

电力辅助服务市场下电采暖促进风电消纳的经济性分析

严干贵, 杨玉龙

(东北电力大学电气工程学院, 吉林省 吉林市 132012)

Economic Analysis of Electric Heating for Wind Power Consumption Under the Background of Ancillary Service Market

YAN Gangui, YANG Yulong

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, Jilin Province, China)

Abstract: The wind power penetration rate of the power grid in northern China is relatively high. At the same time, a high proportion of coal-fired cogeneration units are used to meet the huge heating demand in winter, which results in limited ability of flexible adjustment and the problem of curtailed wind power. Currently, studies on economic evaluation of electric heating for wind power consumption are scarce. Especially, the economic evaluation on different types of electric heating under the background of the ancillary service market is insufficient. Thus, aiming at typical electric heating system, such as the electric boiler with heating storage, electric heat pump and distributed electric heating, this paper devotes to building economic evaluation model on the basis of ancillary service market by means of sequential production simulation. Further, the simulation calculation on three typical electric heating systems operating in northeast China is carried out. Lastly, the influence factors, such as the price, wind curtailment level and heating load characteristic are analyzed. The results show that the feasible price of ancillary service for electric boiler with heating storage and distributed electric heating varies between 315 to 460 yuan/MWh. Compared with traditional thermal plants, electric heating is more competitive.

Keywords: wind power; electric heating; economic analysis; ancillary service

摘要: 中国三北地区电网风电渗透率较高, 同时存在高比例燃煤热电联产机组用于满足冬季巨大的采暖需求, 导致其灵活调节能力极其有限, 弃风问题十分突出。现有研究尚缺乏对各种类型电采暖负荷促进风电消纳的经济性评价研究, 尤其是以电力辅助服务市场为背景, 对不同调节特性电采暖

负荷的经济性分析还鲜有报道。由此, 以集中蓄热式电采暖、直热式电采暖和分布式电采暖三种典型电采暖负荷为研究对象, 利用时序生产模拟方法, 构建基于实时调峰辅助服务的电采暖负荷消纳弃风经济评估模型, 以北方地区实际运行的电采暖项目数据为算例, 对比几类典型采暖负荷消纳弃风的经济性, 并分析了辅助服务价格、弃风水平和采暖负荷运行特性等关键因素对经济性的影响。计算结果显示, 与传统火电机组相比, 集中蓄热式电采暖和分布式电采暖的可行辅助服务价格在315~460元/MWh, 具有一定的竞争力。

关键词: 风电; 电采暖; 经济性分析; 辅助服务

0 引言

面对能源危机和环境保护问题, 以低碳和可持续发展为特征的新型能源战略成为中国重要的应对策略, 以风电为代表的可再生能源近些年在中国发展迅速。截至2018年底, 中国并网风电装机容量1.84亿 kW, 中国电力系统将逐渐进入以可再生能源为主化石燃料为辅的新阶段。风电等可再生能源具有强随机波动性, 发电可控性很差, 给电力系统安全经济运行带来严峻挑战, 尤其是中国三北地区电网风电渗透率较高, 且存在高比例燃煤热电联产机组用于满足冬季巨大的采暖需求^[1], 灵活调节能力极其有限, 北方某些省份在采暖季的弃风率甚至高于20%, 弃风问题仍十分突出^[2]。

在国家清洁供暖政策支持下, 电采暖在中国北方地区发展迅速, 装机容量逐年增加, 为消纳大规模风电提供了新的思路。蓄热式电采暖被认为是解决弃风问题的重要手段之一^[3-4], 国家出台了相关政策鼓励开展风电供热^[5-6], 由此建设了吉林洮南供热项目、内蒙古华电辉腾锡勒供热项目等多项清洁供暖示范

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0902200); 国家电网公司科技项目(2017GW-20)。

National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902200); Science and Technology Foundation of SGCC(2017GW-20).

工程^[7-8]。进一步,随着清洁供暖、电能替代政策的推出,分布式供暖也发展迅速,截至2017年底,长春累计电采暖装机容量290 MW,其中环流散热器、发热电缆、地热膜等分布式电采暖占比达到33.1%,如果能有效聚集,也将为消纳弃风提供巨大的可调节容量。

