

风热冲突下热电厂供热问题研究

吕 泉¹,胡炳廷¹,王海霞¹,张 娜²,刘 乐³

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015;
3. 吉林电力交易中心有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 将热电联产机组的成本分为发电成本和供热成本,实现了两者的分离独立计算。剖析了风热冲突问题的机理和热电机组 2 种灵活性改造方式(配置储热设备和配置电锅炉)的原理和有效性。以电热综合能源系统整体综合能耗最小为目标建立了供热问题分析模型。研究了热电厂在灵活性改造前后的供热策略,并讨论了配置蓄热设备和电锅炉的有效性以及最佳热负荷水平问题。算例结果验证了理论分析的有效性,相关结论可为热电厂决策提供参考。

关键词: 风热冲突; 风电消纳; 电热综合能源系统; 灵活性改造; 蓄热装置; 电锅炉

中图分类号: TM 761 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.031

0 引言

近年来,我国“三北”地区冬季供暖期因风热冲突导致的弃风问题越来越严重,局部地区 2016 年第一季度的弃风甚至超过了 50%^[1]。鉴于风电和热电均是我国节能减排的重要方式,如何使二者友好发展已经成为全社会非常关注的问题。

现有研究均是首先假设热电厂热负荷已经确定且必须满足,然后再从弃风如何消纳的角度展开研究。例如利用储热将热电厂产热时间从弃风时段转移到非弃风时段^[2-5],或者直接利用电锅炉消纳弃风进行风电供热^[6-8]。

然而,实际系统中,也可以通过在规划时降低热电厂承担的热负荷水平从而降低运行时热电厂“以热定电”发电功率的形式实现对风电的消纳,减少的热负荷可以转移给区域高效燃煤锅炉予以满足。

那么,是应该优先保证热电厂多承担热负荷,还是应该优先保证风电消纳? 热电厂的最佳供热负荷水平应该为多少? 热电厂进行灵活性提升改造后又该如何进行短期供热运行和长期热负荷水平规划?

针对上述问题,本文从电热综合能源系统整体综合能源最优的角度进行了探讨。

1 电热综合能源系统

1.1 系统架构

当前,我国区域供热系统中有一半以上的供热量来自于热电联产机组,而根据规划未来该比重还会继续增加。现实中,电力系统和区域供热系统以热

电联产为耦合点构成了电热综合能源系统。

图 1 给出了热电厂加装储热设备和电锅炉进行灵活性提升改造后的电热综合能源系统示意图。该示意图中若删去储热设备和电锅炉(或容量设置为 0)即为传统的电热综合能源系统。

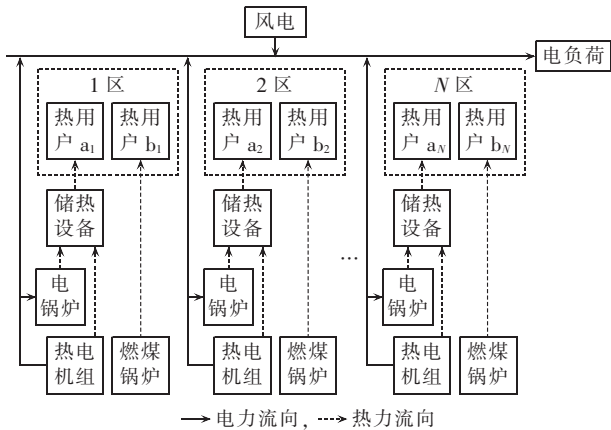


图 1 进行灵活性改造后的电热综合能源系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of CHP system after flexibility reconstruction

当前,我国热电厂和区域锅炉房基本采用独立供热的模式,即热电厂和区域锅炉房在运行时分别承担不同用户的供热需求(如图 1 所示),为此本文基于该供热模式进行分析。

1.2 热电联产发电煤耗和供热煤耗的分解

应该优先保证热电厂多承担热负荷,还是应该优先保证风电消纳,主要取决于哪种方式更加节能。热电厂供热的节能效果取决于热电厂的供热煤耗和其所替代的燃煤锅炉煤耗的差值;风电消纳的节能效果取决于风电所替代的燃煤发电的煤耗。鉴于纯凝机组可以看作供热量为 0 的热电机组,因此对热电机组发电煤耗和供热煤耗的合理分解,就成为分析

收稿日期:2017-02-27;修回日期:2017-05-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607021)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607021)

上述问题的基础。

热电厂在联产状态下同时生产电和热 2 种商品,在分摊煤耗时有多种方法,包括热量法、实际焓降法、做功能力法等,或者将联产好处全部归电,或者将联产好处全部归热,或者二者各得一部分^[9]。然而上述方法无法描述热电厂供热的边际煤耗。热电厂供热的边际煤耗低于传统燃煤锅炉供热煤耗,这是在供热系统运行时优先利用热电厂进行供热的本质原因,也是进一步进行分析的数据基础。

对于背压式机组,由于采用排汽供热,完全利用了发电余热,增加供热并没有导致发电煤耗增加,因此可以认为供热煤耗为 0。然而,对于抽汽机组而言,由于抽汽供热会降低机组发电功率,因而在保证发电功率一定的前提下,抽汽供热需要增加机组的煤耗,增加的煤耗可认为是热电厂的供热煤耗。鉴于我国绝大部分供热机组均为抽汽供热机组,因此本文以此机组类型为对象进行分析。

抽汽机组的供热煤耗可根据其电热运行区间(如图 2 所示)进行计算。图 2 中,与 AB 平行的虚线为等煤耗曲线,表示在汽轮机进汽量恒定(相应锅炉耗煤量恒定)的情况下,随着抽汽供热量的增大,机组发电功率会逐渐下降;BC 段为最大抽汽工况线(也称最小凝汽工况),此时,大部分蒸汽被抽出供热,只有少部分蒸汽进入汽轮机低压段以满足冷却的需要(约为低压段设计流量的 5%~10%^[10]),因此,该工况接近于背压工况(若不考虑低压缸通流冷却流量,可认为该线为抽汽机组的背压工况线)。

