

4-16-2021

Study on ability of distributed electric boilers with thermal storage in abandoned wind power consumption

Jun LI

Nari Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China ; State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, China

Zhenyu WANG

Nari Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China ; State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited, Wuhan 430074, China

Jie XIANG

State Grid Hunan Integrated Energy Service Company Limited, Changsha 410007, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

LI, Jun; WANG, Zhenyu; and XIANG, Jie (2021) "Study on ability of distributed electric boilers with thermal storage in abandoned wind power consumption," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 36: Iss. 1, Article 21.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2021.01.021

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol36/iss1/21>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

分布式蓄热电锅炉对弃风电量的 消纳能力评估

李 俊^{1,2}, 王振宇^{1,2}, 向 洁³

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210000; 2. 国网电力科学研究院武汉能效测评有限公司, 湖北 武汉 430074; 3. 国网湖南综合能源服务有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要:合理利用用户侧蓄能环节可以提高电力系统的调峰能力,加强电力系统消纳间歇性可再生能源的能力。针对蓄热电锅炉在弃风电量消纳过程中的应用,围绕可消纳电量(总量),消纳功率(强度),消纳速度(速度)3 个方面,涉及日前、日内小时级以及日内实时 3 个层面,建立了一套评估指标集。该评估指标集为蓄热电锅炉消纳指令的下发提供数据支撑,为运行控制人员实时掌握系统运行状态提供数据保障,是蓄热电锅炉消纳弃风电量的关键。通过介绍蓄热消纳系统的组成,对该评估体系的使用方法进行了说明,并使用案例仿真验证了该消纳能力评估指标集的有效性。

关 键 词:蓄热电锅炉;储能;风电消纳;弃风

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.01.021 中图分类号:TK01+9 文章编号:1673-9140(2021)01-0185-07

Study on ability of distributed electric boilers with thermal storage in abandoned wind power consumption

LI Jun^{1,2}, WANG Zhenyu^{1,2}, XIANG Jie³

(1. Nari Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Efficiency Evaluation Company Limited,

Wuhan 430074, China; 3. State Grid Hunan Integrated Energy Service Company Limited, Changsha 410007, China)

Abstract: Peak-load regulation capability of power systems can be improved by the rational utilization of thermal storage systems at the customer-side, which can also promote the consumption of the renewable energy. A set of indicators, which considers the quantity, the intensity and the velocity of the potential power consumption, is proposed to direct the consumption of the abandoned wind power by distributed electric boilers with thermal storage (EBTS). The indicator set evaluate the consumption ability from three aspects, which includes day ahead level, hour level and real-time level. The indicator set not only provides data support for the instructions of the EBTS, but also provide the real-time operating state information of EBTS to operators. This paper introduce the thermal storage consumption system, and elaborate the application of the indicator set, of which effectiveness is validated through case studies.

Key words: electric boilers with thermal storage; energy storage; wind power consumption; abandoned wind power

收稿日期:2018-01-10;修回日期:2018-05-03

基金项目:国家电网公司科技项目(SGTYHT/15-JS-191)

通信作者:李 俊(1987-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统运行与控制、可再生能源消纳、综合能源系统研究;E-mail:juntony256@gmail.com

近年来,中国的风电产业发展迅速。风电是一种潜力巨大的可再生能源,由于风电的波动性,其应用受到了较大影响。根据中国国家能源局 2020 年 10 月公布的数据,前三季度,中国弃风电量约 $116 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,平均弃风率 3.4%,较去年同期有所改善。

弃风产生的原因很多,常常因地区特点而异,包括电力系统检修或故障、风电送出通道能力不足、系统调峰(调频)能力不足等方面原因^[1]。以东北地区为例,弃风的主要原因包括东北地区负荷小、增长慢,风电发展远超过了市场消纳能力;东北地区电源结构性矛盾没有根本改变,调峰矛盾突出;电网覆盖范围有限,严重制约了风电在东北地区在更大范围内外送消纳^[2]。风电并入冷热电联供系统的优化运行控制可以提升风电的利用水平,降低风电随机性对电网的影响^[3]。将风电功率预测信息纳入调度体系,建立新的预控调度技术,是实现高比例风电消纳的关键途径^[4]。同时,合理利用蓄冷、蓄热等储能环节,可以有效提高电力系统的调峰能力^[5]。蓄热电锅炉具有灵活开关、快速反应的特点,其接入可以为电力系统带来大量的蓄热容量,在采暖季夜间存在大量弃风电量的情况下,合理利用蓄热电锅炉作为蓄热资源,结合风功率预测与调度优化,可以在不影响用户使用的情况下,提高系统机组的调峰能力,增加清洁能源的消纳^[6]。

