

热网特性对弃风消纳效果的影响研究

谢华宝¹,戴 赛²,许 丹²,胡林献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有限公司,北京 100089)

摘要:储热可平移热负荷,通过削热峰填热谷解耦热机组“以热定电”约束,提高风电消纳率,故而研究了热网储热、衰减、延时特性对弃风消纳效果的影响。分析了不考虑热网衰减、延时特性时管网储热的弃风消纳机理以及热网衰减、延时特性对管网储热弃风消纳效果的影响。建立了管网储热模型,构建了计及热网储热、衰减、延时特性的电热联合系统调度模型。实例仿真分析结果表明:管网储热配合电锅炉可进一步消纳弃风,且可替代储热式电锅炉的储热装置,节约装置成本;衰减特性引起了热网供热损耗和热源供热功率增加以及管网储热量减少,不利于消纳弃风;延时特性使热机组供热功率与风电错峰,有利于消纳更多弃风,但不会影响管网储热量和管网储热的弃风消纳效果。

关键词:电热联合系统;管网储热;延时特性;衰减特性;弃风消纳

中图分类号:TM 614;TK 01

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004011

0 引言

“三北”地区具有丰富的风能,在电力系统中有巨大的应用潜力^[1-2],但风电的随机性、波动性^[3-4]使其并网时需要能够灵活调节的电源。在“三北”地区,以燃煤火电、热电为主的电源结构单一、灵活性不足;同时冬季供暖需求大、热电机组运行比重大;且热电机组受“以热定电”约束^[5]。在风电、热负荷高峰而电负荷低谷时,这3种因素导致系统调峰能力不足,进而产生大量弃风。据国家能源局统计,2018年我国总弃风电量达 2.77×10^{10} kW·h,而“三北”地区弃风电量占总弃风电量的98.6%^[6],弃风现象严重。储热可平移热负荷实现削热峰填热谷,而热能传输又存在损耗和延迟,因此,结合储热与热网特性的消纳弃风策略已成为研究热点^[7-15]。

文献[7]考虑热网互联特性和建筑物的储热特性,建立了电力系统灵活性调度模型。文献[8]计及热网衰减、延时特性,建立了基于二级热网储热式电锅炉的弃风消纳调度模型。文献[9]分析了热网衰减、延时特性,以及采暖用户热惯性对热电机组供热负荷的影响。文献[10]考虑热网延时特性,通过电热分时间尺度平衡提高机组运行的灵活性,研究了综合能源系统的日前经济调度。文献[11]考虑用户互补聚合响应和热能传输延时特性,研究了综合能源园区运营商的日前和日内两阶段优化调度策略。文献[12]提出管网具有储热潜力,计算了管网的最大

储热量及最大储放热功率,分析结果表明储能环节有助于消纳可再生能源。文献[13]建立了考虑热网储热特性的电热综合能源系统优化调度模型,通过2个实例计算验证了所建模型可提高可再生能源的消纳水平。文献[14]用节点温度变化量衡量热网储热对热网的影响,研究了高渗透率风电条件下热电机组多时间尺度灵活性对风电消纳、系统备用需求的影响。文献[15]研究了计及热网衰减、延时特性的电热联合系统调度方法,算例分析表明热网延时特性有利于风电上网,热网衰减特性则对风电上网不利。

综上所述,热网具有衰减、延时、储热特性,而现有文献仅研究了热网储热特性或热网衰减、延时特性对电热联合系统弃风消纳效果的影响。本文综合分析热网储热、衰减、延时特性对弃风消纳效果的影响。首先分析不考虑热网衰减、延时特性时管网储热的弃风消纳机理,以及热网衰减、延时特性对管网储热弃风消纳效果的影响;然后结合虚拟储热罐的概念建立管网储热模型,构建计及热网储热、衰减、延时特性的电热联合系统调度模型;最后通过实例仿真,对比分析了热力系统管网储热与储热式电锅炉储热的弃风消纳效果。

1 管网储热消纳弃风机理分析

热力管网通过提高供水网络的供水温度直接储热。管网在弃风时段放热,减少热电机组供热功率,降低其电功率下限,增大风电上网空间从而消纳弃风。

1.1 不计热网衰减、延时特性时的消纳弃风机理

考虑调峰电锅炉和管网储热协调,弃风时段热电机组的运行特性如图1所示。图中,AD段为纯凝工况下的运行特性;AB段、CD段分别为最大、最小

收稿日期:2019-10-29;修回日期:2020-02-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877049);国家电网公司科技项目(5442dz180019)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877049) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5442dz180019)

