

中国省级天然气分布式能源开发环境 评价及聚类分析

赵振宇, 叶慧男, 耿孟茹

(华北电力大学新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 天然气分布式能源正成为清洁能源利用的新的重点领域, 考虑不同环境特点因地制宜是天然气分布式能源有序推广和健康发展的重要前提, 因此, 需要建立系统科学的分析指标体系开展不同地区的评价和对比研究。通过文献研究法识别天然气分布式能源项目开发的影响因素, 从中归纳出地区天然气分布式能源开发的资源条件、能源环境、经济环境和社会环境等4个维度的16个可量化指标, 建立地区天然气分布式能源开发环境评价指标体系。应用所建指标体系采用主客观组合赋权法, 开展全国31个省级行政区的天然气分布式能源开发环境评价和综合得分排序。依据评价结果, 将天然气分布式能源发展的地区按环境划分为五类, 并对比分析五类地区在天然气分布式能源开发资源条件、能源环境、经济环境和社会环境方面的差异。针对五类地区的不同环境特征, 提出相应的发展策略建议。

关键词: 天然气分布式能源; 开发环境; 省际比较; 综合评价; 聚类分析

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.020 中图分类号:TK01+9, F206 文章编号:1673-9140(2022)04-0175-08

Provincial evaluation and cluster analysis of environments for gas distributed energy system development in China

ZHAO Zhenyu, YE Huinan, GENG Mengru

(Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The gas distributed energy system (GDES) is becoming a new and important field of clean energy utilization. Considering different environmental characteristics according to local conditions is an important premise for the orderly promotion and healthy development of GDES. It is necessary to establish a systematic and scientific index system to evaluate and compare GDES in different regions. This paper identified the influencing factors of GDES developments through a literature review. Total 16 quantifiable indicators were concluded from 4 aspects involving resource conditions, energy environments, economic environments, and social environments. An evaluation index system of regional GDES development environments is established. Then, a combined weighting determination method was applied to evaluate and rank the GDES development environments of 31 provincial administrative regions in China. Ac-

收稿日期:2020-09-07;修回日期:2020-12-31

基金项目:北京市自然科学基金(8194023)

通信作者:赵振宇(1969-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事清洁能源电力建设、工程项目管理研究;E-mail:zhaozhenyuxm@263.net

ording to the evaluation results, the development environments were divided into five categories, and the differences in resource conditions, energy, economic, and social environments were compared. According to the different environmental characteristics of the five categories, a series of development strategies was suggested.

Key words: gas distributed energy system; development environments; provincial comparison; comprehensive evaluation; cluster analysis

节能和清洁能源利用是当今世界能源结构转型的两大主题,不同国家和地区均围绕这两大主题探索因地制宜的能源利用方式。天然气分布式能源清洁高效兼具灵活和可调节的特性,满足节能的要求,并能通过电—气互联网络的构建促进风光等间歇性可再生能源的消纳^[1],正受到广泛关注。国家发展改革委、财政部住房城乡建设部、国家能源局联合发布《关于发展天然气分布式能源的指导意见》(发改能源[2011]2196号)对天然气分布式能源的概念进行了界定,并提出要推动天然气分布式能源有序发展。天然气分布式能源被界定为以天然气为燃料,实现能源梯级利用且综合利用效率在70%以上的就地供能方式。中国不同地区的天然气分布式能源项目开发环境差异明显,如天然气资源分布、价格、热(冷)需求、

地方政策、环保要求等均有差异,造成天然气分布式能源区域发展的不均衡性。因此,亟需研究不同地区天然气分布式能源开发环境的特征和异同,分析制定差异化的发展策略,开展地区分类指导。

1 天然气分布式能源开发环境分析

天然气分布式能源项目开发决策受多方面因素影响,包括项目内部的资源、需求、价格以及项目外部地区的社会软硬件基础。依据这4个方面要素,并在梳理相关研究文献观点基础上,可将天然气分布式能源开发影响因素归纳为资源条件、能源环境、经济环境和社会环境4个维度。相关观点及不同地区的典型情况如表1所示。