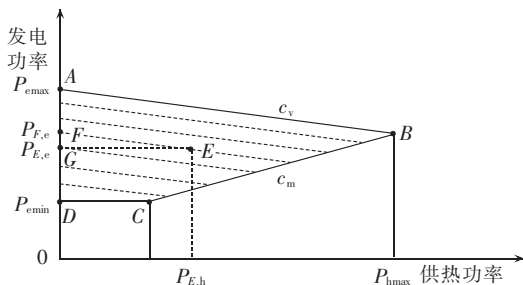


图 2 热电机组的热电特性

Fig.2 Thermal-electric characteristics of CHP unit

假设机组在初始运行时不供热,即处于纯凝状态运行在 G 点,然后在维持发电功率不变的情况下,增加供热功率至 E 点,则由图 2 可以看出,此时输出供热功率 $P_{E,h}$ 所增加的煤耗相当于机组处于纯凝状态时从 G 点至 F 点时增加的煤耗,则单位供热量(单位为 $\text{kW}\cdot\text{h}$)的煤耗可由式(1)计算。

$$\mu_{\text{CHP},h} = \frac{\mu_{\text{CON},e}(P_{F,e} - P_{E,e})}{P_{E,h}} = c_v \mu_{\text{CON},e} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{CON},e} = 0.123 / \eta_{\text{CON}} \quad (2)$$

其中, c_v 为 AB 段斜率的绝对值; $\mu_{\text{CON},e}$ 为机组在纯凝

工况下的发电煤耗; η_{CON} 为机组在纯凝工况下的发电效率。式(1)意味着供热机组的供热煤耗可以描述为机组为了供热而损失的发电量在纯凝工况下的生产煤耗。

根据统计^[11],300 MW 级供热机组在纯凝工况下的发电煤耗(标准煤)约为 $320 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,但是 c_v 约为 0.25,故抽汽供热机组的供热煤耗约为 $80 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,而一台效率为 0.8 的燃煤锅炉的供热煤耗约为 $154 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。显然,供热机组在满足供电的情况下,联产供热越多越好,这意味着供热机组最好运行在 BC 段上。

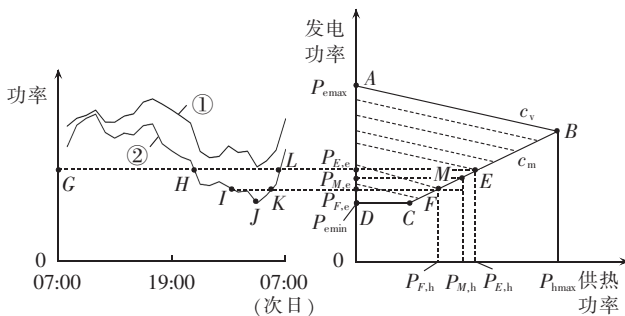
由图 2 可以看出,在供热一定的前提下,增加单位发电功率的煤耗增量实际上就等于机组在纯凝工况下增加单位发电功率的煤耗增量,即发电的边际煤耗为 $\mu_{\text{CON},e}$ 。综上分析,机组运行在任意 E 点的总煤耗(忽略机组因负荷变动所导致的效率变化)可表示为:

$$F_{\text{CHP}}(P_{E,e}, P_{E,h}) = \mu_{\text{CON},e} P_{E,e} + \mu_{\text{CHP},h} P_{E,h} \quad (3)$$

从而实现了供热机组发电煤耗和供热煤耗的分解计算。

1.3 风热冲突机理

由上述分析可知,热电厂替代燃煤锅炉供热 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 可节约标准煤 70 g 左右,而消纳风电替代煤电发电 $1 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 可节约标准煤 320 g 左右。显然,热电和风电在不冲突的前提下,均应该积极发展。然而,随着风电的发展,二者出现了严重的冲突问题,机理如图 3 所示。



时刻

- ① 风电并网前机组发电空间
- ② 风电完全消纳下机组发电空间

图 3 风热冲突原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of wind-heat conflict

图 3 中,假设该机组某日承担的热负荷为 $P_{E,h}$,此时为了保证供热,发电功率至少运行在 $P_{E,e}$ 以上。在风电并网之前,由于负荷较大,机组在各时段发电负荷均大于 $P_{E,e}$,故可以在满足发电需求的前提下保证供热。然而,在风电并网之后,由于风电挤占了一部分发电空间,若完全消纳风电,则在 H—L 时段会导致该机组的发电负荷低于 $P_{E,e}$,从而导致联产供热

无法满足供热需求 $P_{E,h}$; 若保证供热满足 $P_{E,h}$, 则热电机在 $H-L$ 时段的发电出力需运行于 $P_{E,e}$ 水平, 则显然此时图 2 中 $HIJKLH$ 所围的风电部分就需要限电处理, 从而造成风热冲突问题。

1.4 热电灵活性提升改造方式的作用本质

为了解决“三北”地区因风热冲突所造成的大规模弃风问题, 我国正在积极推广热电的灵活性提升改造, 以热电解耦为目标, 主要采用配置储热设备和配置电锅炉 2 种措施。

a. 配置储热设备的调峰作用本质。

解决风热冲突的措施的原理是在等效负荷低于以热定电负荷时, 通过其他方式替代供给汽轮机的一部分供热负荷, 使得热电机可以降低运行点(如从图 3 中的 E 点降低到 F 点), 从而接纳风电。

配置储热设备可以使得热电厂在高电负荷时段(如图 3 中 $G-H$ 时段)运行时将超过供热需求的联产供热部分存储起来, 进而在风热冲突时段(如图 3 中的 $H-L$ 时段)通过放热降低对汽轮机的供热需求, 从而降低以热定电发电出力以接纳风电(相当于将低谷时段的联产供热转移到高峰时段生产)。

但是随着风电并网规模的不断增大, 等效负荷曲线(原始发电负荷曲线减去风电曲线)不断下降, 完全消纳风电条件下留给供热机组的上网空间就越来越小。这导致图 3 中 $H-L$ 时段与等效负荷曲线所围的面积就会越来越小, 而 $HIJKLH$ 所围的面积越来越大。当前者面积小于后者时, 意味着在高峰时段的蓄热量已经不能完全满足低谷时段完全消纳风电的补偿供热量要求, 需要采用其他方式(如电锅炉供热、旁路供热)进行补偿供热。而当等效负荷曲线下降到 GHL 段以下时, 由于发电负荷始终低于以热定电发电负荷, 故已经没有机会蓄热, 蓄热罐不再起作用。

b. 配置电锅炉的调峰作用本质。

如前文所述, 若蓄热不能满足完全消纳风电时在低谷时段补偿供热的需求, 就需要采用电锅炉进行补偿供热(考虑弃风严重程度和投资问题, 实际改造方案中有些电厂仅配置了电锅炉)。而且, 随着风电并网容量的上升, 等效负荷持续下降, 为补偿供热需要的电锅炉容量会越来越多。

