

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.004

基于城市功能区划分的分布式相变蓄热站 热经济性分析

Thermal economy analysis of distributed phase change heat storage stations
based on urban functional zoning

钟声远¹,赵军¹,李浩¹,王小元¹,周颖²

ZHONG Shengyuan¹, ZHAO Jun¹, LI Hao¹, WANG Xiaoyuan¹, ZHOU Ying²

(1.天津大学 中低温热能高效利用教育部重点实验室,天津 300350; 2.中国电力科学研究院有限公司,
北京 100192)

(1.Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, Tianjin University, Tianjin 300350,
China; 2.China Electric Power Research Institute Company Limited, Beijing 100192, China)

摘 要:中国“三北”地区供暖季“以热定电”的运行方式是造成弃风的重要原因之一,采用蓄热式电锅炉供暖是提高风电消纳率的一种有效方式。将分布式蓄热和相变蓄热相结合,可以充分发挥匹配灵活、蓄热效率高和反应快速等优势。以分布式相变蓄热站的年收益为优化目标,在考虑蓄热约束、供热约束和联合供热约束的条件下,对基于城市功能区划分的分布式相变蓄热站进行了经济性分析。结果表明:区域的热负荷特性对蓄热站供暖期的年收益有显著影响;依据边际效益规律,当商务办公区选取蓄热站容量为 13 200 kW·h、蓄热功率为 10 800 kW,居民住宅区选取蓄热站容量为 11 200 kW·h、蓄热功率为 9 000 kW 时蓄热站年收益达到最大值;在选定的容量和蓄热功率下,当商务办公区、居民住宅区的电价分别为 0.218,0.221 元/(kW·h)时,分布式相变蓄热站可达到收支的平衡。

关键词:分布式相变蓄热站;城市功能区;分布式蓄热;相变蓄热;容量优化;边际效益;经济性;可再生能源;弃风

中图分类号:TU 832 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-1951(2020)04-0023-08

Abstract: The operation mode of “Setting Electricity by Heat” taken by the Three-North Region in China during heating seasons is one of the important causes for the wind power abandoning. The utilization rate of wind power can be improved by taking heat storage electric boilers. Combining distributed heat storage and phase change heat storage technologies can give full play to their advantages of flexible matching, high heat storage efficiency and fast response. To increase the annual return of distributed phase change heat storage stations, the economy analysis of distributed phase change heat storage stations based on urban functional zoning is made, while considering the heat storage constraint, heating constraint and combined heating constraint. The analyzing results show that the annual returns of heat storage stations are affected by the characteristics of the regional heat load. According to the law of marginal benefits, the annual return of a heat storage station in commercial area will be maximized with 13 200 kW·h capacity and 10 800 kW heating power, and that in a residential area will peak with 11 200 kW·h capacity and 9 000 kW heating power. With the selected capacity and heating power, the station can reach the break-even point with the electricity price of 0.218 Yuan/(kW·h) in the commercial area and 0.221 Yuan/(kW·h) in the residential area respectively.

Keywords: distributed phase change heat storage station; urban functional area; distributed heat storage; phase change heat storage; capacity optimization; marginal benefit; economic; renewable energy; wind power abandoning

0 引言

随着中国能源结构清洁化进程的稳步推进,现有能源体系中可再生能源占比日益提高。截至

2017 年年底,中国可再生能源发电装机容量达 650 GW,约占全部电力装机容量的 36.6%,其中风电装机容量为 164 GW^[1],但随之而来的弃风问题成为了阻碍可再生能源发展的关键。2010 年中国首次正式提出风电消纳规划^[2],2017 年全国总弃风率降至 12%,但“三北”地区的弃风依然较为严重,甘肃、新疆、内蒙古仍保持 33%,29%,15% 的高弃风率^[3]。

收稿日期:2020-03-10;修回日期:2020-04-02

基金项目:国家电网公司科学技术项目(SGTJDK00DWJS
1900101)

《风电发展“十三五”规划》强调:吉林、黑龙江、甘肃、宁夏、内蒙古、新疆自治区、新疆生产建设兵团暂不下达各年度新增建设规模,待弃风限电问题缓解后另行下达^[4]。

针对弃风问题,国内外学者提出了不同解决方案,目前主流的解决方案是与其他电源配合消纳和储能,平抑风电波动的同时,起到削峰填谷、提升经济性的作用^[5-8]。“以热定电”的运行模式导致系统调峰能力不足是中国“三北”地区弃风限电的首要原因^[9],国家针对该问题出台了各种相关措施,积极推广风电清洁供暖技术,利用电采暖方式实现电能替代以提高消纳率^[10]。文献[11]使用多目标优化粒子群算法,分析得出蓄热装置和电锅炉的组合调度可以缓解弃风问题。文献[12]使用基于轮盘赌思想的优化算法,分析得出储能协同蓄热式电锅炉供暖可以提升风电消纳的效果。文献[13]基于合作博弈和 Shapely 值分配模型方法,对使用相变蓄热方式联盟(包含风电场、弃风供热企业、热电厂和电网公司)的收益进行优化,使得各成员都有可观收益。

