

电力市场

考虑风电消纳的电供暖多方合作博弈研究

岳云力¹, 李倩², 方勇², 刘忠华², 李笑蓉¹, 岳昊¹, 武冰清¹

(1. 国网冀北电力有限公司经济技术研究院, 北京 100038;
2. 北京化工大学 经济管理学院, 北京 100029)

摘要: 风电供暖可以提高北方风能资源丰富地区消纳风电的能力, 同时改善北方地区冬季大气环境。针对风电供暖中由于成本高而产生的多方博弈问题, 构建了电网公司、风电企业、供暖企业多方协同的合作博弈模型, 并以张家口地区为例, 分析了各方的成本收益, 利用 Shapely 值法得到参与各方的成本分摊情况。结果显示: 协作机制能有效推动风电供暖的实施, 参与各方均能获得一定的收益, 尤其是风电企业和供暖企业收益能够持续增加; 但随着供暖面积的增加, 电网公司收益会下降。针对上述结果, 从规划、价格等方面提出了推动风电供暖的政策建议。

关键词: 风电供暖; 合作博弈; 四方协作; Shapely 值

文章编号: 1007-1881(2020)09-0095-08

DOI: 10.19585/j.zjdl.202009016

中图分类号: TM614+F407.61

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Multi-party Cooperative Game of Electric Heating Considering Wind Power Consumption

YUE Yunli¹, LI Qian², FANG Yong², LIU Zhonghua², LI Xiaorong¹, YUE Hao¹, WU Bingqing¹

(1. Institute of Economic Technology, State Grid Jibe Electric Power Company Limited, Beijing 100038, China;
2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Wind power heating can improve the ability to absorb wind power in the northern areas with rich wind energy resources and in the meantime improve the atmospheric environment in winter. Given the multi-party cooperative game caused by the high cost in wind power heating, this paper constructs a multi-party cooperative game model of grid companies, wind power enterprises and heating supply enterprises. Taking Zhangjiakou as an example, this paper analyzes the cost-benefit of each party and obtains the cost-sharing of each party by using the Shapley value method. The results show that the cooperation mechanism can effectively promote the implementation of wind power heating, and all parties involved can gain certain benefits, and wind power enterprises and heating companies, in particular, will increasingly gain benefits; However, the benefits of grid companies will decline with the increase of heating area. Given the above results, some policy suggestions are put forward to promote wind power heating from the aspects of planning and price.

Keywords: wind power heating; cooperative game; quartet cooperation; Shapely value

0 引言

2015年6月国家能源局发布了《关于开展风

电清洁供暖工作的通知》, 鼓励推动风电清洁供暖技术的应用, 促进风电消纳, 同时缓解燃煤供暖带来的大气污染问题。风电供暖作为近年来发展的新型供暖模式, 不仅能提高北方风能资源丰富地区消纳风电的能力, 缓解北方地区冬季供暖期电力负荷低谷时段风电并网运行困难, 还能促

进能源的清洁化利用,对改善北方地区冬季大气环境、雾霾天气有积极影响。在我国风力资源丰富地区推进风电供暖的发展,具有十分重要的现实意义。

目前已有许多学者从风电供暖的技术原理和经济性、风电供暖实现路径等方面进行了研究。在风电供暖的技术原理方面,文献[1]研究了风电供热的原理,并结合我国风电供热实践特点,证明风电供热有利于提高低谷风电的消纳能力,缓解弃风现象。风电供暖有多种技术实现方式,文献[2]比较了风能-电锅炉、风能-地源热泵、风光电互补供热系统、风电光热混合供热系统4种供热系统的能源利用率、供热能力、采暖价格等,其中风能-电锅炉技术较成熟且初始投资较低,在供热系统中应用更为广泛。风电供暖的经济性直接影响其发展的可持续性,文献[3]提出了“回归电力、市场购电”的风电供暖实现路径和方式,即通过挂牌交易、优先调度、差额收益返还等方式降低风电供暖用户的到户电价,并提出供暖电量全部由超过保障小时数之外的电量提供、参与市场化交易风电企业的调峰辅助服务分摊费用应核减等政策建议,以促进风电供暖的进一步推广。文献[4-5]提出电采暖负荷参与实时调峰辅助服务,构建了辅助服务市场下电采暖消纳弃风经济模型,并通过算例证明:如果风电采暖所需电量集中在负荷低谷时段,则能够降低耗电运行成本;提高经济可行价格的范围时,风电供暖具有一定的竞争力,同时也具备一定的经济可行性。由于风电供暖涉及到多个参与方,只有保障各方的利益才能推动电采暖的可持续发展,促进风电的消纳。文献[6]通过量化风电减排的经济效益,并运用合作博弈理论,分析在合作联盟模式下风电企业和电网公司的改进策略,计算合作双方成本效益变动情况,进而提出了一种使风电-电网联盟的总收益达到最大值的风电场容量规划模型。通过上述文献分析可以发现,风电供暖在技术上具有可行性,能促进风电消纳,但其成本高、经济可行性较差,电网公司和风电企业的运营成本与经营效益、供暖企业的投资建设成本、采暖用户的期望电价等诸多因素都制约着风电供暖的发展。