针对大规模风电的消纳问题,现有研究利用电采暖负荷,通过优化蓄热装置运行以及考虑建筑物蓄热特性等方式,增加系统调峰、调频能力,实现对弃风的消纳。文献[9]通过引入大量使用的空调热泵,并考虑集中热网的水热延时特性,提出一种综合热电控制方法,增加风电消纳,同时节能效果显著。文献[10]构建了包含蓄热的热电联产机组、电供热系统的调度模型,将蓄热纳入包含风电的电力系统有功调度体系。文献[11]提出基于含蓄热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型,提出极限消纳弃风电量的电锅炉供热量计算方法。进一步,文献[12]以德国电力市场为背景,通过构建建筑物蓄热特性模型,充分利用分时电价对空调负荷进行激励,帮助风电消纳,从而提高系统全年的经济效益和节能效益。文献[13]在考虑建筑物蓄热特性的基础上,使得空调可以作为旋转备用,解决中国北方电网大量弃风的问题,并跟踪风电预测误差,提高系统节能效益。可见,现有研究多针对消纳大规模风电的电采暖优化调度方法进行了广泛研究。在电采暖的经济性分析方面,一些文献对蓄热式电采暖项目的经济可行性进行了分析^[14],文献[15]建立了电力市场环境下的蓄热式电采暖消纳弃风经济性评估模型。但是,对考虑建筑物蓄热特性的电采暖经济性分析,尤其是以电力辅助服务市场为背景,对不同调节特性电采暖负荷的经济性分析还鲜有报道。

本文以集中蓄热式电采暖、直热式热泵和分布式电采暖3种典型电采暖负荷为研究对象,探索了通过负荷聚合商参与实时调峰电力辅助服务市场的交易模式,对典型电采暖负荷促进风电消纳的经济性进行分析。首先,构建利用电采暖负荷实时调节特性促进风电消纳的基本方法。其次,基于时序生产模拟方法,构建实时调峰辅助服务市场下的电采暖负荷经济评估模型。最后,以北方地区实际运行的电采暖项目为算例依据,探索性地对比几类典型采暖负荷消纳弃风的经济性,并分析了辅助服务价格、弃风水平和采暖负荷运行特性等关键因素对经济性的影响。

1 3种电采暖负荷参与实时调峰辅助服务的运行特性

根据电采暖运行特点的不同,现有电采暖方式可以分为集中蓄热式电采暖、集中直热式电采暖和分布式电采暖3种:1)集中蓄热式电采暖一般由电锅炉和蓄热体构成,在热需求不变的情况下,可以利用蓄热体对能量的时间平移特性,向电网提供实时调节能力;2)集中直热式电采暖包括电锅炉和各类热泵等方式,在没有配置储热的情况下,其运行在“以热定电”模式,无法向电网提供实时调节能力;3)分布式电采暖:指在用户住宅内独立安装的各类电采暖设备,包括:环流散热器、发热电缆和热泵等,其运行特性受到建筑物传热特性的影响,具有较大的热惯性,在不影响用户热舒适温度需求的前提下,通过调整电采暖用电计划,向电网提供实时调节能力。

2 基于时序生产模拟的电采暖消纳弃风模型

2.1 弃风消纳的目标函数

对任意一种电采暖方式,本文以其运行成本最小为优化目标,包括用电成本和辅助服务收益两部分,这里以蓄热式电采暖为例,其运行成本如式(1)所示:

$$cost_{cb} = \sum_{d=1}^D \left(\sum_{t=1}^{T_k} m_{TOU}(t) \cdot P_{cb}(d,t) - \sum_{t=1}^T m_{as} \cdot \Delta P_{cb-a}(d,t) \right) \quad (1)$$

式中: d 表示日索引; t 表示仿真时间步长; $m_{TOU}(d,t)$ 为现行电采暖电价政策下的电采暖分时电价; m_{as} 为电采暖参与实时调峰辅助服务市场的辅助服务电价; $P_{cb}(d,t)$ 为第 d 天第 t 时段的蓄热式电采暖实际耗电功率, MW; $\Delta P_{cb-a}(d,t)$ 为蓄热式电采暖的灵活调节功率,用于满足其在辅助服务市场的实时弃风消纳需求,其值等于蓄热式电采暖实际耗电功率与计划耗电功率之差,如式(2)所示:

$$\Delta P_{cb-a}(d,t) = P_{cb}(d,t) - P_{cb0}(d,t) \quad (2)$$

另外,弃风功率具有间歇波动的特性,而不同空间范围的弃风具有不同的功率波动特性。因此,电采暖在消纳弃风的过程中,其调节功率的时序运行特性将受到弃风功率波动特性的制约。本文引入可利用弃风功率限制约束,如式(3)所示:

$$\Delta P_{cb-a}(d,t) \leq P_{ab\ wind}(d,t) \quad (3)$$

进一步,3种电采暖具有不同的运行特性,本文采用时序生产模拟的方法,对其时序运行特性进行约

束，具体内容如下文所述。

2.2 集中蓄热式电采暖运行约束

集中蓄热式电采暖可调节特性主要由蓄热装置的运行特性决定。其中，蓄热装置的蓄热量可由式（4）求出：

$$C_{\text{eb-hs}}(s,t) = \begin{cases} C_{\text{TES}}(d-1,T) + H_{\text{eb-in}}(d,t) - H_{\text{eb-out}}(d,t), & t=1 \\ C_{\text{TES}}(d,t-1) + H_{\text{eb-in}}(d,t) - H_{\text{eb-out}}(d,t), & t>1 \end{cases} \quad (4)$$

