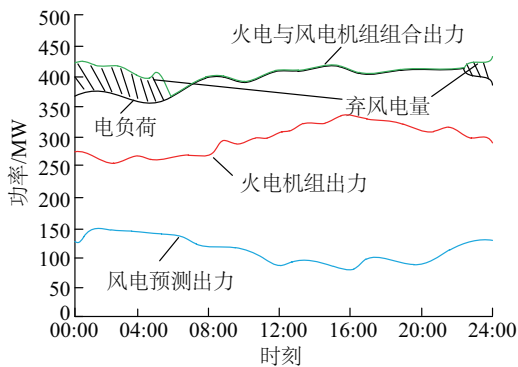


图2 弃风产生原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of production principle of abandoned wind

根据“三北”地区风电场弃风现象严重且多发生在供暖季这一特点^[16],结合电网运行管理部门的风电出力预测数据与电网负荷使用预测数据,研究建立供暖季特定时间段内弃风电量的计算模型。弃风功率和时段预测和电量计算,是最大化消纳弃风电量的关键和基础。

同一风电场中,根据风力发电机组的不同出力情况,供暖季风电场某一天 $t = t_2 - t_1$ 时间内弃风电量可表示为:

$$W_q = \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_{i=1}^m (P_{si} + P_t - P_l) + \sum_{j=1}^n (P_{sj} + P_t - P_l) + \sum_{k=1}^l (P_{sk} + P_t - P_l) \right] dt \quad (1)$$

式中, P_l ——负荷功率, kW; P_t ——火电机组出力, kW; m 、 n 、 l ——3种不同装机容量风力机的数量; i 、 j 、 k ——起始数量; P_{si} ——数量为 i 的风力机的实发出力, kW; P_{sj} ——数量为 j 的风力机的实发出力, kW; P_{sk} ——数量为 k 的风力机的实发出力, kW。

典型供暖期1d弃风曲线如图3所示。

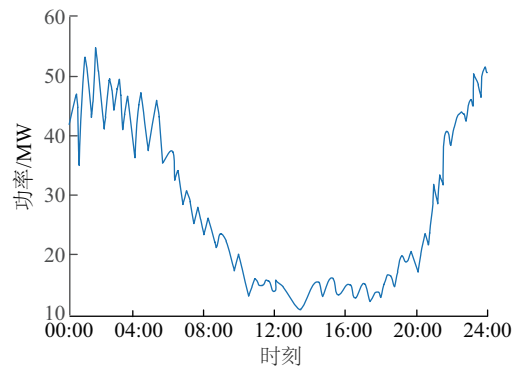


图3 典型供暖期1d弃风曲线

Fig. 3 A typical one-day abandoned wind curve for a typical heating period

则7d的弃风电量为:

$$W_q = \int_{t_1}^{t_2} \left[\sum_{i=1}^m (P_{si1} + P_{t1} - P_{l1}) + \sum_{j=1}^n (P_{sj} + P_{t1} - P_{l1}) + \sum_{k=1}^l (P_{sk} + P_{t1} - P_{l1}) \right] dt + \dots + \int_{t_{13}}^{t_{14}} \left[\sum_{i=1}^m (P_{si7} + P_{t7} - P_{l7}) + \sum_{j=1}^n (P_{sj7} + P_{t7} - P_{l7}) + \sum_{k=1}^l (P_{sk7} + P_{t7} - P_{l7}) \right] dt \quad (2)$$