张家口是国务院批复设立的可再生能源示范

区,风力资源丰富,在2017年前存在较为严重的弃风现象。为了更好地推动风电供暖发展,张家口于2017年2月首次提出建立“政府+电网+发电企业+用户侧”共同参与的四方协作机制,构建了一种具有发展潜力的电供暖风电消纳模式,该模式实施以来取得了很好的经济社会效益,对于风力资源丰富的地区推动电采暖具有典型意义。本文针对风电供暖中存在的参与方博弈问题,以张家口地区为例,从成本收益的角度构建风电供暖的合作博弈模型,分析电网公司、风电企业和供暖企业在实现大规模风电消纳情境下的收益与成本,并提出风电消纳可持续发展的政策建议。

1 风电供暖的模式与现状

1.1 风电供暖的模式与特点

风电供暖的原理是利用电锅炉将风电能转化成热能,从而满足供暖需求。风电与电锅炉联合供热的原理如图1所示。该系统包括风力发电机组、控制器、电网接口、蓄热式电锅炉、循环泵、散热设备、热网等部分。

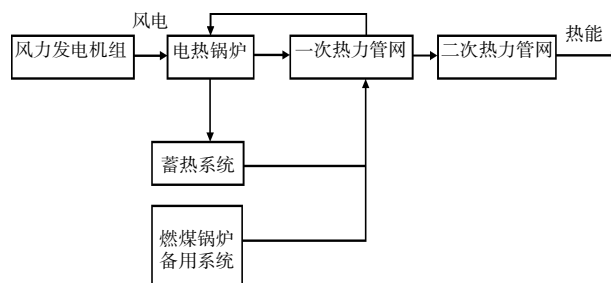


图1 风电与电锅炉联合供热基本原理

目前比较成熟的电锅炉技术是电阻式锅炉和电极式锅炉,供热方式可分为蓄热式和直热式,典型的集中式电采暖方案见表1。目前应用较为广泛且相对成熟的风电供暖方案主要有“风电+电热水锅炉+蓄热系统”和“风电+固体蓄热锅炉系统”^[7]。由于蓄热式电锅炉能够将热能通过蓄热装置储存起来,充分利用谷电或弃风电能来加热锅炉,经济性更为突出。

1.2 风电供暖的现状

2013年以来,随着风电供暖技术的不断成熟,国家政策和财政资金逐步加大了对风电供暖的支持力度,陆续颁布相关政策法规促进风电供

表 1 集中式电采暖典型方案

技术路线	设备配置	
	锅炉功率/MW	蓄热罐总容积/m ³
电阻锅炉直热	4(1×4 MW)	
电阻锅炉+蓄热	4(1×4 MW)	500(2×250 m ³)
电极锅炉直热	40(4×10 MW)	
电极锅炉+蓄热	40(4×10 MW)	3 000(12×250 m ³)

暖的发展, 形成了从中央到地方的多级财政补贴制度。2017 年, 财政部等四部委联合发布《关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知》, 明确中央财政将支持试点城市推进清洁方式取暖替代散煤燃烧取暖, 确定了包括天津、石家庄等在内的首批 12 个试点城市, 并拨付了总共 60 亿元奖励资金。至 2019 年, 北方清洁取暖试点城市不断扩容, 中央财政累计投入资金已达 351.2 亿元。风电供暖的国家政策及其要点见表 2。