与蓄热罐存储的依然是汽轮机的联产供热量不同, 电锅炉补充供热的机理较为复杂, 其本质相当于电厂锅炉直接供热。如图 3 所示, 假设某时段消纳风电后安排的热电机组的发电出力为 $P_{F,e}$, 则此时该机组联产最大供热能力为 $P_{F,h}$, 要满足热负荷需求, 还需要 $P_{E,h}-P_{F,h}$ 的补偿供热量。为补偿该部分热量, 可将机组的运行点从 F 点提高到 M 点, 同时利用电锅炉将多余的电力 $P_{M,e}-P_{F,e}$ 转化为热能。从外特性

来看, 机组输出电力依然为 $P_{F,e}$ 。但此时, 由于电锅炉的作用, 总的供热输出增加了 $\eta_{eb}(P_{M,e}-P_{F,e})+(P_{M,h}-P_{F,h})$, 其中 η_{eb} 为电锅炉的热电转换效率。显然, 只要 M 点选择合适, 就可以使得增加的供热输出满足 $P_{E,h}-P_{F,h}$ 的补偿供热需求。

因电锅炉作用所增加的供热中包含了原本用于发电的 $P_{M,e}-P_{F,e}$ 以及相应的联产热能 $P_{M,h}-P_{F,h}$ 。因此从整体上相当于将电厂锅炉新进入汽机的热能完全用于供热, 与电厂锅炉直接供热的效果完全相同。因此, 与联产供热的供热煤耗相比, 电锅炉供热煤耗更大, 以增加的煤耗量 $\mu_{CON,e}(P_{M,e}-P_{F,e})+\mu_{CHP,h}\times(P_{M,h}-P_{F,h})$ 除以新增的总供热量可得电厂电锅炉供热煤耗如下:

$$\mu_{CHP-eb} = \frac{\mu_{CON,e}c_m + \mu_{CON,e}c_v}{\eta_{eb}c_m + 1} \quad (4)$$

其中, c_m 为图 2 中 BC 段的斜率。如果 $\mu_{CON,e}$ 为 $320 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, c_m 为 0.45 , c_v 取为 0.23 , 那么 $\mu_{CHP-eb} = 150 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 供热效率约为 82% , 和区域燃煤锅炉效率相差不大。

2 热电厂的供热问题建模与分析

2.1 风热冲突问题的转换

如前文所述, 在热电厂灵活性提升改造前, 风热冲突问题可描述为在电热综合能源系统中, 热电厂应多供热多弃风还是少供热少弃风(及其边界条件分析)的问题。而在火电厂灵活性提升改造之后, 理论上若电制热容量足够大, 则风电可以完全被电热综合能源系统所消纳。因此, 风电冲突问题就可以转换描述为: 在大规模风电并网后, 热电厂如何根据所承担的越来越小且大幅波动的等效发电负荷, 以及热电厂锅炉剩余的大量空闲容量, 充分利用蓄热罐和电锅炉, 通过合理供热, 使得整个电热综合能源系统耗能最小的问题。

为此, 下文以整个电热综合能源系统整体能耗最小为目标函数, 建立了一个含风电和灵活性热电的电热综合能源系统简化运行模拟模型, 以分析在大规模风电并网后热电厂的短期供热运行策略和长期热负荷水平规划策略以及电锅炉、蓄热罐在其中的作用。

2.2 数学模型

鉴于纯凝机组可以看作是热电机组热负荷为 0 的特殊形式, 故假设所有火电机组均为热电机组。假设电热综合能源系统由 N 个分区组成, 每个分区内有一个含 $N_l(l=1, 2, \dots, N)$ 台热电机组的热电厂, 且该厂配置有 1 个蓄热罐和 1 台电锅炉(将电锅炉和蓄热罐容量置 0 即可描述没有进行灵活性改造的情况); 同时每个分区配置有 1 台等效的区域燃煤锅炉。假设每个分区的总热负荷为 P_{th}^l , 热电厂供给

其中的一部分用户,占比为 α_l ,剩余用户由区域燃煤锅炉供给。因此,热电厂是应该提高还是减少其所承担的热负荷水平,体现在 α_l 的变化上。所有分区热电机组和一个等效的风电场共同满足系统电负荷 $P_{D,e}^l$ 。

(1) 目标函数。

目标函数为整个电热综合能源系统的煤耗量最小:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^{N_l} (\mu_e^{l,n} P_e^{l,n,t} + \mu_h^{l,n} P_h^{l,n,t}) + \sum_{l=1}^N \sum_{l=1}^N \mu_{CB,l} \left[P_{D,h}^{l,t} - \sum_{n=1}^{N_l} (P_h^{l,n,t} + S^{l,t-1} - S^{l,t}) - \eta_{eb,l} P_{eb}^{l,t} \right] \quad (5)$$

其中,目标函数第一部分为热电机组发电和供热煤耗,第二部分为区域燃煤锅炉供热成本; $\mu_e^{l,n}$ 、 $\mu_h^{l,n}$ 分别为分区 l 中机组 n 的发电、供热煤耗; $P_e^{l,n,t}$ 、 $P_h^{l,n,t}$ 分别为机组 n 在 t 时刻的发电、供热功率; $\mu_{CB,l}$ 为分区 l 中燃煤锅炉的供热煤耗率; $S^{l,t}$ 为分区 l 中蓄热罐在 t 时刻的蓄热量; $\eta_{eb,l}$ 为其供热效率; $P_{eb}^{l,t}$ 为分区 l 中电锅炉在 t 时刻的供热功率; T 为决策的时段数,既可表示短期某日,也可表示长期整个供暖期。