在热负荷对风电的消纳方面,国内外已经进行了一定程度的研究。文献[7-13]从优化算法、政策建议、仿真计算、评估分析、策略制定等各个角度进行了讨论。

该文针对分布式蓄热电锅炉消纳弃风电量的过程中消纳指令执行前的信息上报,提出了一套指标集。该指标集为调度指令向蓄热电锅炉的下发与执行提供数据支撑,并为运行控制人员实时掌握系统的运行状况提供数据保障,是蓄热电锅炉消纳弃风电量的关键环节。该文的研究为蓄热电锅炉作为可控负荷消纳弃风电量提供了数据基础。

1 蓄热电锅炉对弃风弃光电量的消纳方式

1.1 蓄热消纳系统

分布式蓄热电锅炉对可再生能源的消纳在政府

部门、电网以及用户的协调配合下完成。在系统层面上,需要在一定的硬、软件基础上,将用户的电锅炉控制系统与电网调度系统联系起来构成蓄热消纳系统,以提供数据采集、通信以及远程控制支撑;同时,还需要政府监管部门在激励政策方面予以促进。蓄热消纳系统的总体结构如图 1 所示。

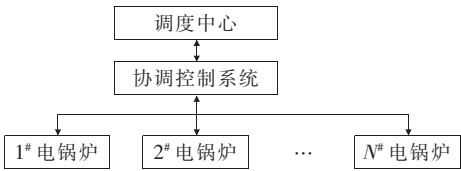


图 1 蓄热消纳系统结构

Figure 1 Structure of abandoned wind power consumption system using thermal storage

调度中心在现有调度系统的基础上,将风、光、电预测数据以及消纳需求下发到协调控制系统,将协调控制系统虚拟为负的发电厂实现调度;协调控制系统在服务器以及控制程序的基础上,一方面从电锅炉用户获取蓄热电锅炉运行数据并评估得到其消纳能力,根据分层分区思路整合打包成虚拟发电厂上报至调度中心;另一方面,从电网调度部门获取风电预测信息以及消纳指令,结合用户用能需求以及优化算法形成分解的消纳指令下发至蓄热电锅炉。蓄热电锅炉用户通过蓄热电锅炉消纳控制模块实时上报运行状态,并执行收到的消纳指令。

1.2 分布式蓄热电锅炉

蓄热电锅炉由电锅炉本体、电锅炉控制柜、蓄热装置等组成,是将电能转换为热能并通过蓄热装置将热能存储起来并加以利用的系统。常见的蓄热电锅炉主要采用水蓄热、固体蓄热以及相变蓄热等不同的蓄热方式。

该文所说的分布式消纳是相对集中消纳而言,将加热功率较小(一般小于 2 MW)、地理位置分散的电蓄热锅炉,通过信息网络联系起来,利用优化分配的方式对弃风电量进行消纳,达到优化消纳的目的。电锅炉与调度系统之间需要建立专用的通信通道,同时需要确定调度、协调控制系统以及蓄热电锅炉各部分之间的通信协议。

固体蓄热电锅炉由于体积小、维护运行维护相对简单,并且可以做到快速响应和精确控制,在北方地区已经得到较为广泛的应用。

2 消纳能力评估及参数获取

2.1 北方地区弃风电量消纳需求

在某一时间段内,风电场发电曲线与用户用电曲线之间存在一定的差异。通常情况下,当风功率低于正常负荷用电功率的时候,由火电机组增发火电弥补电源功率的不足;而当风电功率高于正常负荷用电功率的时候,则存在弃风限电的风险。图 2 所示为三北地区某风场 24 h 内的弃风限电情况。

