

基于模拟退火算法的热电机组耦合蓄热装置的运行策略

高新勇¹, 金晶², 张云鹏², 梁诗雨²

(1. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:为应对我国“三北”地区的弃风现象,在热电机组中耦合蓄热装置可以实现热电厂热力生产与电力生产的解耦运行,扩大电力调峰空间,避免弃风现象的产生。以丹东地区某330 MW亚临界机组为研究对象,在热电机组中增设蓄热装置,阐释热电机组耦合蓄热装置后消纳弃风的机理,考虑风电功率、火电机组功率以及居民电热负荷的相关约束,以系统总能耗最小为目标,基于模拟退火优化算法制定蓄热装置的运行策略。结果表明:采取优化后的策略运行,在夜间风能充裕的时间段蓄热装置放热,可打破原热电机组“以热定电”的最小电出力限制,使风电的上网电量得到提高;采用模拟退火算法优化后的运行策略,相比原热电机组运行能耗单日节省了22.47 t煤。

关键词:热电联产;弃风消纳;热电解耦;蓄热调峰;模拟退火算法

中图分类号:TK284.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.11.013

[引用本文格式]高新勇,金晶,张云鹏,等.基于模拟退火算法的热电机组耦合蓄热装置的运行策略[J].热能动力工程,2022,37(11):97-103. GAO Xin-yong, JIN Jing, ZHANG Yun-peng, et al. Operation strategy of co-generation unit equipped with heat storage device based on simulated annealing algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(11): 97-103.

Operation Strategy of Co-generation Unit Equipped with Heat Storage Device based on Simulated Annealing Algorithm

GAO Xin-yong¹, JIN Jing², ZHANG Yun-peng², LIANG Shi-yu²

(1. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou, China, Post Code: 310030; 2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: In order to avoid the occurrence of wind curtailment in the three north areas of our country, the coupled heat storage device was used in the co-generation unit to realize the decoupling operation of thermal production and power production in the thermal power plant and expand the space of power peak regulation. This paper took a 330 MW subcritical unit in Dandong as the research object, which installed heat storage device in the co-generation unit. The mechanism of reducing the wind curtailment after coupling the heat storage device was explained. Considering the relevant constraints of wind power, power of thermal power unit and electrical and thermal load for residents, the operation strategy of heat storage device based on simulated annealing optimization algorithm was generated when the minimum coal consumption of co-generation unit was taken as the objective function. The simulation results show that when the wind energy is abundant at night, the heat storage device releases heat, optimal operation strategy can break the minimum power output limit of "heat fixed electricity" of the original unit, and increase the grid power of

收稿日期:2022-01-10;修订日期:2022-02-24

基金项目:国家自然科学基金(51976129)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51976129)

作者简介:高新勇(1987-),男,河南信阳人,华电电力科学研究院有限公司助理工程师。

通讯作者:金晶(1963-),女,山东济南人,上海理工大学教授。

wind power. Through the operation strategy optimized by simulated annealing algorithm, the co-generation unit equipped with heat storage device can save daily coal consumption of 22.47 ton compared with the original unit.

Key words: co-generation, wind curtailment, heat-power decoupling, heat storage peak regulation, simulated annealing algorithm

引 言

我国“三北”地区风力资源丰富,近年来风电装机容量每年可达3 000万kW,风电发电占比已达10%,成为我国第三大电源^[1]。虽然风电装机容量在逐年增加,但风电实际消纳情况却不容乐观,弃风比例仍较高。究其原因是在“三北”地区冬季的生产生活需要保证供暖,供暖期热发电机组“以热定电”运行模式带来电力系统调峰空间不足,同时风能大规模并网会挤占火电上网空间,进一步导致热发电机组调峰困难。

