

Integrated
Intelligent
Energy

综合智慧能源

ISSN 2097-0706
CN 41-1461/TK
CODEN ZZNOAF

2

第 44 卷 第 2 期
Vol. 44 No. 2
2022 年



物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术

Power System Demand-Side Load Regulation
Technologies based on IoT

Special Issue 专刊

主管单位：中国华电集团有限公司

主办单位：华电郑州机械设计研究院有限公司 中国华电科工集团有限公司



期刊网站



微信公众号



中国电力优秀期刊
《CAJ—CD 规范》执行优秀期刊
中国核心期刊（遴选）数据库源刊
中国学术期刊综合评价数据源刊
美国《乌利希期刊指南（UPD）》收录期刊

（原刊名：华电技术）

编辑出版：《综合智慧能源》编辑部

网址：www.hdpower.net

E-mail：hdjs-chd@vip.163.com

北京地址：北京市丰台区汽车博物馆东路6号院华电科工大厦

邮编：100070

郑州地址：郑州市郑东新区龙子湖湖心岛湖心环路27号

邮编：450046

电话：0371-58501042

传真：0371-58501055

广告：0371-58501038

印刷：河南瑞之光印刷股份有限公司

国内发行：河南省邮政局

邮发代号：36-254

海外总发行：中国国际图书贸易集团有限公司

（北京399信箱）

国外发行代号：MO1842

国外定价：10美元/册

国内定价：24元/册

《综合智慧能源》编辑委员会

顾问委员：（以下按拼音首字母排序）

丁玉龙 杜祥琬 高翔 姜培学 江亿
金红光 王成山 赵旭东 周孝信

委员：（以下按拼音首字母排序）

别朝红 陈一东 丁坤 丁书江 丁一 董海鹰
董旭柱 董朝阳 高建民 郭照立 黄琦 李慷
李政 刘建明 刘向雷 鹿院卫 吕俊复 钱虹
盛万兴 隋军 孙宏斌 唐巍 王随林 王为术
王新雷 王志峰 吴学光 肖先勇 严俊杰 杨海平
杨卫红 俞自涛 袁智勇 曾德良 曾鸣 曾祥君
张华 张晋宾 张全国 赵军 钟文琪 周二专
朱继忠

主编：沈明忠

特约主编：惠红勋 张洪财 丁一

执行主编：杨满成

本期责编：齐琳 白银雷

中国标准连续出版物号：ISSN 2097-0706
CN 41-1461/TK

主管单位：中国华电集团有限公司

主办单位：华电郑州机械设计研究院有限公司

中国华电科工集团有限公司

特约主编寄语

为实现“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的减排目标，充分利用光伏、风电等新能源替代化石能源，以降低碳排放，已成为我国经济高质量发展的内在要求和必然趋势。然而，含高比例新能源的电力系统中，新能源发电受天气影响波动大，具有高度不确定性。为消纳波动的新能源出力，维持电力供给侧和需求侧的实时平衡，以火电为代表的传统机组频繁启停、爬坡，运行压力大。随着新能源占比的提高，机组面临调节能力不足的挑战。

以5G为代表的信息通信和物联网技术，可实现对海量需求侧负荷资源的实时监测和调控，为维持电网平衡提供了新途径。灵活调整储能电池、电动汽车、空调等需求侧负荷资源的用电，可以在保证用户生活和生产需求的前提下，为电网提供调峰、调频、备用等服务。随着新能源占比的增加和传统机组占比的减少，挖掘需求侧海量负荷的调节潜能是实现新能源高效清洁消纳、维持电网安全经济运行的有效途径。

为此，《综合智慧能源》邀请澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室惠红勋研究助理教授、张洪财助理教授和浙江大学电气工程学院丁一教授担任特约主编，策划了“物联网下的电力系统需求侧负荷调控技术”专刊。专刊得到了电力与能源领域专家学者的大力支持，经过同行评议，共收录高质量论文11篇，内容涵盖负荷建模与调节潜力分析、负荷资源的优化运行与控制、负荷调控市场机制等多个方面。希望本专刊可以为科研工作人员及工程管理人员提供关于电力系统需求侧负荷调控技术的前沿成果、最新进展、关键技术及未来发展方向，并为负荷调控技术的学术研究、政策机制设计、工程实践等提供有益参考。