式中： $C_{\text{eb-hs}}(s,t)$ 为蓄热式电采暖蓄热量，MWh； $H_{\text{eb-out}}(d,t)$ 为蓄热式电采暖的放热功率，即供热功率，MW； $H_{\text{eb-in}}(d,t)$ 为蓄热式电采暖的蓄热功率，由式（5）表示：

$$H_{\text{eb-in}}(d,t) = \eta_{\text{cb}} \cdot P_{\text{cb}}(d,t) \quad (5)$$

式中， η 为蓄热式电采暖热电转换效率。蓄热式电采暖蓄热量受其蓄热炉的额定容量 $C_{\text{eb-hs}}^{\text{max}}$ 限制，如式（6）所示：

$$0 \leq C_{\text{eb-hs}}(s,t) \leq C_{\text{eb-hs}}^{\text{max}} \quad (6)$$

另外，蓄热式电采暖的运行还要受到热负荷的约束，如式（7）所示：

$$H_{\text{eb-out}}(d,t) = H_{\text{hot}}(d,t) \quad (7)$$

式中： $H_{\text{eb-out}}(d,t)$ 为蓄热式电采暖热输出功率，MW； $H_{\text{hot}}(d,t)$ 为逐时段热负荷，MW。

2.3 集中直热式电采暖运行约束

集中直热式电采暖按照“以热定电”模式运行，因此，其运行方式较为固定，无法进行优化调节，其耗电功率受到热负荷限制，如式（8）所示：

$$H_{\text{hot}}(d,t) = H_{\text{ehp}}(d,t) = \text{COP} \cdot P_{\text{ehp}}(d,t) \quad (8)$$

式中： $H_{\text{hot}}(d,t)$ 为逐时段热负荷，MW； $H_{\text{ehp}}(d,t)$ 为第 d 天第 t 时段的直热式电采暖设备供暖功率，MW； COP 为热泵能效系数； $P_{\text{ehp}}(d,t)$ 为第 d 天第 t 时段的直热式电采暖设备耗电功率，MW。

2.4 分布式电采暖运行约束

分布式电采暖的可调节特性由建筑物热过程和用户热舒适温度决定。其中，建筑物热过程可以用式（9）的温度—功率时变方程表示：

$$T_{\text{in}}(d,t) = [T_{\text{in}}(d,t-1) - T_{\text{out}}(d,t) - \eta \cdot p_{\text{deh}}(d,t) \cdot R] \cdot e^{-\frac{\Delta t}{C \cdot R}} + T_{\text{out}}(d,t) + \eta \cdot p_{\text{deh}}(d,t) \cdot R \quad (9)$$

式中： Δt 为时间步长，s； $T_{\text{in}}(s,t)$ 为室内温度， $^{\circ}\text{C}$ 。 $T_{\text{out}}(s,t)$ 为室外温度， $^{\circ}\text{C}$ ； R 为等效热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ； C 为等效热容， $\text{J}/^{\circ}\text{C}$ 。其中，室内温度受到用户的热舒适温度约

束，如式（10）所示：

$$T_{\text{down}} \leq T_{\text{in}}(d,t) \leq T_{\text{up}} \quad (10)$$

式中， T_{up} 和 T_{down} 分别为用户热舒适上限温度和下限温度。

3 辅助服务市场下电采暖消纳弃风经济模型

3.1 电采暖参与辅助服务市场关系

借鉴《东北电力辅助服务市场运营规则（试行）》中火电机组参与实时深度调峰的辅助服务方式，本文结合电采暖负荷在时序上的动态调节特性，探索了电采暖以负荷聚合商形式参与实时备用市场的经济可行性（暂未考虑现有技术条件对分布式电采暖的制约），其参与辅助服务市场关系如图1所示。

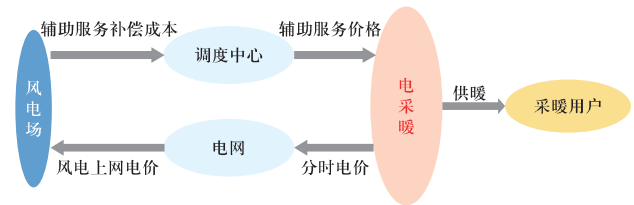


图1 电采暖参与辅助服务市场结算关系图

Fig. 1 The billing relationship of electric heating users in ancillary services market

