

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181556

电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究

谢华宝¹, 许丹², 胡林献¹, 丁强², 宋柏越¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及其自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100089)

摘要: 配置电锅炉可削热峰填电谷, 是消纳“三北”地区弃风的主要途径之一。对比分析源侧集中式与荷侧分布式配置电锅炉的弃风消纳效果。首先在机理上从热网衰减对热源供热功率影响、热网延时而对热电机组供热功率影响、热网延时而对电锅炉供热功率和填谷效果的影响三个方面分析了两种电锅炉配置方式的消纳弃风效果的异同。然后分别构建了两种电锅炉配置方式的电热联合系统的调度模型。通过实例仿真分析, 证明了荷侧分布配置方案的热网总损耗更小, 热电机组供热功率和“以热定电”功率更小, 电锅炉的填谷效果更好, 弃风消纳效果更佳。

关键词: 电热联合系统; 电锅炉; 源侧集中配置; 荷侧分布配置; 消纳弃风

Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment

XIE Huabao¹, XU Dan², HU Linxian¹, DING Qiang², SONG Boyue¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: Configuration of electric boilers to cut heat load peak and fill power load valley is one of the main ways to reduce wind power abandoning in Northeast, North, and Northwest China. This paper compares and analyses the effect of centralized source-side and distributed load-side electric boilers on wind power curtailment. Firstly, from three aspects of the influence of heat network loss on heat power of heat source, and the influence of heat network delay on heat power of thermoelectric unit, on heat power and on effect of filling power load valley of electric boilers, the similarities and differences of wind power curtailment effect between two different electric boiler configurations are analyzed on mechanism. Then, the dispatching models of the combined heat and power system of two different electric boiler configurations are constructed respectively. Results of case simulation show that the configuration of distributed load-side electric boilers has lower total heat loss, lower heat power and power determined by heat of thermoelectric units, better effect of filling power load valley by electric boilers, and better effect of wind power curtailment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877049) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5442dz180019) “Research and Application of Global Plan Decision-making and Spot Market Core Techniques”.

Key words: combined heat and power system; electric boiler; centralized source-side configuration; distributed load-side electric boilers configuration; wind power curtailment

0 引言

“三北”(东北、华北、西北)地区电源以燃煤火电、热电为主, 抽水蓄能、燃气电站等具有灵活调节能力的电源严重缺乏。与此同时, 风能作为一

种可再生的清洁能源, 在“三北”地区储量丰富, 对于电力系统节能减排具有巨大的应用潜力^[1-2]。然而, 风电具有随机性、波动性^[3-6], 风电并网需要能够灵活调节的电源。“三北”地区冬季供暖需求大, 运行的热电机组比重高, 其“以热定电”的工况降低了系统的调峰能力^[7-9], 在风电高峰而电负荷低谷时大量风电无法上网, 造成大量弃风。据国家能源局统计, 2017年总弃风电量达419亿kW·h, 弃风率超过10%的地区包括甘肃(33%)、新疆(29%)、吉

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877049); 国家电网公司科技项目资助(5442dz180019)“全局计划决策与现货市场核心技术研究与应用”

林(21%)、内蒙古(15%)和黑龙江(14%),“三北”仍是弃风现象最为严重的地区^[10]。

目前,学者们提出的消纳弃风途径主要包括利用电锅炉^[11-20]、储热装置^[21]、热网和建筑物的蓄热特性^[20-23]等。由于电锅炉性价比高、运行灵活^[24],利用电锅炉消纳弃风成为当今的主要研究热点。

研究电锅炉消纳弃风的现有文献中,电锅炉的配置方式可分为两类:电锅炉分布配置在负荷侧(分布式配置)^[11-14,20]以及电锅炉集中配置在源侧(集中式配置)^[15-20]。