凝气工况下的运行特性,斜率均为 c_v ;BC段为背压工况下的运行特性,斜率为 c_m ;点E为弃风时段热电机组原运行点;点F为电锅炉启动后热电机组的运行点;点G为管网放热后的运行点; Q_e 、 P_e 分别为电锅炉热功率(LK段)、电功率(IK段),IL段的斜率 c_e 为其电热转换效率的倒数; Q_{st} 为管网的储放热功率(GJ段); ΔP_w 为消纳的风电功率(EK段)。

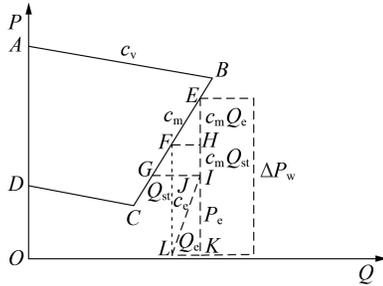


图1 管网储热协调电锅炉的弃风时段机组运行特性

Fig.1 Units operating characteristics of pipe network heat storage coordinated with electric boilers in wind abandon period

当系统出现弃风现象时,调峰电锅炉启动,通过电热转换填电谷削热峰,直接消纳弃风;若弃风严重,则管网放热进一步削热峰,减少热电机组供热功率,降低其电功率下限而消纳更多弃风。此时电锅炉消耗弃风电量(IK段)填电谷,同时削热峰使热电机组供热功率减小(FH段),运行点由点E到点F。管网放热削热峰则使热电机组供热功率进一步减小(GJ段),运行点再由点F到点G。因此总弃风消纳量(EK段)为 $\Delta P_w = P_e + c_m(Q_e + Q_{st})(IK + EH + HI)$ 段)。

1.2 热网衰减、延时特性对消纳弃风的影响

在无弃风现象的热负荷低谷时段,热电机组供热功率较小,此时可增大热电机组供热功率以便于管网储热。由1.1节的分析可知,管网在弃风严重时段放热,管网储热能够增加的弃风消纳量与放热量正相关。管网在一个调度周期内的储热量等于放热量,因此管网储热对弃风消纳效果的影响与其实际储热量正相关。

热网衰减特性的影响主要体现在:①热电机组供给热负荷的功率相比于不考虑热网衰减特性时更大,弃风时段热电机组“以热定电”电功率下限更高,因此弃风量增加;②管网储存相同热量时,热电机组供给管网储热的热功率相比于不考虑热网衰减特性时更大,因此,管网储热开始时间应尽量滞后于风电高峰,避免管网储热引起的热电机组供热功率增加与风电高峰重叠;③管网放热的损耗率比热电机组供热功率的损耗率低,因此,在风电高峰时段提高管网放热功率有利于快速降低热电机组热功率和弃风

消纳。

热网延时特性的影响主要体现在:①热电机组供给热负荷的功率高峰提前,与风电高峰时段错开,缓解了“风热”矛盾,弃风量减少;②管网储热功率需热电机组提前输出,因此,管网储热开始时间滞后风电高峰的时间应不低于热网延时时间,避免管网储热引起的热电机组供热功率增加与风电高峰重叠;③管网放热的延时比热电机组供热功率的延时短,因此,风电高峰时段提高管网放热功率不利于热电机组热功率与风电错峰和弃风消纳。

2 计及热网特性的电热联合系统调度模型

2.1 目标函数

本文以煤耗量最低为目标函数,如式(1)所示。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l} F_{\text{CHP}}^{t,l,n} + \sum_{m=1}^M F_{\text{CON}}^{t,m} \right) \Delta t \quad (1)$$

其中, F 为总煤耗量,单位为 t ; $F_{\text{CHP}}^{t,l,n}$ 为第 t 时段第 l 座热电厂第 n 台热电机组煤耗量,单位为 t/h ; $F_{\text{CON}}^{t,m}$ 为第 t 时段第 m 台火电机组煤耗量; Δt 为调度时间间隔,单位为 h ; T 为调度时段数; L 为热电厂数; N_l 为第 l 座热电厂热电机组数; M 为火电机组数。

2.2 约束条件

约束条件分为以下4类。

(1)电力系统约束。其具体为电平衡约束,如式(2)所示。

$$\sum_{l,n} P_{\text{CHP}}^{t,l,n} + \sum_m P_{\text{CON}}^{t,m} + P_{\text{WIND}}^t = P_{\text{LD}}^t + \sum_{l,s} P_e^{t,l,s} \quad (2)$$

其中, $P_{\text{CHP}}^{t,l,n}$ 为热电机组电功率,单位为 MW ; $P_{\text{CON}}^{t,m}$ 为火电机组电功率; P_{WIND}^t 为风电功率; P_{LD}^t 为电负荷; $P_e^{t,l,s}$ 为第 s 台电锅炉电功率。

