

蓄热式电锅炉的风电消纳研究

李丹东

(西安诺博尔稀贵金属股份有限公司, 陕西 西安 710065)

[摘要] 针对我国风电快速发展下弃风严重的问题,本文提出了一种跟踪风功率的蓄热式电锅炉运行方式的风电消纳方案。在国内外风速预测研究成果基础上,分析蓄热式电锅炉的工作机理,提出一种采用跟踪风功率的控制策略,以弃风量最小和运行成本最小为目标函数,结合各机组的运行约束与能量平衡约束进行分析,从而建立包含蓄热式电锅炉的电网模型。仿真结果表明,本策略具有很好的风电消纳能力和更低的运行成本。

[关键词] 蓄热式电锅炉; 风电消纳; 风速预测

[中图分类号] TF806

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2021)05-0041-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.05.010

1 研究背景和意义

风能以其清洁可再生的优势已成为世界新能源技术的关注点。我国已探明可开发陆上风能约为10亿kW。至2020年底,我国预计风电建设总投资将超过7000亿元。风力发电的出力受限于风速的波动,无法提前规划,导致电网为了满足调峰调频要求和保证系统安全,只能对风电场进行弃风限电。以火电和热电为基础的电网运行机制不能适应风电的大规模并网。我国的弃风电量严重,仅以2016年为例,就达到497亿kW·h,弃风率高达20.6%,造成的经济损失占当年风力发电投资的14%。随着国家对弃风的日益重视,提出力争在2020年将弃风率控制在5%以下。因此,我国关于大规模的风电消纳的研究虽处于起步阶段,但政府、电网和风电企业都在探寻消纳过剩风能的有效方法。

由于我国的风电跨区域输送设施和输送技术仍不完善,风电消纳只能以就地消纳为主。风电就地消纳的方法分为以下几种:蓄水储能、弃风输送、弃风储能、风电供热。其中风电供热蓄热在经济效益和消纳不确定弃风上具有更好的表现。2017年国

家能源局下发《关于促进可再生能源供热的意见》,鼓励和推进北方地区冬季风电供热。

风电供热的方式包含以下几种形式:离网风电机组独立供暖、风电互补供暖、风光互补供暖、风光电互补供暖、热-电机组或风-电机组或蓄热式电锅炉互补供暖,其中利用蓄热式电锅炉完成电热能量在时间上的转移,消纳供暖期内的弃风电量,是目前就地解决弃风现象的有效方案。

2 蓄热式电锅炉工作原理

蓄热式电锅炉的本质为电热转换的电负荷,是一种高效、清洁的电加热设备。在电力系统中,蓄热式电锅炉负荷低谷时通过风电进行制热蓄热,提高电网低谷时段的用电负荷,消纳供暖期的电网无法利用的风电出力,同时在负荷高峰时利用储蓄的热能进行供热,降低热电联产机组的负荷,实现能量的时段转移,打破“以热定电”的限制,稳定电力系统的安全运行。

相对于传统的煤炭锅炉,在利用风电场冬季采暖期弃风供热的同时,把传统的化石燃料和灰渣输送变为电力输送,改变了我国北方地区传统的热电机组和燃煤锅炉构成的集中供热模式,不仅有效降低了区域内的环境污染,节约了投资成本和残渣的处理成本,而且蓄热式电锅炉具有灵活可控性,不需要时刻保持运行状态。蓄热式电锅炉消纳风电供热示意图如图1所示。

从上述的分析可以看出,在一年中供暖需求高

[收稿日期] 2021-06-29

[作者简介] 李丹东(1964-),男,陕西商洲人,大学本科,工程师,主要从事贵金属材料的生产和研究工作。

[引用格式] 李丹东.蓄热式电锅炉的风电消纳研究[J].有色设备,2021,35(5):41-46.