文献[11-12]研究了在热网负荷侧配置电锅炉的启停策略,算例结果表明该策略可以提升系统的弃风消纳率。文献[13-14]均研究了负荷侧配置电锅炉时储热和电锅炉配合的消纳弃风效果,文献[13]的储热装置位于源侧,文献[14]的储热装置则位于负荷侧,与电锅炉组合为储热式电锅炉,算例结果均表明储热和电锅炉配合能进一步提升系统的弃风消纳能力。文献[15]将电锅炉配置在热电厂,通过STAR-90仿真平台证明了该做法可以有效消纳风电场的过剩产能,但是仍存在电网配套设施建设、调度方式等政策性问题。文献[16]分析了在源侧配置电锅炉后热电机组的运行特性,验证了电锅炉的热电耦合作用可有效减少弃风。文献[17]研究了热电厂配置电锅炉进行合理供热,缓解大规模风电并网时的风热冲突问题。文献[18]研究了热电厂配置电锅炉的消纳弃风方案以及经济性评价。文献[19]简单说明了电锅炉的两种配置方案的优缺点,但是只分析计算了源侧配置电锅炉后系统的风电消纳率。文献[20]则研究了电锅炉配置在源侧、中间侧、负荷侧时的热网损耗,但是缺乏进一步消纳弃风效果的分析计算。上述文献主要研究电锅炉配置在源侧或负荷侧时的弃风消纳效果,缺乏两种配置方式弃风消纳效果的对比研究。

热网与电网的结构及其能量传输特性具有较大差别。电网传输延时几乎为零,可忽略;由于负荷侧分布配置的电锅炉配置在二级热网换热站,到热电厂距离较短,一般只有数公里,加之电锅炉容量较小,引起的额外电网损耗很小,可以忽略。因此两种配置方案的电网损耗相同,比较时不再考虑。分析表明,当不考虑延时、衰减等热网特性时,由于两种电锅炉配置方案的热平衡方程完全相同,消纳风电能力并无差别。但热网特性对两种电锅炉配置方式下的热电机组供热功率及其峰谷特性的影响不同,进而引起弃风消纳差异。鉴于此,本文在考虑热网特性前提下,首先从机理上分析两种电锅炉配置方式的消纳弃风效果的异同,然后分别构建两种

电锅炉配置方式下的电热联合系统调度模型,最后通过实例仿真分析,证明负荷侧分布配置电锅炉方案的热网总损耗更小、热电机组供热功率和“以热定电”电功率更小,弃风消纳效果更好。

1 电锅炉消纳弃风机理分析

1.1 不计热网特性时的电锅炉消纳弃风机理分析

现有应用电锅炉消纳弃风的文献中,绝大部分不计衰减、延时等热网特性,此时,两种配置方案的热平衡方程(热电机组供热功率与电锅炉供热功率之和等于热网总负荷)等同,因而消纳弃风的机理和效果也相同,如图1所示。

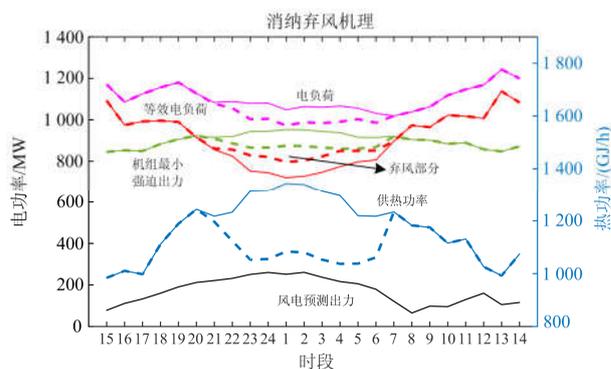


图1 消纳弃风机理

Fig. 1 Mechanism of wind power curtailment

图1中,实线表示配置电锅炉前,虚线表示配置电锅炉后。等效电负荷为电负荷与风电预测出力的差值;供热功率为热电机组的供热功率,因此供热功率的实线部分即为热网总负荷;机组最小强迫出力曲线在火电机组和热电机组最小技术出力之和的基础上预留10%的旋转备用得到,其中热电机组的最小技术出力与其供热功率线性相关。由图1可知,配置电锅炉前,在热负荷和风电高峰、电负荷低谷期,机组最小强迫出力较大,等效电负荷较小,机组的最小强迫出力大于等效电负荷,两条曲线的差值部分即为弃风部分。配置电锅炉后,电锅炉在弃风时段削热峰填电谷,使等效电负荷增大,热电机组的供热功率和最小强迫出力降低,弃风部分减少。

1.2 计及热网特性时的电锅炉消纳弃风机理分析

热能传输与电能传输不同,热网输送热能不仅存在衰减,而且有延时。衰减特性使得热源的供热功率大于热网总负荷,而热网延时特性则使热源供热功率峰谷超前于热网总负荷峰谷。因此,在研究电锅炉的消纳弃风效果时,应计及热网特性的影响。

1.2.1 源侧集中配置电锅炉

该方案将电锅炉配置在热电厂内部,电锅炉和

热电厂的供热功率在传输过程中均产生供热损耗,因此热电厂供热功率比不计热网衰减时更大,图1中的机组最小强迫出力曲线升高。在原弃风时段,机组最小强迫出力增加导致弃风部分增大;在原非弃风时段,热损相对热电厂供热功率较小,一般不会造成新的弃风。