最后，感谢参与本次专刊出版的作者、评审专家以及《综合智慧能源》编辑部所有工作人员的鼎力支持和辛勤付出！

惠红勋 张洪财 丁一

特约主编简介



惠红勋

澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室研究助理教授，分别于2015年和2020年获浙江大学电气工程学士学位和博士学位，曾任美国弗吉尼亚理工大学访问学者、田纳西大学访问学者。主要从事负荷资源控制、综合能源系统优化、电力市场等相关领域研究工作。主持/参与国家科技部重点研发计划2项、国家自然科学基金2项、国家自然科学基金国际(地区)合作项目1项以及多个省部级重点项目。担任IEEE工业应用协会浙江大学分会副主席(2018—2020年)、IEEE PES(中国)电动汽车与能源交通系统融合技术分委会理事、20余本国际SCI期刊审稿专家等。入选浙江大学首批博士研究生“学术新星计划”，获浙江大学优秀博士毕业生、浙江省优秀博士毕业生、可持续电力与能源国际会议(iSPEC)最佳论文奖、MPCE优秀审稿专家等荣誉。多次受邀参与学术会议组织工作，担任2018年首届国际电机与系统学生大会(IEEE SCEMS)联合主席、2021年国际应用能源大会(ICAE)分会场主席等。近5年发表学术论文40余篇，包括SCI索引论文20余篇、ESI高被引论文1篇，授权发明专利10余项，出版英文学术专著1部。



张洪财

澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室助理教授、博士生导师，2013年获清华大学电气工程学士学位，2018年获清华大学电气工程博士学位，曾任美国加州大学伯克利分校博士后研究员、美国劳伦斯伯克利国家实验室访问研究员。主要从事综合能源系统、能源物联网、电气化交通等相关领域的研究工作，主持国家自然科学基金青年项目1项、澳门科技发展基金等省部级科技项目3项。发表学术论文60余篇，包括SCI索引论文40余篇，曾获清华大学紫荆学者、科睿唯安ESI全球最优秀1%评审专家、世界电动车大会暨展览会(EVS34)优秀论文奖、可持续电力与能源国际会议(iSPEC)最佳论文奖等荣誉。任中国电工技术学会青年工作委员会委员、IEEE PES(中国)电动汽车与能源交通系统融合技术分委会秘书长、国际期刊《IET Electrical Systems in Transportation》副编辑等。



丁一

浙江大学电气工程学院教授、博士生导师、电气工程学院副院长，国家青年特聘专家，国家杰出青年基金获得者。曾任丹麦科技大学电力与能源中心永久职位副教授，担任国际供电会议组织中国指导委员会委员、中国运筹学会可靠性分会理事、浙江电力市场管理委员会委员、《Applied Energy》《MPCE》等多个SCI期刊编委。曾主持/参与欧盟智能电网试点项目EcoGridEU、国家自然科学基金项目、国家重点研发计划项目、国务院发展研究中心项目、国家发改委项目等多个国内外重大项目。长期从事复杂电力系统风险分析和控制、智能电网架构设计与优化运行、电力市场、需求侧管理等相关研究工作，获国家科学技术进步奖二等奖、中国电力科技进步一等奖、浙江省科技进步一等奖、中国电力优秀科技工作者奖、MPCE杰出贡献奖和CSEE JPES优秀青年学科编辑奖等。在国内外权威刊物发表论文200余篇，授权国家专利40余项，出版中英文著作4部。

综合智慧能源

ZONGHE ZHIHUI NENGYUAN

第 44 卷 第 2 期 (总第 355 期) 月刊 1979 年创刊 2022 年 2 月 25 日出版

目次

负荷建模与潜力分析

多重不确定性下基于 LMDI 的城市工业碳排放量影响因素分析及预测：以苏州市为例
.....王盛,谈健,马亚辉,等 (1)

具有储能作用的用户侧资源运行特性.....赵建立,汤卓凡,王桂林,等 (8)

基于社区划分的 GRU 神经网络负荷建模.....赵省军,张开鹏,付鑫权,等 (15)

负荷资源优化控制

计及用户端调节容量的变频空调自适应电压调控策略.....华咏竹,谢强强,秦会斌,等 (21)