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

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

其中, P_{CON}^{\min} 、 P_{CON}^{\max} 分别为火电机组电功率下限、上限,单位为 MW 。

热电机组热出力约束、电出力约束分别如式(4)和式(5)所示。

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

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

其中, D 和 D^{\min} 、 D^{\max} 分别为热电机组抽汽速率和其下、上限,单位为 t/h ; P_{CHP}^{\max} 、 P_{CHP}^{\min} 分别为热电机组电功率上、下限,单位为 MW ,分别如式(6)和式(7)所示。

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

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

其中, 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机组供电供热比; a_L 为纯凝工况下最小电功率; b_L 为背压工况下热电机组供电供热比。

风电出力约束如式(8)所示。

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

其中, $P_{\text{WIND}}^{\text{max}}$ 为风电预测出力, 单位为 MW。

火电机组和热电机组的爬坡约束分别如式(9)和式(10)所示。

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

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

其中, $P_{\text{CON}}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{CON}}^{\text{up}}$ 分别为火电机组单位时间最大滑坡、爬坡功率, 单位为 MW/h; $P_{\text{CHP}}^{\text{down}}$ 、 $P_{\text{CHP}}^{\text{up}}$ 分别为热电机组单位时间最大滑坡、爬坡功率。

(3) 电锅炉约束。管网储热配置的电锅炉仅含直供部分, 其热功率 Q_e 如式(11)所示。

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

其中, η 为电锅炉电热转换效率。

电锅炉容量有最大值约束, 如式(12)所示。

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

其中, P_e^{max} 为电锅炉电功率上限, 单位为 MW。

储热式电锅炉由直供热和电储热两部分组成, 文献[8]已建立了其模型, 本文采用该模型, 具体公式不再赘述。电储热部分在同一时段仅能处于储热状态或放热状态。

(4) 热力系统约束。本文热力系统考虑衰减、延时、储热特性, 以节点温度为中间变量建立热源功率和热负荷功率供需平衡的模型。

考虑延时特性, 工质流过管道存在时间差^[8], 如式(13)所示。

$$t_k = \frac{\pi \rho L_k d_k^2}{4m_k} \quad (13)$$

其中, 下标 k 表示管道编号; ρ 为水的密度, 单位为 kg/m^3 ; t_k 为热量经管道 k 传输延迟时间, 单位为 h; L_k 为管道 k 长度, 单位为 m; d_k 为管道 k 的直径, 单位为 m; m_k 为管道 k 流量, 单位为 kg/h 。

考虑衰减特性, 管道末节点温度要低于首节点温度^[16], 如式(14)所示。

$$T_{\text{end}}^{t+t'_k} = (T_{\text{start}}^t - T_a) e^{-\frac{\lambda L}{C_p m_k}} + T_a \quad (14)$$

其中, 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 分别为考虑延时管道末节点和首节点的节点温度, 单位为 K; T_a 为环境温度; 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 $\text{GJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

考虑管网储热特性, 管网储热会引起供水网络温度升高, 而放热则会导致供水网络温度下降^[17]。计及热网衰减、延时特性后, 反映管网储放热与各节点供水温度之间关系的管网储放热模型是一组复杂的非线性积分方程, 使得调度模型过于复杂, 难以优化。如对于单管道 k 网络, 其管道储放热功率(首节

点 00:00 时刻时)与末节点的供水温度变化量如式(15)所示。

$$\Delta T = \int_0^{L_k} \left[\left(\frac{\sum_{t=0}^{t_k} Q_{\text{st}}^{t,k}}{C_p m_k L_k t_k} - T_a \right) e^{-\frac{\lambda L'}{C_p m_k}} + T_a \right] dL' \quad (15)$$

其中, ΔT 为管网储放热导致的末节点的供水温度变化量, 单位为 K; $Q_{\text{st}}^{t,k}$ 为管道 k 在时刻 t 的储放热功率, 单位为 GJ/h ; L' 为距离管道首节点的距离, 单位为 m。

由于管道越长, 热量传输延时越长, 衰减越大, 因此, 用中点法取管网储放热功率在时间中点与长度中点处的值来近似通过式(15)计算得到的末节点的供水温度变化量, 即类似于电力系统中用一个线路电阻来等效线路分布式参数, 将每段管网的储热功能用一个布置在管道中点的虚拟蓄热罐来集中模拟, 以简化模型, 如图2所示。

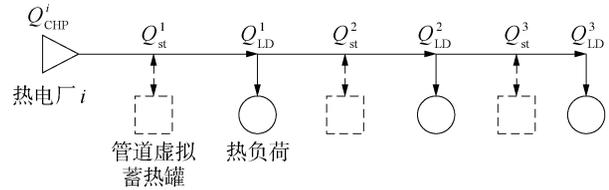


图2 管网虚拟蓄热罐

Fig.2 Virtual heat storage tank of pipe network

虚拟蓄热罐放热时经过 1/2 的管道延时后影响管道末端热负荷节点的供水温度, 如式(16)所示。

$$Q_{\text{st}}^{t-t_{1/2}^k} \Delta t = C_p \rho V_k (T_s^{t,j} - T_s^{t+1,j}) \quad (16)$$