表 2 风电供暖的国家政策及其要点

发布时间	政策名称	发布部门	主要内容
2013 年	《关于做好风电清洁供暖工作的通知》	国家能源局	研究风电供暖可行性, 制定促进政策措施, 开展试点和示范工作
2015 年	《关于开展风电清洁供暖工作的通知》	国家能源局	推动风电清洁供暖技术的应用, 有条件地区编制年度工作方案
2017 年	《关于开展中央财政支持北方地区冬季清洁取暖试点工作的通知》	财政部等四部委	财政支持试点城市推动清洁供暖

目前各地实施的风电供暖政策对电采暖用户的支持力度较大, 主要采用优惠电价、电采暖设备补贴等措施。由于风电的波动性和反调峰特性, 大规模风电并网也带来一系列问题, 其中较高的弃风率成为阻碍风电发展的主要因素之一。为了促进大规模风电消纳, 各级政府的风电供暖政策力度很大, 持续财政补贴使得政府面临巨大的财政压力; 电网公司需要接入调风调频辅助设备来保证电网正常运行, 提高了风电供暖的运营成本; 风电企业则期望灵活参与不同的市场获得更高的收益。风电供暖参与各方的不同利益诉求导致难以协同行动, 而一方或某几方持续性的亏

损将导致风电供暖难以持续, 进而影响大规模的风电消纳, 最终影响所有参与方的利益。因此, 风电消纳与电供暖的问题根源在于收益和成本的合理分摊, 参与各方需协同才能实现共同利益。

2 风电供暖的合作博弈模型

2.1 合作博弈的参与方分析

目前电采暖的成本依然较高, 某一方难以经济性地实施风电供暖, 需要有规范的机制来推动其实施。在风电供暖实施过程中, 政府主导、企业为主、市场驱动、全社会共同参与的模式是推进和推广的主要模式, 主要涉及政府、发电企业、电网公司、综合能源服务商(供暖企业)、用户、金融机构六大主体。张家口市的四方协作机制则将政府、风电企业、电网公司和供暖企业纳入交易机制中, 构建了风电供暖交易平台。通过详细规定各方的权利和义务, 从政策法规上进行激励和约束, 促进风电供暖的持续发展, 如图 2 所示。

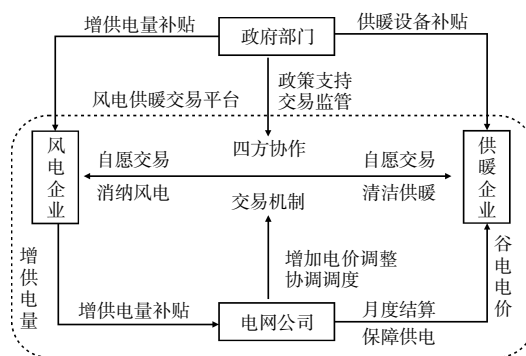


图 2 四方协作机制

在该机制下, 张家口市政府与国网冀北电力有限公司合作建立了可再生能源电力交易平台, 同时提供补贴和政策支持。风电供暖交易平台由售电方、购电方和输电方构成, 其中: 售电方是在交易平台注册的风力发电项目, 即风电企业; 购电方是获取相关准入的电力用户, 即供暖企业; 输电方指电网公司。

电网公司主要是将风电企业和供暖企业联系起来, 对风电供暖项目起到一个整体协调的作用。风电供暖需要电网公司在发电侧、售电侧与其他主体协调合作, 制定合理的电价机制、市场机制, 同时在电网公司内部也要构建对风电供暖

的政策争取、技术推广、示范工程建设等环节,在关注项目本身经济性的同时,承担起节能减排等社会责任。

风电企业作为风电供暖系统的能源流始端,主要是在发电侧将清洁能源更多地转化为电能,并通过特高压输送;从电能流向来说,风电企业既可以向电网公司提供电能,又可以通过大用户直供电形式与供暖企业直接进行交易。

供暖企业需要投资建设电供暖的热力站,利用现有的区域热网或者新建热网向用户侧(包括居民、工厂、企业、商场、学校等)供热,在保证用户侧成本不增加的基础上实现盈利。供暖企业可与风电企业通过大用户直供电形式开展风电供暖,也可以通过电网公司以三方协议形式或者市场交易的手段,签订购售电协议,最终要通过降低电价来降低运营成本,增加其自身收益。