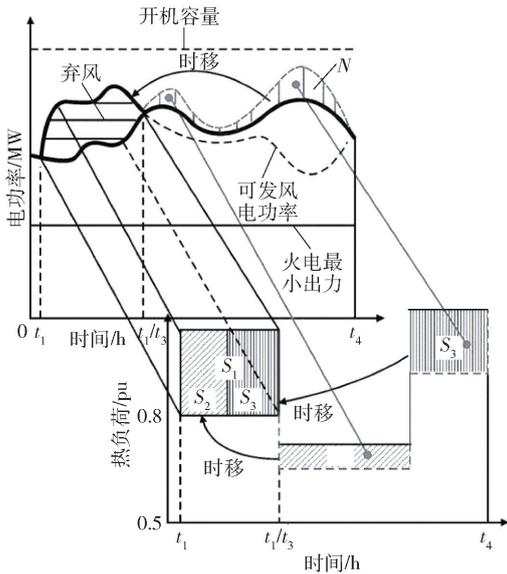


图1 电-热时移特性弃风消纳示意

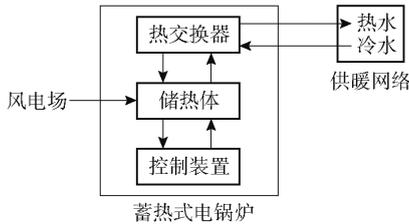


图2 固体蓄热式电锅炉原理结构示意图

峰的冬季,以及一天中用电低谷的夜晚时段,风能资源丰富,风电机组出力高,但是电网中由于热电机组占据了大量的消纳空间,导致发出的风电被迫要放弃。考虑到这些时间段内的热需求高,弃风大,结合蓄热式电锅炉的电热时移特性,利用弃风电力作为蓄热电锅炉的电源。蓄热式电锅炉工作产生的热量一部分与现有热网络的低温热网循环水加热系统并联运行,实现对需求侧用户供热,一部分用于储蓄,在负荷高峰进行供暖,减轻热电联产机组的压力,为风电调度并网提供更多空间。

蓄热式电锅炉的供给源为风电,运行功率可以表示为:

$$P_{bi} = (1 - \alpha)\eta P_w \quad (1)$$

式中 P_{bi} —蓄热式电锅炉加热时的功率;
 P_w —风电发电功率;
 η —风能转化效率;
 α —制热的损耗率。

需求侧的供热负荷决定了蓄热式电锅炉的供暖功率,供热负荷受到多种因素的影响,包括温度,湿

度等气象因素,以及管道、建筑的散热效率等,其中温度的变化是影响供暖需求最主要的原因。为了保持室内供暖温度的稳定性以及降低能源损耗,供热负荷需要对室内与室外温度进行动态调节:

$$P_{bo} = P_r + \Delta P_r \quad (2)$$

$$P_r = \sum_{j=1}^J q_i S_i (T_{ji} - T_{jo}) \quad (3)$$

式中 P_{bo} —蓄热式电锅炉供暖时的功率;
 J —热电站供热范围内的建筑数量;
 q_i —建筑 j 的单位面积散热指标;
 S_i —建筑 j 的面积;
 T_{ji} —建筑 j 的室内温度,一般为 $16 \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
 T_{jo} —建筑 j 的室外温度;
 ΔP_r —位传输过程中的热损失。

蓄热式电锅炉实现了电-热能量的转化和时移,在夜晚风电高发期利用原本的弃风电量进行制热蓄热,而在电负荷较高的白天时段利用储存的热能向用户供热,缓解了热电机组的热负荷,提高了系统调度的灵活性。从经济性上看,蓄热式电锅炉将过剩风电加以利用,起到一定的削峰填谷功能,降低热电联产机组出力,减少化石能源的使用,达到节能减排的目的,降低系统总体的运行成本。

3 基于风速预测与蓄热式电锅炉的风电消纳研究

风力发电收到风速变化波动性与随机性的限制,具有严重的不确定性,加上冬季供暖期内的“风热冲突”依然是影响风电消纳的主要原因,蓄热式电锅炉一方面作为电网负荷,在风电高发期利用风电进行制热蓄热,另一方面解耦热电联产机组“以热定电”的运行约束,实现了电热的时移转换,提高了系统的调峰能力。需要对蓄热式电锅炉的运行策略的分析,建立优化调度模型,从风电消纳和经济效益两方面验证了基于风速预测的运行策略的有效性。