表1 地区天然气分布式能源开发环境分析

Table 1 Analysis of GDES development environments in different regions

因素	主要观点	不同地区的典型情况
资源条件	需要天然气资源供应保障(需要天然气资源自主供应保障/持续外来输入)	四川天然气剩余可采储量丰富,生产量有保障 ^[2] ;长三角地区自有天然气资源匮乏,气源由外来输入供应 ^[3] ;黑龙江鼓励产业园区、商业综合体十三五期间开展天然气分布式能源示范项目,加强对俄罗斯天然气输入的利用 ^[4] ;山东鼓励在气源有保障的城市推广燃气热电冷三联供分布式能源 ^[5]
能源环境	需要能源、电力、热(冷)需求作为开发基础;需要能源投资的环境;地区可再生能源资源的开发利用是有竞争力的供能方案	将冷热电集成规划,可提高多能源整体能效,增加经济效益 ^[6] ;天然气分布式能源项目布局应当同步关注热力需求,如:长江以南地区无居民供热负荷,工业以供冷需求为主,产业园区汇集冷热电气多种负荷 ^[7] (冷负荷主要由热力或电力经设备转化提供)。长江经济带能源供应有投资增长趋势,提供项目投资空间 ^[3] 。目前,天然气分布式能源平衡风光等可再生能源出力的机制尚不健全且未形成规模,从能源供需角度,二者为竞争关系;可再生资源丰富地区可充分利用可再生能源 ^[8] ,构建能源解决方案
经济环境	燃料成本影响天然气分布式能源系统运行;部分地区消费者价格承受能力相对较强;用能价格需要具备相对经济性	燃气电站作为独立运行者,其市场行为受实时电价、气价调节 ^[9] 。浙江燃气上网电价越低潜在盈利空间越少,十三五期间积极探索天然气分布式能源的价格形成机制 ^[10] 。电力—天然气网络联合规划需要考虑运行成本问题 ^[11] ,并存在发电、电网及天然气公司的三方主体投资、运营博弈 ^[12] ;作为对比电价和定价参考的主网煤电价越高,拟进入市场新型能源可接受的成本范围越大 ^[13]
社会环境	生态环境压力是地区天然气分布式能源发展的驱动力;天然气分布式能源发展需要基础设施、技术推广以及政策等的支撑	四川能源结构优化推进生态建设 ^[14] ;吉林、河南、湖南、广东以及广西5省鼓励热电冷三联供技术应用示范、天然气分布式能源工程建设 ^[15-19] 。热电联产机组、微燃机组是建设新型能源系统的重要能源耦合设备 ^[20] ;能源系统中分布式电源的建模已较为成熟 ^[21] ;包括气、热、电网在内的能源网络特性影响综合能源系统规划及优化 ^[22] ;上海等地配套了天然气分布式能源相关激励措施 ^[23]

资源条件:考察天然气源供应潜力。当前,天然气分布式能源项目中用气量在城市天然气消费中占比低,但对于天然气总量供应充足地区,其未来天然气分布能源项目开发更有保障。

能源环境:天然气分布式能源项目开发的能源投资环境和供能需求。项目开发应符合能源产业供需关系及其平衡的要求。

经济环境:影响天然气分布式能源经济效益水平的项目自身成本、收入及外部相关要素价格水平对比。

社会环境:天然气分布式能源引入的推力和软硬件基础,包括地区发展的环保压力以及项目开发的政策支持水平、技术推广水平和管网设施基础。

2 开发环境评价指标体系构建

对地区天然气分布式能源开发环境展开分析,细化并归纳相应指标,依据全面、具体、可操作性原则,并考虑数据的可获得性,构建地区天然气分布式

能源开发环境评价指标体系,如表 2 所示,目标层包含 4 个准则层,即资源条件、能源环境、经济环境、社会环境;在准则层的 16 个指标中,可再生能源消纳水平和天然气价格水平为负向指标,其他均为正向指标。