基于拓扑重构与分布式电源调度的配电网灾后恢复策略.....王卓容,石庆鑫 (29)

适应风电参与电力市场的需求侧储能负荷运行优化研究.....管馨,陈涛,高赐威 (35)

楼宇型综合能源服务系统智能优化运行研究.....张爱平,赵利兴,刘静 (42)

负荷调控市场机制

面向零售侧的点对点交易体系：概念、国际经验与相关启示.....尚楠,黄国日 (49)

虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述.....张凯杰,丁国锋,闻铭,等 (60)

电力现货市场背景下的水电出力优化与光伏发电消纳.....王一铮,胡嘉骅,唐琦雯,等 (73)

黏性电力用户参与需求侧响应的行为决策建模与分析.....吉斌,孙绘,昌力,等 (80)

Integrated Intelligent Energy

Vol. 44 No. 2 (Sum No. 355)

Monthly

Started Publication in 1979

Feb. 25, 2022

Load Modeling and Potential Analysis

- Impact factor analysis and forecasting of the carbon emissions from industries based on LMDI method under multiple uncertainties: The case of Suzhou CityWANG Sheng, TAN Jian, MA Yahui, et al. (1)
- Operation characteristics of user-side resources with energy storage function
.....ZHAO Jianli, TANG Zhuofan, WANG Guilin, et al. (8)
- GRU neural network load modeling based on community division
.....ZHAO Shengjun, ZHANG Kaipeng, FU Xinquan, et al. (15)

Load Optimization and Control

- Adaptive voltage regulation strategy for inverter air conditioners considering the regulation capacity on user side
.....HUA Yongzhu, XIE Qiangqiang, QIN Huibin, et al. (21)
- Post-disaster restoration strategy of power distribution systems based on topology reconfiguration and distributed generation scheduling..... WANG Zhuorong, SHI Qingxin (29)
- Study on optimal operation of the demand-side energy storage system for wind power participating in electricity market
.....GUAN Xin, CHEN Tao, GAO Ciwei (35)
- Research on optimized operation of building-type integrated energy service systems
.....ZHANG Aiping, ZHAO Lixing, LIU Jing (42)

Load Scheduling and Market Mechanism

- Peer-to-peer trading system on retail side: Concept, international experience and suggestions
.....SHANG Nan, HUANG Guori (49)
- Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants
.....ZHANG Kaijie, DING Guofeng, WEN Ming, et al. (60)
- Hydropower generation optimization and photovoltaic generation consumption in the spot market for electricity
.....WANG Yizheng, HU Jiahua, TANG Qiwen, et al. (73)
- Modeling and analysis on decision making behavior of loyal users participating in demand-side response
.....JI Bin, SUN Hui, CHANG Li, et al. (80)

Competent Authority: China Huadian Corporation Ltd.
Sponsors: Huadian Zhengzhou Mechanical Design Institute
Co., Ltd. ;China Huadian Engineering Co., Ltd.
Editor and Publisher: Editorial Department of Integrated
Intelligent Energy
Add: No. 27 Huxin Ring Road, Center Island in Longzi Lake,
Zhengdong New District, Zhengzhou City, China
Postcode: 450046

Editor-in-Chief: SHEN Mingzhong
Executive Editor-in-Chief: YANG Mancheng
Website: www.hdpower.net
E-mail: hdjs-chd@vip.163.com
Tel: 86 - 371 - 58501042
Publication Number: ISSN 2097-0706
CODEN: ZZNOAF
Annual Subscription Rate: \$ 120.00

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.001

多重不确定性下基于LMDI的城市工业碳排放量影响因素分析及预测:以苏州市为例

Impact factor analysis and forecasting of the carbon emissions from industries based on LMDI method under multiple uncertainties: The case of Suzhou City

王盛¹, 谈健², 马亚辉¹, 邹风华¹
WANG Sheng¹, TAN Jian², MA Yahui¹, ZOU Fenghua¹

(1. 国网(苏州)城市能源研究院有限公司, 江苏苏州 215163; 2. 国网江苏省电力有限公司
经济技术研究院, 南京 210008)

(1. State Grid (Suzhou) City & Energy Research Institute Company Limited, Suzhou 215163, China; 2. Economic
Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210008, China)