热网延时特性使热电厂和电锅炉的供热功率经 t_k 延时后才能输送至热负荷,即热电厂和电锅炉需提前 t_k 供热,才能满足热负荷需求。从热方面看,图1中的热电厂供热功率(虚线)变化为先将热网总负荷(实线)左移 t_k 时段,然后扣除电锅炉的供热功率。在原弃风时段,热电厂供热高峰错开了风电高峰,机组最小强迫出力降低,弃风部分减小;在原非弃风时段,机组供热功率虽然也会增大,但此时风电上网空间较大,一般不会造成新的弃风。从电方面看,电锅炉的供热功率左移导致其耗电功率左移,可能影响其填电谷效果,不利于风电消纳。

1.2.2 荷侧分布配置电锅炉

该方案将电锅炉分布式配置在各热负荷点,仅热电厂的热功率存在损耗,其供热功率比不计热网衰减时增加,但比源侧集中配置电锅炉方案小。图1中的机组最小强迫出力曲线也介于二者之间。在原弃风时段,弃风部分比源侧集中配置电锅炉方案小;在原非弃风时段,同样一般不会引起弃风。

热网延时特性仅使热电厂的供热功率经 t_k 延时后才能输送至热负荷,即热电厂需提前 t_k 供热,才能与电锅炉共同满足热负荷需求。从热方面看,图1中的热电厂供热功率(虚线)变化为先将热网总负荷(实线)扣除电锅炉的供热功率,然后左移 t_k 时段。虽然此时热电厂供热高峰同样错开了风电高峰,由于源侧配置的电锅炉的供热功率存在延时,即使两种方案电锅炉的供热功率大小相同,热电厂供热功率对消纳弃风的影响也不同。从电方面看,电锅炉的供热功率没有左移,耗电功率也没有左移,可充分利用电负荷与热负荷、风电出力的反向特性,填电谷的效果好,利于风电消纳。

2 电热联合系统调度模型

2.1 源侧集中配置电锅炉方案

2.1.1 目标函数

为了响应节能减排,本文忽略风电成本,以煤耗量最低作为目标函数。目标函数如式(1)所示。

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

式中: F 为总煤耗量,单位为t; $F_{\text{CHP}}^{t,i,n}$ 为 t 时段第 i

座热电厂第 n 台机组热电厂煤耗量,单位为t/h; $F_{\text{CON}}^{t,j}$ 为 t 时段第 j 台火电厂煤耗量; Δt 为调度时间间隔,单位为h; T 为调度时段数; I 为热电厂数; N_i 为第 i 座热电厂热电厂数; J 为火电厂数。

2.1.2 约束条件

电热联合系统调度模型的约束条件分为四类。

1) 电力系统约束:包括电平衡约束,供电平衡不考虑网损,如式(2)所示。

$$\sum_{i,n} P_{\text{CHP}}^{t,i,n} + \sum_j P_{\text{CON}}^{t,j} + P_{\text{WIND}}^t = P_{\text{LD}}^t + \sum_{i,k} P_e^{t,i,k} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{CHP}}^{t,i,n}$ 为热电厂电功率,单位为MW; $P_{\text{CON}}^{t,j}$ 为火电厂电功率; P_{WIND}^t 为风电功率; P_{LD}^t 为电负荷; $P_e^{t,i,k}$ 为电锅炉电功率。

2) 机组约束:包括机组出力约束、机组爬坡约束。火电厂出力约束如式(3)所示。

$$P_{\text{CON}}^{\min} \leq P_{\text{CON}} \leq P_{\text{CON}}^{\max} \quad (3)$$

式中, P_{CON}^{\min} 、 P_{CON}^{\max} 为火电厂电功率下限、上限,单位为MW。

热电厂热出力约束、电出力约束分别如式(4)、式(5)所示。

$$D^{\min} \leq D \leq D^{\max} \quad (4)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\min} \leq P_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHP}}^{\max} \quad (5)$$

式中: D^{\min} 、 D^{\max} 为热电厂抽汽速率下限、上限,单位为t/h; P_{CHP}^{\min} 、 P_{CHP}^{\max} 为热电厂电功率下限、上限,单位为MW。

热电厂电功率上下限如式(6)、式(7)所示。

$$P_{\text{CHP}}^{\max} = a_H + b_H D \quad (6)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\min} = a_L + b_L D \quad (7)$$