各指标测度主要以相关统计值为依据。“政策支持水平”使用“0-1”二元评价测度结果,测度过程如下:

1) 将相关政策分为涉及天然气分布式能源的节能减排政策、涉及天然气分布式能源的中长期发展规划、推进天然气分布式能源项目发展的导向政策、天然气分布式能源专项规划以及补贴政策 5 个方面;

2) 根据地区现实情况,展开各项政策记录,有某方面政策内容记“1”分,否则记“0”分;

3) 累加各方面政策记录得分,获得地区政策支持水平统计值。

通过这种判断式评价,可以减小主观判断错误,提高政策支持水平评价的准确性。

表 2 地区天然气分布式能源开发环境评价指标体系

Table 2 Evaluation index system of regional GDES development environments

目标层	准则层	指标层	指标测度方法
地区 天然 气分 布式 能源 开发 综合 环境 (D)	资源条件(R)	天然气资源开发潜力(r_1)	以天然气剩余可采储量表征
		自产天然气增长率(r_2)	以天然气产量增长率表征
		天然气外来输入量(r_3)	以地区供气总量和地区生产量的差值表征
		天然气外来输入增长率(r_4)	以天然气外来输入增长率表征
	能源环境(P)	电力消费增长(p_1)	以电力消费量增长率表征
		可再生能源消纳水平(p_2)	以地区可再生能源电力消纳比重表征
		能源供应投资水平(p_3)	以电力、蒸汽、热水生产和供应业投资增长率表征
		热力相对需求(p_4)	以供热供电原煤比表征
	经济环境(E)	天然气价格水平(e_1)	以天然气基准门站价格表征
		燃气电价水平(e_2)	以燃气平均上网电价表征
		可比价格水平(e_3)	以燃煤标杆电价表征
		价格承受能力(e_4)	以人均可支配收入表征
	社会环境(S)	地区环境压力(s_1)	以废气中主要污染物排放总量与地区建成区面积的比值表征
		政策支持水平(s_2)	使用“0-1”二元评价结果
		技术推广水平(s_3)	以地区气电项目个数表征
		管网设施基础(s_4)	以地区天然气管网长度与建成区面积比表征

3 综合评价及结果

3.1 主客观组合赋权法

指标权重的确定对综合评价结果的准确性至关重要,本文采用主客观组合赋权法^[24]确定指标权重。

首先,基于熵值法^[25]确定第*i*个指标的客观权重 w_{1i} ;其次,基于九标度专家打分和层次分析法确定第*i*个指标的主观权重 w_{2i} ;最后,计算第*i*个指标组合权重,即

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{1i} \cdot w_{2i}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt{w_{1i} \cdot w_{2i}}} \quad (1)$$

式中 w_i, w_{1i}, w_{2i} 分别为第*i*项指标的组合、客观、主观权重, $i=1, 2, \dots, n$ 。

3.2 数据收集及处理

考虑统计数据的可获得性,选取31个省级行政区开展分地区的天然气分布式能源开发环境评价,指标数据来源如表3所示。

表3 评价指标数据来源

Table 3 Data sources of evaluation indicators

指标	数据来源
r_1, r_2, r_3, r_4	国家统计局地区分省年度数据(2016—2018)
p_1, p_4	电力工业统计资料汇编 2017、2018
p_2	《2018年度全国可再生能源电力发展监测评价报告》(国家能源局)
p_3	《中国能源统计年鉴 2018》
e_1	《国家发展改革委关于调整天然气基准门站价格的通知》(发改价格[2019]562号)
e_2	《2018年度全国电力价格情况监管通报》(国家能源局)
e_3	《国家发展改革委关于降低燃煤发电上网电价和一般工商业用电价格的通知》(发改价格[2015]3105号)及各地区具体调价方案
e_4, s_1, s_4	《中国统计年鉴 2019》、《中国城市统计年鉴 2019》、国家统计局分省年度数据(2017、2018)
s_2	各地方政府发展和改革委员会、人民政府门户网站等天然气分布式能源相关政策
s_3	www.chinagasmap.com(中国燃气发电项目数据实时更新,访问时间2020年10月12日)