其中, $Q_{\text{st}}^{t-t_{1/2}^k}$ 为管道 k 处管网的储放热功率, 单位为 GJ/h ; $t_{1/2}^k$ 为管道 k 中点到末端热负荷节点处延时四舍五入后的时间, 单位为 h; V_k 为管道 k 的体积, 单位为 m^3 ; $T_s^{t,j}$ 和 $T_s^{t+1,j}$ 分别为管道 k 末端热负荷节点在时段 t 和时段 $t+1$ 的供水温度, 单位为 K。

根据文献[14], 管网最大储热量、最大储放热功率分别如式(17)和式(18)所示。

$$H_{\text{stmax}}^{t,k} = C_p \rho V_k (T_s^{\text{max}} - T_s^{\text{min}}) \quad (17)$$

$$Q_{\text{stmax}}^k = C_p m_k (T_s^{\text{max}} - T_s^{\text{min}}) \quad (18)$$

其中, $H_{\text{stmax}}^{t,k}$ 为管道 k 的最大储热量, 单位为 GJ ; Q_{stmax}^k 为管道 k 中点处最大储放热功率, 单位为 GJ/h ; T_s^{max} 和 T_s^{min} 分别为供水网络最大供水温度和最小供水温度, 单位为 K。

管网储放热功率上下限约束如式(19)所示。

$$-Q_{\text{stmax}}^k \leq Q_{\text{st}}^k \leq Q_{\text{stmax}}^k \quad (19)$$

为了维持供热稳定, 管网在一个调度周期内的净储热量为 0, 如式(20)所示。

$$\sum_{t,k} Q_{\text{st}}^{t,k} \Delta t = 0 \quad (20)$$

汇流节点流出温度通过流入温度和流入流量计

算^[16],如式(21)所示。

$$\left(\sum m_{\text{out}}\right)T_{\text{out}} = \sum (m_{\text{in}}T_{\text{in}}) \quad (21)$$

其中, m_{out} 和 m_{in} 分别为流出和流入混合节点的各管道流量,单位为 kg/h ; T_{out} 和 T_{in} 分别为流出和流入混合节点的各管道工质温度,单位为 K 。

节点温度上下限约束如式(22)和式(23)所示。

$$T_s^{\min} \leq T_s^t \leq T_s^{\max} \quad (22)$$

$$T_r^{\min} \leq T_r^t \leq T_r^{\max} \quad (23)$$

其中, T_s^t 和 T_o^t 分别为节点供水温度和出口温度; T_r^{\max} 和 T_r^{\min} 分别为回水网络节点最大出口温度和最小出口温度,单位均为 K 。

热源功率与节点温度关系如式(24)所示。

$$Q_{\text{CHP}}^{t,i} = C_p m (T_s^{t,i} - T_o^{t,i}) \quad (24)$$

其中,上标 i 为热源节点编号; $Q_{\text{CHP}}^{t,i}$ 为热电机组热功率,单位为 GJ/h ; m 为管道总流量,单位为 kg/h 。

热负荷功率与节点温度关系如式(25)所示。

$$Q_{\text{LD}}^{t,j} - Q_e^{t,j} - Q_{\text{st}}^{t_{\text{st}},k} = C_p m_j (T_s^{t,j} - T_o^{t,j}) \quad (25)$$

其中,上标 j 为热负荷节点编号; $Q_{\text{LD}}^{t,j}$ 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关系如式(26)所示。

$$Q_{\text{CHP}} = D\Delta H/1000 \quad (26)$$

其中, ΔH 为蒸汽焓降,取 $2327.53 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

3 算例分析

3.1 算例系统原始数据

通常认为电网负荷在白天处于高峰、夜晚处于低谷,与热网负荷、风电出力的峰谷特性相反,而热网负荷与风电场出力的峰谷特性大致相同。在上述典型的峰谷矛盾场景下,产生了弃风现象。因此本文针对这类典型场景进行分析,设置的算例也符合上述特性。算例系统由电力系统以及热力系统两部分组成。电力系统部分包含6台热电机组(配置在2座热电厂中)、4台火电机组,机组、风电场的参数和数据详见文献[18],将热电机组电功率下限修改为 50 MW ,风电预测出力为原数据的1.5倍。热力系统部分包含2个供热分区,分别由2台、4台热电机组供热,拓扑结构见文献[8]。热网采用质调节方式,管道参数如附录表A1所示,管网最大储水温度、最小储水温度、最大回水温度、最小回水温度分别为 110 、 100 、 80 、 $50 \text{ }^\circ\text{C}$,环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,热转换系数为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ GJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$ 。