典型供暖期 7 d 弃风曲线如图 4 所示。

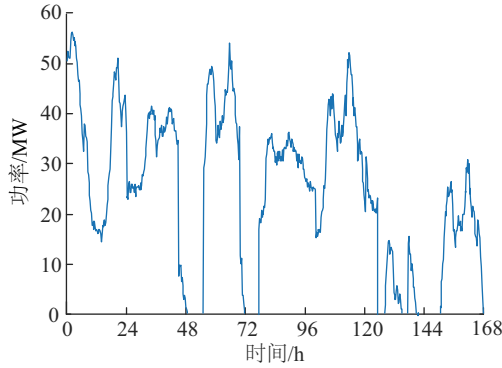


图 4 典型供暖期 7 d 弃风曲线

Fig. 4 Typical heating period 7 days abandoned wind curve

1.2 电储热锅炉供热模型

电储热锅炉有电加热和储热 2 部分,假设有足够的容量的电储热介质可储存弃风电产生的热量,则电储热锅炉 t 时段内利用弃风电可产生的热量表示为:

$$Q_{\text{EHS}}(t) = \eta_{\text{EH}}(W_{\text{q}} - W_{\text{EH}}) - \mu_{\text{EHS}}W_{\text{EH}} \quad (3)$$

式中, $Q_{\text{EHS}}(t)$ ——电储热锅炉在 t 时段消耗弃风电产生的热量, kJ; η_{EH} ——电储热锅炉加热部分的“电-热”能量转换系数; W_{EH} ——电储热锅炉运行 t 时段内自身消耗的电量, kJ; μ_{EHS} ——电储热锅炉储能时自损耗热量系数。

电储热锅炉供热模型为:

$$Q_{\text{EHS}}(t) = \eta_{\text{EH}}(W_{\text{q}} - W_{\text{EH}}) - \mu_{\text{EHS}}W_{\text{EH}} \\ = \left[\eta_{\text{EHS}}^{\text{abs}} \cdot P_{\text{EH,out}}(t) - \frac{1}{\eta_{\text{EHS}}^{\text{relea}}} P_{\text{relea}}(t) \right] \cdot t \quad (4)$$

式中, $\eta_{\text{EHS}}^{\text{abs}}$ ——电储热锅炉储能部分的储能效率; $P_{\text{EH,out}}(t)$ ——电储热锅炉加热部分 t 时段对储热介质输出的热功率, kW; $\eta_{\text{EHS}}^{\text{relea}}$ ——电储热锅炉储能部分的放热效率; $P_{\text{relea}}(t)$ —— t 时段储能部分的放热功率, kW。

根据电储热锅炉消纳弃风电的供热模型,可计算出电储热锅炉电加热部分对储热介质输出的热功率 $P_{\text{EH,out}}$ 。

$$P_{\text{EH,out}}(t) = \frac{\eta_{\text{EH}}(W_{\text{q}} - W_{\text{EH}}) - \mu_{\text{EHS}}W_{\text{EH}}}{\eta_{\text{EHS}}^{\text{abs}}t} + \frac{1}{\eta_{\text{EHS}}^{\text{abs}}\eta_{\text{EHS}}^{\text{relea}}} P_{\text{relea}}(t) \quad (5)$$

由式(5)可得,电储热锅炉在时间 t 内消纳的弃风电量 $W_{\Sigma W_{\text{q}}}$ 可表示为:

$$W_{\Sigma W_{\text{q}}} = \int_0^t P_{\text{EH,out}}(t) dt \quad (6)$$

1.3 燃煤锅炉供热模型

设时间 t 内热网所需总热量为 Q_{HSN} , 则燃煤锅炉所需提供热量 $Q_{\text{CTB}}(t)$ 为:

$$Q_{\text{CTB}}(t) = Q_{\text{HSN}}(t) - Q_{\text{EHS}}(t) \quad (7)$$

考虑使用弃风电量的电储热锅炉产热效率高, 因此, 消纳弃风电量使电储热锅炉供热可有效降低锅炉侧热量的损失, 不再考虑燃煤锅炉自身损失热量。在特定时间 t 内, 用燃煤锅炉进行供热, 燃煤锅炉的热功率可表示为:

$$P_{\text{CTB}} = \frac{Q_{\text{CTB}}(t)}{t} = \frac{Q_{\text{HSN}}(t) - Q_{\text{EHS}}(t)}{t} \quad (8)$$