目前,国内外已有相关学者对风电消纳技术以及热电厂灵活性调峰改造技术进行了相关研究。王振浩等人^[2]研究了在考虑弃风消纳的前提下,配置电储能装置后进行调度运行会比原机组接纳更多风能。吕泉等人^[3]提出直接利用弃风电量对热电厂配置电锅炉进行风电供热,分析改造前后对整体系统综合能耗的影响。Liu等人^[4]通过比较低压缸切缸技术、光轴技术、配置电锅炉、配置蓄热罐、配置热泵的优缺点及运行效率,发现几项技术均可以提供调峰空间,为电厂选择“热电解耦”技术提供指导性意见。刘小聪等人^[5]考虑电价波动的影响,提出了基于需求侧资源整合的风电消纳调度模型,充分发挥需求侧效益,降低弃风电量。崔扬等人^[6]提出基于含储热热电联产机组和电锅炉的弃风消纳调度模型,使用电锅炉消纳弃风电量,显著提升机组的运行灵活性。St等人^[7]提出在生物质热电厂中配置蒸汽蓄热罐,蓄热罐储热时可使机组功率降低7.0%,释放储存能量可提供4.3%的机组功率,可以有效提升热电厂运行的灵活性,提升调峰能力。

综上所述可以发现,在热电厂中配置蓄热装置可以实现热电厂热力生产与电力生产的解耦运行,扩大电力调峰空间,避免弃风现象的产生。但是上述针对风电消纳的研究中,大多数只基于供热侧调峰^[8-9]或电力侧调峰^[10-11]某一方面,缺乏对整体电力侧调峰与供热侧协同优化的有关研究。因此本文

基于整体供电供热系统,以系统总能耗最小为目标函数进行优化,考虑风电功率、火电机组功率以及居民电热负荷的相关约束,基于模拟退火优化算法制定蓄热装置的运行策略。运行策略给出了蓄热装置逐小时运行状况,以及对整体运行能耗的影响,研究结果对热电厂耦合蓄热装置进行弃风消纳、蓄热调峰具有工程指导意义。

1 热发电机组配置蓄热装置消纳弃风的机理

热发电机组配置蓄热装置进行调峰的原理是在保证电负荷以及热负荷供应的前提下,将多余的热量储存于蓄热装置中。当机组热负荷提升时,蓄热装置中的热量用来向外界供热。图1展示了配置蓄热装置后,机组消纳弃风的机理。如图中所示,原机组的发电负荷为上方曲线,其与未配置蓄热装置的最小机组出力之间的空间即为调峰空间。在接纳风电后,整体的运行曲线发生变化。等效负荷线如果低于原机组最小出力线,就会发生弃风现象。热电厂配置了蓄热装置后,在发生弃风的时间段内放热,可减少热发电机组的供热量,从而降低“以热定电”导致的强迫出力,减小系统最小出力水平,图中阴影部分即为消纳的弃风量。在非弃风时段,通过提高热发电机组供热抽汽量,将一部分热量进行储存,为高峰时段储备热量避免出现弃风。热发电机组供热功率提高越多,对应蓄热装置存储的热量越多。

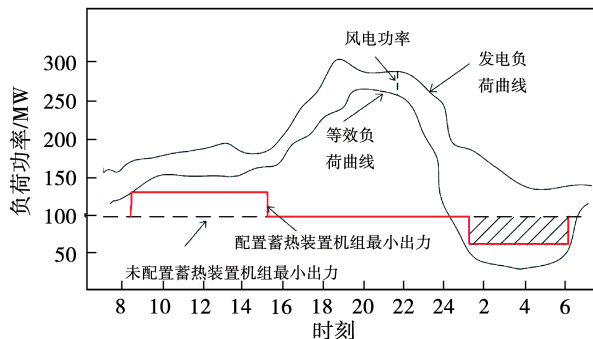


图1 热发电机组配置蓄热装置消纳弃风的机理

Fig. 1 Mechanism of wind curtailment for co-generation unit equipped with heat storage device