2.2 模型假设

在风电供暖的协作机制中,政府为风电供暖出台相关支持政策,对各个环节进行监督与监管,保障交易、投资等过程规范与合法,并要协调好各个主体在促进风电供暖过程中的关系,并不参与联盟利益的分配,在合作博弈中称为无为博弈方,不参与合作模型的构建。由此,本文构建电网公司、风电企业和供暖企业的风电供暖三方合作博弈模型,研究三方之间的博弈关系,并作出如下假设:

(1) 博弈中的主体都是有限理性的,即在决策过程中,各主体根据获取的有限信息作出合作与否的决定,并从中选出利益最大化的方案。

(2) 参与主体的收益仅考虑风电供暖的运营期,即从可持续风电消纳的角度出发,只有参与方持续从风电供暖中盈利才能维持合作。

(3) 风电供暖所需电量由风电企业保障收购小时数以外电量提供。根据张家口地区的负荷运行曲线,目前超额电量大于风电供暖所需电量。

2.3 风电供暖的合作博弈模型

风电供暖的运营阶段,电网公司、风电企业和供暖企业三者无论是各自单独经营还是联合经营都有一定的经济收益。如果各主体之间的收益不存在抵消性,即合作不会使个体收益减少,联合经营的总收益超过各自独立经营之和,那么电网公司、风电企业和供暖企业便会选择合作而放

弃单独行动,并且所有主体都参加合作可以实现收益最大化。因此,需确定参与方集合中每个联盟所对应的特征函数 $v(S)$ 。令 $N=\{\text{电网公司, 风电企业, 供暖企业}\}$, 那么就有 2^3 种联盟可能, 并构造参与主体独立行动、两方合作和三方合作情况下的收益函数, 通过收益函数的求解而找到最优的合作方案, 即 $S_0=\emptyset$, $S_A=\{\text{电网公司}\}$, $S_B=\{\text{风电企业}\}$, $S_C=\{\text{供暖企业}\}$, $S_{AB}=\{\text{电网公司, 风电企业}\}$, $S_{AC}=\{\text{电网公司, 供暖企业}\}$, $S_{BC}=\{\text{风电企业, 供暖企业}\}$, $S_{ABC}=\{\text{电网公司, 风电企业, 供暖企业}\}$ 。

2.3.1 单个主体的成本收益分析

风电供暖的3个主体分别单独行动时, 电网公司的收入包括电供暖的电费收入、除了电供暖电量外的其余超发电量的电费收入、所有超发电量的输配电费收入, 成本是从风电企业购电的费用。随着电供暖面积增大, 电供暖电量增加, 电网公司电供暖电费收入增加, 同时支付给风电企业的上网电费也会增加。电网公司的收益表达式如下:

$$E_A = s_1(h_1 - h_2)W_1 p_{s_1} + (1 - s_1)(h_1 - h_2)W_1 p_{s_2} + [(h_1 - h_2)W_1 - Q][s_3 p_{m_1} + (1 - s_3)p_{m_2}] + s_2 Q p_{g_1} + (1 - s_2)Q p_{g_2} - [(h_1 - h_2)W_1 - Q]p_q \quad (1)$$

式中: E_A 为电网公司的收益; h_1 为风电利用小时数; h_2 为风电保障收购小时数; W_1 为风电并网量; Q 为采暖负荷电量; s_1 为输配电中谷电比例; s_2 为居民供暖电量占电供暖总电量比例; s_3 为超发电量扣除电供暖电量后居民用电的比例; p_{s_1} 为谷电输配电价; p_{s_2} 为一般输配电价; p_{g_1} 为居民电供暖电价; p_{g_2} 为工商业电供暖电价; p_{m_1} 为居民购电电价; p_{m_2} 为工商业购电电价; p_q 为风电强制结算电价。

风电企业单独行动时, 上网电价由四方协作机制决定, 不合作时风电企业上网电价为强制结算电价。风电企业的单独收入是将所有超发电量以强制结算电价卖给电网公司的收益和政府清洁能源补贴。风电企业的收益表达式如下:

$$E_B = (h_1 - h_2)W_1(p_b + p_q) \quad (2)$$

式中: E_B 为风电企业的收益; p_b 为清洁能源补贴。

供暖企业单独行动时, 收入是居民和工商业用户缴纳的取暖费, 按每个取暖季为5个月计算, 取暖费用由取暖面积和每月取暖费用相乘, 成本

是供暖企业向电网公司缴纳的电供暖电费(包括输配电费和政府基金及附加)。供暖企业的收益表达式如下:

$$E_C = 5s_2Mp_1 + 5(1-s_2)Mp_2 - [s_1Qp_{s1} + (1-s_1)Qp_{s2} + s_2Qp_{g1} + (1-s_2)Qp_{g2} + Qp_z] \quad (3)$$