目前较常见的蓄热形式为集中蓄热,但随着供热管网规模的扩大,集中蓄热调节延滞效应大、灵活性差的缺点逐渐显现^[14],而基于用户侧的分布式蓄热则具有灵活性好、反应迅速和效率高的优势;同时,传统的显热蓄热装置蓄热密度低、储/释热过程温度波动明显,无法满足大范围的蓄热设施建设需求,而相变蓄热潜热大、恒温的特点^[15]更加符合未来建设需求。然而,既有研究中鲜见对分布式蓄热站的规模设置进行系统化的定量分析。

本文在上述研究基础上,将相变蓄热与分布式蓄热相结合,从城市功能区域划分出发,对不同功能区建设分布式相变蓄热站的经济性进行分析,为解决“三北”地区大规模风电消纳问题提供参考。

1 城市区域负荷特性

依据 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》^[16],中国“三北”地区大多处于严寒地带,必须充分满足冬季保温要求,本研究选取东北地区某市作为典型城市进行分析。

近年来,随着工业设施的外迁,当前城市内的商用、民用和公共服务设施主要包含住宅小区、工商企业、医院等。各建筑由于功能不同,热负荷波动规律、峰谷差等特性均有较大差别,因此,设置分布式蓄热站时不能只考虑大区域负荷,应综合考虑各功能区域的负荷特性。

本研究采用 DeST 软件进行模拟,参考实际城市

功能,分别模拟包含酒店、住宅小区、医院和办公楼的居民住宅区和商务办公区的热负荷特性。各功能区构成见表 1,各建筑基础参数见表 2。

根据功能区的划分可得各区域的典型日逐时热负荷,如图 1 所示。

表 1 各功能区构成

Tab. 1 The composition of functional areas

项目	居民住宅区	商务办公区
医院	2	1
酒店	0	2
办公楼	2	10
小区	5	1

表 2 各建筑基础参数

Tab. 2 Parameters of each building

项目	总建筑面积/m ²	单建筑层数	单建筑层高/m
医院	4 739	8	3.0
酒店	12 292	9	3.3
办公楼	7 200	10	3.0
小区	33 540	9	2.8

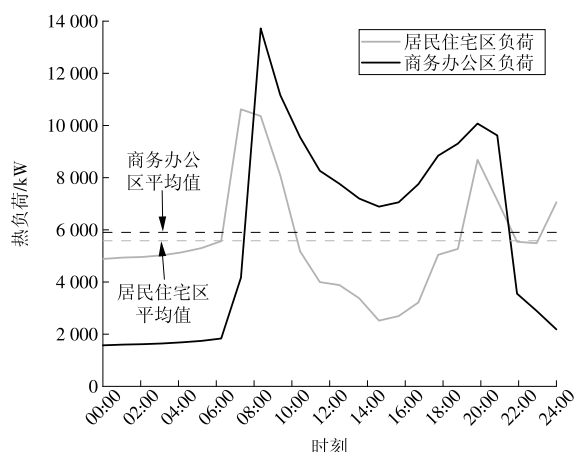


图 1 各区域典型日逐时热负荷

Fig. 1 Hourly heat load of a typical day in each area

由图 1 可见,2 区域平均负荷相近,但波动情况和峰谷差相差甚远,若依照传统设计方式参考 CJJ 34—2010《城市热力网设计规范》中的供暖面积热指标推荐值^[17]进行设计,显然不能满足未来分布式蓄热站的建设需求。因此,本研究将对基于城市功能区划分的分布式相变蓄热站的经济性进行分析,为分布式相变蓄热站的容量设置提供一定参考。

2 相变蓄热站设计

2.1 相变蓄热站供热模式

由于风力发电的不稳定和“反调峰”等特性,当相变蓄热模块没有热量供给热负荷时,蓄热站只能使用市电供热,会导致成本增加。因此,相变蓄热

站与热电厂联合供热,由热电厂提供供热调峰服务是比较经济的方案,该供热模式如图2所示。

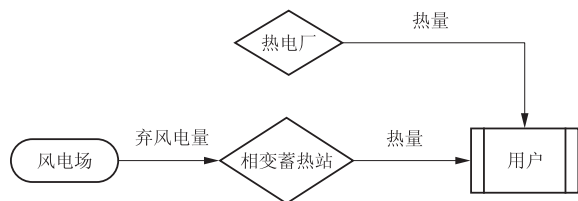


图2 相变蓄热站与热电厂联合供热模式

Fig. 2 Combined heating mode with a phase change heat storage station and a thermal power plant

2.2 相变蓄热站供热模式

对相变蓄热站进行经济性分析时,针对的目标为该站的年收益情况,目标函数为

$$F = A_1 - B_1 - B_2 - B_3 - B_4 - B_5, \quad (1)$$

式中: F 为相变蓄热站的年收益; A_1 为相变蓄热站售热收入; B_1 为相变蓄热站向热网购热费用; B_2 为相变蓄热系统初始投资的年折算费用; B_3 为相变蓄热系统运行维护费用; B_4 为相变蓄热站向电网购电(废弃风电)费用; B_5 为相变蓄热站购地初投资的年折算费用。