根据时间 t 内热网热量总需求及电储热锅炉运行情况, 可得到电储热锅炉和燃煤锅炉联合供暖时, 燃煤锅炉提供的总热量为:

$$Q_{\Sigma Q_{\text{CTB}}} = \int_0^t P_{\text{CTB}} dt \quad (9)$$

2 电、煤锅炉协调调度模型

2.1 电、煤锅炉协调调度优化模型

根据本文电储热锅炉和燃煤锅炉联合供暖这一运行方式, 设置电储热锅炉和燃煤锅炉联合供热系统的发热成本最低为:

$$\min C_{\text{dis}} = C_{\text{CTB}} + C_{\text{EHB}} \quad (10)$$

式中, C_{dis} ——电、煤锅炉协调调度运行总成本, ¥; C_{CTB} ——燃煤锅炉运行成本, ¥; C_{EHB} ——电储热锅炉运行成本, ¥。

1) 燃煤锅炉运行成本

$$C_{\text{CTB},i}(t) = \mu_{\text{coal}}(a_i P_{\text{CTB},i}(t)^2 + b_i P_{\text{CTB},i}(t) + c_i) \quad (11)$$

式中, $C_{\text{CTB},i}(t)$ ——第 i 台燃煤锅炉在 t 时段的运行成本, ¥; μ_{coal} ——燃煤价格, ¥/t; $P_{\text{CTB},i}(t)$ ——第 i 台燃煤锅炉在 t 时段的发热功率, kW; a_i 、 b_i 、 c_i ——第 i 台燃煤锅炉运行成本拟合系数。

2) 电储热锅炉运行成本

$$C_{\text{EHB},i}(t) = \tau_i P_{\text{EH,out},i}(t) + \eta_i (P_{\text{EH,out},i}(t) - P_{\text{relea},i}(t)) \quad (12)$$

式中, $C_{\text{EHB},i}(t)$ ——第 i 台电储热锅炉工作 t 时段的运行成本, ¥; τ_i ——第 i 台电储热锅炉电加热部分工作的运行成本系数; $P_{\text{EH,out},i}(t)$ ——第 i 台电储热锅炉加热部分在 t 时段的输出热功率, kW; $P_{\text{relea},i}(t)$ —— t 时段第 i 台电储热锅炉储能装置的放热功率, kW; η_i ——第 i 台电储热锅炉储能装置工

作时的运行成本系数。

2.2 协调运行约束条件

电储热锅炉和燃煤锅炉联合协调供热消纳弃风调度模型主要有以下约束条件:

1) 供热平衡约束为:

$$P_{HL}(t) = P_{CTB}(t) + P_{EH}(t) \quad (13)$$

式中, $P_{HL}(t)$ —— t 时段的热负荷, kW; $P_{CTB}(t)$ —— t 时段的燃煤锅炉供热功率, kW; $P_{EH}(t)$ —— t 时段的电储热锅炉总供热功率, kW。

2) 电储热锅炉整体约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{EH,in}(t) \leq P_{EH,in,max} \\ 0 \leq P_{EH,out}(t) \leq P_{EH,out,max} \\ 0 \leq P_{HS,in}(t) \leq P_{HS,in,max} \\ 0 \leq P_{relea}(t) \leq P_{relea,max} \\ Q_i(t) \leq Q_{i,max} \\ \sum_{t=1}^T P_{HS,in}(t) - \sum_{t=1}^T P_{relea}(t) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中, $P_{EH,in}(t)$ —— 电储热锅炉加热部分 t 时段的输入功率, kW; $P_{EH,in,max}$ —— 电储热锅炉加热部分的最大输入功率, kW; $P_{EH,out}(t)$ —— 电储热锅炉加热部分 t 时段的输出功率, kW; $P_{EH,out,max}$ —— 电储热锅炉加热部分的最大输出功率, kW; $P_{HS,in}(t)$ —— t 时段储热装置的输入功率, kW; $P_{HS,in,max}$ —— 储热部分的最大输入功率, kW; $P_{relea}(t)$ —— t 时段储热部分的放热功率, kW; $P_{relea,max}$ —— 储热部分的最大放热功率, kW; $Q_i(t)$ —— 时刻 t 储热部分的储热量, kJ; $Q_{i,max}$ —— 储热部分的最大储热容量。求和为零代表满足储热部分周期热容量不变约束。