3.1 基于蓄热式电锅炉的风电消纳控制策略

风速的季节性变化较为明显,风速波动范围比较大,根据波峰风速和谷底风速对应的时间,6月至9月平均风速与平均风功率密度较小,11月至次年2月(冬季)平均风速与平均风功率密度较大,风速与风功率密度的月变化趋势基本一致,存在比较明显的波动性与间歇性。风电高发期与我国的供热期

重叠程度较高,风电消纳量也明显高于非供热期,而此时由于热电机组“以热定电”的运行状态,严重压缩了电网中消纳风电的空间,虽然电网系统为了应对风电随机波动会预留一定调控容量。但是在供热时段内的负荷低谷期,调峰容量十分有限,造成大量风电弃风。

蓄热式电锅炉在高弃风时段进行工作,产生的热量一部分与现有热点网络的低温热网循环水加热系统并联运行,实现对需求侧用户供热,一部分用于储蓄,在负荷高峰进行供暖,实现电热的时移,减轻热电联产机组的压力,为风电调度并网提供更多空间。相比于传统的锅炉,蓄热式电锅炉利用风电供热不仅有效缓解化石能源造成的环境污染问题,同时可以大量利用优质风资源,达到降低风电弃风的目的。

本文采用的蓄热式电锅炉消纳风电的运行策略有两种:

(1) 基于分时电价的两阶段运行方式

我国为了鼓励风电的就地消纳,针对风电供热项目的用电执行大工业用户用电,每日根据不同的时间段,将用电分为“峰、谷、平”三个时段,具体时间段的划分如下:

表 1 不同用电时段划分

名称	描述	电价
用电峰段	7:30—11:30, 17:00—21:00	0.74 元/kW·h
用电平段	22:00—5:00	0.508 元/kW·h
用电谷段	5:00—7:30, 11:30—17:00, 21:00—22:00	0.275 元/kW·h

在此基础上,为了节约运行成本,蓄热式电锅炉可以根据分时电价设置两阶段运行方式:在每日的部分用电谷段以及部分用电平段,即每日 21:00 至次日 7:00,由于该时间段内的风力资源丰富,风电出力较高,电网接纳风电的能力较低,在该时间段内蓄热式电锅炉以额定功率运行,以较低的电价进行蓄热;在这段时间之外,电价恢复正常水平,蓄热式电锅炉停止运行,仅向外进行供暖,降低热电联产机组的负荷,为电力系统获取更多接纳风电的空间。

$$P_{bi} = \begin{cases} 0 & 7 \leq t \leq 21 \\ P_{bi}^{\max} & 0 \leq t \leq 7 \text{ and } 21 \leq t \leq 24 \end{cases} \quad (4)$$

(2) 跟踪风电功率的运行方式

将蓄热式电锅炉作为电网中的可调节负荷,对其运行功率根据风功率的预测出力进行调节。但是短时间内过多的调节次数会严重损害其使用寿命,为了降低跟踪风电功率运行方式的调节次数,根据蓄热式电锅炉的额定制热功率将其运行功率划分为多个档位,基于第三章建立的风速预测模型获得未来的一小时内的风速预测序列,根据风电机组的处理模型进行风功率预测,将风电功率和蓄热式电锅炉的剩余容量作为决策变量来控制运行状态以及运行功率。

如图 3 所示,依据当前时刻的剩余热量容纳空间,若风电功率 $P_w(v)$ 大于等于额定功率 P_{bi}^{\max} 时,并且直到下一次功率改变前产生的热量小于剩余容量,则电锅炉以额定功率 P_{bi}^{\max} 运行,否则将运行功率下降一个档位并重新判断,直到选择出合适的制热功率;当风电功率 $P_w(v)$ 大于 0 小于 P_{bi}^{\max} 时,并且在该功率下运行直到下一次功率改变前产生的热量小于剩余容量,电锅炉以风电功率 $P_w(v)$ 所处档位运行,否则将运行功率下降一个档位并重新判断,直到选择出合适的制热功率。在该策略中,蓄热式电锅炉能够配合风电出力尽可能消纳风电,同时避免在风电出力较低的情况下,电锅炉的运行功率过大造成的经济损失。

$$P_{bi} = \begin{cases} P_{bi}^{\max} & P_{bi}^{\max} < P_w(v) \text{ and } Q_{br} > Q_{bi} \\ P_d & d = \arg \max Q_d \text{ and } Q_{br} > Q_d \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_d —蓄热式电锅炉在档位 d 下的运行功率;
 Q_{br} —剩余容量, $Q_{d\max}$ 为额定功率下 1 小时储蓄的热量;
 Q_d —档位 d 下 1 小时储蓄的热量。