根据目标函数对研究对象进行建模。相变蓄热系统初始投资包含相变蓄热模块和电加热模块,将初始投资成本折算到规划年,可得规划年初始投资的分摊成本。根据某公司提供的相关数据,相变蓄热模块投资为相变蓄热模块单体价格的一次函数,电加热模块投资为电加热功率的二次型函数。相变蓄热系统运行维护费用可看作初始投资成本的线性函数^[13]。目标函数的各项表达式为

$$A_1 = C_h \sum_{t=1}^T P_h, \quad (2)$$

$$B_1 = C'_h \sum_{t=1}^T P'_h, \quad (3)$$

$$C_B = \frac{S}{S_a} C_s - a_1 P_{\text{emax}}^2 - a_2 P_{\text{emax}} - a_3, \quad (4)$$

$$B_2 = C_B \frac{\gamma(1+\gamma)^k}{(1+\gamma)^k - 1} - C'_B \frac{\gamma(1+\gamma)^k}{(1+\gamma)^k - 1}, \quad (5)$$

$$B_3 = C_B R_t, \quad (6)$$

$$B_4 = C_e \sum_{t=1}^T P_e, \quad (7)$$

$$B_5 = \frac{S}{S_a} \cdot A \cdot \frac{\gamma(1+\gamma)^k}{(1+\gamma)^k - 1}, \quad (8)$$

式中: C_h 为相变蓄热站热量单价; t 为时间步长, $t \in [1, T]$; P_h 为相变蓄热站供热功率; C'_h 为热网购热单价; P'_h 为热网调峰供热功率; C_B 为相变蓄热站初始投资; S 为相变蓄热站容量; S_a 为相变蓄热模块单体容量; C_s 为相变蓄热模块单价; P_{emax} 为电加热系统

最大功率; γ 为弃风供热企业资金的年利率; k 为相变蓄热系统报废期或土地最高出让年限; C'_B 为相变蓄热系统残值; R_t 为运行维护费用比例; C_e 为弃风电价; P_e 为相变蓄热系统电热功率; A 为相变蓄热模块单体占地面积。

2.3 相变蓄热站供热模式

(1) 相变蓄热系统容量约束

$$0 \leq S' \leq S, \quad (9)$$

式中: S' 为相变蓄热系统容量状态。

(2) 相变蓄热系统供热约束

$$0 \leq P_e \leq P_{\text{emax}}, \quad (10)$$

$$0 \leq P_h \leq P_{\text{hmax}}, \quad (11)$$

式中: P_{hmax} 为相变蓄热系统供热最大功率。

(3) 相变蓄热系统容量状态约束。蓄热系统运行优化一般要求运行一个周期后蓄热量恢复到初始状态,即

$$S'_{\text{start}} = S'_{\text{end}}, \quad (12)$$

式中: S'_{start} 为相变蓄热系统周期初始蓄热量; S'_{end} 为相变蓄热系统周期结束蓄热量。

(4) 相变蓄热系统电热转换约束,电加热功率应不大于蓄热站总体最大换热功率。

$$P'_e = \eta P_e, \quad (13)$$

式中: P'_e 为实际蓄热功率; η 为电热转换效率。

由于本文所研究相变蓄热站只供应所属区域,因此算例分析中电热转换设备单位时间产热量不大于相变蓄热站容量,即

$$P'_e t \leq S.$$

(5) 相变蓄热系统与市政热网联合供热,满足供热平衡约束

$$P_h + P'_h = P_{\text{load}}, \quad (14)$$

式中: P_{load} 为该区域总热负荷。

由于本研究针对的是城市区域分布式相变蓄热站,规模远小于市政热网与电网,因此对热电厂最大出力、弃风电量和线路潮流不做约束。

3 算例分析

3.1 算例说明

本研究根据东北地区某市的典型年气候模拟得出的热负荷数据为基础,分析基于城市功能分区的区域分布式相变蓄热站的经济性。全年供暖期(11月1日至次年3月31日)2区域热负荷特性如图3所示。

从图3可以看出,2区域全年热负荷波动规律相近,但商务办公区高负荷持续时间更长,居民住宅区低负荷持续时间更长。2区域最大负荷与平均负

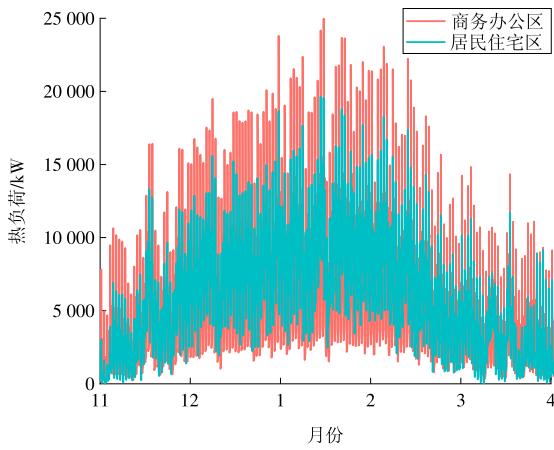


图3 2区域供暖期热负荷特性
Fig. 3 Heat load characteristics of the two regions in a heating season

荷之间差值过大,若依据最大值决定蓄热容量必将造成浪费。因此,算例以容量变化和电热转换功率为基础,计算分析区域相变蓄热站的经济性。

根据实际情况,算例中相变蓄热站供热价格为0.24元/(kW·h)。蓄热站使用的电价为蓄热站和风电场的协议电价和过网费之和^[18],电能传输的过网费与购售双方的地理位置及线路损耗相关,本文用电过网费选为定值0.11元/(kW·h)^[19-20]。相变蓄热系统运行维护费用比例为0.3%,设备残值为初始投资的5%,设备报废期20年,热电转换效率为97%。相变蓄热系统初始投资包含相变蓄热模块和电加热模块,相变蓄热模块投资为相变蓄热模块单体价格的一次函数,电加热模块投资为电加热功率的二次型函数。