2.3 电、煤锅炉调度策略模型

电储热锅炉和燃煤锅炉运行状态如图 5 所示, 具体调度策略是根据电网运行管理部门的风电出力预测数据与电网负荷预测数据、是否存在弃风量、是否满足热网需求以及储热装置剩余能量水平来决定的, 最后求取满足条件的最优解。

3 电、煤锅炉联合消纳弃风效益分析模型

根据本方案, 电储热锅炉消纳弃风电存储的热量 Q_{EHS} 为相应燃煤锅炉节约的煤产生的热量。

根据式(3), 设燃煤锅炉供暖时间为 T , 则单位时间燃煤锅炉产生的热量为:

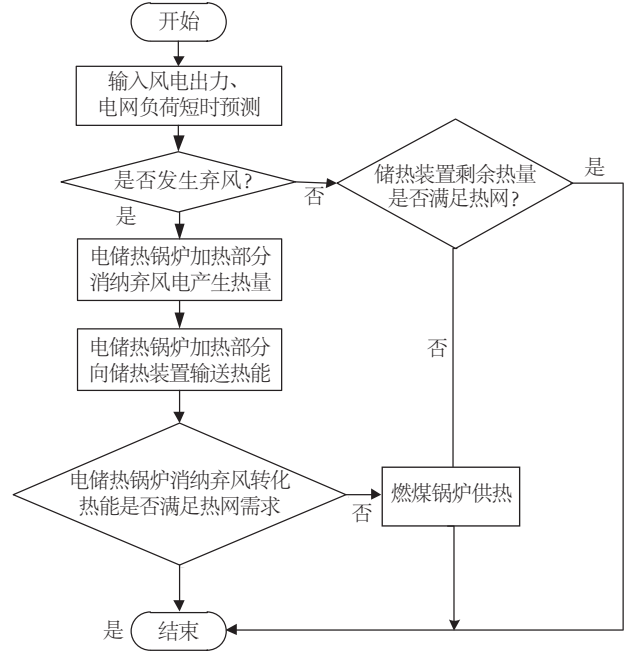


图5 电、煤锅炉调度模型流程图

Fig. 5 Flow chart of power storage boiler and coal-fired boiler scheduling

$$Q_{FCB} = \frac{\eta_{EH}(W_q - W_{EH}) - \mu_{EHS} W_{EH}}{T} \quad (15)$$

设燃煤热值为 η , 则单位时间燃煤锅炉供热需要的煤质量 M_T 为:

$$M_T = \frac{Q_{FCB}}{\eta} = \frac{\eta_{EH}(W_q - W_{EH}) - \mu_{EHS} W_{EH}}{\eta T} \quad (16)$$

利用弃风电供热代替燃煤锅炉供热节省的煤耗, 不仅有效提高经济效益, 还可减少相关污染物排放, 有效提高环境效益^[16]。

设整个热网 1 a 供暖期利用弃风电产生的热量等效于利用燃煤锅炉供热需用的时间总和为 T_y , 则 1 a 供暖期节约的煤耗经济效益 R_y 为:

$$R_y = \mu_{coal} M_T T_y \quad (17)$$

式中, μ_{coal} —— 燃煤价格, ¥/t。

风能为清洁能源, 电储热锅炉消纳弃风可节约同等热量燃煤锅炉产生的 CO_2 排放量。

$$M_{CD} = \delta Q_{EHS}(t) \quad (18)$$

式中, M_{CD} —— 利用弃风供热 t 时段节约的 CO_2 排放量, t; δ —— 燃煤锅炉单位热量 CO_2 排放系数。

4 仿真分析

以某地区电网运行管理部门实际弃风数据为

依据,分析该地区风电供热示范工程项目供暖季电、煤锅炉联合供暖弃风消纳效果和节煤效果。风电场规模为 500 MW,供暖示范工程项目供暖面积为 40 万 m^2 ,热网总需求为整个供暖季从每年 11 月 1 日至次年 3 月 31 日,约 150 d。供暖季弃风曲线如图 6 所示。