式中: a_H 为纯凝工况下最大电功率; b_H 为最大凝气工况下热电厂热电比的倒数; a_L 为纯凝工况下最小电功率; b_L 为背压工况下热电厂热电比的倒数。

风电出力约束如式(8)所示。

$$0 \leq P_{\text{WIND}} \leq P_{\text{WIND}}^{\max} \quad (8)$$

式中, P_{WIND}^{\max} 为风电预测出力,单位为MW。

火电厂和热电厂的爬坡约束分别如式(9)、式(10)所示。

$$P_{\text{CON}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CON}}^t - P_{\text{CON}}^{t-1} \leq P_{\text{CON}}^{\text{up}} \Delta t \quad (9)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CHP}}^t - P_{\text{CHP}}^{t-1} \leq P_{\text{CHP}}^{\text{up}} \Delta t \quad (10)$$

式中: $P_{\text{CON}}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{CON}}^{\text{up}}$ 为火电厂单位时间最大滑坡、爬坡功率,单位为MW/h; $P_{\text{CHP}}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{CHP}}^{\text{up}}$ 为热电厂单位时间最大滑坡、爬坡功率。

3) 电锅炉约束: 两种方案的电锅炉工作原理相同, 通过消耗电能加热锅炉中的水而将电能转换成热能, 其转换大小与转换效率有关, 如式(11)所示。

$$Q_e = 3.6P_e\eta \quad (11)$$

式中: Q_e 为电锅炉热功率, 单位为 GJ/h; P_e 为电锅炉电功率, 单位为 MW; η 为电锅炉电热转换效率。

电锅炉受其容量限制, 电热转换功率有最大值, 用其电功率表示如式(12)所示。

$$0 \leq P_e \leq P_e^{\max} \quad (12)$$

式中, P_e^{\max} 为电锅炉电功率上限, 单位为 MW。

4) 热力系统约束: 热力系统约束包括热网温度约束、热网延时约束、热源约束、热负荷约束。热网温度约束包括温度衰减约束、混合温度约束、节点温度约束。忽略换热站的换热损耗以及二级热网供热损耗, 热网损耗由一级热网管道传输热能过程中温度的衰减体现。温度衰减约束体现管道首末两节点的温度衰减^[25], 如式(13)所示。

$$T_{\text{end}}^{t+t'_k} = (T_{\text{start}}^t - T_a) e^{-\frac{\lambda L_k}{C_p m_k}} + T_a \quad (13)$$

式中: t'_k 为实际延时 t_k 对调度间隔进行四舍五入得到的传输延迟时间, 单位为 h; $T_{\text{end}}^{t+t'_k}$ 和 T_{start}^t 为考虑延时管道末节点和首节点的节点温度; T_a 为环境温度, 单位为 K; λ 为管道单位长度的热转换系数; C_p 为水的比热容, 单位为 GJ/(kg·K); L_k 为管道 k 长度, 单位为 m; m_k 为管道 k 流量, 单位为 kg/h。

混合温度约束为汇流节点流出温度表达式^[25], 如式(14)所示。

$$\left(\sum m_{\text{out}}\right) T_{\text{out}} = \sum (m_{\text{in}} T_{\text{in}}) \quad (14)$$

式中: m_{out} 和 m_{in} 分别为流出和流入混合节点各管道流量, 单位为 kg/h; T_{out} 和 T_{in} 分别为流出和流入混合节点各管道工质温度, 单位为 °C。

节点温度约束如式(15)、式(16)所示。

$$T_s^{\min} \leq T_s^t \leq T_s^{\max} \quad (15)$$

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

式中: T_s^{\max} 和 T_s^{\min} 为供水网络节点最大温度和最小温度, 单位为 K; T_r^{\max} 和 T_r^{\min} 为回水网络节点最大温度和最小温度, 单位为 K。

热网延时约束体现工质流过管道的时间^[14], 如式(17)所示。

$$t_k = \frac{\pi \rho L_k d_k^2}{4m_k} \quad (17)$$

式中: 下标 k 为管道号; ρ 为水的密度, 单位为

kg/m³; t_k 为热量经管道 k 传输延迟时间, 单位为 s; d_k 为管道 k 的直径, 单位为 m。

源侧集中配置电锅炉时, 其热源约束如式(18)所示。

$$Q_{\text{CHP}}^{t,i} + Q_e^{t,i} = C_p m (T_s^{t,i} - T_o^{t,i}) \quad (18)$$

式中: 上标 i 为热源节点号; $Q_{\text{CHP}}^{t,i}$ 为热电机组热功率, 单位为 GJ/h; $T_s^{t,i}$ 和 $T_o^{t,i}$ 为节点供水温度和出口温度, 单位为 K; m 为管道总流量, 单位为 kg/h。