(2) 约束条件。

a. 热电机组约束。

机组热运行区间约束:

$$0 \leq P_h^{l,n,t} \leq U^{l,n} P_{h,max}^{l,n} \quad (6)$$

$$U^{l,n} [\max(P_{e,min}^{l,n}, c_m^{l,n} P_h^{l,n,t} + K^{l,n})] \leq P_e^{l,n,t} \leq$$

$$U^{l,n} (P_{e,max}^{l,n} - c_v^{l,n} P_h^{l,n,t}) \quad (7)$$

其中, $U^{l,n}$ 为机组 n 的启停状态; $P_{h,max}^{l,n}$ 为机组 n 的最大联产供热功率; $P_{e,max}^{l,n}$ 、 $P_{e,min}^{l,n}$ 分别为机组 n 在纯凝工况下的最大、最小发电功率; $c_m^{l,n}$ 、 $c_v^{l,n}$ 、 $K^{l,n}$ 为机组 n 的电热区间参数,其中 $K^{l,n}$ 为图2中线段 BC 延长线与纵轴的交点值。考虑供热机组供热之后不进行启停调峰,故而不带时间索引,表示周期内各时段启停状态相同。

b. 系统约束。

风电出力约束:

$$0 \leq P_W^t \leq P_{Wfore}^t \quad t=1, 2, \dots, T \quad (8)$$

其中, P_W^t 为风电上网功率; P_{Wfore}^t 为风电预测出力。

电力平衡约束:

$$\sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^{N_l} P_e^{l,n,t} + P_W^t = P_{D,e}^t + \sum_{l=1}^N P_{eb}^{l,t} \quad (9)$$

系统备用约束:

$$\sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^{N_l} U^{l,n} [\max(P_{e,min}^{l,n}, c_m^{l,n} P_h^{l,n,t} + K^{l,n})] \leq (1 - \alpha_{down}) P_{D,e}^t \quad (10)$$

$$\sum_{l=1}^N \sum_{n=1}^{N_l} U^{l,n} (P_{e,max}^{l,n} - c_v^{l,n} P_h^{l,n,t}) \geq (1 + \alpha_{up}) P_{D,e}^t \quad (11)$$

其中, α_{down} 、 α_{up} 分别为系统下、上旋转备用系数。

c. 各分区的供热约束。

$$\sum_{n=1}^{N_l} P_h^{l,n,t} + \eta_{eb,l} P_{eb}^{l,t} + P_{CB}^{l,t} + (S^{l,t} - S^{l,t-1}) \geq P_{D,h}^{l,t} \quad (12)$$

$$S^{l,0} = S^{l,T} = S_{max}^l / 2 \quad (13)$$

$$S^{l,t} \leq S_{max}^l \quad (14)$$

$$P_{D,h}^{l,t} = \beta_l^t \max \{ P_{D,h}^{l,t} \} \quad (15)$$

其中, S_{max}^l 为蓄热罐最大容量; $\beta_l^t \leq 1$ 表示分区 l 的热负荷在周期内各时段的分布系数。

d. 供热模式约束。

若每个分区中热电厂和区域锅炉房分别承担各自用户的供热需求,而不是采用大热网互补供热,则在式(12)的基础上,还需满足如下约束:

$$\sum_{n=1}^{N_l} P_h^{l,n,t} + \eta_{eb,l} P_{eb}^{l,t} + (S^{l,t} - S^{l,t-1}) \geq \alpha_l P_{D,h}^{l,t} \quad (16)$$

$$P_{CB}^{l,t} \geq (1 - \alpha_l) P_{D,h}^{l,t} \quad (17)$$

由于本文只分析热电厂改造前后的供热相关问题,并非进行最优调度,故燃煤锅炉、蓄热罐和电锅炉容量及其功率调整速度等约束均未考虑。

2.3 模型目标函数物理意义分析

在实际系统中,供热机组之间的发电煤耗、供热煤耗以及背压工况或最大抽汽工况下的电热比相差并不大,因此假设所有机组的发电煤耗为平均发电煤耗 μ_e ,供热煤耗为平均供热煤耗 μ_h ,电热比为平均电热比 $c_{CHP,m}$;并假设电锅炉的效率约等于1^[12]。同时,考虑1.4节所述热电厂电锅炉供热原理,将分区 l 所有热电联产机组的联产功率供热功率分为两部分:一部分对应在生产电锅炉利用电功率 $P_{eb}^{l,t}$ 时联产的 $P_{eb}^{l,t}/c_{CHP,m}$;剩下的部分则显然可认为是在满足系统等效电负荷时联产生产。结合式(4),则目标函数可以变换为:

$$\min \left[\sum_{t=1}^T \left(\mu_e P_{D,e}^t + \sum_{l=1}^N \mu_{CB,l} P_{D,h}^{l,t} \right) - \sum_{t=1}^T \mu_e P_W^t - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N (\mu_{CB,l} - \mu_h) \left(\sum_{n=1}^{N_l} P_h^{l,n,t} - \frac{P_{eb}^{l,t}}{c_{CHP,m}} \right) - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^N (\mu_{CB,l} - \mu_{CHP-eb}) \left(P_{eb}^{l,t} + \frac{P_{eb}^{l,t}}{c_{CHP,m}} \right) \right] \quad (18)$$

其中,第1项表示若没有风电并网和热电联产供热时火电机组为满足电负荷需求、区域燃煤锅炉为满足区域供热需求各自需要消耗的煤耗之和;第2项表示风电入网替代煤电发电所节约的煤耗;第3项表示热电机组在满足系统等效电负荷过程中联产的热量替代区域燃煤锅炉供热时节约的煤耗;第4项表示热电机组使用电厂电锅炉供热(相当于电厂锅炉直接供热)替代区域燃煤锅炉所节约的煤耗。风电替代煤电、联产供热替代燃煤锅炉均具有明显的节能效果;但第4项中,随着区域锅炉的升级改造,其效率与电厂锅炉效率相差不大,故该项节能效果并不明显。因此,可认为,系统消纳的风电越多、电厂联产供热的热化发电量越多,整个电热综合能源系统的能耗就越小。

2.4 热电厂灵活性改造前的供热问题分析

若热电厂未进行灵活性改造,则式(18)中 $P_{eb}^{l,t}$ 为

0, 考虑到第 1 项为常数项, 再假设各区域燃煤锅炉供热煤耗(效率)均相同, 则式(18)可简化为:

$$\max f = \sum_{t=1}^T [\mu_e P_{\text{W}}^t + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}) P_{\text{CHP, sum}}^{h,t}] \quad (19)$$

其中, $P_{\text{CHP, sum}}^{h,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{n=1}^{N_i} P_{\text{h}, n, t}^{i, n, t}$, 为所有区域热电机组的汽轮机总联产供热功率。式(19)表示电热综合能源系统应该以风电替代火力发电和联产供热替代区域锅炉供热的总替代效益最大为目标。