现有研究在初投资方面通常只考虑设备费用,但现阶段土地交易是推动经济发展的重要因素之一,因此土地投资是不能忽略的关键因素^[21]。根据国家《城市用地分类与规划建设用地标准》^[22],蓄热站属公共供热设施,用地类型为公共服务设施用地,土地出让年限为50年。

相变蓄热装置采用某公司的模块化相变蓄热单元,单个模块的参数见表3。蓄热站中采用4个模块并联为1组,即总高4.8m的相变蓄热单元。

表3 相变蓄热模块参数

Tab. 3 Parameters of the phase change heat storage model

项目	各边长/m	最大容量/(kW·h)	最大换热功率/kW	单价/[元·(kW·h) ⁻¹]
数值	1.2	100	80	200

3.2 算例计算结果

根据所搭建的模型和约束条件,电价仅影响蓄热站的最终年收益,对于蓄热站容量和蓄热功率与

相变蓄热站年收益之间的关系没有影响。因此,算例在电价只包含过网费的极限条件下进行计算,可得相变蓄热站年收益与蓄热站容量和蓄热功率的变化曲线,如图4、图5所示。

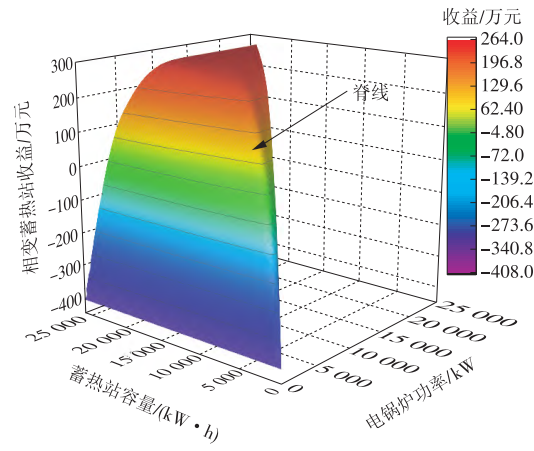


图4 商务办公区相变蓄热站年收益
Fig. 4 Annual return of a phase change heat storage station in business area

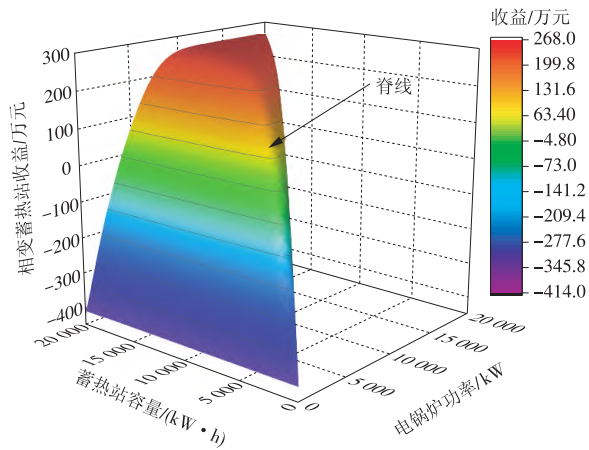


图5 居民住宅区相变蓄热站年收益
Fig. 5 Annual return of a phase change heat storage station in residential area

从图4、图5可以看出,在相变蓄热站容量一定的情况下,随着蓄热功率的增加,系统总收益总体呈增长趋势。容量增加初期年收益快速增长,随着容量逐渐接近最大负荷,年收益增长速度逐渐趋于平缓。当蓄热功率越过图中“脊线”后,年收益与其成负相关。

而当蓄热功率确定后,由于蓄热站容量和蓄热功率之间的约束,随着蓄热站容量的增加,年收益短暂增长后快速进入平缓阶段。

从图中可以看出,年收益与相变蓄热站容量和蓄热功率有很强的相关性,但商务办公区和居民住宅区出现增速放缓的区域并不相同,因此应结合各区域的特性进行分析;同时,由于蓄热站容量和蓄热功率之间的约束,蓄热站容量作为首要分析对象

将更加适宜。

3.3 基于区域热负荷特性的蓄热站容量配置分析

图4和图5的增长规律类似边际效益递减规律,且处于第2阶段合理增长阶段,即随着投入的增加边际效益会逐渐减少;若边际效益仍为正,则总效益持续增加,但增加幅度逐渐平缓;当投入累积到饱和,边际效益递减至0时,总效益不会再增加,此时总效益达到最大。为了获得整体的边际效益增长规律,将图4和图5的图形投影至蓄热站容量与年收益2坐标轴所组成的平面,计算得总收益的边际效益曲线,如图6所示。