热负荷约束如式(19)所示。

$$Q_{\text{LD}}^{t,j} = C_p m_j (T_s^{t,j} - T_o^{t,j}) \quad (19)$$

式中: 上标 j 为热负荷节点号; $Q_{\text{LD}}^{t,j}$ 为热负荷功率, 单位为 GJ/h; m_j 为节点 j 注入流量, 单位为 kg/h。

此外, 供热抽汽速率和机组供热功率的关系如式(20)所示。

$$Q_{\text{CHP}} = D\Delta H / 1000 \quad (20)$$

式中, ΔH 为蒸汽焓降, 为 2 327.53 kJ/kg。

2.2 荷侧分布配置电锅炉方案

荷侧分布配置电锅炉时, 热负荷约束如式(21)所示。

$$Q_{\text{LD}}^{t,j} - Q_e^{t,j} = C_p m_j (T_s^{t,j} - T_o^{t,j}) \quad (21)$$

热源约束如(22)所示。

$$Q_{\text{CHP}}^{t,i} = C_p m (T_s^{t,i} - T_o^{t,i}) \quad (22)$$

目标函数和其余约束与源侧集中配置电锅炉方案相同。

3 算例分析

3.1 算例系统原始数据

算例系统包括一个 10 机电力系统以及一个含两个供热分区(每个分区有 4 节点)的热力系统。其中机组、风电场的参数和数据来自于文献[26], 电锅炉的参数如表 1 表示。

表 1 算例系统热网的电锅炉参数

Table 1 Electric boiler parameters of heat network in case system						
分布式	热电厂 1			热电厂 2		
电锅炉号	1	2	3	4	5	6
额定功率/MW	7	8	12	11	17	21
集中式配置						
电锅炉号	1	2	3	4	5	6
额定功率/MW	13.5	13.5	12.25	12.25	12.25	12.25

由表 1 可知电锅炉台数和额定功率。对于源侧集中配置电锅炉方案, 每台热电机组配置 1 台电锅炉; 对于荷侧分布配置电锅炉方案, 每个换热站配置 1 台电锅炉。两种配置方案下的电锅炉总容量相

等, 转换效率为 0.95。

热网采用质调节方式, 管道流量固定, 管道参数如表 2 所示, 热网结构如图 2 所示。最大供应温度、最小供应温度、最大回水温度、最小回水温度分别为 130℃、90℃、80℃、50℃; 环境温度为 20℃^[25], 管道单位长度的热转换系数为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ GJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$ 。

表 2 算例系统热网的管道参数

Table 2 Pipe parameters of heat network in case system

管道号	长度/m	直径/m	流量/(10 ⁶ kg/h)	延时/h
1	5 000	1.0	2.210 5	2
2	3 000	1.0	1.640 8	1
3	2 000	1.0	1.008 4	2
4	5 000	1.0	4.049 1	1
5	3 000	1.0	3.113 6	1
6	2 000	1.0	1.733 2	1

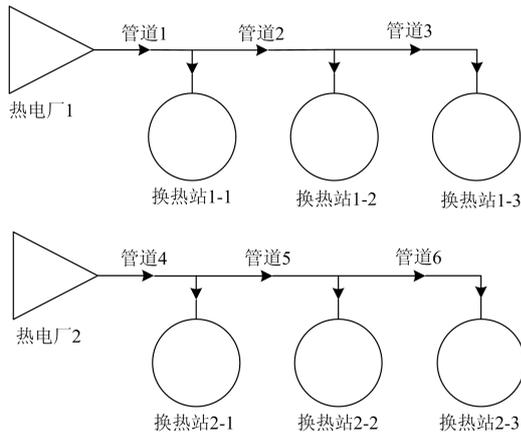


图 2 算例系统热网结构

Fig. 2 Heat network structure of case system

算例中共有 10 台机组, 1—6 号机组为热电机组, 7—10 号机组为火电机组, 其中 1—2 号机组属热电厂 1, 3—6 号机组属热电厂 2。

取调度周期为 1 天, 调度间隔为 1 小时, 每个时段的电、热负荷数值可在文献[26]中查阅。

3.2 计算结果与分析

3.2.1 供热损耗对比分析

由于电锅炉配置地点不同, 供热损耗也不同, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 弃风时段 1—2, 分布配置方案比集中配置方案共节约供热损耗 4.75 GJ/h, 节约的供热损耗能进一步降低热电机组“以热定电”电功率下限, 消纳更多弃风。在非弃风时段, 分布配置方案的供热损耗除热电厂 1 在时段 3—8 略大于集中配置方案外, 均比集中配置方案小, 但此时无弃风差