电采暖用户通过负荷聚合商的形式参与到电力辅助服务市场中，通过日前竞价的方式，确定可提供的实时调峰容量（灵活调节功率）和辅助服务价格，并在容量被调用后，获得相应容量的辅助服务收益。这部分收益最终将由负荷率高于深度调峰基准的火电厂、风电场和核电厂承担。同时，电采暖消耗的电量通过负荷聚合商向电网按分时电价价格购入。

3.2 电采暖经济评价模型

本文以电采暖总利润作为经济性评价指标，如式（11）所示：

$$P_{\text{sum}} = P_{\text{inc}} - P_{\text{pay}} \quad (11)$$

式中： P_{inc} 为电采暖综合收益，元； P_{pay} 为电采暖成本，元。

综合收益分为供暖收益 P_{hot} 和辅助服务收益 P_{as} 两部分，如式（12）至式（14）所示：

$$P_{\text{inc}} = P_{\text{hot}} + P_{\text{as}} \quad (12)$$

$$P_{\text{hot}} = m_{\text{hot}} \cdot S \quad (13)$$

$$P_{\text{as}} = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T m_{\text{as}} \cdot \Delta P_{\text{cb-a}}(d,t) \quad (14)$$

这里辅助服务收益以蓄热式电采暖为例。式中： S 为蓄

热式电采暖供暖面积, m^2 ; m_{not} 为供暖收费, 元/ m^2 。

进一步, 蓄热式电采暖成本分为动态投资成本和运行成本两部分, 如式(15)所示:

$$P_{\text{pay}} = P_{\text{pay,d}} + P_{\text{pay,r}} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{pay,d}}$ 为静态投资成本; $P_{\text{pay,r}}$ 为运行成本。

静态投资成本主要指将初投资成本 IC 及退役残值 DC 分摊到寿命期 N 年内的成本, 本文考虑能源价格的增长对成本分摊的影响^[6], 各年分摊的投资成本应随能源价格的增长而增加, 如式(16)所示:

$$P_{\text{pay,d}} = \frac{(1+i) \cdot i}{(1+i)^N - 1} \cdot (IC - DC) \quad (16)$$

$$IC = m_{\text{eb}} \cdot S \quad (17)$$

式中: i 为能源价格年增长率; m_{eb} 为电采暖(以蓄热式电采暖为例)的单位面积造价, 元/ m^2 。

运行成本是指整个供暖期电采暖运行所消耗电量对应的成本, 这里以电锅炉为例, 如式(18)所示:

$$P_{\text{pay,r}} = \sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^{T_k} m_{\text{TOU}}(t) \cdot P_{\text{cb}}(d,t) \quad (18)$$

4 算例分析

4.1 算例流程

电采暖参与辅助服务的基本流程如图2所示, 电采暖在日前向调度中心申报辅助服务价格 m_{as} , 然后根据电采暖消纳弃风模型计算的运行结果, 一方面向风电提供实时调峰功率 $\Delta P_{\text{cb-a}}(d,t)$, 一方面耗电 $P_{\text{cb}}(d,t)$ 向

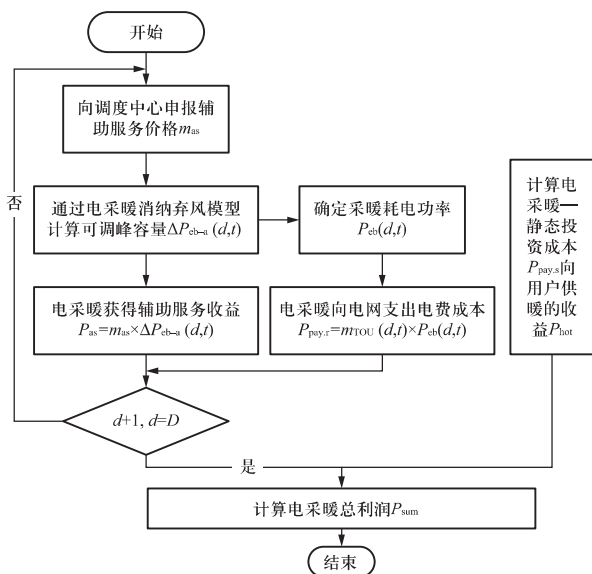


图2 电采暖参与辅助服务市场流程图

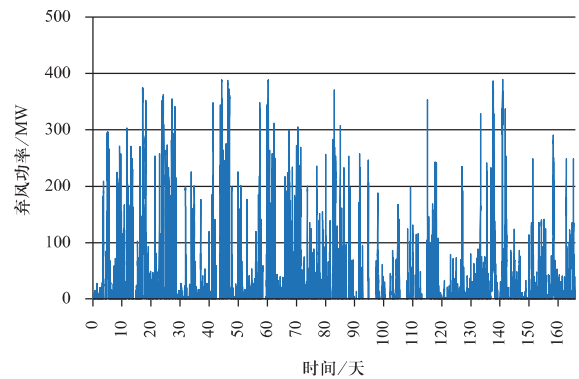
Fig. 2 The flow chart of electric heating participating in ancillary services market