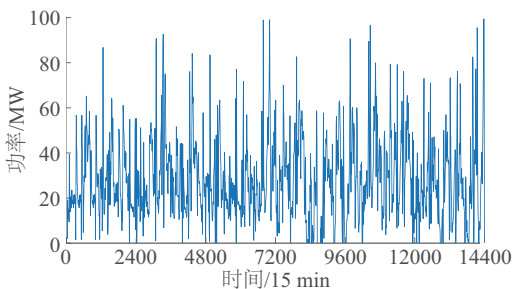


图6 供暖季弃风曲线

Fig. 6 Abandoned wind curve during heating period

4.1 电储热锅炉运行优化分析

根据本文提出的电、煤锅炉联合供暖消纳弃风方案,对电储热锅炉中的储热部分按弃风情况进行分组投退,并将电储热锅炉电储热部分统一投入/退出控制方式与跟随弃风变化的分组投入/退出控制方式进行对比。

1)当电储热锅炉储热部分采取统一投入/退出控制方式运行时,设置电储热锅炉极限运行功率为 40 MW。根据图 3 中所示供暖季 1 d 的弃风曲线,不分组投入/退出的电储热锅炉消纳弃风效果如图 7 所示。

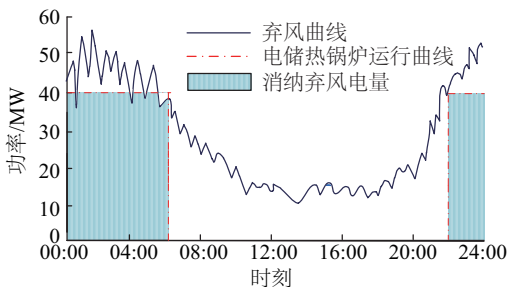


图7 不分组投入/退出的电储热锅炉消纳弃风效果图

Fig. 7 Effect diagram of absorption and discard air of electric heat storage boiler without grouping input/exit

2)当电储热锅炉储热部分采取跟随弃风变化的分组投入/退出控制方式运行时,设置电储热锅炉分组功率为 5 兆瓦/组,分组投入/退出的电储热锅炉消纳弃风运行曲线如图 8 所示。

如果将电储热锅炉储热部分极限功率增加为

60 MW 时,设置电储热锅炉分组功率为 5 兆瓦/组。分组投入/退出的电储热锅炉消纳弃风运行曲线如图 9 所示。由于弃风本身存在较大的随机性和不确定性,因此电储热锅炉运行状态和弃风量大小有关,当风电场弃风功率小于 5 MW 时,电储热锅炉停止运行^[16]。

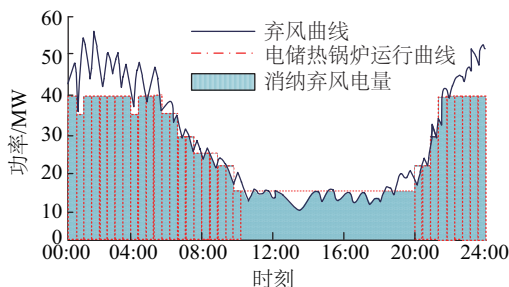


图8 分组投入/退出的电储热锅炉(40 MW)消纳弃风曲线

Fig. 8 Operation curve of electric heat storage boiler(40 MW) in group input / exit

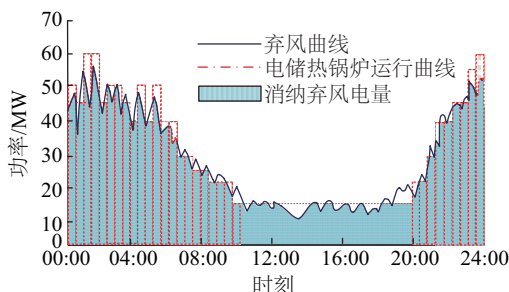


图9 分组投入/退出的电储热锅炉(60 MW)消纳弃风曲线

Fig. 9 Operation curve of electric heat storage boiler(60 MW) in group input/exit