若只考虑单一时段, 则对式(19)以 $P_{\text{CHP, sum}}^{h,t}$ 为变量进行求导, 可得:

$$\frac{df}{dP_{\text{CHP, sum}}^{h,t}} = \mu_e \frac{dP_{\text{W}}^t}{dP_{\text{CHP, sum}}^{h,t}} + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}) \quad (20)$$

对于非弃风时段, 显然增加供热不影响风电消纳, 故 $dP_{\text{W}}^t/dP_{\text{CHP, sum}}^{h,t} = 0$, 此时式(20)总是大于 0, 所以应该尽可能增加联产供热; 而在弃风时段, 由于 $P_{\text{CHP, sum}}^{h,t}$ 增加 1 个单位, 会导致热电机组的联产发电功率增加 $c_{\text{CHP, m}}$, 从而造成等量的弃风, 故有 $dP_{\text{W}}^t/dP_{\text{CHP, sum}}^{h,t} = -c_{\text{CHP, m}}$ 。如前文所分析, 若燃煤锅炉效率为 0.8, 则 $\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}$ 约为 $154 - 80 = 74 [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$; 而 $c_{\text{CHP, m}} \mu_e$ 约为 $0.45 \times 320 = 144 [\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})]$ 。显然, 实际系统中, 在弃风时段式(20)总是大于 0, 故就单时段而言, 总是应该优先考虑消纳风电, 然后再在考虑满足等效负荷 $P_{\text{D, e}}^t - P_{\text{W}}^t$ 的约束下尽可能多地进行联产供热。

然而在独立供热模式下, 各时段间热负荷存在耦合关系, 满足 $P_{\text{CHP, sum}}^{h,t} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \beta_{i, t} \max \{P_{\text{D, h}}^{i, t}\}$, 再简化假设各区域中热电厂承担的热负荷比例 α_i 相同(均为 α), 各区热负荷时段分布系数 $\beta_{i, t}$ 也相同(均为 β_t), 将该式代入式(19)并求导, 可得:

$$\frac{df}{d(\alpha P_{\text{D, h}}^{\text{max}})} = \sum_{t=1}^T \left[\mu_e \frac{dP_{\text{W}}^t}{d(\alpha P_{\text{D, h}}^{\text{max}})} + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}) \beta_t \right] \quad (21)$$

其中, $P_{\text{D, h}}^{\text{max}} = \max \left(\sum_{i=1}^N P_{\text{D, h}}^{i, t} \right)$ 表示所有分区热负荷之和在周期内的最大值。

当 $\alpha P_{\text{D, h}}^{\text{max}}$ 增加 1 个单位时, 在 t 时段热负荷仅增加了 β_t , 对于非弃风时段, 增加热负荷不会造成风电上网功率减少, 故 $dP_{\text{W}}^t/d(\alpha P_{\text{D, h}}^{\text{max}}) = 0$; 而对于弃风时段, 则会导致风电上网功率减少 $\beta_t c_{\text{CHP, m}}$ 。故而式(21)又可转换为:

$$\frac{df}{d(\alpha P_{\text{D, h}}^{\text{max}})} = (\mu_{\text{CB, l}} - \mu_{\text{h}}) T_{\Sigma} \beta_{\Sigma, \text{av}} - \mu_e c_{\text{CHP, m}} T_{\text{CW}} \beta_{\text{CW, av}} \quad (22)$$

其中, T_{CW} 为周期内的弃风时段数; T_{Σ} 为周期总时段数; $\beta_{\Sigma, \text{av}} = \sum_{t=1}^T \beta_t / T_{\Sigma}$ 为周期内热负荷的平均分布系数; $\beta_{\text{CW, av}} = \sum_{t \in C_{\text{w}}} \beta_t / T_{\text{CW}}$ 为弃风时段的热负荷平均分布系数, C_{w} 为周期内弃风时段集合。由于热负荷越大, 越容易弃风, 故而弃风时段更容易发生在供热中期热

负荷大的时期, 故可认为 $\beta_{\text{CW, av}} > \beta_{\Sigma, \text{av}}$ 。

如前文所述, $\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}$ 约为 $74 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $c_{\text{CHP, m}} \mu_e$ 约为 $144 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; 根据某实际系统取 $\beta_{\Sigma, \text{av}}$ 为 0.84, $\beta_{\text{CW, av}}$ 为 0.88。故边界条件约为 $T_{\text{CW}}/T_{\Sigma} < 0.49$, 即整个供暖期弃风小时数低于一半时, 提高热电厂热负荷更节能。

目前, 尽管“三北”地区各区域的弃风率很高, 但弃风时段尚未占到整个供暖期一半的水平。鉴于当前热电厂供热模式多以独立供热为主, 故优先保证联产供热满足热负荷尽管会造成很大弃风, 但依然比为降低联产供热水平而采用燃煤锅炉供热更加节能。

2.5 热电厂灵活性改造后的供热问题分析

基于与式(19)同样的假设, 式(18)可以描述为:

$$\max f = \sum_{t=1}^T [\mu_e P_{\text{W}}^t + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}) P_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}] + \sum_{t=1}^T (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{CHP-eb}}) \left(1 + \frac{1}{c_{\text{CHP, m}}} \right) P_{\text{eb, sum}}^t \quad (23)$$

其中, $P_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t} = P_{\text{CHP, sum}}^{h,t} - P_{\text{eb, sum}}^t / c_{\text{CHP, m}}$, 为整个系统中热电机组总联产供热功率减去为电锅炉提供电功率时联产的供热功率, 即热电机组在满足系统等效发电负荷 $P_{\text{D, e}}^t - P_{\text{W}}^t$ 过程中所联产的供热功率。

2.5.1 灵活性改造后热电厂的供热运行策略

在热电厂采用独立供热模式下, 由于电锅炉供热的补充作用, 使得联产供热功率时段之间的耦合关系得以解耦, 则此时热电厂的供热问题可各时段单独决策。

同样, 对式(23)以 $P_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}$ 为变量进行求导, 可得:

$$\frac{df}{dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}} = \mu_{\text{el}} \frac{dP_{\text{W}}^t}{dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}} + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}) + (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{CHP-eb}}) \left(1 + \frac{1}{c_{\text{CHP, m}}} \right) \frac{dP_{\text{eb, sum}}^t}{dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}} \quad (24)$$