式中: E_C 为供暖企业的收益; M 为风电集中供暖面积; p_1 为单位面积居民采暖每月费用; p_2 为单位面积工商业采暖每月费用; p_z 为政府基金及附加。

2.3.2 2个主体合作成本收益分析

风电供暖的主体两方合作时,风电企业和电网公司合作则可以促进风电的消纳,弃风电量可以上网参与供暖;风电企业和供暖企业合作,则供暖企业可以享受低谷的购电价格。通过上述合作博弈的分析,可以构造出电网公司、风电企业和供暖企业三大博弈主体中两方合作的收益函数,分为三种情况:电网公司和风电企业合作;电网公司和供暖企业合作;风电企业和供暖企业合作。

(1)电网公司和风电企业合作。在这个合作联盟中满足输电约束条件下,风电企业发电量可全部上网,不存在弃风情况。并且按四方交易机制的规定,风电企业参与交易的超额发电量进行差额收益返回,风电企业未参与交易的超额发电量不参加差额收益返还。电网公司和风电企业合作的收益表达式如下:

$$E_{AB} = (1-s_4)(h_1-h_2)W_2[s_3p_{m1} + (1-s_3)p_{n2}] + s_4(h_1-h_2)W_2[s_3p_{m1} + (1-s_3)p_{n2} + p_a - p_q] + (h_1-h_2)W_2p_b + s_1(h_1-h_2)W_2p_{s1} + (1-s_1)(h_1-h_2)W_2p_{s2} + s_2Qp_{g1} + (1-s_2)Qp_{g2} \quad (4)$$

式中: E_{AB} 为电网公司和风电企业合作的收益; W_2 为风电装机量; s_4 为风电企业参与四方协作交易的超额发电量的比例; p_a 为标杆上网电价。

(2)电网公司和供暖企业合作。在这个合作联盟中,电网企业能够减少风电并网限制,提高区域风电渗透率,在用电低谷时段向供暖企业出售更多电能,降低供暖企业的运营成本。合作的收益表达式如下:

$$E_{AC} = 5s_2Mp_1 + 5(1-s_2)Mp_2 + [(h_1-h_2)W_1 - Q][s_3p_{m1} + (1-s_3)p_{n2} + s_1p_{s1} + (1-s_1)p_{s2} - p_q] - Qp_z - s_2Qp_{g1} - (1-s_2)Qp_{g2} \quad (5)$$

式中: E_{AC} 为电网公司和供暖企业合作的收益。

(3)风电企业和供暖企业合作。在这个合作

联盟,双方可采取大用户直购电方式,供暖企业与风电企业直接交易,上网电价与输配电价分别核算。收益表达式如下:

$$E_{BC} = 5s_2Mp_1 + 5(1-s_2)Mp_2 - Qp_z - Qp_{s1} + (h_1-h_2)W_1(p_q + p_b) + [(h_1-h_2)W_1 - Q]p_q + (h_1-h_2)W_1p_b \quad (6)$$

式中: E_{BC} 为风电企业和供暖企业合作的收益。

2.3.3 3个主体合作成本收益分析

电网公司、风电企业、供暖企业三方合作情况下,在四方交易机制的框架内,风电企业可以将弃风电量全部并入电网中,实现收益增加,电网公司获得更多的输配电收益,供暖企业则全部采用低谷电价,降低自己的运营成本。合作联盟成立的情况下,联盟的总收益包括供暖公司的取暖费用、全部超额发电量的电费收入(包括输配电费)、供暖电量的电费收入,成本是政府基金及附加。电网公司、风电企业和供暖企业三者合作的收益表达式如下:

$$E_{ABC} = 5s_2Mp_1 + 5(1-s_2)Mp_2 - Qp_z + (h_1-h_2)W_2p_b + [(h_1-h_2)W_2 - Q][s_3p_{m1} + (1-s_3)p_{n2}] + s_4(h_1-h_2)W_2(p_a - p_q) \quad (7)$$