以某 330 MW 亚临界机组为例,配置蓄热装置的热电机组的热电特性如图 2 所示,其可以揭示机组调峰空间扩大的原理。通过机组的电热特性图可以看出,机组热负荷与电负荷的相互耦合关系。

原机组的运行工况包括在由 $ABCD$ 围成的范围里,工况点 m 的上下调峰空间为 FG 段。配置蓄热装置后,由于蓄热罐的补偿作用,在相同的热负荷需求 Q_h 下,蓄热罐改造后电力向上调节极限达到 E 点,向下调节极限达到 H 点,调峰能力得到提高。

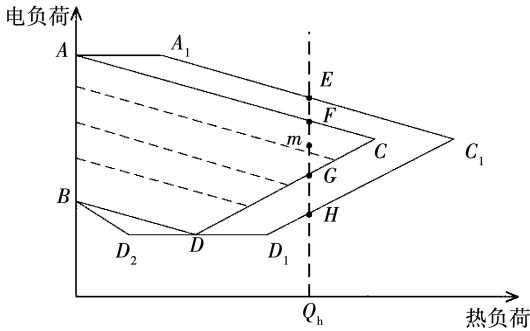


图 2 配置蓄热罐后机组电热特性图

Fig. 2 Diagram of heat-electricity relationship for co-generation unit equipped with heat storage device

2 运行模型及约束条件

2.1 目标函数

为了综合评价配置蓄热装置后系统整体能耗的变化情况,在热电机组的基础上考虑了风电接纳,热电机组和风电机组两者发电功率共同向电负荷供电,同时热电机组供热的能耗也计入目标函数,制定以系统总能耗最小为目标的联合优化运行模型。

对于纯凝式火电机组,其煤耗量 M_n 可以表示为发电功率的二次形式^[12]:

$$M_n = a(P_{el}^t)^2 + bP_{el}^t + c \quad (1)$$

式中: a, b, c —纯凝机组的煤耗系数; P_{el}^t —机组在 t 时刻的发电功率, MW。

而根据抽汽式机组的运行原理,若 t 时刻其纯凝工况下的发电功率为 P^t ,则随着抽汽量的增加,供热功率 Q_h^t 与发电功率 P_{el}^t 之间满足如下关系:

$$P^t = P_{el}^t + C_v Q_h^t \quad (2)$$

式中: C_v —抽取单位供热热量下发电功率的减小量。

抽汽式机组的煤耗量 M_c 的最小值即为模型计算的目标函数:

$$\min M_c = a(P_{el}^t + C_v Q_h^t)^2 + b(P_{el}^t + C_v Q_h^t) + c \quad (3)$$

2.2 约束条件

电力平衡约束即同一时刻热电厂热电联产机组的总发电量加上此时的风电功率应等于外界的电负荷,关系式如下:

$$P^t + P_W^t = P_{load}^t \quad (4)$$

式中: P_W^t — t 时刻的风电功率, MW; P_{load}^t — t 时刻外界的电负荷, MW。

电力负荷还受机组负荷变化速率的限制,关系式如下:

$$P_{down} \leq |P^t - P^{t-1}| \leq P_{up} \quad (5)$$

式中: P_{down} —机组滑坡速率, MW/min; P_{up} —机组爬坡速率, MW/min。

风电出力约束,风电的功率不大于其预测值:

$$P_W^t \leq P_{pre}^t \quad (6)$$

式中: P_{pre}^t — t 时刻的风电预测功率, MW。

供热平衡约束即同一时刻热电厂热电联产机组的总供热量应大于或等于外界的用热负荷,关系式如下:

$$\begin{cases} Q_h^t + Q_{xu}^t \geq Q_{load}^t \\ Q_{xu}^t = S^t - S^{t-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q_h^t —系统 t 时刻机组供热功率, MW; Q_{xu}^t —系统 t 时刻蓄热装置的蓄放热功率, MW; 当 $Q_{xu}^t \geq 0$ 时,蓄热罐进行储热;当 $Q_{xu}^t \leq 0$ 时,蓄热罐放热。 Q_{load}^t — t 时刻外界的热负荷, MW; S^t, S^{t-1} — t 时刻和 $t-1$ 时刻蓄热罐内的储热量, MW·h。