由此可知,与电储热锅炉储热部分采取统一投入/退出控制运行方式相比,储热部分跟随弃风变化的分组投入/退出控制方式能更好地消纳弃风,且适当增加电储热锅炉的储热容量可提高弃风消纳效果。

4.2 电、煤锅炉协调效益分析

电储热锅炉储热部分容量和分组的增加可提升风电消纳能力,但从经济效益角度考虑,相应的设施建设成本也随之增加,结果如图 10 所示。不同建设成本下的电储热锅炉消纳弃风和节煤效果不同。

不同的储热容量决定电储热锅炉建设投资和投资回收期的长短,也直接决定年均收益大小,如表 1 所示。除建设成本外,根据国家发改委风电补

偿激励政策,不同电价机制下节煤经济性不同。以容量 40 MW 电储热锅炉为例,取煤价 600 元/t,计算整个供暖季不同弃风电价(电价负——得到补偿)下的经济效益,如表 2 所示。

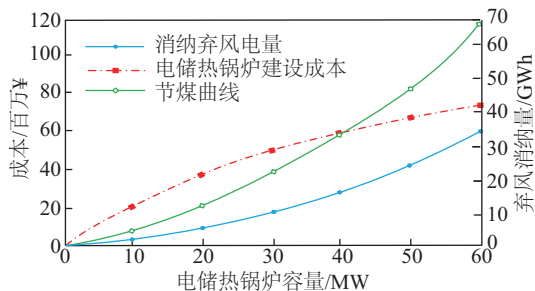


图 10 不同建设成本下的电储热锅炉消纳弃风和节煤效果图
Fig. 10 Efficiency diagram of electric heat storage boiler under different construction cost in absorbing and discarding air and saving coal

根据供暖季一年的燃煤锅炉与电储热锅炉运

行成本数据,分析电、煤锅炉联合供暖协调运行策略下的环境效益,仿真运行结果如图 11 所示。在热网热负荷一定情况下,在一定范围内,电储热锅炉配置容量越高时,节煤效果越好。

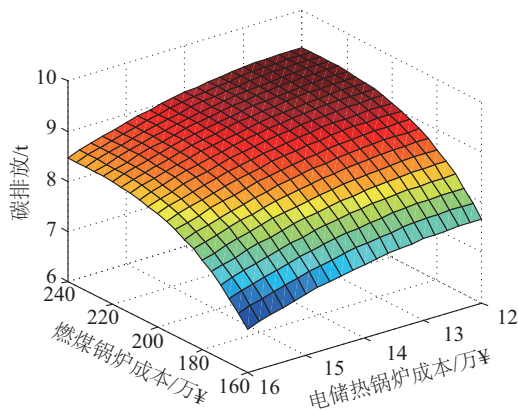


图 11 电、煤联合运行下的经济效益
Fig. 11 Economic benefits under combined operation of electricity and coal

表 1 不同储热容量的电储热锅炉建设投资及收益计算表

Table 1 Construction investment and income statement of electric heat storage boiler with different heat storage capacity							
方案	电储热锅炉容量/ MW	供暖面积/ 万 m ²	建设投资/ 万元	使用年限/ a	年均投资/ 万元	年均维护成本/ 万元	供暖收益/ 万元
1	40	40	6000	40	489.306	9.79	1120
2	60		9000		733.958	14.68	1680