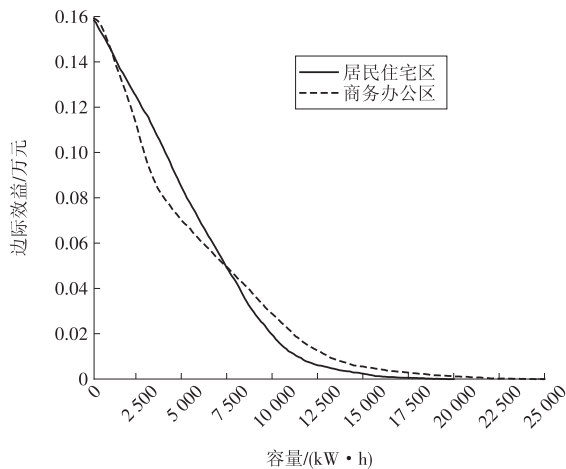


图6 蓄热站年收益边际效益曲线

Fig. 6 Annual return marginal benefit curve of a heat storage station

从图6可以看出,当居民住宅区相变蓄热站容量达到11 000 kW·h左右时边际效益快速下降,而商务办公区相变蓄热站容量在13 000 kW·h左右时边际效益快速下降。为了更明显地反映边际效益与各区域负荷特性的关系,应结合各功能区的热负荷特性进行分析。

根据模拟所得的2区域热负荷,计算得出整个供暖期的热负荷延时曲线,如图7所示。

从图7可以明显看出,在全供暖期间,最大热负

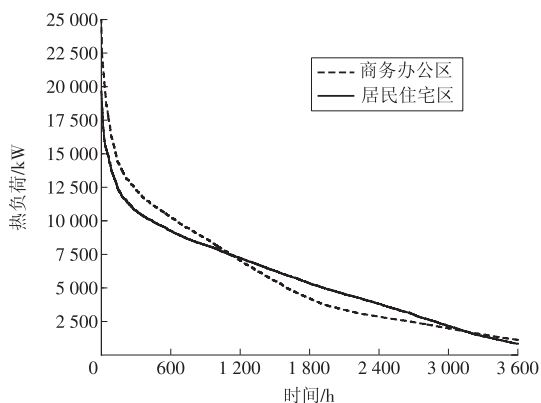


图7 供暖期热负荷延时曲线

Fig. 7 Thermal load delay curve during heating period

荷附近的值占比极小,通过计算各负荷区间所对应的时长与总时长的比值,可以更明显地显示各负荷区间占比,见表4。

表4 各负荷区间占比

区域	负荷/MW			
	>5 000	>10 000	>12 500	>15 000
商务办公区	44.3	17.9	9.8	3.4
居民住宅区	53.2	12.1	5.1	1.5

结合表4与图7可以看出,在蓄热功率一定的条件下,当相变蓄热站年收益增长速率开始快速下降时,容量超过10 000 kW的负荷占比相对较小。居民住宅区由于最大热负荷较低,故年收益增长速率下降点更为靠前。从图6中分析得出的居民住宅区和商务办公区的边际效益快速下降点所属负荷区间占比分别为8.3%、5.2%,既满足供热需求又能避免设备容量设置过大而造成浪费。

在算例工况下,选定商务办公区蓄热站容量为13 200 kW·h、居民住宅区蓄热站容量为11 200 kW·h作为后续分析基础,首先基于该容量确定蓄热功率,图8为选定容量下蓄热功率与年收益的关系。

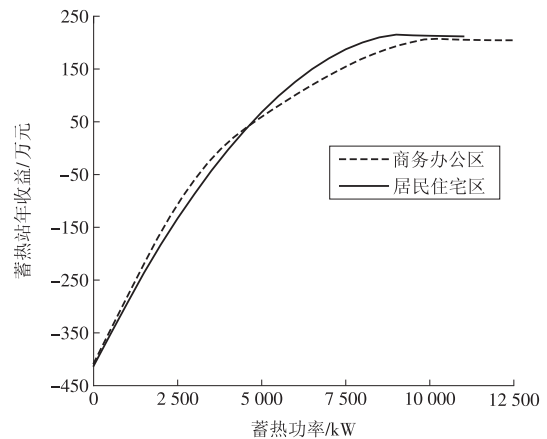


图8 蓄热功率与蓄热站年收益变化曲线

Fig. 8 Annual return of a heat storage station varying with its heating power

从图8可以看出,当居民住宅区蓄热功率达到9 000 kW、商务办公区蓄热功率达到10 800 kW时,蓄热站年收益出现最大值,出现最大值前年收益基本保持较快增长的趋势。

3.4 相变蓄热站运行特性分析

本研究分析的基于城市功能分区的分布式相变蓄热站由于采用了风电这一清洁能源,因此相比于完全依赖集中供暖的方式在节能减排方面也具有一定优势。本节将对2区域相变蓄热站分布式供暖模式,分析其在风电消纳和缓解热电厂供热

压力方面的表现。根据前文分析,选定商务办公区蓄热站容量为 $132\,00\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、蓄热功率为 $10\,800\text{ kW}$,居民住宅区蓄热站容量为 $11\,200\text{ kW}\cdot\text{h}$ 、蓄热功率为 $9\,000\text{ kW}$ 。

3.4.1 分布式相变蓄热站典型日协同控制分析

依据用户负荷和可再生能源发电量,对购热量和蓄热量进行合理的协同控制,才能确保分布式相变蓄热站实现消纳风电和缓解热电厂供热压力的目标。本节根据选定容量,选取典型日进行 24 h 协同控制分析。