管网最大储热量、最大储放热功率如附录表A2所示,每个换热站配置1台电锅炉,电锅炉电热转换效率为 0.95 ,配置的电锅炉容量如附录表A3所示。

算例中取调度周期为 1 d 、调度间隔为 1 h ,各时段的热负荷数值详见文献[18],电负荷数值详见

附录表A4。本文所建调度模型为二次规划模型,在MATLAB R2018a环境下调用GUROBI 8.0.1优化软件进行求解。

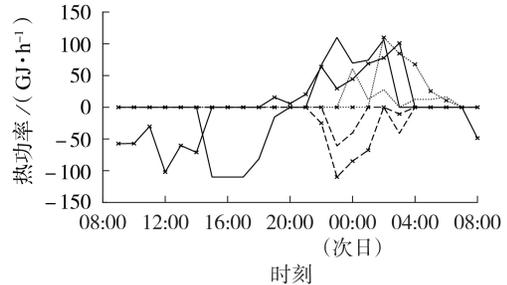
3.2 计算结果与分析

储热式电锅炉与管网储热的储热方式不一样,但都利于风电消纳,文献[8]构建了含储热式电锅炉的电热联合系统弃风消纳调度模型。本文针对以下4种场景,对2种储热方式的弃风消纳效果进行对比分析,仿真中管道的最大储热量、最大储放热功率与管道末端换热站配置的储热式电锅炉保持相等。场景1,不考虑热网特性;场景2,仅考虑热网延时特性;场景3,仅考虑热网衰减特性;场景4,同时考虑热网衰减、延时特性。

无储热无电锅炉时,计算得到弃风时段为次日01:00—06:00、22:00至次日00:00,其中在次日01:00(126.14 MW)、次日02:00(126.00 MW)、次日00:00(101.80 MW)时的弃风功率均大于 100 MW 。不利用储热,仅通过电锅炉消纳弃风时,计算得到弃风时刻为次日01:00(28.17 MW)、次日02:00(23.03 MW)、次日00:00(3.82 MW)。

3.2.1 储热对比分析

以热电厂2为例,场景1和场景2下2种储热方式的储放热功率如图3所示。



— 场景1下管网储放热功率, 场景1下电锅炉放热功率
--- 场景1下电锅炉储热功率, — 场景2下管网储放热功率
-·- 场景2下电锅炉放热功率, -·- 场景2下电锅炉储热功率

图3 场景1和场景2下管网和储热式电锅炉储热对比
Fig.3 Comparison of heat storage between pipe network and electric boilers under Case 1 and Case 2

图3中,管网储放热功率为热电厂2管网的3段管道储放热功率之和,电锅炉放热或储热功率也为热电厂2所供3个换热站的电锅炉放热或储热功率之和。由图3可知,不考虑热网衰减、延时特性时,管网在热负荷低谷时段(15:00—19:00时段)储热 426.99 GJ ;储热式电锅炉则在热负荷非高峰、弃风较小的时刻(23:00、次日00:00、次日03:00)储热 142.15 GJ ,这是由于储热式电锅炉采取弃风启动控制策略,在热负荷、风电出力高峰期,储热式电锅炉消耗的弃风则全部用于直供热。管网实际储热量明显比储热式电锅炉大。管网放热时长持续 5 h (22:00至次日02:00时段),储热式电锅炉则在弃风严重时

段(次日00:00—02:00时段)放热101.08 GJ,2种储热方式均在弃风严重时段(次日00:00—02:00时段)利用大部分储热量来消纳弃风。在次日00:00时,储热式电锅炉直供部分已消纳大部分弃风,剩余的少量弃风中,一部分由部分电锅炉通过电储热消纳,而另一部分则由其他电锅炉通过放热降低热电机组“以热定电”电功率下限的方式消纳。图3中电锅炉功率为3台电锅炉功率之和,但分别统计得到储热式电锅炉的储热功率、放热功率,因此,部分时刻既有储热功率又有放热功率(图4类似)。

不考虑热网衰减、延时特性时,供热分区2管网达最大储热量。若将最大供水温度提升1℃,供热分区2管网最大储热量可提高42.70 GJ,若在某严重弃风时段将此热量用于降低热电机组“以热定电”电功率下限来消纳弃风,为达到相同的弃风消纳效果,储热式电锅炉需要额外消耗12.49 MW储热用的电功率。可以看出,管网储热能够替代大规模容量的储热式电锅炉的储热部分来消纳弃风。