别。分布配置方案在弃风时段节约的供热损耗计算对应的弃风消纳量仅为 0.37 MW(两种方案弃风消纳差异量为 7.70 MW), 说明热网衰减对两种电锅炉配置方式的弃风消纳效果影响差别较小。

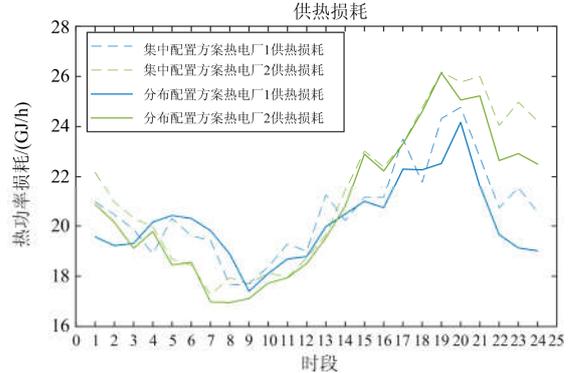


图 3 两种方案的热网损耗

Fig. 3 Heat network loss of two configurations

由供热损耗对比分析可知, 热网衰减影响热源供热损耗, 使荷侧分布配置电锅炉消纳弃风效果稍优于源侧集中配置电锅炉。

3.2.2 热电厂供热功率对比分析

热电厂供热功率的对比如图 4 所示。

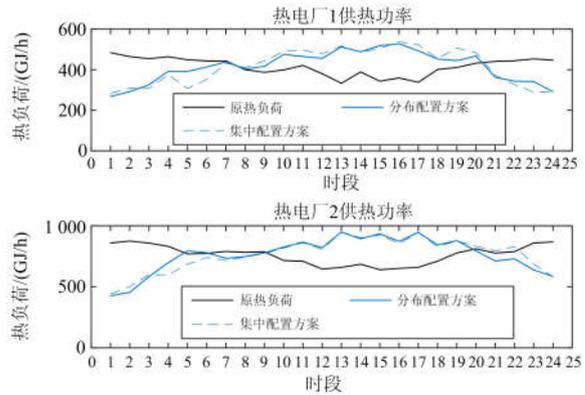


图 4 热电厂供热功率对比

Fig. 4 Heat power comparison of thermal power plant

两个热电厂供热功率曲线类似, 以热电厂 2 为例。由图 4 可知, 热网延时特性使热电厂供热功率高峰早于热网总负荷高峰, 且早于风电高峰, 因此风电高峰时热电厂供热功率减小, 利于风电消纳。但在弃风时段 1—2, 分布式配置方案的供热功率比集中配置方案小 61.80 GJ/h, 而此时两种方案的电锅炉均处于最大出力, 因此分布配置方案的热电机组“以热定电”功率下限更低, 能多消纳 4.78 MW 风电。在非弃风时段 3—19, 分布式配置方案的供热功率比集中配置方案大 328.81 GJ/h, 但此时无弃风。在非弃风时段 20—24, 分布式配置方案的供热