图 9 为商务办公区相变蓄热站 24 h 的协同控制结果,数据显示:全天除峰值热负荷外,其余时间段相变蓄热站均能通过消纳风电为所在区域供热; $08:00—09:00$ 为峰值热负荷时段,由于热负荷超过相变蓄热站容量的上限,蓄热站内热量消耗完后使用市政热网进行补充; $10:00$,虽然负荷下降,但由于前一时刻蓄热站内热量已消耗完毕且电热转换功率存在限制,因此仍需要市政热网补充部分热量; $11:00$,负荷继续下降,此时相变蓄热站容量和电热转换功率对风电消纳不再构成约束,因此风电消纳量略大于热负荷的目的是将热量储满;之后热负荷趋于平稳,所有供热需求皆可以通过消纳风电来满足。

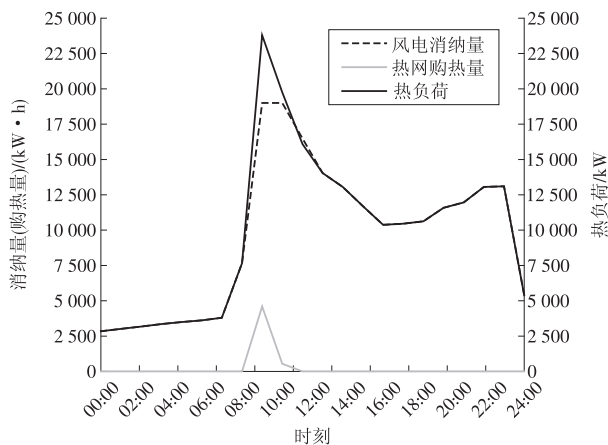


图 9 商务办公区 24 h 协同控制结果

Fig. 9 Commercial area 24 h collaborative control results

图 10 为居民住宅区相变蓄热站 24 h 的协同控制结果,数据显示:全天除峰值热负荷外,其余时段相变蓄热站均能通过消纳风电为所在区域进行供热; $07:00—09:00$ 为峰值热负荷时段,由于热负荷超过相变蓄热站容量上限,蓄热站内热量消耗完后使用市政热网进行补充;之后热负荷趋于平稳,所有供热需求皆可以通过消纳风电来满足。

通过上述分析可知,本研究所采用的分布式相变蓄热站协同控制方式适用于多种情景下的风电

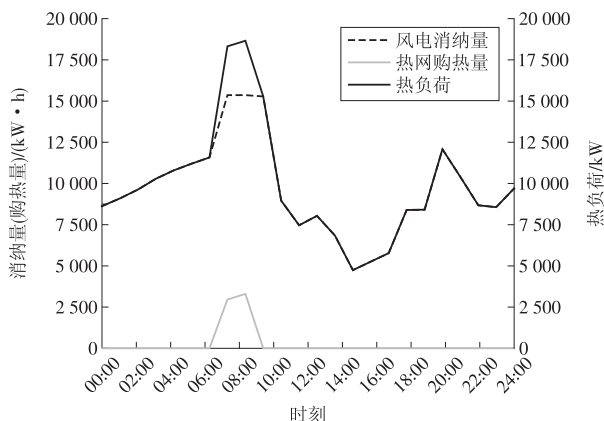


图 10 居民住宅区 24 h 协同控制结果

Fig. 10 Residential area 24 h collaborative control results

消纳供热。相变蓄热站能满足热负荷需求时由蓄热站供应,不能满足热负荷需求时由市政热网进行调峰供应,并在后续时刻及时补充热量至蓄热站。

3.4.2 分布式相变蓄热站全供暖季风电消纳效果分析

根据各区域选定的配置容量,计算全供暖期相变蓄热站的风电消纳量和从市政热网的购热量,计算结果如图 11、图 12 所示。数据显示:在取得年最大收益的最佳蓄热容量和蓄热功率下,全供暖期相变蓄热站绝大多数时段使用风电来为区域供热;2 区域用于调峰的市政热网供热最大值为 $5\,776.7\text{ kW}$ (出现于商务办公区)。由此可见,采用风电供热相变蓄热站可以极大地将热电厂从“以热定电”的运行模式中解放出来;同时,冬季使用风电供暖,还可有效提升风电利用率。

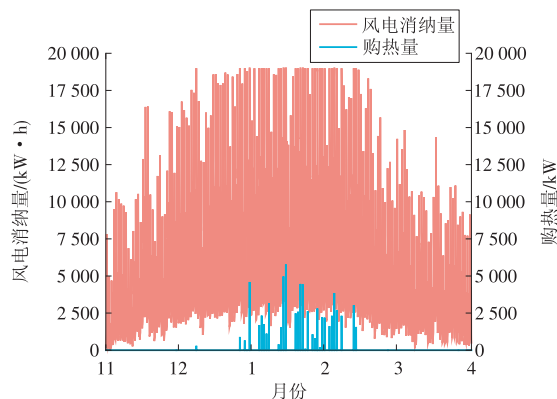


图 11 商务办公区风电消纳量与购热量

Fig. 11 Consumption of wind power and municipal heat in commercial area

全供暖期各区域风电消纳量与市政热网购热量见表 5。由表 5 可见,在大致相同的风电消纳量下,商务办公区的市政购热量明显更高。因为在相近的平均热负荷下,商务办公区负荷峰谷差更大,为了调峰,市政购热量会较高。因此,分布式相变蓄热站在峰谷差较小的区域能取得相对更好的