机组的热出力不得高于其最大供热量,其供热量大小受机组热交换器换热量影响。

$$Q_{min} < Q^t \leq Q_{max} \quad (8)$$

式中: Q_{min}, Q_{max} —热电联产机组的最小供热量和最大供热量, MW。

热电联产机组的发电量存在一定的限制范围,由于“以热定电”的限制,电负荷上下限与当前热负荷耦合相关,具体可由下式表示:

$$P_{min} - C_{v2} Q^t < P^t < P_{max}, 0 < Q^t \leq Q_{D2} \quad (9)$$

$$P_{min} < P^t < P_{max}, Q_{D2} < Q^t \leq Q_D \quad (10)$$

$$P_{min} < P^t < K_1 - C_{v1} Q^t, Q_D < Q^t \leq Q_{D1} \quad (11)$$

$$K_2 + C_m Q^t < P^t < K_1 - C_{v1} Q^t, Q_{D1} < Q^t \leq Q_{C1} \quad (12)$$

式中: P_{max}, P_{min} —机组在纯凝工况下的最大发电量与最小发电量, MW; $Q_D, Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{C1}$ —图 2 电热特性图中 D, D_1, D_2 和 C_1 点对应的供热量, MW; C_v —抽

取单位供热热量下发电功率的减小量,其中 C_{v1} —最大电出力对应值; C_{v2} —最小电出力对应值; C_m —低压缸最小凝汽流量线 CD 的斜率; K_1, K_2 —常数,与发电机组特性有关。

蓄热装置的约束包括蓄热装置蓄放热功率约束,同时为保持系统稳定,一个周期结束时刻蓄热装置的储热量应等于其初始时刻的储热量,具体可由以下式子表示:

$$S^t \leq S_{\max} \tag{13}$$

$$S^t - S^{t-1} \leq P_{\text{charge}}, S^{t-1} \leq S^t \tag{14}$$

$$S^{t-1} - S^t \leq P_{\text{incharge}}, S^{t-1} \geq S^t \tag{15}$$

$$\sum_{i=1}^T S_i^t = 0 \tag{16}$$

式中: $S_{\max}$ —蓄热罐的最大容量, $\text{MW} \cdot \text{h}$; P_{charge} —蓄热罐的最大储热速率, MW ; P_{incharge} —蓄热罐的最大放热速率, MW ; T —整个周期的时间, h 。

2.3 模型的求解算法

建立的模型中,优化变量较多,约束较复杂,本文采用智能优化算法中的模拟退火算法进行求解。模拟退火算法是一种概率演算优化方法,用于在一个大的解集空间内找寻目标函数的最优解^[13-14],其计算求解步骤如图 3 所示。