对指标的统计值进行归一化处理,可以消除指标间由于量纲而导致的信息量差异,即

$$S_{ij} = \begin{cases} \frac{Z_{ij} - \min_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\}}{\max_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\} - \min_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\}}, & \text{第 } i \text{ 个指标为正向指标} \\ \frac{\max_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\} - Z_{ij}}{\max_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\} - \min_{1 \leq j \leq n} \{Z_{ij}\}}, & \text{第 } i \text{ 个指标为负向指标} \end{cases} \quad (2)$$

式中 Z_{ij}, S_{ij} 分别为第*j*个样本第*i*个指标的统计值、归一化统计值, S_{ij} 最大值为1,最小值为0。

结合组合权重,第*j*个样本的综合评价结果为

$$D_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_{ij} \quad (3)$$

3.3 地区环境评价结果及分析

采用主客观组合赋权法获取各指标权重,如图1所示,可以看出,主观赋权更侧重于社会环境,尤其是政策支持水平;客观赋权更侧重于经济环境,尤其是天然气价格水平。组合赋权法对主观、客观权重计算结果进行了修正,使地区天然气分布式能源开发环境评价的指标权重更加合理科学。

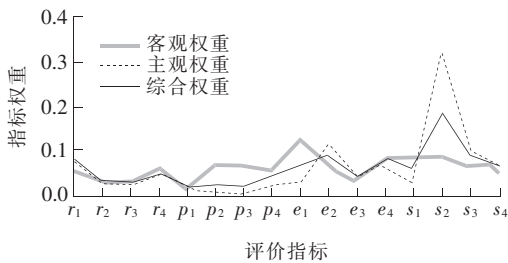


图1 指标权重

Figure 1 Weight of indicators

31个参与评价地区的天然气分布式能源开发环境评价结果如表4所示,天然气分布式能源开发环境综合得分前5位的省(市)为北京、上海、江苏、浙江和山东,后5位的省(区)为江西、辽宁、云南、西藏和甘肃。根据天然气分布式能源开发环境的准则层指标,资源条件较好的有四川、新疆;经济环境较好的有上海、浙江、北京、重庆;能源环境较好的有北京、辽宁、河南、黑龙江、山东、浙江;社会环境较好的有江苏、上海、山西、广东。综合来看,中国天然气分布式能源开发环境存在地区内的资源、经济、能源和社会方面的结构性差异,以及地区间的开发环境横向差异。