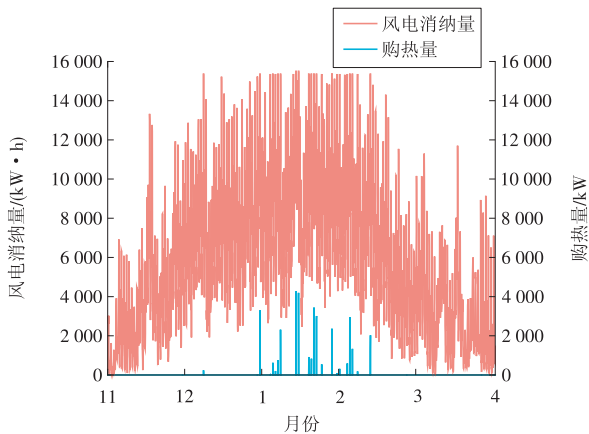


图12 居民住宅区风电消纳量与购热量

Fig. 12 Consumption of wind power and municipal heat in the residential area

表5 2区域风电消纳量与购热量

区域	heat of two areas		MW·h
	风电消纳量	购热量	
商务办公区	20 319.53	77.872 12	
居民住宅区	20 578.43	64.974 89	

表现。

3.5 风电价格对相变蓄热站年收益影响分析

在确定了最佳蓄热站容量和蓄热功率后,通过分析电价可以更好地展示蓄热站和风电场之间的协议电价对蓄热站年收益的影响,图13为除去过网费的协议电价变化对蓄热站年收益的影响。

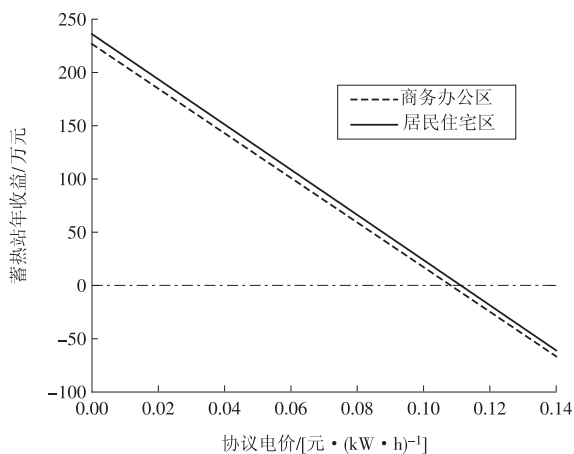


图13 协议电价对蓄热站年收益的影响

Fig. 13 The influence of contract electricity price on the annual return of heat storage stations

从图13可得,2区域的蓄热站年收益与电价的关系为线性负相关,与前文电价只影响蓄热站年收益数值而不影响年收益变化规律的分析结果相符。根据数值分析,各区域相变蓄热站年收益零点电价见表6。因此,在蓄热站实际运行过程中,为了实现盈利,应将电价控制在零点电价之下。

表6 2区域年收益零点电价

区域	协议电价	总电价
商务办公区	0.108	0.218
居民住宅区	0.111	0.221

4 结论

本研究构建了城市区域分布式相变蓄热站的模型,分析了不同功能区存在的负荷差异,探讨了针对不同功能区分别建立相变蓄热站的优势。根据目前城市土地价格高的现状,加入了土地价格的影响因素,最终通过算例验证得出以下结论。

(1)在一定范围内,当相变蓄热站容量增大时,蓄热站年收益显著增加,但最终增长速度会逐步趋平。相变蓄热站年收益与区域热负荷特性相关,容量越趋近最大热负荷,年收益增长越慢。相变蓄热站最经济的容量出现在整个供暖期延时热负荷占比大于5%的负荷区间。

(2)相变蓄热站算例结果显示可显著提高风电消纳量,而市政热网购热量则与热负荷峰谷差成正比。因此,相变蓄热站设置在热负荷大且峰谷差较小的区域更能发挥其提高风电消纳量和降低热电厂供热压力的作用。

(3)相变蓄热站使用的风电价格对年收益有较大影响,整体成线性负相关,在包含0.11元/(kW·h)过网费的情况下,商务办公区、居民住宅区收益为零的电价分别为0.218,0.221元/(kW·h),若要盈利则电价应低于该值。可以申请政府补贴或考虑风电场、电网公司、相变蓄热站和热电厂联合运营。

弃风供热是消纳风电的最佳方式之一,本文的研究对设置城市区域分布式相变蓄热站的经济性提出了一些建议,可为实际工程应用提供参考。

参考文献:

- [1]国家能源局.国家能源局新闻发布会介绍2017年度相关能源情况等[EB/OL].http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921015.htm.
- [2]李新民,郑晓奕.国家电网首次回应风电“上网难”[EB/OL].<http://news.bjx.com.cn/html/20100201/242464.shtml>.
- [3]国家能源局.2017年风电并网运行情况[EB/OL].http://www.nea.gov.cn/2018-02/01/c_136942234.htm.
- [4]国家能源局.国家能源局关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见(2017年第31号)[EB/OL].http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201707/t20170728_2835.htm.