摘要: 在“双碳”背景下, 准确计算碳排放量、分析碳排放结构并综合预测未来产业能源碳排放的走势, 是科学制定城市产业发展与规划政策的基础。在经典Kaya恒等式的基础上, 考虑产业结构、能源消费结构及外来电比例的影响, 重构了Kaya恒等式, 基于对数平均迪氏指数法(LMDI)对碳排放量影响因素进行分解。基于箱型不确定集, 对各影响因素的不确定性进行建模, 建立了改进的可拓展的随机性环境影响评估(STIRPAT)模型, 通过求解基于不确定集的优化模型方式构建了碳排放量预测方法。最后以苏州市规模以上工业为例, 对该方法进行了验证并提出了相应的政策建议。

关键词: 碳中和; 碳排放量影响因素; 对数平均迪氏指数法; 箱型不确定集; 改进STIRPAT模型; 碳排放量预测
中图分类号: X 321; TK 01; F 407.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2022)02-0001-07

Abstract: To achieve carbon peak and carbon neutrality, accurately measuring the carbon emissions, analyzing the composition and comprehensively studying the trend of carbon emissions from industries are the foundation of scientifically formulating policies on city development planning. The Kaya equation is reformulated by taking industrial structure, energy consumption composition and the influence of power from outside into account. And the Logarithmic Mean Divisia Index (LMDI) decomposition method is taken to analyze the impact factors on carbon emissions. The models for multiple uncertainties of carbon emission impact factors are set up based on the box-type uncertainty set. Then, a Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence and Technology (STIRPAT) model is construct after optimization, and a forecasting method for carbon emissions is made by solving the optimized model based on the uncertain set. Finally, the proposed method is validated by using large-scale industries in Suzhou as examples, and political suggestions are proposed.

Keywords: carbon neutrality; impact factor of carbon emission; LMDI method; box-type uncertainty set; improved STIRPAT model; carbon emission forecasting

0 引言

近些年来, 随着社会经济的飞速发展, 中国在2009年超过美国, 成为全球碳排放量最大的经济体^[1]。作为负责任的大国, 中国出台了一系列以减少碳排放量为目的的能源政策, 力争在2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和。江苏省是我国东

部沿海能源消费大省, 而苏州市作为江苏省经济体量最大的地级市, 是降低碳排放量的主力军。“十三五”期间苏州市碳排放强度下降超过22%, 提前完成国家、江苏省下达的减碳任务^[2]。然而, 在接下来的“十四五”规划中, 苏州市受经济增长、城市发展等各方面的影响, 进一步减少碳排放量面临着巨大压力。因此, 分析驱动碳排放量增长的主要因素、对未来碳排放趋势进行综合研判并基于此对症下药, 是未来几年达成降碳目标的重要技术支撑之一。

对于碳排放量驱动因素的研究, 目前主流的方

法包括结构分解 (Structure Decomposition Analysis, SDA) 法^[3]、指标分解 (Index Decomposition Analysis, IDA) 法^[4]以及数据拟合法^[5], 其中, 对数平均迪氏指数 (Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI) 法作为指标分解法的一种, 由于对数据要求较低、全分解、估计无偏差等特点而得到广泛应用^[6]。文献[7]基于 LMDI 法对上海市的工业碳排放量影响因素进行了分解, 提出了产业升级转型比能源结构调整更重要的观点。文献[6]采用 LMDI 和 Kaya 恒等式结合的方式, 以自下而上的模型分析了中国商业建筑的碳排放结构。文献[8]基于中国的化学工业, 分析了节约电能对二氧化碳、硫化物、氮氧化物、固体颗粒等排放的综合影响。文献[9]基于 LMDI 法研究了中国能源供应行业的碳排放量 and 经济发展直接的解耦关系, 并提出了相应的政策建议。