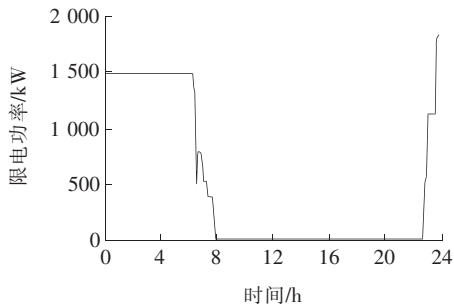


图 2 某风场一天内弃风限电情况

Figure 2 Abandoned wind power of a typical wind farm within a day

由图中可以看到,该风电场昼夜限电情况存在较大差异,弃风限电主要集中于夜间(22:00—08:00)。可以推测,该地区弃风限电的主要原因一是昼夜负荷运行状态差异;二是昼夜风电波动差异。

针对昼夜负荷与风电的波动,结合三北地区对冬季对供暖的需求,利用蓄热电锅炉的快速功率调节特性跟随风电的波动,在风电大发的同时使用蓄热电锅炉相应地增加负荷,可以将原来可能弃风的电量转化为热能存储起来加以利用。此时,风电的超短期风功率预测曲线与限电曲线(调度部门按照未采用蓄热消纳前的限电规则给出)之间的差值体现了蓄热消纳的目标。

2.2 消纳能力参数的选取原则

获取足够信息并在此基础上对蓄热电锅炉进行灵活调度是蓄热消纳得以实现的关键。在蓄热消纳系统中,类比调度中心对风电、火电的控制,将必要的蓄热电锅炉信息打包为消纳能力参数集,通过虚拟为发电厂的方式对蓄热电锅炉的运行状态进行控制。

消纳能力上报的目标有 2 个:①为调度指令的制定提供参考,保证调度指令合理、有效;②为蓄热消纳系统的状态展示提供数据支撑,起到状态监测和故障预警的作用。结合蓄热消纳系统的运行方式,消纳能力参数集的选取须遵循以下基本原则。

1)与原有调度系统配合。

蓄热消纳系统需接入原有调度系统,上行的消纳能力信息应遵循原有调度系统的设定,使得虚拟发电厂可调度。消纳能力信息的上报可以参考发电厂对调度的信息上报,即包含额定参数、日前计划以及实时运行状态。

2)方便运行人员全面查看虚拟发电厂的实际情况。

除了功率、蓄热量等与实际运行控制直接相关的参数外,还应提供实体蓄热电锅炉的基本参数,如供水温度、回水温度、炉温等。

该文以蓄热电锅炉为虚拟电厂的主体,对弃风弃光的消纳能力上限为蓄热电锅炉物理承受能力,主要限制参数包含以下 2 个方面:功率限制,即最大功率有上限,在虚拟电厂中体现为功率调整范围;容量限制,即特定时间段内最大消纳电量上限,在虚拟电厂中体现为特定时间段内电量消纳范围。

2.3 消纳能力

蓄热电锅炉的消纳能力是指其接收可再生能源电量的能力,针对调度需求,消纳能力需要涵盖日前、日内小时级、日内 5 分钟级(即实时)3 个层面,并从电量、电力的角度描述其是否可以消纳弃风电量,消纳的电量是多少(总量),消纳的功率是多少(强度),消纳速度是多少(速度)等问题,为调度决策提供支撑,为消纳执行提供帮助。