功率比集中式配置方案小 267.00 GJ/h, 是由于两种方案的热网总负荷相同, 各时段供热功率之和应相等。

由热电厂供热功率对比分析可知, 热网延时影响热电厂供热功率, 使荷侧分布配置电锅炉消纳弃风效果明显优于源侧集中配置电锅炉。

3.2.3 电锅炉填谷效果对比分析

电锅炉总耗电功率如图 5 所示。

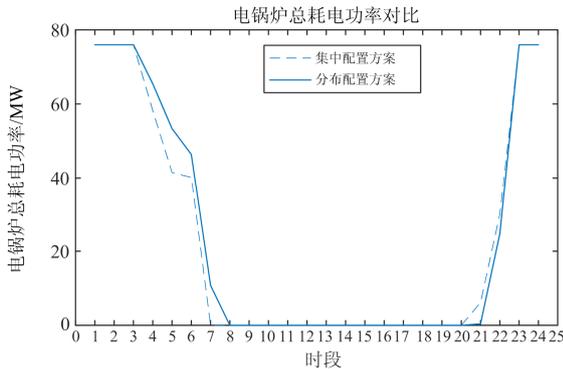


图 5 电锅炉总耗电功率对比

Fig. 5 Heat power comparison of electric boiler

由图 5 可知, 在时段 1—3、23—24, 两种方案供热区域 1 的电锅炉耗电功率相同, 均为最大值 76 MW, 此时电锅炉的填电谷效果相同, 由于弃风时段为 1—2, 两种方案电锅炉消纳弃风效果相同。在电谷时段 4—8, 集中配置方案热电厂 1 电锅炉耗电功率相较于分布配置方案左移, 此时电锅炉耗电功率逐渐减小, 分布配置方案填电谷效果更好; 在另一电谷时段 20—22, 集中配置方案热电厂 1 电锅炉耗电功率也相较于分布配置方案左移, 此时电锅炉耗电功率逐渐增大, 集中配置方案填电谷效果更好。总体上看, 分布配置方案总耗电功率更大, 因此填电谷效果更好。但时段 4—8、20—22 弃风已完全被消纳, 此时填电谷效果的差异并不会引起消纳弃风效果的差异。

由电锅炉填谷效果对比分析可知, 热网延时影响电锅炉供热功率从而影响其耗电功率, 由于弃风时电锅炉耗电功率一般最大, 虽然分布配置方案非弃风时段总体填电谷效果更好, 两种方案的电锅炉填谷效果对弃风消纳效果的影响相同。

3.2.4 煤耗与弃风对比分析

使用内点法对算例系统进行求解。两种电锅炉配置方案的实际风电上网功率如图 6 所示。

由图 6 可知, 在时段 1—2, 电锅炉分布配置方案比集中式配置方案分别多消纳 2.54、5.16 MW, 其他时段无弃风。计算同时表明, 不考虑热网延时

特性时的弃风时段有 1~7、21~24, 考虑热网延时特性使时段 21~24、3~7 的弃风完全被消纳。

两种电锅炉配置方案及不配置电锅炉时的煤耗量与弃风率如表 3 所示。

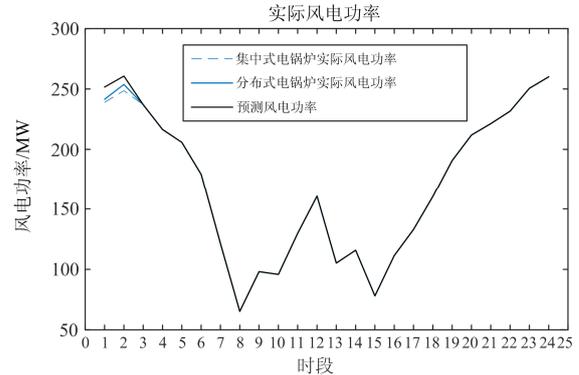


图 6 两种方案的实际风电上网功率

Fig. 6 Actual wind power on grid of two configurations

表 3 不同情况下的煤耗量与弃风率

Table 3 Coal cost and wind power curtailment rate in different conditions

	无电锅炉	集中式配置	分布式配置
煤耗量 t	12 515.71	12 306.41	12 303.58
弃风量/MWh	705.87	24.71	17.01
弃风率	17.25%	0.60%	0.42%

由表 3 可知, 配置电锅炉能节约超过 200 t 的煤耗, 并消纳约 680 MW·h 的弃风, 其中电锅炉分布式配置方案的弃风率较集中式配置方案低 0.18%, 煤耗也更少。如果仅计及热网衰减特性, 则无电锅炉、集中式配置、分布式配置三种情况的弃风率分别为 23.58%、5%、4.96%, 此时两种电锅炉配置方案的弃风率差别极小, 这是由于电锅炉供热比重低, 且只有弃风时段的供热损耗才影响弃风率。