其中, 根据供热平衡, 在热负荷已经确定的情况下, 有 $dP_{\text{eb, sum}}^t/dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t} = -c_{\text{CHP, m}}/(1+c_{\text{CHP, m}})$; 而如 2.4 节分析可知, 在非弃风时段, $dP_{\text{W}}^t/dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t} = 0$, 在弃风时段, 有 $dP_{\text{W}}^t/dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t} = -c_{\text{CHP, m}}$ 。

则在弃风时段, 式(24)可简化为:

$$\frac{df}{dP_{\text{CHP, sum, sys}}^{h,t}} = -c_{\text{CHP, m}} \mu_e + (\mu_{\text{CB, l}} - \mu_{\text{h}}) - (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{CHP-eb}}) \quad (25)$$

其中, 如前文分析, $c_{\text{CHP, m}} \mu_e$ (约 $144 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$), 远大于 $\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}}$ (约 $75 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$); 而由于实际电力系统中发电机组所配置的燃煤锅炉与区域高效燃煤锅炉供热效率相差不大, 即 μ_{CB} 和 $\mu_{\text{CHP-eb}}$ 实际相差不大, 可认为 $\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{CHP-eb}}$ 接近于 0 或者为很小的数, 显然远小于 $\mu_{\text{CB, l}} - \mu_{\text{h}}$ 。故可认为在弃风时段式(25)总是小于 0, 这意味着在弃风时段总是应该优先消纳风电。

而在风电完全消纳之后, 式(24)又可简化为:

$$\frac{df}{dP_{\text{CHP,sum,sys}}^{\text{h,t}}} = \mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{h}} - (\mu_{\text{CB}} - \mu_{\text{CHP-ch}}) \quad (26)$$

由上文分析可知,式(26)远远大于 0,故此时应该优先根据消纳风电后的等效负荷曲线尽可能进行联产供热,不足部分再由电锅炉补充供热。

在该模式下,基于消纳风电后等效负荷对应的联产供热能力可能存在大于供热负荷的情况,此时就需要使用储热设备将该时段多余的联产供热量进行存储,同时在其他时段联产供热能力不足时,优先使用蓄热进行补充供热,然后再用电锅炉进行补充供热。

上述分析表明,经过灵活性改造后的热电厂,在供热负荷已定的情况下,在运行时总是应该优先消纳风电,然后再根据消纳风电后的等效负荷曲线尽可能进行联产供热(超过热负荷的部分则进行存储),不足部分则再由电锅炉进行补充供热(若有蓄热,则优先使用蓄热补充)。

2.5.2 灵活性改造后热电厂的热负荷确定问题

鉴于热电厂联产供热成本远低于区域燃煤锅炉供热成本,理论上,为充分利用热电厂发电的机会进行联产供热,系统中电厂的热负荷水平至少应该等于依据等效负荷确定的各时段联产供热能力在周期内的平均功率。若二者正好相等,则热电厂全部的热负荷正好可以由热电厂联产供热满足,不过由于风电的日间波动性较大,此时需要有足够大的蓄热容量。

同时,若实际电力系统中发电机组所配置的燃煤锅炉效率高于区域燃煤锅炉供热效率,即 $\mu_{\text{CHP-ch}}$ 小于 μ_{CB} ,则热电厂采用电锅炉供热替代区域锅炉供热也具有一定的节能效果。显然,此时应该尽可能提高热电厂的供热负荷水平,在充分利用热电厂联产供热的同时,利用其锅炉剩余容量进行供热。理论上,若电厂配置电锅炉的容量足够大,则热电厂的最大供热能力等于其所配置的燃煤锅炉最大输出热能减去热电厂承担的最大电负荷。

反之,若 $\mu_{\text{CHP-ch}}$ 大于 μ_{CB} ,则热电厂采用电锅炉供热不节能,应该减少电锅炉供热量。然而,实际电力系统中热电厂锅炉效率往往高于区域燃煤锅炉,即使个别热电厂锅炉效率小于区域燃煤锅炉,二者之间的差异也并不大。而且,与区域燃煤锅炉相比,热电厂锅炉所执行的大气污染物排放标准较高,单位供热的污染物排放少很多^[13-14]。

因此,为了保证联产供热能力能够得到充分利用,且减少系统同时对蓄热和电锅炉的需求,以及充分利用电厂锅炉进行供热所带来的减排效益,在确定热负荷时应该偏高一些。该部分研究涉及投资、减排等决策,将另行撰文阐述。

3 算例分析

为验证上述理论分析结果的正确性,下文参考实

际系统,构造了一个包括 3 个供热分区的电热综合能源系统。

3.1 基础数据

假设该电热综合能源系统中,分区 I 的热电厂含 3 台 300 MW 机组的热电厂,分区 II 的热电厂含 2 台 300 MW 机组和 1 台 200 MW 机组,分区 III 的热电厂含 3 台 200 MW 机组,2 类机组的参数如下。

a. 300 MW 机组参数:最大发电功率为 300 MW,最小发电功率为 90 MW;最大供热功率为 323 MW;最大热化发电功率为 226 MW; $c_v=0.23$, $c_m=0.45$; $K=80.7$;发电煤耗为 320 g/(kW·h),联产供热煤耗为 74 g/(kW·h),电锅炉等效供热煤耗为 150 g/(kW·h)。

b. 200 MW 机组参数:最大发电功率为 200 MW,最小发电功率为 60 MW;最大供热功率为 278 MW;最大热化发电功率为 150 MW; $c_v=0.21$, $c_m=0.44$; $K=45.4$;发电煤耗为 340 g/(kW·h),联产供热煤耗为 72 g/(kW·h),电锅炉等效供热煤耗为 154 g/(kW·h)。

同时,在每个热电厂中,均有 1 台等效蓄热罐和 1 台等效电锅炉,且电锅炉效率为 1(电锅炉和蓄热罐容量置 0,即可描述热电厂没有进行灵活性改造的情况)。每个分区除热电厂外,还有 1 台等效的区域燃煤锅炉。

除热电厂外,假设系统还有 1 个等效的风电场,风电和各区热电共同满足系统电负荷,且各分区之间不存在电网输电容量限制。假设整个系统与其他电网无电功率交换,运行时考虑上调旋转备用率为 5%,下调旋转备用率为 2%。