分布式蓄热电锅炉的消纳能力如表 1 所示。

2.3.1 日前消纳能力

蓄热电锅炉的日前消纳能力包含:是否参与消纳、可消纳电量(总量)、消纳功率(强度)和消纳速度(速度)。

1)是否参与消纳标志 CY 由运行单位根据电锅炉运行状态给出,可参与表示为 1,否则表示为 0。

2)所处层区(位置)WZ 在电锅炉向协调控制系统报备时生成,是电锅炉在系统中的名称以及位置标识,格式为层号区号层号区号层号区号。

表 1 分布式蓄热电锅炉的消纳能力

Table 1 Consumption ability of distributed electric boilers with thermal storage

日前消纳					日内小时级消纳				日内实时消纳			
是否参与消纳	所处层区 (位置)	电量 (总量)	功率 (强度)	速度	是否可停止消纳	电量 (总量)	功率 (强度)	速度	是否可消纳	电量 (总量)	功率 (强度)	速度
参与消纳标志 CY	所处层区 (位置)编号 WZ	剩余蓄热量 预测曲线 $Q_{rqyc}(t)$	预测最大 可消纳功 率曲线 $P_{rqkxn}(t)$	最大消纳 增长速度 V_{z-max}	是否可 停止消 纳 TZ	最大可消 纳电量 Q_{xsdkxn}	可调减功 率 P_{ssq}	同最大消 纳减少速 度 V_{j-max}	是否可 开始消 纳 KS	当前蓄热 量 Q_{daxr}	当前运行 功率 P_{dq}	同最大消 纳增长速 度 V_{z-max}
		蓄热电锅 炉的剩余 蓄热量 Q_{rqsy}	额定运行 功率 P_N	最大消纳 减少速度 V_{j-max}		估计可消 纳电量 Q_{xsgjkn}	最低恒定 运行功率 P_{ssyx_min}			当前剩余 蓄热量 Q_{dasy}	当前运行 功率 P_{dq}	
							当前用能 功率 P_{dqyn}				可调升功 率 P_{ssst}	

3) 日前消纳电量(总量)包含的参数。

① 日前剩余蓄热量预测曲线 $Q_{rqyc}(t)$, 为 1 一条曲线, 反应日前剩余蓄热量随时间的预测状态。可通过日前剩余蓄热量以及日前用能预测计算获得, 表示为

$$Q_{rqyc}(t) = Q_{rqsy} + \int P_{rqyd}(t) \times \Delta t - Q_{rqyn}(t) \quad (1)$$

式中 Q_{rqsy} 为电锅炉日前剩余蓄热量; $P_{rqyd}(t)$ 为电锅炉日前用电计划曲线; $Q_{rqyn}(t)$ 为电锅炉用户日前用能预测曲线。

② 蓄热电锅炉的日前剩余蓄热量 Q_{rqsy} , 为 1 个数值, 反应第 2 天消纳开始前, 蓄热电锅炉剩余的蓄热量总量, 由电锅炉运行单位上报。

③ 其他相关参数: 蓄热电锅炉用户日前用能预测曲线 $Q_{rqyn}(t)$, 为 1 条曲线, 反应第 2 天消纳开始后的用能预测曲线, 可根据用户用能历史曲线获取, 由电锅炉运行单位上报。

4) 消纳功率(强度)包含的参数。

① 可消纳功率 $P_{rqkxn}(t)$, 反应蓄热电锅炉的日前预测最大可消纳功率:

$$P_{rqkxn}(t) = P_N - P_{rqyd}(t) \quad (2)$$

式中 $P_{rqkxn}(t)$ 为可消纳功率; P_N 为额定运行功率; $P_{rqyd}(t)$ 为日前用电计划曲线。

② 额定运行功率 P_N , 为 1 个数值, 反应蓄热电锅炉的额定运行功率, 由设备供应商提供。

③ 其他相关参数: 日前用电计划曲线 $P_{rqyd}(t)$, 为 1 条曲线, 反应蓄热电锅炉的日前用电计划, 由电锅炉运行单位上报。

5) 消纳速度(速度)包含的参数。

① 最大消纳增长速度 V_{z-max} , 为一个数值, 反应

蓄热电锅炉功率调节过程中, 功率增加的速度, 由设备供应商提供。

② 最大消纳减少速度 V_{j-max} , 为一个数值, 反应蓄热电锅炉功率调节过程中, 功率减少的速度, 由设备供应商提供。

2.3.2 日内小时级消纳能力(停止消纳(调减)参考量)

蓄热电锅炉的日内小时级消纳能力主要包含: 是否可停止消纳、小时级可消纳电量(总量)、消纳功率(强度)和消纳速度(速度)。

1) 是否可停止消纳 TZ。

是否可停止消纳(蓄热量是否充足)包含一个参数, 由电锅炉运行单位上报, 表示为

$$TZ = \begin{cases} 1, & \text{当前蓄热量} \geq \text{小时内用能} \\ 0, & \text{当前蓄热量} < \text{小时内用能} \end{cases} \quad (3)$$

小时级用能因蓄热体的大小和用户对舒适度的要求不同而不同。

2) 小时级可消纳电量(总量)包含的参数。

① 小时内最大可消纳电量 Q_{xsdkxn} , 为 1 个数值, 反应最大功率运行情况下蓄热电锅炉可消纳的电量, 表示为

$$Q_{xsgjkn} = \begin{cases} P_N \times t, & Q_{xsgjkn} < Q_{sssy} \\ Q_{sssy}, & Q_{xsgjkn} \geq Q_{sssy} \end{cases} \quad (4)$$