表 4 各地区天然气分布式能源开发环境评价结果

Table 4 Evaluation results of GDES development environments for different region

地区 序号	省(区、 市)	分值					地区 序号	省(区、 市)	分值				
		R	P	E	S	D			R	P	E	S	D
1	北京	0.097 9	0.094 9	0.159 4	0.213 9	0.566 1	17	湖北	0.069 6	0.046 0	0.072 3	0.163 9	0.351 8
2	天津	0.062 0	0.048 7	0.134 8	0.203 5	0.449 0	18	湖南	0.071 1	0.048 3	0.128 7	0.196 0	0.443 9
3	河北	0.072 8	0.045 9	0.075 9	0.247 8	0.442 4	19	广东	0.065 5	0.040 0	0.126 9	0.256 9	0.489 2
4	山西	0.071 6	0.040 5	0.119 6	0.265 6	0.497 2	20	广西	0.076 0	0.043 8	0.103 0	0.185 1	0.407 9
5	内蒙古	0.105 7	0.044 6	0.115 1	0.102 8	0.368 1	21	海南	0.079 8	0.043 1	0.147 3	0.147 2	0.417 4
6	辽宁	0.070 6	0.064 1	0.088 6	0.044 1	0.267 4	22	重庆	0.077 8	0.036 3	0.158 9	0.089 2	0.362 3
7	吉林	0.035 8	0.050 3	0.091 0	0.174 8	0.351 9	23	四川	0.131 3	0.022 1	0.118 8	0.178 8	0.451 0
8	黑龙江	0.075 1	0.055 1	0.090 7	0.102 6	0.323 6	24	贵州	0.095 6	0.036 1	0.082 1	0.171 6	0.385 4
9	上海	0.065 4	0.035 5	0.184 8	0.275 4	0.561 1	25	云南	0.077 6	0.017 2	0.081 5	0.075 8	0.252 1
10	江苏	0.080 3	0.047 1	0.105 1	0.320 3	0.552 8	26	西藏	0.071 2	0.032 9	0.061 4	0.060 0	0.225 5
11	浙江	0.085 9	0.050 5	0.182 6	0.187 8	0.506 7	27	陕西	0.092 7	0.040 0	0.118 1	0.214 9	0.465 7
12	安徽	0.070 9	0.047 6	0.068 8	0.206 7	0.394 0	28	甘肃	0.053 9	0.030 9	0.089 4	0.029 5	0.203 7
13	福建	0.075 4	0.042 0	0.128 7	0.107 4	0.353 5	29	青海	0.070 8	0.020 2	0.113 5	0.084 9	0.289 3
14	江西	0.055 8	0.039 9	0.066 3	0.113 9	0.275 8	30	宁夏	0.076 6	0.034 4	0.145 9	0.192 7	0.449 6
15	山东	0.081 6	0.052 0	0.140 0	0.227 4	0.501 0	31	新疆	0.113 9	0.023 2	0.106 8	0.064 1	0.308 0
16	河南	0.077 1	0.059 0	0.101 9	0.233 6	0.471 7							

4 开发环境聚类及分析

4.1 聚类方法及操作

聚类分析通过某种准则将对象依据属性值的近似或差异关系进行对象分类,以便挖掘对象属性的内涵。本文采用改进的 K-means 法^[26]对天然气分布式能源项目开发环境展开聚类分析。步骤:①使用系统聚类法开展多级聚类分析;②结合实际情况分析,选择合适的聚类组合数,并明确对应的聚类中心;③输入组合数及聚类中心信息,开展 K-means 聚类,修正个别样本所属类别。如图 2 所示,将基于

主、客观综合权重获取的参评地区资源条件以及能源、经济、社会、综合环境评价结果作为输入数据,对地区天然气分布式能源开发环境展开多级聚类。

4.2 聚类分析结果

依据聚类分析结果及各地区实际情况,参评的 31 个地区较适宜的分类数为 5。以类别数 5 及其对应的质心坐标为输入参数,使用 K-means 法修正个别样本所属类别,最终各地区所属类别如表 5 所示。根据聚类结果,计算各类地区各指标评价结果均值,使用雷达图呈现各指标的标准化值,开展各类天然气分布式能源开发环境特征对比,如图 3 所示(雷达图中坐标轴值从内到外依次增加)。

根据表 5,一类地区虽然资源条件相对一般,但受其他方面的拉动,其地区综合环境最利于项目开发;二、三类地区相较其他地区资源条件优势突出,其中,三类地区较二类地区的短板在社会环境;四类地区各项指标相对水平较为不均衡,其中,能源环境和社会环境较好,但资源条件和社会环境较差;五类地区资源条件较四类地区好,但其他方面的环境尚未配套建设,天然气分布式能源的综合开发环境落后。

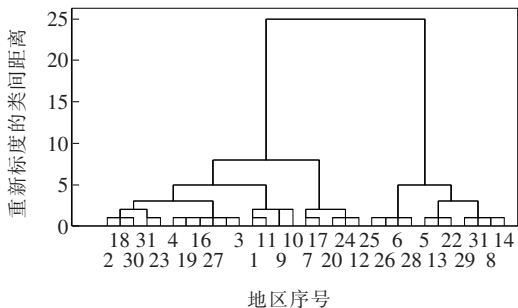


图 2 地区天然气分布式能源开发环境多级聚类
Figure 2 Multi level cluster diagram of regional GDES development environments