考虑延时特性后,管网提前储热和放热,这是因为热电机组提前供热,管网储放热的影响由各管道中点的虚拟储热罐储放热模拟,管网也提前了一半的延时时间储热和放热。2种场景下的管网实际储热量基本相等,而储热式电锅炉实际储热量增大为298.38 GJ,储热式电锅炉储热用耗电量明显增大。储热式电锅炉在弃风时段消耗弃风电功率,并在供热高峰时段放热降低热电机组“以热定电”电功率下限来消纳弃风。在考虑热网延时后,供热高峰时段提前,与弃风高峰错开,此时储热式电锅炉储热部分可在不同的时段放热和消耗弃风电功率储热,比同时消耗弃风电功率和放热的直供热部分更能适应热网延时特性的影响,因此储热式电锅炉储、放热量增大。

以热电厂2为例,场景2和场景4下2种储热方式的储放热功率如图4所示。

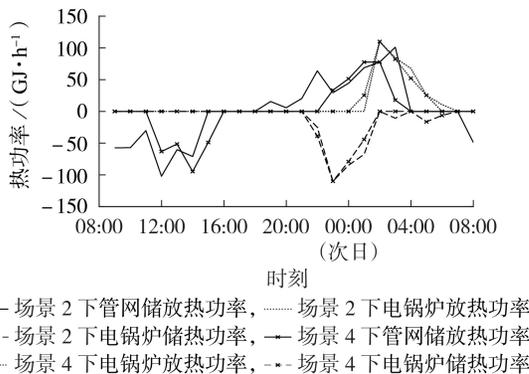


图4 场景2和场景4下管网和储热式电锅炉储热对比
Fig.4 Comparison of heat storage between pipe network and electric boilers under Case 2 and Case 4

由图4可知,考虑衰减特性后,管网实际储热量由426.99 GJ减少为258.20 GJ,而储热式电锅炉安装

在热负荷节点,储热量不受衰减特性的影响,基本保持不变(295.08 GJ)。

3.2.2 热电厂供热功率对比分析

以热电厂2为例,场景1—3下2种储热方式的热电厂供热功率如图5所示。

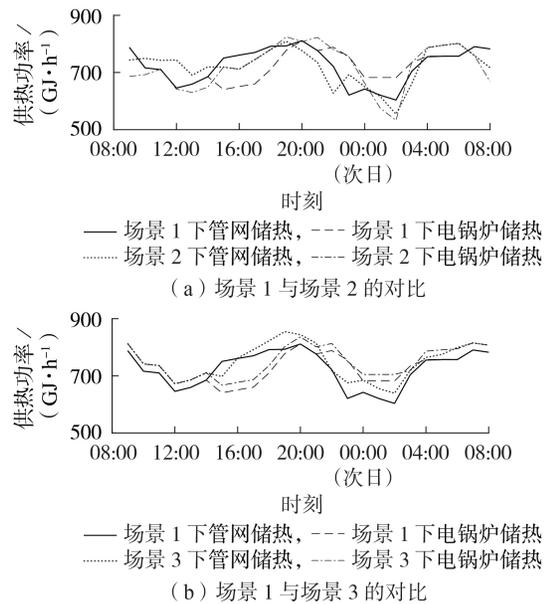


图5 3种场景下热电厂2供热功率对比

Fig.5 Comparison of heat power for Thermal Power Plant 2 under three cases

由图5可知,不考虑热网特性时,在15:00—19:00时段,管网储热使热电厂2供热功率比储热式电锅炉储热更大;在次日01:00—03:00、22:00至次日00:00时段,由于管网放热量更大,同时在次日03:00时储热式电锅炉部分电功率用于储热,直供热功率比管网储热的电锅炉小,因此管网储热的热电机组供热功率更小,其“以热定电”的电功率下限也相应更小,提供的风电消纳空间比储热式电锅炉储热大31.91 MW。

考虑延时特性后,由于热电厂向热负荷的供热存在滞后,可看出采用2种储热方式的热电厂2供热功率相较于不考虑延时均左移。此外,在弃风集中的时段(次日01:00—02:00时段),储热式电锅炉储热热电厂2供热功率更低,这是由于延时特性使储热式电锅炉实际储热量增大,在次日02:00—04:00时段放热更多,延时特性使储热式电锅炉储热相较于管网储热消纳弃风多8.95 MW。

考虑热网衰减特性后,热电厂供热存在损耗,因此采用2种储热方式时热电厂2供热功率均增大。在弃风时段(23:00至次日00:00、次日01:00—03:00时段),采用2种储热方式的热电厂2供热功率差值由345.91 GJ/h减小为209.89 GJ/h,相应地,热电机组电功率下限差距缩小。热网衰减特性使储热式电锅炉储热与管网储热弃风消纳能力的差距缩小。