用户供暖。每日运行结束后, 根据申报的辅助服务价格 m_{as} 获得辅助服务收益 P_{as} , 同时根据电采暖分时电价 $m_{\text{TOU}}(d,t)$ 向电网支出电费成本 $P_{\text{pay,r}}$ 。由此, 以日为周期执行上述过程。最后, 采暖季结束后, 进一步计算静态投资成本 $P_{\text{pay,s}}$ 和向用户供暖的收益 P_{hot} , 最终根据电采暖经济评价模型, 计算电采暖的总利润。

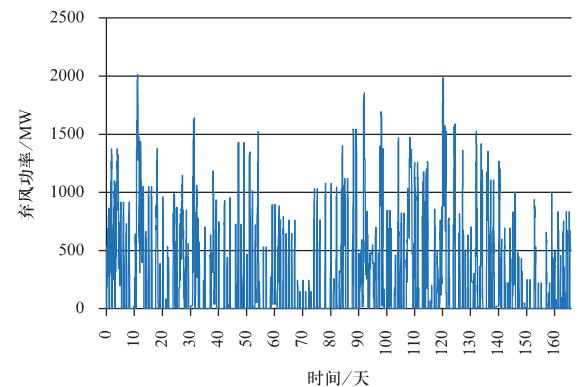
4.2 算例简介

本文分别以长春市蓄热电锅炉、水源热泵和居民楼电采暖系统数据为例对比分析三者的消纳弃风经济性。针对弃风在时间—功率两个尺度上间歇波动特性, 本文用弃风水平来描述, 并分别选取400 MW级风电场和风电总装机容量3153 MW的省级电网的弃风曲线作为对比算例, 如图3(a)和(b)所示。其中, 全省总装机容量12762 MW, 常规机组调峰容量2733 MW, 全省采暖季弃风率42.6%, 总弃风电量11.69亿 kWh。

进一步, 对于3种典型电采暖方式, 供暖期统一按166天计算, 供暖价格均按照现行集中供暖价格27元/ m^2 计算。3种典型电采暖的系统参数如表1所示。



(a) 场站弃风



(b) 全网弃风(省级)

图3 供暖期弃风曲线

Fig. 3 Curtailed wind power curve during heating period

其中，集中蓄热式电锅炉和直热式热泵由热力管网向用户供热，其热网出口热水热负荷如图4所示。分布式电采暖的供暖耗电量由建筑物热过程和用户热舒适温度决定，设该热舒适温度范围为18~24℃。最后，集中蓄热式电锅炉电价如表2峰平谷电价所示，直热式供热电价按照平均价格0.5324元/kWh计算，分布式电采暖电价如表2峰谷电价所示。能源价格年增长率按照2%计算。

表1 电采暖系统参数

Table 1 Parameters of electric heating system

参数	集中蓄热式电锅炉	直热式热泵	分布式电采暖
总容量/MW	6	1.1	2
供暖面积/万m ²	2.6	2.6	2.6
电热转化效率	97%	200%	97%
单位面积静态投资成本/(元/m ²)	280	208	266
寿命/年	15	15	15
退役残值	5%	5%	5%
等效热容/(J/℃)	—	—	5563294.1
等效热阻/(℃/W)	—	—	0.13

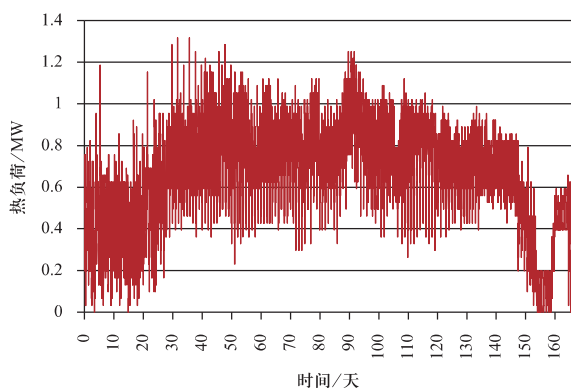


图4 供暖期热负荷曲线

Fig. 4 Heating load curve during heating period

表2 分时电价表

Table 2 Time-of-use price

单位：元/kWh

集中式电采暖	峰段	平段	谷段
	7:30-11:30 17:00-21:00	5:00-7:30 11:30-17:00 21:00-22:00	22:00-24:00 0:00-5:00
	0.88	0.587	0.2936
分布式电采暖	峰段	谷段	
	8:00-21:00	21:00-24:00 0:00-8:00	
	0.562	0.329	