表5 基于改进K-means法的天然气分布式能源开发环境分类

Table 5 The classification of GDES development environments based on revised K-means method

地区分类	省(区、市)
一类	北京、上海、江苏、山东、山西、广东
二类	浙江、河南、陕西、四川、宁夏、天津、湖南、河北
三类	海南、内蒙古、重庆、福建、黑龙江
四类	广西、安徽、贵州、吉林、湖北
五类	新疆、青海、江西、辽宁、云南、西藏、甘肃

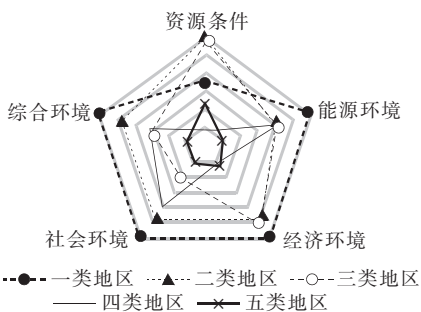


图3 五类地区天然气分布式能源开发环境特征对比

Figure 3 Characteristics of five types of GDES development environments

4.3 五类地区环境分析及发展策略

依据五类天然气分布式能源开发环境特征及分析,不同地区在进一步把握发展机遇、布局天然气分布式能源发展时,需立足当前基础、找准关键问题、精准施策。

一类地区天然气分布式能源的整体建设环境较好,适宜大力发展,但地区天然气资源主要依靠外来供应,发展进程中应重点关注天然气量的保障。随着中俄东线、新一粤—浙天然气管道等的全面建成投运及沿海地区 LNG 接收站的建设,北京、广东、上海、江苏、山东等地区天然气供应量将明显上升。该类地区应配套研究推进天然气供应管网同电、同热等供应网络的信息沟通,通过增加天然气资源和需求的耦合,适度扩大天然气分布式能源的开发空间。

二类地区资源条件优势相对突出,应以资源为主导,进一步完善能源、经济和社会环境,有序开发天然气分布式能源市场。一方面,应强化需求侧管理,完善管输体系以协调天然气资源的对内保障和对外输送;另一方面,应充分发掘区域内天然气分布式能源建设的有效需求,如把握京津冀一体化建设、

川陕地区革命老区振兴等契机,有针对性地优化气电管网布局、出台融资补贴政策。

三类地区资源条件优于一类地区,能源环境和经济环境与二类地区相似,项目建设的相对经济性较好,但社会环境相对滞后。在环境建设实践过程中,应重点关注社会环境改善,以地区经济建设为依托拉动能源需求和投资增长,以地区经济开发区、工业产业园区能源结构调整为抓手,提出针对性政策而推进天然气分布式能源开发。

四类地区的能源和社会环境明显优于其资源条件和经济环境,天然气分布式能源开发的综合环境一般。考虑该类地区天然气分布式能源开发的资源条件和经济环境较前3类地区差,项目的规模化发展有赖于地区经济增长带动天然气资源要素的增加。其天然气分布式能源开发环境改善可对标一类地区,借鉴北上广地区的成熟发展经验,并随着地区经济的改善动态把控项目开发节奏。

五类地区资源条件优于四类地区,但能源、经济和社会环境普遍较其他地区差,并滞后于自身资源条件。对该类地区,应论证天然气分布式能源发展对地区天然气产业发展及地区经济发展的贡献度,理性选择战略方向并在政策上加以明确,避免盲目发展。如:西藏地区经济发展落后、能源需求小,当地光伏资源丰富且开发利用率高,因此,不宜过度宣传和推广天然气分布式能源;云南和甘肃则可分别依托中缅天然气管道和西气东输线路的气源和管网基础,研究制定长期的天然气分布式能源发展战略规划,以政策和管网设施建设等社会环境提升为突破口带动整体环境改善,稳步推进项目建设。