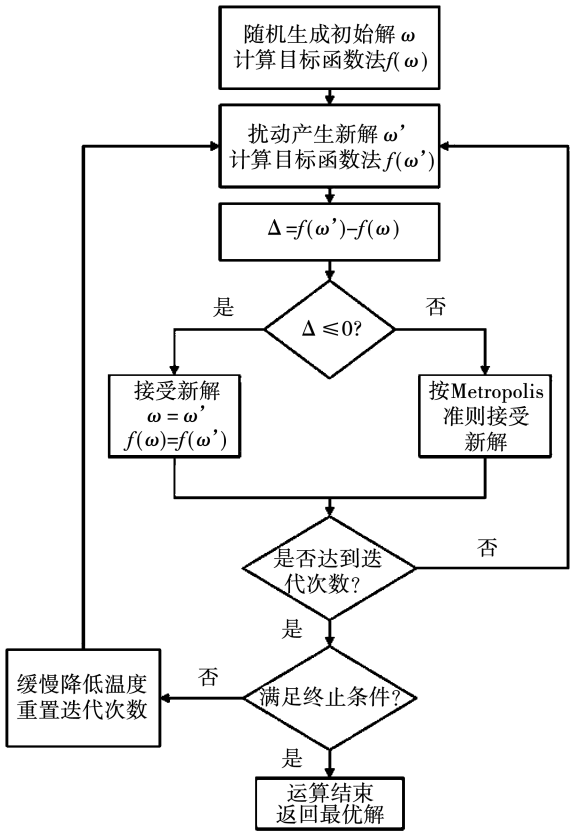


图 3 模拟退火算法的求解流程图

Fig. 3 Flow chart of simulated annealing algorithm

采用 Python 软件编写优化算法,并根据本模型的特点对算法中新解的产生方式进行了修改。计算过程中,初始时的新解产生的波动范围大,随着迭代步数的增加,扰动会越来越小,求解过程中更易获得收敛解。对模型中等式及不等式约束采用惩罚函数法^[15-16]进行处理。对模型进行求解,可得到每时刻蓄热装置的蓄热和放热功率、机组的运行功率以及系统的能耗情况。

3 算例分析

3.1 案例介绍

为详细分析热发电机组耦合蓄热装置后消纳弃风以及整体运行能耗的情况,以丹东地区某 330 MW 亚临界机组为例,机组的爬坡速率与滑坡速率均为 6.6 MW/min。热发电机组主要参数如表 1 所示。

表 1 热发电机组的参数

Tab. 1 Engineering data of co-generation unit

$P_{\max}/\text{MW}$	$P_{\min}/\text{MW}$	$Q_{\max}/\text{MW}$	$a/10^{-5}$	b	c
353	180	380	7.2	0.23	14.62

虽然可以使用模拟退火优化算法计算整个供热期内机组各时刻运行规律,但是计算量过大。肖建华等人^[17]研究得出,不同日峰荷值得出的日负荷曲线只是上下平移且规律相似。Ka^[18]提出了特征日法,即特征日中某小时的负荷等于对应月份在该小时负荷的整月平均值。因此,供热期某一典型日电热负荷数据进行计算的结果,可以指导整个供热期内的运行策略。采用该地区某接入风电的综合能源系统作为案例场景。该典型日当天风电负荷预测功率曲线如图 4 所示。该地区各时刻所需的电功率与采暖抽汽量如图 5 所示。

机组承担的电热负荷根据该地区实际机组所承担的电热负荷的比例计算。对该典型日,以系统自身能耗最小为目标,使用本文编写的模拟退火算法,计算该日热发电机组及蓄热装置的运行功率。每时刻的蓄热罐的运行状况如图 6 所示。结果可知,蓄热罐的运行策略呈现出白天储热(坐标为正)、夜间放热(坐标为负)的规律。因热负荷在一天中的变动