3.2.3 煤耗与弃风对比分析

场景1—4下2种储热方式的煤耗量与弃风率如表1所示。

表1 4种场景下2种储热方式的煤耗量与弃风率

Table 1 Coal cost and wind power curtailment rate of two heat storage modes under four cases

场景	储热方式	煤耗量 / t	弃风量 / (MW·h)	弃风率 / %
1	管网储热	12743.38	27.60	0.54
	储热式电锅炉	12758.66	46.08	0.90
2	管网储热	12744.59	24.65	0.48
	储热式电锅炉	12748.79	15.70	0.31
3	管网储热	12855.54	39.84	0.78
	储热式电锅炉	12864.97	55.03	1.08
4	管网储热	12858.75	34.32	0.67
	储热式电锅炉	12856.82	31.90	0.62

不考虑热网特性和无储热时,通过电锅炉消纳弃风后的弃风率为1.08%。由表1中的场景1弃风率可知,管网储热与电锅炉协调或者电锅炉配置储热装置均能进一步消纳弃风,降低弃风率。对比场景1中2种储热方式可知,不考虑热网特性时,管网储热弃风率更小,这是因为其实际储热量更大,创造了更大的风电上网空间。对比场景1和3、场景2和4,热网衰减特性使总煤耗更大,弃风率更大,这是由于热网衰减特性增大了热电厂供热功率,而管网储热实际储热量减少,其弃风率上升幅度更大。对比场景1和2、场景3和4,则能看出热网延时特性有利于降低2种储热方式的弃风率,这是由于因热网延时错开的风电高峰和供热高峰有利于弃风消纳,而储热式电锅炉实际储热量增大,其弃风率下降幅度更大。对比场景4中的2种储热方式下的弃风率,说明管网储热可替代储热式电锅炉储热来消纳弃风,同时还能节约储热装置成本。

4 结论

本文详细分析了管网储热的弃风消纳机理以及热网衰减、延时特性对管网储热弃风消纳效果的影响。通过算例仿真,对比分析了热力系统管网储热与储热式电锅炉储热的弃风消纳效果,得到了以下结论。

(1)管网储热配合电锅炉可进一步消纳弃风,且可替代储热式电锅炉的储热装置,节约储热装置成本。

(2)热网衰减特性不仅增加了热网供热损耗和热源供热功率,而且减少了管网储热量,不利于消纳弃风。

(3)热网延时特性使热电机组供热功率高峰提前、热电机组供热功率与风电错峰,有利于消纳更多弃风。热网延时虽影响管网储放热的时段,但不影响管网储热量和管网储热的弃风消纳效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 闫占新,刘俊勇,许立雄,等. 风能等效转化利用模型及其效益研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):48-54.
YAN Zhanxin, LIU Junyong, XU Lixiong, et al. Investigation on equivalent conversion-utilization models and corresponding benefits for wind energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):48-54.
- [2] 姚国平,余岳峰,王志征. 如东沿海地区风速数据分析及风力发电量计算[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):12-14.
YAO Guoping, YU Yuefeng, WANG Zhizheng. Wind data analysis and wind power generation calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(4):12-14.
- [3] 丁乐群,徐越,刘琰,等. 基于多阶段复合实物期权的风力发电项目投资决策[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):69-73,86.
DING Yuequn, XU Yue, LIU Yan, et al. Investment decision-making based on multi-stage compound real options for wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12):69-73,86.
- [4] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5):123-128.
- [5] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):139-145.
YU Jing, SUN Hongbin, SHEN Xinwei. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):139-145.
- [6] 国家能源局. 2018年风电并网运行情况[EB/OL]. (2019-01-28)[2019-05-20]. http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780779.htm.
- [7] 魏炜,倪颖婷,罗凤章,等. 基于热网互联的电力系统灵活性调度模型[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):164-170.
WEI Wei, NI Yingting, LUO Fengzhang, et al. Power system flexibility dispatch model based on thermal network interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6):164-170.
- [8] 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.
- [9] 黄大为,黄征,葛维春,等. 以热定电模式下热电联产机组电功率灵活调节能力分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(24):46-58,79.
HUANG Dawei, HUANG Zheng, GE Weichun, et al. Analysis on electric power flexible regulation capacity for combined heat and power units in heat-led mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24):46-58,79.
- [10] 朱承治,陆帅,周金辉,等. 基于电-热分时间尺度平衡的综合能源系统日前经济调度[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):138-143,151.
ZHU Chengzhi, LU Shuai, ZHOU Jinhui, et al. Day-ahead economic dispatch of integrated energy system based on electricity and heat balance in different time scales[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6):138-143,151.
- [11] 徐业琰,彭思成,廖清芬,等. 考虑用户互补聚合响应与热能传