以上分析可知, 热网延时特性有利于消纳弃风, 且电锅炉分布式配置方案比集中式配置方案能消纳更多弃风。

4 结论

本文详细对比分析了源侧集中配置电锅炉方案与荷侧分布配置电锅炉方案的弃风消纳效果, 得到了以下结论。

1) 热网衰减特性增加供热损耗和热源供热功率, 造成弃风增加; 热网延时特性引起热电机组供热功率高峰超前热网总负荷高峰和风电高峰, 有利于消纳更多弃风。

2) 无论从机理分析还是定量计算, 相比于源侧

集中配置电锅炉方案, 荷侧分布配置电锅炉方案的热网总损耗更小、热电机组“以热定电”功率更小、电锅炉的填谷效果更好、弃风消纳效果更佳。

参考文献

- [1] 董永平, 何世恩, 刘峻, 等. 低碳电力视角下的风电消纳问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 12-16.
DONG Yongping, HE Shi'en, LIU Jun, et al. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 12-16.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2018 [EB/OL]. [2018-04-25]. <http://gwec.net/reports/>.
- [3] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongling, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [4] LIN Feng, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.
- [5] 舒隽, 刘祥瑞. 考虑风电的电源电网协调规划[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 93-99.
SHU Jun, LIU Xiangrui. Generation and transmission coordinated planning considering wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 93-99.
- [6] 马留洋, 孟安波, 胡函武. 基于离散纵横交叉算法的含风电电力系统机组组合优化[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 38-44.
MA Liuyang, MENG Anbo, HU Hanwu. Optimization on power system unit commitment with wind power based on discrete crisscross algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 38-44.
- [7] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [8] 许丹, 丁强, 黄国栋, 等. 考虑电网调峰的热电联产热负荷动态调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(11): 59-64.
XU Dan, DING Qiang, HUANG Guodong, et al. Cogeneration unit dynamic scheduling model considering peak-load ability[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(11): 59-64.
- [9] 程中林, 杨莉, 江全元, 等. 储热消纳弃风的市场竞价策略算法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 31-38.
CHENG Zhonglin, YANG Li, JIANG Quanyuan, et al. Research on bidding algorithm for wind accommodation by thermal storage market[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 31-38.
- [10] 国家能源局. 2017 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2018-02-01]. http://nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm/.
- [11] 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 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.
- [12] 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.
- [13] 李虹, 王晓丹, 周晓洁, 等. 基于储热热电机组和电锅炉的风电消纳调度模型[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(1): 11-17.
LI Hong, WANG Xiaodan, ZHOU Xiaojie, et al. Wind power accommodation dispatching model based on thermoelectric unit with heat storage device and electric boiler[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(1): 11-17.
- [14] 郭丰惠, 胡林献, 周升彧. 基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 50-56.
GUO Fenghui, HU Linxian, ZHOU Shengyu. Dispatching model of wind power accommodation based on heat storage electric boiler for peak-load regulation in secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 50-56.
- [15] 李笑宇, 刘卓, 杜徽, 等. 基于电锅炉的火电厂消纳风电系统运行性能仿真研究[J]. 电力科学与工程, 2017, 33(8): 54-59.
LI Xiaoyu, LIU Zhuo, DU Hui, et al. Simulation of electric boiler based on thermal power plant wind power integration system[J]. Electric Power Science and Engineering, 2017, 33(8): 54-59.

- [16] 郑权国, 陈彦秀, 周任军, 等. 调峰补偿热机组及风电消纳能力的优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(1): 51-57.
ZHENG Quanguo, CHEN Yanxiu, ZHOU Renjun, et al. Optimization model for CHP unit with peak load compensation and wind power accommodation capacity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(1): 51-57.
- [17] 吕泉, 胡炳延, 王海霞, 等. 风热冲突下热电厂供热问题研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 236-244.
LÜ Quan, HU Bingyan, WANG Haixia, et al. Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 236-244.
- [18] 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.
LÜ 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.
- [19] 彭博阳. 基于电锅炉的电热综合调度模型[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.
PENG Boyang. Electrothermal comprehensive scheduling model based on electric boiler[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [20] 卢志刚, 杨宇, 耿丽君, 等. 基于 Benders 分解法的电热综合能源系统低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1922-1934, 2208.
LU Zhigang, YANG Yu, GENG Lijun, et al. Low-carbon economic dispatch of the integrated electrical and heating systems based on benders decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1922-1934, 2208.
- [21] 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.
LÜ 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.
- [22] PFEIFFER R, VERSTEGE J. Committing and dispatching power units and storage devices in cogeneration systems with renewable energy sources[J]. International Conference on Power System Control & Management, April 16-18, 1996, London, UK: 21-25.
- [23] PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia[J]. Applied Energy, 2017, 192: 395-407.
- [24] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.
- [25] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2015, 162: 1238-1250.
- [26] 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. Wind power consumption problem in the view of low carbon power[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-24

作者简介:

谢华宝(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电热联合系统优化调度; E-mail: 412571832@qq.com

许丹(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网节能经济调度与系统开发;

胡林献(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: Linxian_hu@163.com

(编辑 葛艳娜)