并不明显,主要考虑电负荷波动对工况的影响。

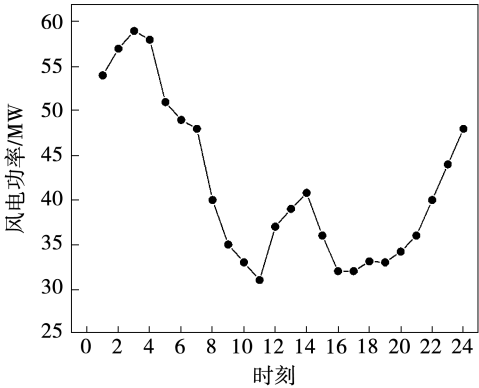


图 4 风电负荷预测功率曲线

Fig.4 The power curve of wind power load forecast

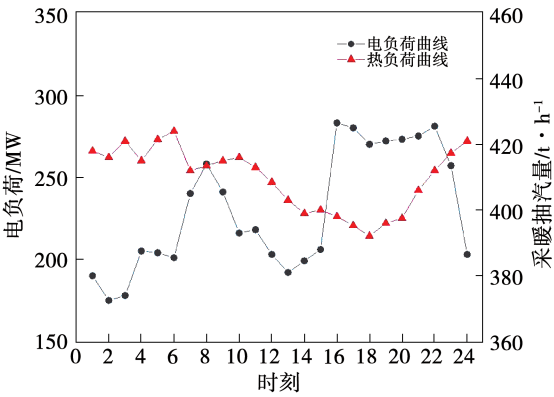


图 5 各时刻的电功率与采暖抽汽量

Fig.5 Electric power and thermal load of the unit at each time

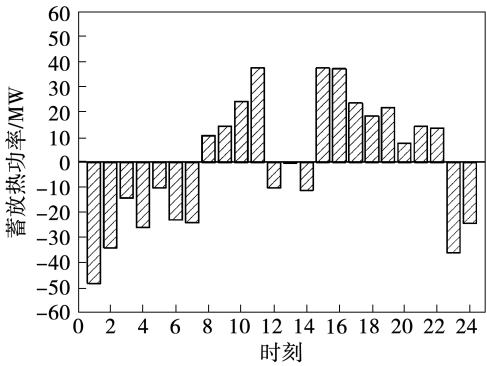


图 6 典型日蓄热装置每时刻蓄放热功率

Fig.6 Heat storage device charge and discharge power at each time in typical day

在夜间,电负荷需求减少,但风电具有反调峰特性,风电功率上升。根据模拟结果,具体运行策略如

表 2 所示。在电负荷高峰时段且系统中蓄热装置未蓄满热量时,系统在满足各项运行约束条件的同时尽可能多蓄热,以尽快蓄满热量,为调峰做好准备。在电负荷平峰时,若蓄热装置仍可蓄热,则提高热电机组的抽汽量进行蓄热。需注意的是,等效负荷不可以低于机组的最小出力,避免因为蓄热过程而产生新的弃风电量。在电负荷低谷时,使用蓄热装置储存的热量进行放热,降低原机组供热抽汽量,避免热发电机组“以热定电”的强迫出力。

表 2 蓄热装置各工况下的运行策略

Tab.2 Operation strategy of the heat storage device under various operating conditions

参数	$S=0$	$0 < S < S_{\max}$	$S = S_{\max}$
电负荷谷峰	保持	放热	放热
电负荷平峰	蓄热	蓄热	保持
电负荷高峰	蓄热	蓄热	保持

3.2 配置蓄热装置对弃风消纳的影响

配置蓄热装置的主要目的是最大程度的消纳弃风电量。图 7 为配置蓄热装置前后风电出力的情况。

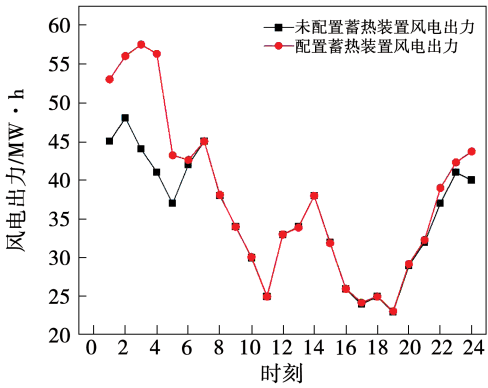


图 7 配置蓄热装置后的风电出力曲线变化情况

Fig.7 Change of wind power load curve for co-generation unit equipped with heat storage device

从图 7 中可以直观地看出,配置蓄热装置后,整个系统对于风电的消纳水平有了一定的提高。白天风电功率不大,因此热电机组的调峰压力小。在满足电热负荷的前提下,依然可以抽取一部分蒸汽热量进行储存。在夜间 22:00 至凌晨 6:00,风电功率增加,未配置蓄热装置前,这个时间段内原热发电机组