3.2 基于蓄热式电锅炉的优化调度系统

根据上述分析,建立包含蓄热式电锅炉的电力调度系统,如图 4 所示。

系统中主要包含电能和热能的生产、传输、转化、存储与使用。两种能量之间存在着较为复杂的耦合关系,因此首先将各个部分的模型从能量角度对主要构成部分进行详细描述,忽略传输和损耗部分,以此简化系统的数学模型。从结构上进行划分,系统中存在着能量供给部分,能量转化和存储部分以及能量输出部分。

3.3 实验模型与实验结果分析

3.3.1 实验情景与参数

为了验证基于风速预测出力的储能系统能够配

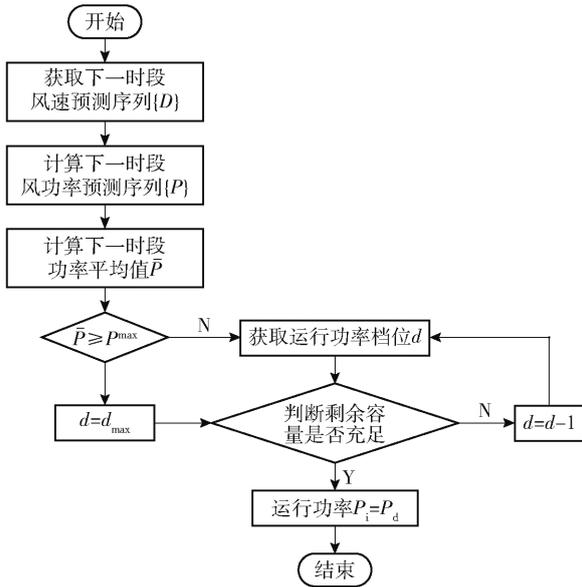


图 3 跟踪风电运行策略流程图

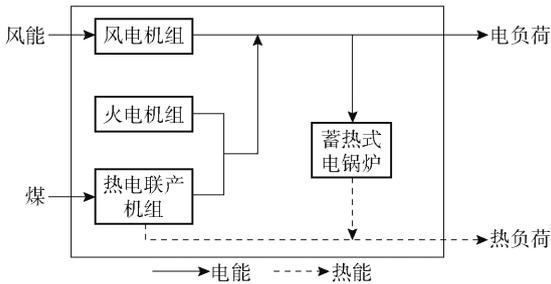


图 4 引入蓄热式电锅炉的调度系统示意图

合电网更有效地进行风电消纳,针对以下三种情景根据上述的约束条件对目标函数进行实验分析。三种情景分别为:

情景 I) 实验仅包含火电机组、热电联产机组、风电机组,不考虑蓄热式电锅炉;

情景 II) 在情景 I 的基础上,加入蓄热式电锅炉,同时蓄热式电锅炉采用两段式运行方式;

情景 III) 在情景 II 的基础上,加入蓄热式电锅炉,同时蓄热式电锅炉采用跟踪风电预测功率的运行方式,将蓄热式电锅炉的功率以每 2 MW 划分为一个档位,获得[0、2、4、6、8、10、12、14、16、18、20]合计分成 11 个档位进行实验。

根据上述情景分析,利用 PSCAD 仿真软件,在 IEEE3 机 9 节点模型的基础上进行仿真实验,其中 7、9 节点分别接入火电机组和热电机组,风电机组和蓄热式电锅炉接入 8 节点。