式中: E_{ABC} 为电网公司、风电企业和供暖企业三方合作的收益。

风电供暖从风力发电单元出力到用户侧转换为热能,还需满足电力系统和供热系统的约束。在电力平衡约束下,由于绿色电力的优先调度,风力发电获得优先发电机会,系统主要由水电和火电承担调峰调频服务,整体上达到了电力的实时平衡。在供热系统的热平衡约束下,风电与电锅炉联合供暖时,储热罐将在谷负荷时吸收热能,在峰负荷时输出热力,实现热力系统的动态平衡。风电供暖的系统约束主要包括:

(1)电力平衡约束。

$$P_{ew,w} + P_{ei,w} = P_{ab} \quad (8)$$

式中: $P_{ew,w}$ 为等效风电厂电出力; $P_{ei,w}$ 为独立电厂电出力; P_{ab} 为目标风电场的电出力。

(2)供热约束。

$$H_{eb,u} + H_{ta,o} = H_{nhl} \quad (9)$$

式中: $H_{eb,u}$ 为电锅炉提供给用户的热功率; $H_{ta,o}$ 为储热罐输出热功率; H_{nhl} 为用户的热负荷。

(3)风电厂出力约束。

$$0 \leq P_{ew,w} \leq P_{ab,ow} \quad (10)$$

式中: $P_{ab,ow}$ 为目标风电场弃风功率。

2.4 模型求解

对于多方合作博弈的求解,美国经济学家 Shapely 于 1953 年首次提出了 Shapely 值法^[8]。Shapely 值作为合作博弈中一个流行解概念,为联盟博弈的参与者提供了唯一配置。Shapely 值法对成本收益分摊的原则是按照其所有边际贡献进行分摊。当 n 个参与主体从事某种经济活动时,各参与成员之间会形成不同的合作方式,任一合作方式都能够获得一定的收益。如果各参与主体之间的经济活动是非对抗性的,那么合作主体数量 n 的增加不会使得到的收益减少,所以全部参与主体合作将会获得最大化的收益。按照 Shapely 值法的思想,局中人 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 所应承担的成本或所应获得的收益等于该局中人对每个参与联盟的边际贡献平均值。其定义如下:

记集合 $N=\{1, 2, \dots, n\}$, S 是 N 的任意子集, \emptyset 表示空集, $v(S)$ 是定义在 N 上的特征函数,代表 S 的收益,并且满足以下条件:

$$\begin{cases} v(\emptyset)=0 \\ v(S_1 \cup S_2) \geq v(S_1) + v(S_2) \\ S_1 \cap S_2 = \emptyset, S_1, S_2 \subseteq N \end{cases} \quad (11)$$

设 φ_i 为参与主体 i 的收益, Shapely 值计算公式为:

$$\varphi_i(v) = \sum_{s \in S_i} \frac{(|S|-1)! (n-|S|)!}{n!} [v(S) - v(S-\{i\})] \quad (12)$$

式中: $|S|$ 表示集合 S 元素的个数; $v(S-\{i\})$ 表示没有 i 加入集合 S 时的收益,则 $v(S)-v(S-\{i\})$ 表示 i 加入集合 S 时对收益产生的增量; $\frac{(|S|-1)! (n-|S|)!}{n!}$ 表示加权因子。

3 算例分析

3.1 算例场景

张家口是我国风能资源和太阳能资源最丰富的地区之一,尤其坝上地区是全国少有的风能集中区,风能可开发资源超过 40 GW^[9]。丰富的可再生能源为张家口市清洁取暖提供了良好的资源保障。目前,张家口市风电国家保障小时数以外的发电量可支撑 20 km² 以上电供暖面积;到 2020 年,装机将达到 13 GW,可支撑约 30 km² 电供暖面积。此外,张家口是京津冀地区重要的生态涵

养区及 2022 年冬奥联合举办城市,在申办奥运时提出“确保到 2022 年赛时空气质量达到世界卫生组织标准”。因此风电供暖是张家口市开展大规模清洁取暖的主要途径。