以 1 d 为周期进行分析,假设每个分区的日内各时段供热负荷需求均为 2500 MW。该日 08:00 至次日 07:00 的电负荷标幺值曲线如图 4 所示,峰谷差率为 33%,则考虑备用要求,整个系统的调峰率需求为 40%。风电预测出力标幺化曲线也如图 4 所示。假设该日最大负荷为 2050 MW。

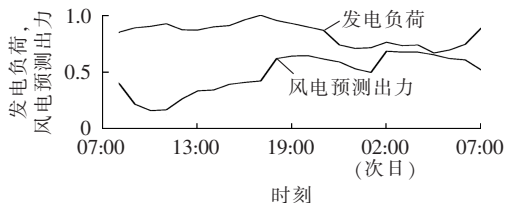


图 4 典型日负荷和风电预测出力标幺化曲线

Fig.4 Typical daily per-unit curves of electric load and predicted wind-power output

为减少调峰约束干扰,取热电机组最小出力为额定容量的 30%。机组调峰能力大于整个系统的 40% 调峰率需求,因而可以认为系统中各机组均具有一定的供热空间。

3.2 热电厂灵活性改造前的供热问题分析

本节旨在分析在热电厂进行灵活性提升改造之

前,系统应该优先接纳风电还是优先供热,故设 3 个分区配置的电锅炉容量和蓄热容量均为 0。

假设区域燃煤锅炉的供热效率为 0.8,则供热煤耗为 154 g/(kW·h),与 2 类热电厂利用电锅炉直接供热的煤耗基本相同。

图 5 给出了在独立供热模式下,风电装机容量为 0~2000 MW 时的最佳供热负荷变化情况。可以看出,当风电装机容量小于 1500 MW 时,供热负荷不变;而当其大于 1500 MW 时,供热负荷逐渐降低。同时图 5 给出了各种风电装机容量下的日弃风时段数,可看出,在最佳热负荷水平下,弃风时段数总是在 13 h 左右,约为整个周期的 54%,与理论分析一致。这说明在独立供热模式下,当弃风时段数约少于 1/2 时总是应该优先供热,提高热电厂的热负荷水平;反之,则应该降低热电厂的热负荷水平。

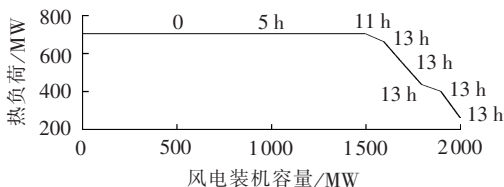


图 5 最佳供热负荷随风电装机容量变化图
Fig.5 Curve of optimum heating load vs. installed wind-power capacity

3.3 热电厂对储热和电锅炉容量需求分析

假设各热电厂的供热负荷均为无风电下确定的最大供热负荷,其中 300 MW 机组的供热负荷为 199 MW,200 MW 机组的供热负荷为 139 MW,分析系统对蓄热设备和电锅炉容量的需求。

图 6 给出了风电装机容量为 0~2000 MW 时日内最大蓄热量和最大电锅炉运行功率曲线。当风电装机容量较小时,由于等效负荷曲线较高,非弃风时段可蓄热量大于弃风时段消纳风电的放热需求,最大蓄热量由弃风时段所需放热量决定,因此其随着风电装机容量增大而增加;而当风电装机容量较大时,由于等效负荷曲线较低,非弃风时段可蓄热量低于弃风时段放热需求,最大蓄热量由非弃风时段可蓄热量决定,故随着风电装机容量的增大,最大蓄热量越来越低。因此,随着风电装机规模的逐渐增大,对蓄热容量的需求呈现先增大后减小的趋势。但是

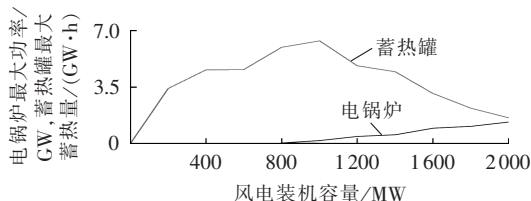
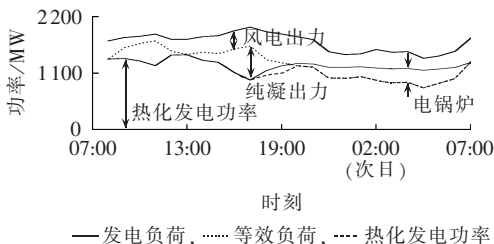


图 6 风电并网规模对蓄热罐和电锅炉容量需求的影响
Fig.6 Curve of required capacity of heat accumulator or electric boiler vs. installed wind-power capacity

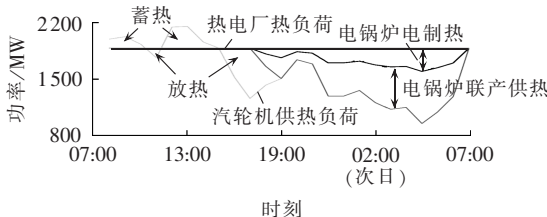
最大电锅炉运行功率却逐步提高,这是因为风电并网规模越大,热电发电空间越小,联产供热能力越低,故在热负荷一定的情况下对电锅炉补偿供热的需求就越大。

3.4 热电厂灵活性改造后的运行策略

图 7(a)、(b)分别给出了 3.3 节场景下风电装机容量在 1000 MW 时的电力平衡图和热力平衡图。根据热化发电功率曲线与等效负荷曲线的重合,可以看出经过灵活性改造后的热电厂,在供热负荷已定的情况下,运行时总是应该优先消纳风电,然后再根据消纳风电后的等效负荷曲线尽可能进行联产供热(超过热负荷的部分则进行存储),不足部分则再由电锅炉进行补充供热。