调度模型中各机组、蓄热式电锅炉的仿真参数

如表 2、3、4 所示,电负荷和热负荷需求如图 5 所示,风电预测出力曲线如图 6 所示。

表 2 火电机组和热电机组的仿真参数

参数名称	参数值
火电机组最小出力/MW	50
火电机组最大出力/MW	250
热电联产机组最小出力/MW	100
热电联产机组最大出力/MW	300

表 3 蓄热式电锅炉仿真参数

参数名称	参数值
额定运行功率/MW	20
制热效率/%	97
储热容量/MWh	50
储热效率/%	100
自放热率/%	0

表 4 调度系统参数

参数名称	参数值
供热面积/m ²	10 000
采暖期室外平均温度/℃	-6.7
采暖热指标值/(W/m ²)	40
最大热负荷/MW	200
最小热负荷/MW	50
煤炭价格/元	640

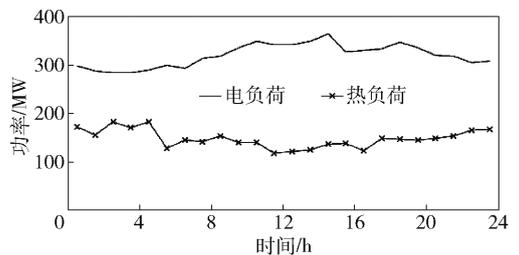


图 5 电、热负荷需求曲线

3.3.2 实验结果分析

综合上述分析,表 5 给出了三种情景下的风电消纳量,弃风电量和弃风率,表 6 给出了三种情景下各机组的运行成本、弃风成本以及典型日内的总体发电成本。

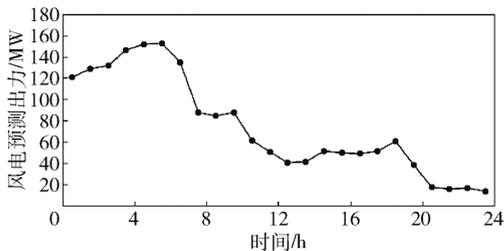


图6 风电场预测出力曲线

表5 各情景模式风电消纳数据对比

情景模式	风电消纳量/MW	弃风量/MW	弃风率/%
情景 I	450.60	1 101.77	73.02
情景 II	548.81	1 008.03	64.93
情景 III	674.10	962.01	57.47

表6 各情景模式运行成本对比

单位:元

情景模式	火电机组	热电机组	弃风成本	投资成本	总和
情景 I	83 681.20	136 719.56	104 260.29	0	324 661.05
情景 II	98 514.31	119 042.78	95 389.87	1 369.86	314 316.82
情景 III	92 843.41	123 681.49	91 035.01	1 369.86	308 929.77

可以看出情景 II 在引入蓄热式电锅炉后,风电消纳量增加了 93.74 MW,有效提高了系统对于风电的利用率,同时弃风成本下降了 8 870.42 元,并且由于解耦了热电机组的运行约束,降低其出力水平,系统总体运行成本下降了 10 344.2 元。而情景 III 利用短期风速预测模型有效跟踪风功率水平,从而调节蓄热式电锅炉运行功率,避免了在风电出力较低的时段以额定功率运行,提高了风电消纳能力,虽然热电机组相较于情景 II 出力变高,但是总体运行成本下降了 4 351.86 元,总体来看,情景 III 的风电消纳能力和运行成本在三种运行方式中最优。若按情景 III 的风电消纳情况进行估计,该系统利用电网谷段电力比例为 89.16%,每年利用电网谷段电力约为 11.6 GWh,假设这部分谷段电力全部来自风电出力,所对应的风电场可以减少弃风小时数约 234.4 h,占风资源等效利用小时数的 9.3%,同时节约煤耗 3 823 t。

3.4 结论

针对冬季供暖期内影响风电消纳的“风热冲突”因素,在传统的电力调度系统中引入蓄热式电锅炉,建立了风电消纳的优化调度模型,采用基于分时电价的两段式运行方式和短期风速预测模型,跟踪预测风功率的运行方式,以系统弃风量最小和运行成本最优为目标函数,以及能量转化平衡和各个模块之间的运行约束,对三种不同场景下的风电消纳能力与经济效益进行仿真实验分析。结果表明:蓄热式电锅炉能够有效提高系统接纳风电的能力,解耦热电联产机组“以热定电”的运行约束,取得较