张家口风电供暖获得了中央和地方政府的大力支持。2017 年张家口市首创了“政府+电网+发电企业+用户侧”共同参与的四方协作机制,成为全国首个将可再生能源电力纳入市场直接交易的成功范例,并获得了国务院的通报表彰。在运营的两年时间里,四方协作机制实现了“政府要绿、企业要利、居民要暖”的多赢诉求,电网企业主动承担央企社会责任,探索符合张家口实际的清洁取暖新机制,提高新能源企业效益,降低用户取暖成本^[10]。2017—2018 年采暖期,纳入市场交易的风电企业有 47 家,装机容量约为 5.83 GW,累计交易挂牌电量合计 1.4×10⁸ kWh,其中纳入四方协作机制,享受市场化交易优惠电价政策的有 138 户电供暖用户,供暖面积 1.39 km²。

从风能资源储量、风电供暖发展需求和实际成效等多方面的影响因素来看,张家口大规模发展风电供暖,实现风电的有效消纳具有典型意义,本文根据张家口风电供暖情况,对风电供暖的合作模型进行验证分析。

3.2 基础数据

3.2.1 电网公司基础数据

根据河北省发改委印发的《清洁供暖有关价格政策》(冀发改价格[2017]1376 号),通过市场化交易方式购电的采暖用电,谷段输配电价可享受 50% 的优惠政策。冀北地区的输配电价为 0.170 7 元/kWh(冀价管[2018]115 号),则合作模式下电采暖谷段的输配电价为 0.085 35 元/kWh。根据河北省物价局《关于合理调整电价结构有关事项的通知》(冀价管[2017]89 号),冀北地区燃煤标杆上网电价(含脱硫、脱硝和除尘)为 0.372 元/kWh,风电项目的标杆上网电价为 0.45 元/kWh,则可再生能源补贴为 0.078 元/kWh。根据国家电网有限公司对张家口风电供暖的详细规划,设定 3 个阶段,第一阶段为 2017—2019 年,第二阶段为 2020—2021 年,第三阶段为 2022—2025 年,不同阶段的相关参数值设定见表 3。

3.2.2 风电企业基础数据

在四方协作机制中,风电企业承诺保障利用

表3 不同场景下各参数值设定

阶段	W_2/GW	W_1/GW	M/km^2	$Q/10^8 kWh$	替代煤量/ $10^4 t$	碳减排效益/万元
第一阶段(2017—2019年)	10.94	10.17	3.20	5.28	16.79	4 929.9
第二阶段(2020—2021年)	13.00	12.09	6.00	9.6	30.53	10 244.8
第三阶段(2022—2025年)	15.00	13.95	9.00	14.4	45.79	166 645.0
总计			18.20	29.28	93.11	181 819.0

小时数以外的发电量全部参与市场化交易,并承诺在协议期内每年自愿将不低于10%的发电量(保障小时数以上电量)按照不高于0.05元/kWh的交易价格,用于保障电供暖用户需求,其中电采暖用户挂牌价格(发电侧)为0.05元/kWh,电能替代用户挂牌价格(发电侧)为0.1元/kWh。张家口风电并网的利用小时数平均为2 250 h,风电保障收购小时数为1 900 h,不参与市场交易的风电强制结算电价为0.296 88元/kWh,弃风率为7%。

3.2.3 供暖企业基础数据

张家口市冬季每月取暖价格为住宅5.91元/ m^2 ,公建9.8元/ m^2 ,按5个月取暖计算为29.55元/ m^2 和49元/ m^2 。根据四方协作机制在张家口的实际运营情况,通过调研和查阅相关文献,对风电供暖相关参数设计如表4所示。

表4 风电供暖相关参数值

参数	数值	参数	数值
s_1	0.625	$p_{e2}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.1
s_2	0.7	$p_{m1}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.48
s_3	0.5	$p_{m2}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.53
h_1/h	2 250	$p_z/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.019
h_2/h	1 900	$p_q/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.296 88
$p_{e2}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.170 7	$p_b/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.078
$p_{s1}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.085 35	$p_1/(元 \cdot m^2 \cdot 月^{-1})$	5.91
$p_{s1}/[元 \cdot (kWh)^{-1}]$	0.05	$p_2/(元 \cdot m^2 \cdot 月^{-1})$	9.8

3.3 计算结果

根据合作博弈的Shapley值求解方法,即根据式(9),将设定参数和各个阶段数据代入计算过程,可以计算出张家口四方协作机制下风电供暖三阶段规划中电网公司、风电企业、供暖公司各自的收益。