式中 P_N 为额定运行功率; t 为小时时间; Q_{sssy} 为当前剩余蓄热量。

② 小时内估计可消纳电量 Q_{xsgjkn} , 为 1 个数值, 考虑以当前运行功率为参考, 估计小时内运行功率时蓄热电锅炉可增加的电量消耗:

$$Q_{xsgjkn} = \begin{cases} (P_N - P_{dq}) \times t, & Q_{xsgjkn} < Q_{sssy} \\ Q_{sssy}, & Q_{xsgjkn} \geq Q_{sssy} \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_N 为额定运行功率; P_{dq} 为当前运行功率; t 为小时时间; Q_{ssy} 为当前剩余蓄热量。

3) 小时级功率限制(速度)包含的参数, 反应小时级功率控制中的限值建议。

① 小时级可调减功率 P_{xstj} , 即

$$P_{xstj} = P_{dq} \quad (6)$$

式中 P_{dq} 为当前运行功率。

② 小时级最低恒定运行功率 P_{xsys_min} , 为 1 个数值, 反应小时内可以维持加热功率不变时的最低运行功率, 表示为

$$P_{xsys_mi} = \frac{Q_{dqsy}}{t} - P_{dqyn} \quad (7)$$

式中 Q_{dqsy} 为当前剩余蓄热量; t 为小时时段; P_{dqyn} 为当前用能功率。

③ 当前用能功率 P_{dqyn} , 为 1 个数值, 以功率的形式反应当前用户用能状况, 该功率为维持蓄热体温度不变时的最小加热功率, 表示为

$$P_{dqyn} = P_{dq} - \frac{Q_{max}}{c_{max} \times \Delta c} \Delta c \quad (8)$$

式中 P_{dq} 为当前运行功率; Δc 为 2 次电锅炉数据数上报时的温度差; Q_{max} 为电锅炉最大蓄热量; c_{max} 为电锅炉最高蓄热温度; Δt 为 2 次电锅炉数据数上报的时间差。

4) 消纳调减速度。

同最大消纳减少速度 V_{j_max} 。

2.3.3 日内实时消纳能力(开始消纳(调增)考量)

1) 是否可开始消纳标志 KS, 即

$$KS = \begin{cases} 1, & P_{dq} < R_N, \text{ 且 } Q_{dasy} > 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中 P_{dq} 为电锅炉的当前运行功率; P_N 为电锅炉的额定运行功率; Q_{dasy} 为当前剩余蓄热量。

2) 实时蓄热量(总量)包含的参数。

① 当前蓄热量 Q_{daxr} , 为 1 个数值, 反应蓄热锅炉当前已有的蓄热量, 可表示为

$$Q_{daxr} = \frac{c}{c_{max}} \times Q_{max} \quad (10)$$

式中 c 为当前蓄热温度; c_{max} 为最高蓄热温度; Q_{max} 为最大蓄热量由设备制造商给出。

② 当前剩余蓄热量 Q_{dasy} , 为 1 个数值, 反应当

前剩余的蓄热量, 可表示为

$$Q_{dasy} = Q_{max} - Q_{daxr} \quad (11)$$

式中 Q_{max} 为最大蓄热量; Q_{daxr} 为当前蓄热量。

3) 实时消纳功率(强度)。

① 当前运行功率 P_{dq} , 为 1 个数值, 反应蓄热锅炉当前的运行功率, 由采集系统上报。

② 可调升功率 P_{sst} :

$$P_{sst} = \begin{cases} P_N - P_{dq}, & Q_{dqsy} > 0 \\ 0, & Q_{dqsy} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中 P_N 为额定运行功率; P_{dq} 为当前运行功率; Q_{dqsy} 为当前剩余蓄热量。