好的经济效益;在跟踪风电功率的运行方式下,能提高系统的调峰能力,降低总成本。

4 研究工作总结

针对我国风电快速发展下弃风严重的问题,本文提出了一种跟踪风功率的蓄热式电锅炉运行方式相结合的风电消纳方案。本文有待进一步完善之处:

(1) 本文虽对环境温湿度、气压对风速预测进行了研究,但风速是一种多因素引起的自然现象,对降雨量、风切变、气压等影响因素没有考虑。

(2) 仅对风电消纳进行了研究,实际上分布式光伏发电与风力发电的多能互补、储能电池与抽水储能模式组合,组成多源-荷-储(热-电)联合系统更有意义。

[参考文献]

- [1] 吕鑫,刘天予,董馨阳,等. 2019 年光伏及风电产业前景预测与展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019,21(2):31-35.
- [2] 风电发展“十三五”规划[R]. 国家能源局,2016(11):21-22.
- [3] 秦海岩. 2018 年风电产业实现高质量发展[J]. 风能, 2018(12):3.
- [4] 吕文春,马剑龙,陈金霞,等. 风电产业发展现状及制约瓶颈[J]. 可再生能源,2018,36(8):112-116.
- [5] 李博洋,杨墨宇. 风电消纳供暖方式示范项目可行性研究[J]. 技术与市场,2018,25(7):65-66.
- [6] 吕泉,刘永成,刘乐,等. 两种风电供热模式的节煤效果比较[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):66-82.

- [7] 吕泉,李玲,朱全胜,等.三种弃风消纳方案的节煤效果与国民经济性比较[J].电力系统自动化,2015(7):75-83.
- [8] 张新宇,李斌,姚远.风电供暖技术方法研究[J].电网与清洁能源,2014,30(1):99-101.
- [9] 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.
- [10] 戴远航,陈磊,闵勇,等.风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J].中国电机工程学报,2017,37(12):112-121,317.
- [11] 万杰,赵鑫宇,刘金福,等.基于自相关分析的风速最佳预报长度度量方法研究[J].可再生能源,2017,35(8):1244-1249.
- [12] 赵征,汪向硕,乔锦涛.基于VMD和改进ARIMA模型的超短期风速预测[J].华北电力大学学报:自然科学版,2019,46(1):58-63.
- [13] Baghaee H R, Mirsalim M, Gharehpetian G B, et al. Three-phase AC/DC power-flow for balanced/unbalanced micro-grids including wind/solar, droop-controlled and electronically-coupled distributed energy resources using radial basis function neural networks[J]. IET Power Electronics, 2017,10(3):313-328.
- [14] 方必武,刘涤尘,王波,等.基于小波变换和改进萤火虫算法优化LSSVM的短期风速预测[J].电力系统保护与控制,2016,44(8):37-42.
- [15] 杨茂,张罗宾.基于数据驱动的超短期风电功率预测综述[J].电力系统保护与控制,2019,47(13):171-186.
- [16] 凌立文,张大斌.组合预测模型构建方法及其应用研究综述[J].统计与决策,2019,35(1):20-25.
- [17] 邱盛.基于风速预测与蓄热式电锅炉的风电消纳优化研究[D].长沙:中南大学,2020.

Research on Accommodating Wind Power of Heat Accumulating Type Electric Boiler

LI Dan-dong

Abstract: In view of the serious wind power curtailment under the rapid development of wind power in China, this paper proposes a scheme for accommodating wind power by adopting wind power tracking, the operation mode of heat accumulating type electric boiler. Based on the research results of wind speed prediction at home and abroad, and with the working mechanism analysis of heat accumulating type electric boiler, the control strategy adopting wind power tracking is put forward. The objective function is to minimize the wind power curtailment and operating cost, combined with the constraints of operation and energy balance of each unit, the grid model of heat accumulating type electric boiler is established. The simulation test shows that this strategy has great capacity to accommodate wind power and lower operating cost.

Key words: heat accumulating type electric boiler; wind power consumption; wind speed prediction ▲