在第一阶段,电网公司的收益为104 104.17万元,风电企业的收益为137 936.03万元,供暖企业的收益为3 585.79万元;在第二阶段,电网公司的收益为89 181.56万元,风电企业的收益为

155 852.15万元,供暖企业的收益为10 748.77万元;在第三阶段,电网公司的收益为54 314.76万元,风电企业的收益为168 490.62万元,供暖企业的收益为21 493.24万元。三阶段收益分摊结果见图3。

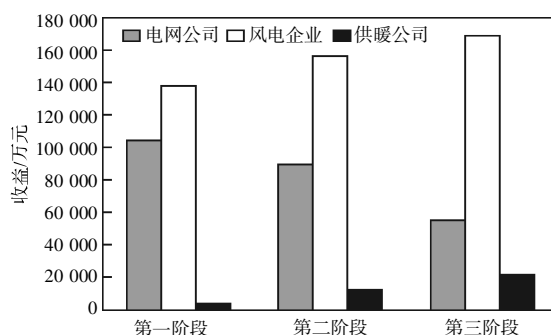


图3 三阶段收益分摊结果

从图3可见,随着风电供暖的持续深入开展,电网公司、风电企业、供暖企业都能从中获得收益,能够持续有效地推动张家口富裕风电的大规模消纳。风电供暖的四方协作机制是一种有效的发展模式,风电企业和供暖企业收益增加,将会有力支持风电供暖的实施和开展。但从投资和收益角度来看,随着供暖面积的增大,电网公司承担了更多的供暖电量补偿,收益会减少,这方面应加强政策性支持。

4 结语

从风电大规模消纳的角度,本文构建了风电供暖的多方合作博弈模型,以张家口地区为例,用Shapely值法对模型求解。通过对电网公司、风电企业、供暖企业的收益分析,发现四方协作机制能有效推动风电供暖的实施,参与各方均能获得一定的收益,尤其是风电企业和供暖企业收益能够持续增加,但随着供暖面积的增加,电网公司收益会下降。从大规模风电消纳和持续推动风电供暖角度,提出以下政策建议:

(1)政府制定相关的风电供暖政策时,要合理控制风电供暖面积与风电供暖电量的比例。做好风电供暖的合理规划设计,对风电场建设和风电供暖面积要统筹规划。

(2)建立清洁取暖成本全社会分摊机制。统筹考虑热源、热网和居民采暖承受能力,可以按照合理成本加收益的原则制定风电供暖电专项电价和专项暖价。考虑适时提高终端供暖价格,缓解供暖成本压力,在可接受范围内使居民参与分摊电采暖成本。

(3)深入推动电力体制改革,推动绿色电力市场交易,适当减免清洁供暖用电中的政府性基金及附加费,并参考峰谷电价制度建立蓄热式电采暖弹性输配电价制度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 许梦莹,蒋东翔.风电供热系统的能源利用率和经济性分析[J].中国能源,2015,37(8):42-47.
- [3] 崔正湃,邢劲,牛逸宁,等.市场化交易风电供暖模式研究及应用示范[J].全球能源互联网,2018,1(5):574-580.
- [4] 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.

- [5] 严干贵,杨玉龙.电力辅助服务市场下电采暖促进风电消纳的经济性分析[J].全球能源互联网,2019,2(3):309-316.
- [6] 刘文霞,凌云岷,赵天阳.低碳经济下基于合作博弈的风电容量规划方法[J].电力系统自动化,2015,39(19):68-74.
- [7] 牛传凯,李铮伟,曹人靖.风电供热项目的开发模式及经济性分析[J].区域供热,2019(2):43-49.
- [8] 熊峰,吴桂峰,夏懿.Shapely 值法在利益分配中的研究[J].管理观察,2018,38(10):32-34.
- [9] 刘颖.张家口可再生能源示范区发展现状及趋势研究[J].现代营销(信息版),2019(4):162-163.
- [10] 孙志杰,谢枫,周辛南,等.清洁采暖背景下张家口电采暖竞争力及经济性分析[J].智慧电力,2018,46(5):40-45.

收稿日期:2020-06-13

作者简介:岳云力(1987),男,高级工程师,主要研究方向为能源经济与企业战略、智能配电网。

方勇(1976),男,教授,主要研究方向为可再生能源政策、电力经济。(通讯作者)

(本文编辑:徐 晗)