4.3 消纳弃风分析

表3展示了整个采暖季不同电采暖方式在不同弃风水平下的消纳弃风电量情况。对于三种不同的电采暖方式，由于其运行特性的显著差异，最终采暖季总的消纳弃风量结果也明显不同。其中，集中蓄热式电锅炉和分布式电采暖具有巨大的蓄热调节能力，因此在不同的弃风水平下均可消纳大量弃风，可减少场站弃风4%~6%。但是，直热式采暖方式不具有蓄热调节能力，只运行在以热定电模式，无法通过参与实时调峰辅助服务来消纳弃风，故消纳弃风电量为0。

表3 消纳弃风电量

Table 3 Consumption of curtailed wind power

单位：MWh

		峰段	平段	谷段	合计
集中蓄热锅炉	场站弃风	5	543	568	1116
	全网弃风	0	0	965	965
分布式电采暖	场站弃风	281.5	—	718.5	1000
	全网弃风	19	—	934	953
直热式热泵	弃风		0		0

另一方面，比较不同的弃风水平对消纳弃风电量的影响，可以发现，不论是集中式还是分布式电采暖，其在弃风水平较高的全网弃风条件下，并没有消纳更多的弃风，而与场站级弃风条件相比，反而略有下降。同时在弃风的消纳时段上来看，省级弃风条件下，更多的弃风电量集中在电价更低的谷段时间，而在场站弃风条件下，在电价更高的平或峰时段消耗了大量弃风。进一步可以计算得到，集中蓄热电锅炉在场站和全网弃风条件下谷段消纳弃风比例分别为50.9%和100%；分布式电采暖在风电场和全网弃风条件下谷段消纳弃风比例分别为71.9%和98%。造成上述结果的主要原因是，省级弃风的功率密度更大，在电采暖系统容量较小的情况下，充分利用谷段弃风电量就可以满足采暖用电需求，而场站弃风功率密度较低，则无法满足。显然，表4所对应的电采暖耗电量验证了对上述原因的分析结论，可见在场站弃风条件下，峰段和谷段消耗的电量占比都很高。另外，分布式电采暖的总耗电量略小于集中蓄热式电锅炉，是受到实际采暖面积、负荷同时率、控制模式等诸多因素的影响，所以单位采暖面积耗电量会略有差异，而与分布式电采暖的供暖效率无关。

表4 电采暖耗电量

Table 4 Electricity consumption of electric heating

单位: MWh

		峰段	平段	谷段	总
集中蓄热锅炉	场站弃风	10	547	1293	1850
	全网弃风	0	0	1859	1859
分布式电采暖	场站弃风	607	—	1154.5	1761.5
	全网弃风	252.5	—	1574.5	1827
直热式热泵	弃风		871.2		871.2

4.4 经济性评估

4.4.1 不同电采暖方式的经济性

图5为场站弃风水平下3种电采暖方式在不同辅助服务价格下的总利润情况。本文所选取的实时调峰辅助服务电价是根据现行东北电网火电机组深度调峰辅助服务实际出清价格选取,只有电采暖的申报辅助服务价格在所选范围(350~800元/MWh)时,电采暖才具有与火电机组相同的辅助服务市场参与资格。另一方面,在不考虑国家补贴和现行电、热价格体制下,总利润是否大于0,是参与辅助服务市场后,电采暖是否具有经济可行性的前提。由图5可见,分布式电采暖和集中蓄热式电采暖,在辅助服务价格大于某一值时,总利润大于0,具有经济可行性,这个经济可行价格就是收支平衡点,对于分布式电采暖和集中蓄热式电采暖分别为460.1和425.9元/MWh。根据东北电网火电机组深度调峰的出清价格规定,调峰价格根据调峰深度可以分为0~400元/MWh、400~600元/MWh、600~800元/MWh 3档,可见电采暖的可行价格与火电机组相比具有较大的竞争力。