- 输延时的综合能源园区运营商两阶段短期优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 152-163.
- XU Yeyan, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Two-stage short-term optimal dispatch of MEP considering CAUR and HTTD[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 152-163.
- [12] PFEIFFER R, VERSTEGE J. Committing and dispatching power units and storage devices in cogeneration systems with renewable energy sources[C]//Fourth International Conference on Power System Control and Management, 1996. London, UK: IET, 1996: 21-25.
- [13] 王婉璐, 杨莉, 王蕾, 等. 考虑供热网储热特性的电-热综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 45-55.
- WANG Wanlu, YANG Li, WANG Lei, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-heat energy system considering heat storage characteristics of heating network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 45-55.
- [14] 张磊, 罗毅, 苗世洪, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 985-998, 1275.
- ZHANG Lei, LUO Yi, MIAO Shihong, et al. Scheduling of integrated heat and power system considering multiple time-scale flexibility of CHP unit based on heat characteristic of DHS[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 985-998, 1275.
- [15] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
- SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.
- [16] LIU Xuezhi, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Combined analysis of electricity and heat networks[J]. Applied Energy, 2015, 162: 1238-1250.
- [17] 邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3626-3633.
- DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3626-3633.
- [18] 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.

作者简介:



谢华宝

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

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

(编辑 李玮)

Influence of heat network characteristics on abandoned wind absorption effect

XIE Huabao¹, DAI Sai², XU Dan², HU Linxian¹

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

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100089, China)

Abstract: Heat load can be shifted by heat storage, meanwhile, wind power curtailment can be reduced by decoupling “power-heat production” constraint of CHP(Combined Heat and Power) units through peak heat load shifting. The impact of heat storage, attenuation and delay characteristics of heat network on wind power curtailment is investigated. The abandoned wind absorption mechanism of pipe network heat storage is analyzed without considering attenuation and delay characteristics, and the impact of the attenuation and delay characteristics on the abandoned wind absorption effect of pipe network heat storage is analyzed. The heat storage model of pipe network is established, and the operation model of CHP system that considers heat storage, attenuation and delay characteristics of heat network is developed. Simulative results show that the abandoned wind power can be absorbed by combining the pipe network heat storage with electric boilers. In addition, the device cost is saved by replacing the heat storage device of electric boilers with heat storage device. The attenuation characteristic results in the increase of both heating loss and heat source production, and the decrease of heat storage of pipe network, which is not conducive to the absorption of abandoned wind power. The delay characteristic results in different peak time of heat production of CHP units and wind power production, which contributes to accommodating more abandoned wind power. However, it has no effect on the heat storage amount of pipe network and the abandoned wind absorption of pipe network heat storage.

Key words: combined heat and power system; pipe network heat storage; delay characteristic; attenuation characteristic; abandoned wind absorption

附 录

表 A1 算例系统热网的管道参数

Table A1 Pipe parameters of heat network in case system

管道	长度/m	直径/m	流量/(Mkg·h ⁻¹)	总延时/h	中点延时/h
1	5000	1.0	2.4868	2	1
2	5000	1.0	1.8459	2	1
3	3000	1.0	1.1345	2	1
4	5000	1.0	4.5552	1	0
5	5000	1.0	3.5028	1	1
6	3000	1.0	1.9499	1	0

表 A2 算例系统管网的储热参数

Table A2 Heat-storage parameters of pipe network in case system

参数	热电厂 1			热电厂 2		
	管道 1	管道 2	管道 3	管道 4	管道 5	管道 6
储热功率上限/(GJ·h ⁻¹)	25.38	25.38	15.23	42.31	42.31	25.38
放热功率上限/(GJ·h ⁻¹)	25.38	25.38	15.23	42.31	42.31	25.38
最大储热量/GJ	164.23	164.23	98.54	164.23	164.23	98.54

表 A3 算例系统的电锅炉容量

Table A3 Electric boiler capacity of case system

参数	热电厂 1			热电厂 2		
	电锅炉 1	电锅炉 2	电锅炉 3	电锅炉 4	电锅炉 5	电锅炉 6
额定容量/MW	11.25	11.25	6.75	18.56	18.56	11.13

表 A4 各时刻电负荷值

Table A4 Power load value of each period

时刻	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00
电负荷 /MW	1162.83	1218.31	1346.84	1368.03	1442.63	1399.34	1370.66	1286.05	1325.36	1356.19	1380.19	1227.32
时刻	21:00	22:00	23:00	次日 00:00	次日 01:00	次日 02:00	次日 03:00	次日 04:00	次日 05:00	次日 06:00	次日 07:00	次日 08:00
电负荷 /MW	1147.51	1056.62	1003.55	1005.06	972.31	988.48	984.26	991.08	1003.14	985.91	1019.12	1038.8