4) 消纳调升速度。

同最大消纳增长速度 V_{z_max} 。

3 算例分析

某风电场日内的实发功率、15 min 前风功率预测与 1 h 前风功率预测曲线如图 3 所示。

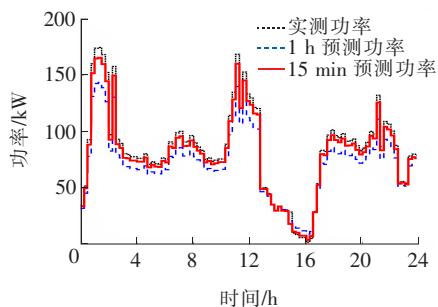


图 3 某风场某风电场日内风功率曲线

Figure 3 Wind power curve of a wind farm within a day

由图可知, 15 min(实线)较 1 h(虚线)风功率预测更接近实测发电量曲线(黑丝点线), 可以利用 15 min 风功率预测曲线作为消纳量优化目标。

某地区现有蓄热锅炉 10 个, 在某一时刻获取到其运行控制参数如表 2 所示。其中, 蓄热锅炉为模拟选取的蓄热锅炉, 单位调整功率并没有进行特殊设置, 对于 1 kW 的调整速度可以认为是瞬时的。仿真选定 5 min 一次调整时间是因为调度的指令下发为 15 min/次, 在一次调度指令的下发间隔可以进行 3 次调整, 保证调整的充分性。假定用户为北方地区典型居民用户, 以表 2 中的电锅炉状态参数生成消纳能力参数集, 对运行中的蓄热电锅

炉每 5 min 调整一次运行功率,并以 15 min 风功率预测曲线作为参考,以消纳量最大为优化目标,通过粒子群算法调整蓄热电锅炉的运行功率,实现风功率消纳,结果如图 4 所示。

表 2 某地区 10 个蓄热电锅炉控制类消纳能力参数表

Table 2 Control type consumption ability indicators of 10 electric boilers in a certain region

参数	额定功率/kW	实际功率/kW	额定蓄热量/(kW·h)	实际蓄热量/(kW·h)	单位调整功率/kW
1	4 000	1 200	40 000	10 000	1
2	1 800	600	18 000	2 000	1
3	200	180	2 000	200	1
4	100	60	1 000	100	1
5	200	100	2 000	100	1
6	300	130	3 000	200	1
7	300	120	3 000	400	1
8	600	230	6 000	500	1
9	800	210	8 000	400	1
10	600	120	6 000	1 000	1

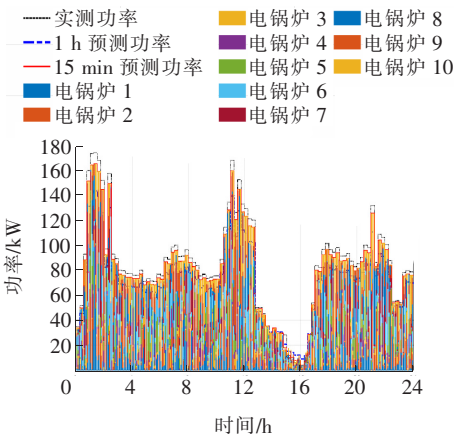


图 4 蓄热电锅炉消纳功率优化结果

Figure 4 Consumptive power optimization results of electric boilers with thermal storage

由图 4 中的消纳功率优化结果可以看到,电锅炉消纳功率可以跟随风电 15 min 预测功率。

当日 8:00 左右时消纳功率优化结果如图 5 所示(图 4 中 8:00 左右时的放大图样)。从图 5 中可以看到 10 个电锅炉各自的功率分配每次调整都会有一定的变化,蓄热电锅炉的功率总和可以较好地跟随 15 min 风功率预测曲线。

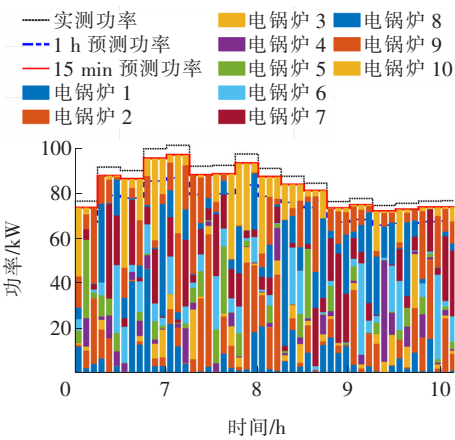


图 5 8:00 时的消纳功率优化结果

Figure 5 Consumptive power optimization results at 8:00

4 结语

该文针对蓄热电锅炉在弃风电量消纳过程中的应用,分析了蓄热电锅炉对弃风电量的消纳方式。对蓄热电锅炉向协调控制系统上报的信息建立了一套指标集,包括运行控制参数和状态展示参数,为蓄热电锅炉消纳指令的下发提供数据支撑,为运行控制人员实时掌握系统运行状态提供数据保障。明确了各参数的获取与计算方法,并使用场景案例仿真验证了该消纳能力指标集的有效性。此外,弃光电量的消纳与弃风电量的消纳在波动性方面类似,在电量大小、时段、波动频次等方面存在一些差异,该文提出的指标集在一定程度上同样适用于弃光电量的消纳。该文的优化结果仍存在一定的误差,在优化算法的选择上,不同优化算法对计算速度以及优化效果的影响仍有待进一步研究。同时在优化目标的选取以及优化控制策略的制定方面仍有一定的拓展空间。