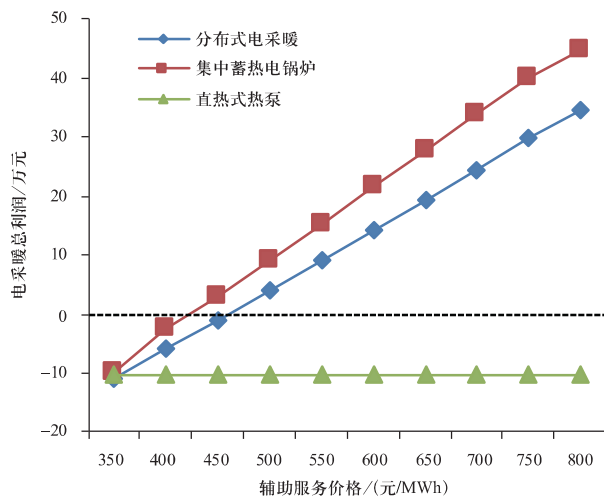


图5 电采暖总利润

Fig. 5 The gross profit of electric heating

另一方面,比较不同电采暖方式的经济性。直热式热泵由于“以热定电”运行特性的制约,无法参与实时调峰辅助服务市场,所以其总利润实际上就是它的供暖总利润,且与辅助服务价格无关,显然其值-10.4万元不满足经济可行的条件,实际上需要电网、电采暖运营机构倒挂补贴或采暖用户自行承担多余费用才能保证供暖。分布式电采暖的可行价格460.1元/MWh略高于集中蓄热式电采暖的425.9元/MWh,在上述算例条件下集中蓄热式电采暖的经济可行范围更大,更具有竞争力。

4.4.2 弃风水平对经济性的影响

图6展示了不同弃风水平下的分布式电采暖和集中蓄热式电采暖总利润情况。首先,不同的弃风水平影响分布式电采暖或集中蓄热式电采暖各自的总利润,场站弃风水平下的总利润明显低于全网弃风水平下的总利润,这主要是由于弃风密度影响了弃风的时段分布,导致了供暖耗电量的时段分布差异,从而由于峰谷电价导致的运行成本不同所致,如表5所示,这与4.2.1中的分析是一致的。由此,不同风电水平下的经济可行价格也不相同,例如,相比场站弃风水平,分布式电采暖和集中蓄热式电采暖在全网弃风水平下的可行价格分别降低到417.3元/MWh和315.3元/MWh。

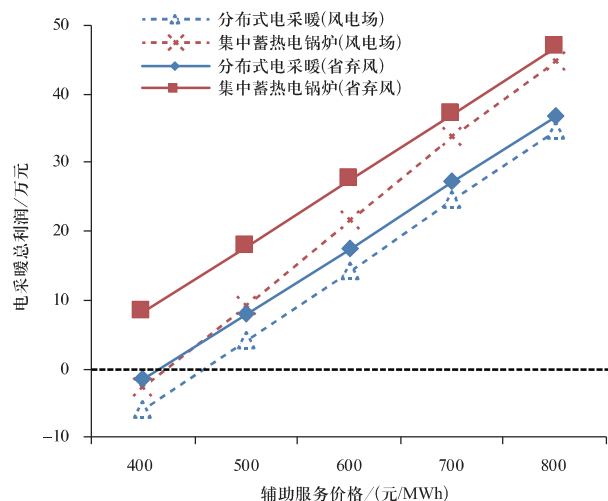


图6 不同弃风水平下的电采暖总利润

Fig. 6 The gross profit of electric heating with different curtailed wind power level

进一步,对比弃风水平对两种电采暖方式的影响程度,在供暖面积相同的情况下,集中蓄热电锅炉总利润更高,这与其总采暖装机容量和调节特性有关;从经济可行价格上看,分布式电采暖的可行价格要高于集中蓄热电锅炉的可行价格,且蓄热式电采暖其可

行价格降低幅度达到了110.6元/MWh，下降明显。这在一定程度上反映了分布式电采暖和集中蓄热式电采暖的可调节特性，也就是建筑物被动蓄热和蓄热装置主动蓄热的显著差异，即主动蓄热调节能力更大，也更为灵活，4.3节中的分时段消纳弃风电量结果也可以反映这个特性。

表5 电采暖运行成本

Table 5 Operation cost of electric heating

辅助服务价格 /(元/MWh)	分布式电采暖/万元		集中蓄热电锅炉/万元	
	场站	全网	场站	全网
400	72.15	66.14	105.90	81.87
500	72.37	66.18	106.43	81.87
600	73.70	65.89	112.50	82.05
700	73.84	66.31	112.85	81.87
800	73.91	66.31	113.38	81.87

5 结论

本文以集中蓄热式电采暖、分布式热泵和分布式电采暖3种北方地区典型电采暖负荷为研究对象，利用时序生产模拟方法，构建其电力辅助服务市场环境下的电采暖负荷经济评估模型，以北方地区实际运行的电采暖项目为算例，对比在实时调峰辅助服务市场中消纳弃风的经济性及相关影响因素，得出了以下主要结论：