- [5] KORKAS C D, BALDI S, MICHAELIDIS I, et al. Occupancy-based demand response and thermal comfort optimization in microgrids with renewable energy sources and energy storage[J]. *Applied Energy*, 2016, 163: 93-104.
- [6] ZHAO H, WU Q, HU S, et al. Review of energy storage system for wind power integration support [J]. *Applied Energy*, 2015, 137: 545-553.
- [7] 郭伟, 张建成. 针对风电场群的储能系统优化配置方法研究[J]. *可再生能源*, 2017(12): 1869-1875.
- GUO Wei, ZHANG Jiancheng. Research on optimal allocation method of energy storage system for wind farms [J]. *Renewable Energy*, 2017(12): 1869-1875.
- [8] 殷志敏, 晁勤, 王纯琦, 等. 基于风储经济调度的储能容量优化配置[J]. *可再生能源*, 2016(1): 64-71.
- YIN Zhimin, CHAO Qin, WANG Chunqi, et al. Optimal allocation of energy storage capacity based on economic dispatching of wind storage [J]. *Renewable Energy*, 2016 (1): 64-71.
- [9] 张海明. 三北地区弃风限电现状及出路探索[J]. *科技创新与应用*, 2015(32): 179-180.
- ZHANG Haiming. Current situation of wind power reduction in the Three-North Region and its outlet [J]. *Technology Innovation and Application*, 2015(32): 179-180.
- [10] 国家能源局. 国家能源局关于做好 2016 年度风电消纳工作有关要求的通知[Z]. 2016.
- [11] 李虹, 王晓丹, 周晓洁, 等. 基于储热热电机组和电锅炉的风电消纳调度模型[J]. *电力科学与工程*, 2018(1): 11-17.
- LI Hong, WANG Xiaodan, ZHOU Xiaojie, et al. Wind power absorption dispatching model based on thermal storage units and electric boilers [J]. *Power Science and Engineering*, 2018(1): 11-17.
- [12] 张洋, 耿娜, 马雪, 等. 基于赌轮盘思想的大规模储能协同蓄热式电锅炉的风电消纳优化运行研究[J]. *电器与能效管理技术*, 2018(1): 44-50.
- ZHANG Yang, GENG Na, MA Xue, et al. Research on optimal operation of large-scale energy storage cooperative regenerative electric boiler based on roulette wheel theory [J]. *Electric Appliances and Energy Efficiency Management Technology*, 2018(1): 44-50.
- [13] 程中林, 江全元, 葛延峰. 基于合作博弈的相变储热容量优化配置及利益分配[J]. *电网技术*, 2017(9): 2870-2878.
- CHENG Zhonglin, JIANG Quanyuan, GE Yanfeng. Optimal allocation and benefit distribution of phase change heat storage capacity based on cooperative game [J]. *Power Grid Technology*, 2017(9): 2870-2878.
- [14] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [15] 傅杰, 蒋绿林, 卢涛, 等. 相变储能太阳能热泵系统的试验研究[J]. *可再生能源*, 2018(1): 22-26.
- FU Jie, JIANG Lyulin, LU Tao, et al. Experimental research on phase change energy storage solar heat pump system [J]. *Renewable Energy*, 2018(1): 22-26.
- [16] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—2016 [S].
- [17] 城市热力网设计规范: CJJ 34—2002 [S].
- [18] 马天男, 彭丽霖, 杜英, 等. 区块链技术下局部多微电网市场竞争博弈模型及求解算法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(5): 191-203.
- MA Tiannan, PENG Lilin, DU Ying, et al. Game model and solution algorithm of local multi-micro grid market competition under block chain technology [J]. *Power Automation Equipment*, 2018, 38(5): 191-203.
- [19] 陈政, 张翔, 荆朝霞, 等. 澳大利亚输电过网费定价机制分析[J]. *南方电网技术*, 2017, 11(2): 63-70.
- CHEN Zheng, ZHANG Xiang, JING Zhaoxia, et al. An analysis of the pricing mechanism of transmission network fees in Australia [J]. *Southern Power Grid Technology*, 2017, 11(2): 63-70.
- [20] 张瑞友, 韩水, 张近朱, 等. 一种适用于我国电力市场的输电定价方法[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(4): 78-82.
- ZHANG Ruiyou, HAN Shui, ZHANG Jinzhu, et al. A transmission pricing method suitable for China's power market [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2008, 28(4): 78-82.
- [21] 杨宜勇, 范宪伟. 土地资本化背景下中国特色“以地谋发展”模式论析 [J]. *中州学刊*, 2018(8): 30-36.
- YANG Yiyong, FAN Xianwei. Analysis on the model of “land for development” with Chinese characteristics under the background of land capitalization [J]. *Zhongzhou Academic Journal*, 2018(8): 30-36.
- [22] 城市用地分类与规划建设用地标准: GB 50137—2011 [S].

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

钟声远(1992—), 男, 河北保定人, 在读博士研究生, 工学硕士, 从事信息物理融合系统研究(E-mail: zhongshengyuan@tju.edu.cn)。

赵军(1964—), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事中低温热能高效利用、基于低品位能源利用的多能互补分布式能源系统研究(E-mail: zhaojun@tju.edu.cn)。

李浩(1992—), 男, 内蒙古包头人, 在读博士研究生, 工学硕士, 从事信息物理融合系统研究(E-mail: tju_lihao1992@tju.edu.cn)。

王小元(1997—), 女, 吉林长春人, 在读硕士研究生, 从事信息物理融合系统研究(E-mail: 18222691429@163.com)。

周颖(1993—), 女, 河北邢台人, 助理工程师, 工学硕士, 从事电力需求侧管理研究(E-mail: zhouying@epri.sgcc.com.cn)。