5 结语

基于文献和现状分析,归纳提出影响地区天然气分布式能源开发的4个维度:资源条件、能源环境、经济环境和社会环境,并建立了地区天然气分布式能源开发环境评价指标体系。采用主客观组合赋权法对中国31个省级行政区天然气分布式能源开发环境进行量化综合评价。根据对综合评价结果的聚类分析,可实现将31个省区市划分为五类地区的合理分类,以科学判断和比较不同类别和同类别地

区间天然气分布式能源开发环境的异同,为全国天然气分布式能源开发的分类指导和同类地区发展经验的相互借鉴提供依据,也为国家和区域性天然气分布式能源的战略制定提供支持。

参考文献:

- [1] 龚晓琴,王进,王珑,等. 含电转气的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2):76-83.
GONG Xiaoqin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low-carbon economic operation for integrated electricity and natural-gas energy system with power-to-gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2):76-83.
- [2] 王胜,李星月,刘竟成,等. 川渝地区建设天然气化工产业集群的必要性、可行性及实施路径[J]. 天然气工业, 2021, 41(6):111-119.
WANG Sheng, LI Xingyue, LIU Jingcheng, et al. Construction of natural gas chemical industry cluster in the Sichuan-Chongqing area: Necessity, feasibility and implementation measures[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6):111-119.
- [3] 苏铭. 长江经济带能源协同发展研究[J]. 宏观经济管理, 2019(12):37-41+57.
SU Ming. A study on integrated energy development in the Yangtze River Economic Belt[J]. Macroeconomic Management, 2019(12):37-41+57.
- [4] 黑龙江省发展和改革委员会. 黑龙江省能源发展“十三五”规划 [EB/OL]. http://www.hljdp.gov.cn/art/2018/1/5/art_347_21097.htm, 2018-01-05.
- [5] 山东省发展和改革委员会. 山东省能源中长期发展规划 [EB/OL]. http://fgw.shandong.gov.cn/art/2016/12/19/art_107805_77, 2016-12-19.
- [6] 白宏坤,尹硕,李虎军,等. 计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):11-19.
BAI Hongkun, YIN Shuo, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):11-19.
- [7] 李宇泽,齐峰,朱英伟,等. 多能互补综合能源电力系统的建设模式初探[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):3-10.
LI Yuze, QI Feng, ZHU Yingwei, et al. A preliminary in-

vestigation on construction modes of a multi-energy complementary integrated energy system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):3-10.

- [8] 王晔,李丰荣,张少华. 考虑风电与能源转换和存储设备联营的电力和天然气市场均衡分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9):64-74.
WANG Xian, LI Fengying, ZHANG Shaohua. Equilibrium analysis of coupled electricity and gas markets considering joint operation of wind power with energy conversion and storage equipment[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9):64-74.
- [9] 舒康安,艾小猛,方家琨,等. 基于价格引导的气电联合系统双层优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(1):100-108.
SHU Kang'an, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Bi-level optimal model for integrated power and gas system based on price signals[J]. Power System Technology, 2019, 43(1):100-108.
- [10] 蔡洁聪,韩高岩,国旭涛,等. 浙江省天然气分布式能源发展及建议[J]. 浙江电力, 2019, 38(1):25-29.
CAI Jiecong, HAN Gaoyan, GUO Xutao, et al. Development and suggestion of natural gas distributed energy in Zhejiang province[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(1):25-29.
- [11] 邓卿,李志强,文福拴,等. 电—气集成能源系统环境下的电力系统动态输电断面识别[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):28-36.
DENG Qing, LI Zhiqiang, WEN Fushuan, et al. Identification of dynamic power transmission sections in an integrated electricity-gas energy system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):28-36.
- [12] 杨楠,黄禹,董邦天,等. 基于多主体博弈的电力—天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22):6521-6533.
YANG Nan, HUANG Yu, DONG Bangtian, et al. Research on the joint planning method of electricity-gas integrated energy system based on multi-agent game [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6521-6533.
- [13] 夏彦辉,董宸,李鹏,等. 一种基于天然气发电的园区能源互联网构建方案[J]. 智慧电力, 2017, 45(11):19-23+56.