表 2 整个供暖季不同电价下的经济效益

Table 2 Economic benefits under different electricity prices in whole heating season					
方案	弃风电价/元	$W_{\Sigma wq}/MWh$	$R_i/\text{万元}$	节煤量/t	$\Sigma M_{co}/t$
1	-0.5	18632.39	1596.29	2660.48	1125.38
2	-0.4	17980.73	1541.20	2568.68	1085.55
3	-0.3	17492.73	1499.38	2498.96	1057.06
4	-0.2	17092.91	1465.11	2441.84	1032.90
5	-0.1	16872.25	1446.19	2410.32	1019.57
6	0	16519.48	1415.96	2359.93	998.24
7	0.1	16192.09	1387.89	2313.16	978.46
8	0.2	15829.83	1356.84	2261.40	956.57
9	0.3	15428.91	1322.49	2204.13	932.34
10	0.4	15192.02	1302.17	2170.29	918.03
11	0.5	14827.92	1270.94	2118.27	896.03

5 结 论

本文针对日益严重的弃风现象,考虑到当前

广泛应用的清洁能源供暖技术,研究电储热锅炉和燃煤锅炉联合供暖消纳弃风运行策略,并对其经济性进行分析。

1)根据电网运行管理部门的风电出力与负荷预测数据,建立特定时间段内弃风电量计算模型,并在此基础上研究电储热锅炉利用弃风电量储热、放热的“电-热”能量转换模型,提出弃风电量替代燃煤锅炉进行供暖的调度策略。

2)根据热网所需总供热量及电储热锅炉调度策略,研究燃煤锅炉的最佳节煤运行方式,并提出电、煤锅炉联合供暖消纳弃风协调调度控制策略。

3)根据电储热锅炉消纳弃风产生的热量,计算出同等热量下燃煤锅炉节约的煤耗和减少的碳排放量,评估其经济和环境效益。

4)以风电供热示范工程项目对本方案进行仿真,仿真结果表明本文提出的电、煤锅炉联合供暖消纳弃风策略可有效提高弃风消纳能力,同时减少燃煤锅炉的煤耗,提升经济性;减少 CO₂ 排放,提升环境效益。

[参考文献]

- [1] 路甬祥. 大力发展分布式可再生能源应用和智能微网[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(2): 157—164, 152, 265.
- [1] Lu Yongxiang. To develop distributed renewable energy applications and intelligent microgrid[J]. Proceedings of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(2): 157—164, 152, 265.
- [2] 李军徽, 邢志同, 穆 钢, 等. 供热期调峰约束下电网弃风情况分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(3): 596—602.
- [2] Li Junhui, Xing Zhitong, Mu Gang, et al. Analysis of wind abandonment of power grids under peak cooling during heating period[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(3): 596—602.
- [3] 滕 云, 张铁岩, 陈 哲. 多能源互联系统优化运行与控制技术研究现状与前景展望[J]. 可再生能源, 2018, 36(3): 467—474.
- [3] Teng Yun, Zhang Tieyan, Chen Zhe. Research status and prospects of the optimization and operation of multi-energy interconnected systems[J]. Renewable Energy, 2018, 36(3): 467—474.
- [4] 吕 泉, 王 伟, 韩 水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887—1894.
- [4] Lyu Quan, Wang Wei, Han Shui, et al. Evaluation method of power grid abandonment based on analysis of peak shaving capacity[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1887—1894.
- [5] 姜 欣, 陈红坤, 回俊龙, 等. 计及弃风的风电场最优装机容量[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18): 160—168.
- [5] Jiang Xin, Chen Hongkun, Hui Junlong, et al. The optimal installed capacity of wind farms considering abandoned wind[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18): 160—168.
- [6] 邹 金, 赖 旭, 汪宁渤. 以减少电网弃风为目标的风电与抽水蓄能协调运行[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2472—2477.
- [6] Zou Jin, Lai Xu, Wang Ningbo. Coordinated operation of wind power and pumped storage with the goal of reducing wind curtailment[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2472—2477.
- [7] 唐西胜, 齐智平. 应用于微电网的储能及其控制技术[J]. 太阳能学报, 2012, 33(3): 517—524.
- [7] Tang Xisheng, Qi Zhiping. Energy storage and control technology applied to microgrid[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(3): 517—524.
- [8] 王振浩, 杨 璐, 田春光, 等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 137—143.
- [8] Wang Zhenhao, Yang Lu, Tian Chunguang, et al. Energy optimization of wind power-electric energy storage-regenerator combined electric boiler considering wind power dissipation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(S1): 137—143.
- [9] 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.
- [9] 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.
- [10] 郑 乐, 胡 伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533—2543.
- [10] Zheng Le, Hu Wei, Lu Qiuyu, et al. Comprehensive optimization model for planning and operation of wind energy access by energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533—2543.
- [11] 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.
- [11] Lyu Quan, Jiang Hao, Chen Tianyou, et al. Scheme of electric wind turbines for dissipating wind power and its national economic evaluation in thermal power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6—12.
- [12] 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.
- [12] Lyu Quan, Li Ling, Zhu Quansheng, et al. A comparison of coal saving effect and national economy of three kinds of wind abatement schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 75—83.
- [13] 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.
- [13] Chen Lei, Xu Fei, Wang Xiao, et al. Implementation method and effect analysis of heat storage capacity for improving wind power absorption[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4283—4290.
- [14] 贺惠民, 王海燕, 任 杰, 等. 利用风电弃风电量进行电能替代冬季供热的可行性研究[J]. 华北电力技术, 2016, (1): 1—5.
- [14] He Huimin, Wang Haiyan, Ren Jie, et al. Feasibility study of using electric power to discard wind power to substitute winter heating[J]. North China Electric Power, 2016, (1): 1—5.
- [15] 李国军, 袁铁江, 孙谊嫔, 等. 风电-氢储能与煤化工多能耦合系统全寿命周期经济性评估[J]. 电工技术学报, 2017, 32(21): 132—142.
- [15] Li Guojun, Yuan Tiejia, Sun Yijun, et al. Life cycle economic evaluation of multi-energy coupled system for wind power-hydrogen storage and coal chemical industry[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(21): 132—142.
- [16] 孙 欣, 方 陈, 沈 风, 等. 考虑风电出力不确定性的发用电机组组合方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(4): 204—211.
- [16] Sun Xin, Fang Chen, Shen Feng, et al. Combination method of generator sets considering the uncertainty of wind power output[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(4): 204—211.