1) 集中蓄热式电采暖和分布式电采暖具有一定的蓄热调节能力和弃风消纳能力。

2) 本算例中，集中蓄热式电采暖和分布式电采暖参与实时调峰辅助服务市场的可行价格集中在315~460元/MWh，与火电机组实际报价相比，具有一定的竞争力，参与实时调峰服务市场具备经济可行性。

3) 受到电采暖蓄热调节能力的制约，弃风水平较高时，电采暖消耗的弃风电量更多集中在负荷低谷时段，降低了总的耗电运行成本，提高了经济可行价格范围。

4) 对于集中蓄热式电采暖和分布式电采暖两种电采暖方式，其不同的蓄热可调节特性影响了各自的经济可行性，其中集中蓄热式电采暖的调节能力更大、也更为灵活，经济可行性更好。

5) 进一步，由于负荷可调节能力是影响电采暖在辅助服务市场中消纳弃风经济性的关键因素，如何

充分挖掘电采暖负荷，尤其是分布式电采暖负荷的调节能力，并根据其调节特性优化运行方式，从而提高其经济性是未来工作的重点。

参考文献

- [1] Zhang Ning, Lu Xi, McElroy MB, 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.
- [2] 吕泉, 王伟, 韩水, 等. 基于调峰能力分析的电网弃风情况评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1887-1894.
Lyu Quan, Wang Wei, Han Shui, et al. A new evaluation method for wind power curtailment based on analysis of system regulation capability[J]. Power System Technology, 2013, 37(7):1887-1894(in Chinese).
- [3] 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 increase utilization rate of wind power capacity[J]. Huadian Technology, 2012, 34(9): 75-78+82(in Chinese).
- [4] 戴伟. 基于电力供暖的促进风电消纳建模与仿真研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [5] 国内最大风电供热示范项目并网发电[J]. 中国设备工程, 2014, 02: 6.
- [6] 杨春伟, 刘晓明. 北方地区冬季利用风电供热的可行性[J]. 电工文摘, 2012, (3): 48-49.
Yang Chunwei, Liu Xiaoming. Wind power heating feasibility in North China during winter[J]. Electric Digest, 2012, (3): 48-49(in Chinese).
- [7] 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.
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(in Chinese).
- [8] 王建强. 中电投内蒙古四子王旗风电供热项目介绍及示范作用[J]. 华电技术, 2014, 07: 32-33+36+78.
Wang Jianqiang. Introduction of CPI Inner Mongolia siziwang banner wind power heat supply project and its demonstration effect[J]. Huadian Technology, 2014, 07: 32-33+36+78(in Chinese).
- [9] 李鹏, 杨玉龙, 黄越辉, 等. 综合热负荷控制下的省级电网风电并网研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 69-73.
Li Peng, Yang Yulong, Huang Yuehui, et al. Wind power integration in provincial power grid under electricity and heating load control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 69-73(in Chinese).
- [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(in Chinese).
- [11] 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): 4072-4080.
- Cui Yang, Chen Zhi, Yan Gangui, 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): 4072-4080(in Chinese).
- [12] Papaefthymiou G, Hasche B, Nabe C. Potential of heat pumps for demand side management and wind power integration in the German electricity market[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(4):636-642.
- [13] Yang Yulong, Wu Kai, Long Hongyu, et al. Integrated electricity and heating demand-side management for wind power integration in China [J]. Energy, 2014, 78: 235-246.
- [14] 苗常海, 白中华, 王雯, 等. 典型蓄热式电采暖项目经济性对比分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6): 36-39.
- Miao Changhai, Bai Zhonghua, Wang Wen, et al. Economic comparison and analysis of typical regenerative electric heating projects. Power Demand Side Management, 2018, 20(6): 36-39(in Chinese).
- [15] 孙勇, 严干贵, 郑太一, 等. 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2016, 5(4): 532-538.
- Sun Yong, Yan Gangui, Zheng Taiyi, et al. Economic analysis of electrical heating with heat storage using grid integrated wind power. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 532-538(in Chinese).
- [16] 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, 39(7): 75-83.
- Lyu Quan, Li Ling, Zhu Quansheng, et al. Comparison of Coal-saving Effect and National Economic Indices of Three Feasible Curtailed Wind Power Accommodating Strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 75-83(in Chinese).

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-04-10。



严干贵

作者简介:

严干贵 (1971), 男, 教授, 研究方向为新能源发电运行控制、大规模储能技术应用, E-mail: yangg@neepu.edu.cn。

杨玉龙 (1986), 男, 讲师, 研究方向为综合能源系统优化、风电并网消纳、能源互联网, E-mail: yangyulong@neepu.edu.cn。

(责任编辑 张宇)