- XIA Yanhui, DONG Chen, LI Peng, et al. Construction scheme for park energy internet based on natural gas power generation[J]. Smart Power, 2017, 45(11): 19-23+56.
- [14] 马新华, 胡勇, 王富平. 四川盆地天然气产业一体化发展创新与成效[J]. 天然气工业, 2019, 39(7): 1-8.
MA Xinhua, HU Yong, WANG Fuping. An integrated production-supply-storage-marketing system for natural gas development in the Sichuan Basin: Innovation and achievements[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(7): 1-8.
- [15] 吉林省人民政府. 吉林省“十三五”节能减排综合实施方案[EB/OL]. http://jldrc.jl.gov.cn/zl/zyhbdcjxs/zcfg/201708/t20170815_5225759.html, 2017-08-15.
- [16] 河南省发展和改革委员会. 河南省天然气替代煤专项方案(2016—2020年)[EB/OL]. <http://fgw.henan.gov.cn/2016/09-07/705142.html>, 2016-09-07.
- [17] 湖南省发展和改革委员会. 湖南省“十三五”节能规划[EB/OL]. http://fgw.hunan.gov.cn/fgw/xxgk_70899/ghjh/201702/t20170209_3980609.html, 2017-02-09.
- [18] 广东省发展和改革委员会. 关于加快推进我省清洁能源建设的实施方案[EB/OL]. http://drc.gd.gov.cn/gfxwj5633/content/post_865567.html, 2015-07-16.
- [19] 广西壮族自治区人民政府办公厅. 广西大气污染防治攻坚战三年作战方案(2018—2020年)[EB/OL]. http://www.gxzf.gov.cn/zfwj/zzqrmzfbgtwj_34828/2018ngzwbj_34842/t1508549.shtml, 2018-08-01.
- [20] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 面向新型城镇的能源互联系统规划关键技术研究及展望[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 16-28.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Research and prospect of key technologies for energy interconnection system planning for new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 16-28.
- [21] 周长城, 马溪原, 郭祚刚, 等. 面向工程应用的用户级综合能源系统规划[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2843-2854.
ZHOU Changcheng, MA Xiyuan, GUO Zuogang, et al. User-level integrated energy system planning for engineering applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2843-2854.
- [22] 张利军, 王一铮, 陈飞, 等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [23] 童家麟, 吕洪坤, 蔡洁聪, 等. 国内天然气分布式能源发展现状与应用前景综述[J]. 浙江电力, 2018, 37(12): 1-7.
TONG Jialin, LV Hongkun, CAI Jiecong, et al. Review on development and application prospect of domestic natural gas distributed energy resources[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(12): 1-7.
- [24] 胡铭洋, 高红均, 王程, 等. 面向多微网协调交易的多方共治决策方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 30-42.
HU Mingyang, GAO Hongjun, WANG Cheng, et al. Multi-party co-governance decision-making method for coordinated transactions among multiple microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 30-42.
- [25] 应宇辰, 王灿, 董庆国. 基于负荷综合权值的配电网孤岛划分策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(10): 91-97.
YING Yuchen, WANG Can, DONG Qingguo. Islanding partition strategy for distribution networks based on comprehensive weight of load[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(10): 91-97.
- [26] 张娜, 任强, 刘广忱, 等. 基于VMD-GWO-ELMAN的光伏功率短期预测方法[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 57-65.
ZHANG Na, REN Qiang, LIU Guangchen, et al. PV power short-term forecasting method based on VMD-GWO-ELMAN[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 57-65.