(a) 电力平衡图



(b) 热力平衡图

图 7 系统电力和热力平衡图

Fig.7 Electric and thermal power balancing diagrams of system

3.5 灵活性改造后热电厂的最佳供热负荷分析

本节分析区域燃煤锅炉在供热效率为 0.9 和 0.7 这 2 种情况下热电厂的最佳热负荷问题。假设风电装机容量为 1000 MW。对计算结果的分析如下。

a. 当区域锅炉的效率为 0.9 时(高于 2 类电厂锅炉直接供热煤耗),系统内所有热电厂总的最佳热负荷为 1170 MW,约等于系统日内等效负荷确定的联产供热能力的平均值 1169 MW。系统尽可能减少了电锅炉供热而利用高效区域锅炉供热。

b. 当区域锅炉的效率为 0.7 时(低于 2 类电厂锅炉直接供热煤耗),系统内所有热电厂总的最佳热负荷为 2305 MW,远大于情况 a,约等于热电厂日内等效负荷确定的联产供热能力和电锅炉供热能力之和的日内平均值。该日系统内所有热电厂利用电锅炉的直接制热量为 8461 MW·h,对应的联产供热量为 18779 MW·h,最大限度地利用了热电厂空闲容量进行了供热。

上述分析与 2.5 节中的理论分析一致。

4 结论

本文研究表明,从电热综合能源系统整体的角度看,在大规模风电并网之后,风热冲突问题的本质是热电厂如何根据所承担的大幅波动的等效发电负荷以及热电厂锅炉剩余的大量空闲容量,充分利用蓄热和电制热,通过合理供热,以使得整个电热综合能源系统耗能最小的问题。

理论分析和算例验证所得结论如下。

a. 对于周期内任一时段,总是应该优先消纳风电,然后再根据等效负荷尽可能进行联产供热。若系统在优先消纳风电之后,等效负荷被全部用于联产供热,则电热综合能源系统的煤耗接近于最低。

b. 在独立供热模式下,热电厂配置储热和电锅炉进行灵活性改造是实现上述状态的有效方式。其运行策略为优先消纳风电,然后再根据消纳风电后的等效负荷曲线尽可能进行联产供热(超过热负荷的部分则进行存储),不足部分则再由电锅炉进行补充供热(若有蓄热,则优先使用蓄热补充)。

c. 在独立供热模式下,若热电厂没有经过灵活性改造,则当弃风时段数占周期时段总数的比例低于约 1/2 时,应该提高热电厂在周期内的供热水平,此时多供热比少供热多消纳风电,更加节能。

d. 对于现有采用独立供热模式的热电厂,随着风电并网规模的不断增大,由于联产制热能力减小,对储热容量的需求会越来越低,但对电锅炉补充供热容量的需求会越来越高。因此,在风电大规模并网后,仅配置储热无法解决大规模风电并网后挤占热电厂发电空间致使联产供热量无法满足热负荷需求的问题,难以从本质上有效解决风热冲突问题,需要利用足够的电锅炉容量补充供热。

e. 热电厂利用电锅炉供热的本质相当于电厂锅炉新汽直接供热。鉴于热电厂锅炉直接供热效率与区域高效燃煤锅炉效率相差不大甚至更高,但前者排放标准又远高于后者,因此在独立供热模式下,应尽量提高热电厂承担的热负荷水平。这样一方面有利于在大幅波动的等效发电负荷条件下充分利用发电机会联产供热替代区域燃煤锅炉供热实现节能;另一方面可充分利用电厂燃煤锅炉满足电负荷后的空闲容量替代区域燃煤锅炉供热实现减排。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2016 年一季度风电并网运行情况[EB/OL]. (2016-04-26) [2017-03-01]. http://www.nea.gov.cn/2016-04/26/c_135313988.htm.
- [2] 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.
- [3] LÜ 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [4] 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.
- [5] CHEN Lei, XU Fei, WANG Xiao, et al. Implementation and effect of thermal storage in improving wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17):4283-4290.
- [5] NUYTTEN T, CLAESSENS B, PAREDIS K, et al. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating[J]. Applied Energy, 2013, 104(4):583-591.
- [6] 李群英,冯利民,许宇辉,等. 基于水源热泵技术的风电消纳模式[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):25-27.
- [7] LI Qunying, FENG Limin, XU Yuhui, et al. Accommodation mode of wind power based on water source heat pump technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17):25-27.
- [7] 龙虹毓,徐瑞林,何国军,等. 基于热电风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.
- [8] LONG Hongyu, XU Ruilin, HE Guojun, et al. Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4):30-34.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [9] 刘志真. 热电联产[M]. 北京:中国电力出版社,2006:25-32.
- [10] 黄树红. 汽轮机原理[M]. 北京:中国电力出版社,2008:136.
- [11] 中国电力企业联合会. 2013 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2014-01-26) [2017-03-01]. <http://www.cec.org.cn/guohuayutongji/tongjinxinxi/yuedushuju/2014-01-26/116224.html>.
- [12] Danishi Energy Agency. Technology data for energy plants[M]. Denmark; Energinet.dk, 2010.
- [13] 环境保护部. 火电厂大气污染物排放标准:GB13223—2011[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [14] 余洁. 中国燃煤工业锅炉现状[J]. 洁净煤技术,2012,18(3):89-91,113.
- [15] YU Jie. Status and transformation measures of industrial coal-fired boiler in China[J]. Clean Coal Technology, 2012, 18(3):89-91,113.

作者简介:



吕泉

吕泉(1980—),男,山西晋中人,副教授,博士,主要研究方向为含高比例可再生能源的电热综合能源系统(E-mail:lvquan@dlut.edu.cn);

胡炳廷(1992—),女,山西忻州人,硕士研究生,主要研究方向为大规模风电并网后的热电厂供热问题;

王海霞(1981—),女,山西大同人,讲师,博士,主要研究方向为含高比例可再生能源的电热综合能源系统(E-mail:wanghaixia@dlut.edu.cn)。

Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict

LÜ Quan¹, HU Bingting¹, WANG Haixia¹, ZHANG Na², LIU Le³

(1. College of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Shenyang 110015, China;

3. Jilin Electricity Trading Center Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: The total operational cost of CHP(Combined Heat and Power) unit is divided into power-generation cost and heat-supply cost to realize their separate calculations. The mechanism of wind-heat conflict is analyzed and two modes of CHP unit reconstruction(installation of heat accumulator or electric boiler) for improving its operational flexibility are discussed on working principle and effectiveness. A heat-supply analytical model with the minimum total energy consumption of CHP system as its object is established. The heat-supply strategies of thermal power plant before and after flexibility reconstruction are studied and the effectiveness and optimal thermal load of installed heat accumulator or electric boiler is discussed. Case study verifies the validity of theoretical analysis and the given conclusions provide references for decision-making.

Key words: wind-heat conflict; wind-power accommodation; combined power and heat system; flexibility reconstruction; heat accumulator; electric boiler