参考文献:

[1] 张卫东. 我国风电弃风原因及对策分析[J]. 中国电力企业管理, 2013(7): 26-29.
ZHANG Weidong. Cause and countermeasure of abandoned wind in China[J]. China Power Enterprise Management, 2013(7): 26-29.
[2] 谢国辉,樊昊. 东北地区风电运行消纳形势及原因分析[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 152-155.
XIE Guohui, FAN Hao. Analysis on the situations and reasons of wind power operation and consumption in northeast China[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 152-155.

- [3] 周任军,尹权,康信文,等. 风电并入冷热电联供系统的优化运行控制[J]. 电力科学与技术学报,2014,29(3):45-51.
- ZHOU Renjun, YIN Quan, KANG Xinwen, et al. Optimal operation control of wind power access to CCHP system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(3): 45-51.
- [4] 鲁宗相,闵勇. 基于功率预测的波动性能源发电的多时空尺度调度技术[J]. 电力科学与技术学报,2012,27(3):28-33.
- LU Zongxiang, MIN Yong. Multiple time and spatial scale dispatching techniques of volatile energy generation based on power prediction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(3): 28-33.
- [5] 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.
- [6] 刘庆超,张清远,许霞. 蓄热电锅炉在风电限电地区进行调峰蓄能的可行性分析[J]. 华电技术,2012,34(9):75-78+82.
- LIU Qingchao, ZHANG Qingyuan, XU Xia. Analysis on feasibility of heat storing electric boiler application for energy storage and peak shaving to increase utilization rate of wind power capacity[J]. Huadian technology, 2012, 34(9): 75-78+82.
- [7] 曾红,刘天琪,何川,等. 含电转气设备的气电互联综合能源系统多目标优化[J]. 电测与仪表,2019,56(8):99-107.
- ZENG Hong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi-objective optimization for integrated natural-gas and electricity energy system considering power-to-gas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 99-107.
- [8] 杨翮,张林强,孙可,等. 法国可再生能源区域发展政策的研究[J]. 高压电器,2019,55(10):241-246.
- YANG Xuan, ZHANG Linqiang, SUN Ke, et al. Analysis on regional development policy of renewable energy in France[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 241-246.
- [9] 董存,梁志峰,礼晓飞,等. 跨区特高压直流外送优化提升新能源消纳能力研究[J]. 中国电力,2019,52(4):41-50.
- DONG Cun, LIANG Zhifeng, LI Xiaofei, et al. Study on power optimization of the trans-regional UHVDC delivery channels in promoting renewable energy accommodation capacity[J]. Electric Power, 2019, 52(4): 41-50.
- [10] 任德江,吴杰康,毛骁,等. 考虑风电消纳的综合能源系统源荷协调运行优化方法[J]. 智慧电力,2019,47(9):37-44.
- REN Dejiang, WU Jiekang, MAO Xiao, et al. Optimal method for source-load coordinated operation of integrated energy system considering wind power absorption[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 37-44.
- [11] 孙勇,魏敏,王磊,等. 基于系统调峰约束的电网风电消纳水平研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):107-112.
- SUN Yong, WEI Min, WANG Lei, et al. Study on wind power consumption based on system peak regulation capability constrain[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 107-112.
- [12] 何后裕,郭健翔,王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(23):180-187.
- HE Houyu, GUO Jianxiang, WANG Yongli. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 180-187.
- [13] 戚永志,黄越辉,王伟胜,等. 高比例清洁能源下水风光消纳能力分析研究方法研究[J]. 电网与清洁能源,2020,36(1):55-63.
- QI Yongzhi, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. A study on hydro-wind-solar consumption analysis method for high proportion of clean energy[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(1): 55-63.