的调峰能力有限,不能为风电上网提供空间,造成了弃风现象。配置蓄热装置后,在这个时段蓄热装置进行放热,打破原热电机组“以热定电”的最小电出力限制,降低其发电功率,有效地提高了风电的上网电量。因此,在热电厂中配置蓄热装置可以有效提高电网对于风电的接受水平,降低弃风现象的产生。

3.3 配置蓄热装置对系统能耗的影响

配置蓄热装置后,整个系统运行过程中没有改变供给热用户的总热量大小,只是通过蓄热装置实现了热能产生时间的“平移”,因此配置前后的供热能耗视为一致。图 8 为原机组与配置蓄热装置后热电机组的电出力情况。

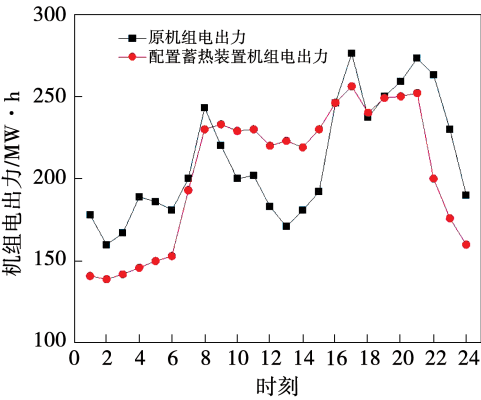


图 8 配置蓄热装置后的机组电出力曲线变化情况

Fig.8 Change of electric power load curve for co-generation unit equipped with heat storage device

从图 8 中可以看出,与原机组相比,配置蓄热装置后,整体机组电出力曲线在白天负荷高峰时段有所上升,因为此时热电机组提高了抽汽量进行蓄热,由于热电耦合关系导致了整体的电功率有所上升;在夜间,风电需要上网空间,配置蓄热装置的机组放热,热电机组的热出力减少,相应的电出力也减少。整体来说,通过蓄热装置削峰填谷的作用,抑制了负荷波动,使得机组的电出力曲线趋于平缓。同时,配置蓄热装置后系统整体的峰谷差小于原系统的峰谷差。

图 9 为耦合蓄热装置前后机组最小电功率的变化情况。在容易出现弃风现象的时间段,经过优化后运行策略使该机组的最低电负荷趋于最小电出力

值,证明该策略已经充分挖掘了热电机组的调峰潜力。

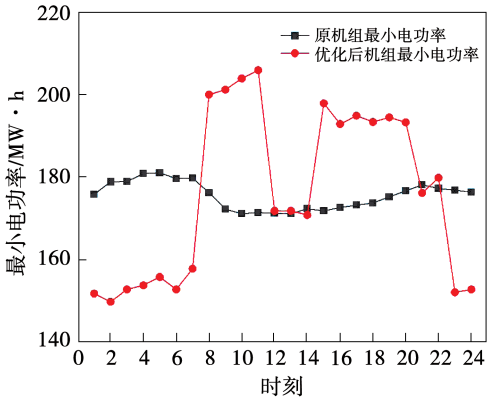


图 9 配置蓄热装置后的机组最小电功率变化情况

Fig.9 Change of the minimum power load for co-generation unit equipped with heat storage device

机组在白天进行储热,此时抽汽除了供暖外,需增加蒸汽流量用于蓄热系统储热。夜间蓄热装置通过放热来降低机组的最低电负荷,避免了强迫发电从而挤占风电上网空间。将各时刻机组电热功率代入式(3)可得,若采用蓄热装置进行调峰,该典型日的总煤耗为 2 054. 95 t,比原机组运行煤耗节省了 22. 47 t。一方面,由于风电上网电量增加,热电机组的发电量需求下降,减少了一部分煤耗;另一方面,由于机组稳定运行比变工况运行更易降低整体能耗^[19],耦合蓄热装置后,热电机组运行负荷更加平稳,从而降低了煤耗量。因此,在热电机组中耦合蓄热装置,不仅能有效地消纳弃风量,还可以提高系统运行的经济性。