WIND POWER ACCOMMODATION STRATEGY AND BENEFIT ANALYSIS OF COMBINED HEATING OF ELECTRIC AND COAL BOILERS

Ge Weichun^{1,2}, Cheng Shanshan², Sun Peng², Li Jiajue³, Shao Baozhu³, He Huan⁴

(1. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110004, China;

2. College of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

3. Electrical Power Research Institute of Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;

4. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Anshan Electric Power Co., Ltd., Anshan 114000, China)

Abstract: Aiming at the large-scale wind-dissipating problems existing in the rapid development of wind power in the “Three North” region of China, the wind-reduction and dissipation strategy based on combined heat storage of electric heat storage boilers and coal-fired boilers was studied, and a comprehensive benefit analysis model was established. Based on the wind power output and load forecasting data of the power grid operation management department, this paper proposes a wind power calculation model for a certain period of time, and on this basis, studied the “electricity-heat” of heat storage and heat release by the electric heat storage boiler. An energy conversion model was established to establish an operational strategy for the replacement of coal-fired boilers for heating by abandoning wind power. According to the total heat required by the heating network and the operation strategy of the electric heat storage boiler, the optimal coal-saving operation mode of the coal-fired boiler was studied, and a coordinated operation control strategy for electricity and coal boilers for combined heating and wind rejection was further established. The conversion model between the electric power storage heat-dissipation boiler and the coal consumption of coal-fired boilers under the same heat is studied, and a comprehensive benefit analysis model for the combination of electricity and heat boilers was proposed. The simulation analysis conducted by the wind power heating project example showed that the proposed strategy of combined heating and disposing of wind power for coal and coal boilers can effectively improve the capacity of abandoning wind and dissipate energy, at the same time, it can significantly reduce coal consumption of coal-fired boilers and improve economic and environmental benefits.

Keywords: wind power; scheduling; electric heat storage boiler; coal saving effect