4 结 论

为应对我国“三北”地区的弃风现象,在热电机组中耦合蓄热装置可以实现热电厂热力生产与电力生产的解耦运行,扩大电力调峰空间,避免弃风现象的产生。以丹东地区某 330 MW 亚临界机组为研究对象,在热电机组中增设蓄热装置,阐释热电机组耦合蓄热装置后消纳弃风的机理,考虑风电功率、火电机组功率以及居民电热负荷的相关约束,以系统总能耗最小为目标,基于模拟退火优化算法制定蓄热

装置的运行策略。

(1) 热发电机组耦合蓄热装置后运行策略为:在电负荷高峰时段,系统在满足各项运行约束条件的同时尽可能多蓄热,以尽快将蓄热装置蓄满热量,为调峰做好准备;电负荷平峰时,若蓄热装置仍可蓄热,则提高热发电机组的抽汽量进行蓄热,需要注意的是,等效负荷不可以低于机组的最小出力,避免因为蓄热过程而产生新的弃风电量;在电负荷谷峰时,使用蓄热装置储存热量进行放热,降低原机组供热抽汽量。

(2) 在夜间风能充裕的时间段,蓄热装置放热,打破原热发电机组“以热定电”的最小电出力限制,降低其发电功率,有效地提高了风电的上网电量,避免弃风现象的发生。

(3) 采用模拟退火算法优化后的运行策略充分挖掘了热发电机组的调峰潜力,相比原机组运行煤耗单日节省了 22.47 t。

参考文献:

- [1] 池喜洋,竺炜,刘长富,等.含大型风电场的电网安全经济优化调度[J].电力科学与技术学报,2018,33(1):125-131.
CHI Xi-yang,ZHU Wei,LIU Chang-fu,et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1):125-131.
- [2] 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(1):137-143.
WANG Zhen-hao,YANG Lu,TIAN Chun-guang,et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):137-143.
- [3] 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.
LYU Quan,JIANG Hao,CHEN Tian-you,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.
- [4] LIU M,WANG S,ZHAO Y,et al. Heat-power decoupling technologies for coal-fired CHP plants:operation flexibility and thermodynamic performance[J]. Energy,2019,188(1):1-14.
- [5] 刘小聪,王蓓蓓,李扬,等.计及需求侧资源的大规模风电消纳随机机组组合模型[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3714-3723.
LIU Xiao-cong,WANG Bei-bei,LI Yang,et al. Stochastic unit commitment model for high wind power integration considering demand side resources[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14):3714-3723.
- [6] 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):4072-4081.
CUI Yang,CHEN Zhi,YAN Gan-gui,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):4072-4081.
- [7] STEVANOVIC V D,PETROVIC M,MILIVOJEVIC S,et al. Upgrade of the thermal power plant flexibility by the steam accumulator[J]. Energy Conversion and Management,2020(223):113-119.
- [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.
LYU Quan,CHEN Tian-you,WANG Hai-xia,et al. Load regulation capability analysis of thermoelectric unit after heat storage[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(11):34-41.
- [9] RICHTER M,OELJEKLAUS G,GOERNER K. Improving the load flexibility of coal-fired power plants by the integration of a thermal energy storage[J]. Applied Energy,2019,236(15):607-621.
- [10] 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.
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.
- [11] ZHANG N,LU X,MCELROY M B,et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage[J]. Applied Energy,2016,184:987-994.
- [12] 石志云,陈海平,王忠平,等.热电联产机组热电成本分摊理论综述[J].节能,2012,31(8):12-16.
SHI Zhi-yun,CHEN Hai-ping,WANG Zhong-ping,et al. Summary of thermoelectric cost sharing theory of cogeneration units[J]. Energy Conservation,2012,31(8):12-16.
- [13] PAN Z,GUO Q,SUN H. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia[J]. Applied Energy,2017,192(15):395-407.