在碳排放量预测模型方面, 目前应用较为广泛的包括人口、经济和技术的影响 (Impact, Population, Affluence, and Technology, IPAT) 模型^[10]、可拓展的随机性环境影响评估 (Stochastic Impacts by Regression on Population, Affluence, and Technology, STIRPAT) 模型^[11]、长期能源替代规划系统 (Long-range Energy Alternatives Planning System, LEAP) 模型^[12]等。文献[13]基于 IPAT 模型和扩展的 STIRPAT 模型对黄河流域交通运输部门的碳排放进行了情景预测, 提出了加快产业调整、清洁化交通工具和降低单位周转量能耗水平等建议。文献[14]利用 STIRPAT 模型对未来中国碳排放量峰值进行了预测。文献[15]以内蒙古自治区为例, 采用协整分析方法构建了碳排放量影响因素的长期均衡关系, 并通过蒙特卡洛法进行了动态模拟。文献[16]根据 2009—2019 年临沂市工业碳排放数据建立了 STIRPAT 模型, 定量分析了临沂市工业碳排放量与企业固定资产、人均工业生产增加值、能源强度和能源结构的关系, 通过岭回归消除了各自变量之间的共线性问题。文献[17]基于改进的 STIRPAT 模型, 从时间和行业 2 个维度测算了江苏省碳排放的数量特征及演进规律。文献[18]基于 STIRPAT 模型和岭回归技术, 对江苏省能源消费碳排放进行了影响因素分析及趋势预测。

但上述研究有一些考虑不够充分之处。

(1) 在碳排放影响因素分解方面, 无论是省、市统计局数据还是公开的数据库资料, 都缺少对外来电的统计。苏州市作为江苏省负荷中心与工业用电大市, 具有特高压、交直流混联等复杂的电网结构^[19], 若不考虑外来电消费过程中的碳排放量, 而将其归口至外来电来源地区能源部门的碳排放量,

显然是不合理的; 另一方面, 以往的研究通常未考虑产业结构与能源结构的影响, 而这两者往往是相互作用的, 文献[20]提出了基于两阶段的同时考虑这两者影响的碳排放量分解方法, 但缺乏统筹考虑两者的机制。

(2) 以往的碳排放量预测方法多基于绝对数量的数据拟合, 但由于各数据量纲不同, 数量级相差较大, 无法直接反映影响因素的作用机制且对数值较为敏感, 容易形成较大误差; 另一方面, 以往的碳排放量预测未考虑未来各因素的不确定性, 多采用基于预设场景的确定性预测方式, 只能分析给定场景下碳排放量的可能情况, 而无法将长期尺度上不确定性的概率分布特性和区间特性纳入考虑范围。

因此, 本文提出了一种考虑多重不确定性的基于 LMDI 的城市碳排放量影响因素分析及预测方法。首先, 基于苏州市统计局公布的能源平衡表信息, 将外来电纳入考虑范围, 计算苏州市的碳排放总量; 其次, 基于扩展的 Kaya 恒等式以及 LMDI 法, 考虑能源消费结构和产业结构的影响, 分解碳排放量增长的影响因素; 然后, 基于 Kaya 恒等式分解得到的各驱动因素的预测结果, 通过箱型不确定集 (Box Uncertainty Set) 来刻画其不确定性, 基于改进的 STIRPAT 法求取多元线性回归参数并通过构建优化问题获取碳排放量预测的上下边界, 从而得到未来碳排放量预测结果的区间; 最后, 通过苏州市的数据, 验证所提出方法的有效性, 并对苏州未来城市发展提出有效建议。

1 碳排放量计算及影响因素分析

1.1 碳排放量计算

根据苏州市统计年鉴内全市规模以上工业企业分行业能源消费量表, 碳排放量可以表示为

$$c_t = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} e_{i,j,t} K_i / F_i, \quad (1)$$

式中: c_t 为第 t 年的碳排放量; I, J 分别为能源类型和工业中细分行业类型的集合; $e_{i,j,t}$ 为工业中细分行业 j 在第 t 年能源类型 i 的消耗量 (折算成标准煤); K_i 为能源类型 i 的标准煤折算系数; F_i 为能源类型 i 的碳排放系数。

1.2 基于 LMDI 的碳排放量影响因素分析

采用 Kaya 恒等式对碳排放量的影响因素进行分解。经典的 Kaya 恒等式通常将碳排放量影响因素分为人口增长、经济发展、能源消耗强度和碳排放系数^[6]

$$c_t = p_t \times \frac{g_t}{p_t} \times \frac{e_t}{g_t} \times \frac{c_t}{e_t}, \quad (2)$$

式中: p_t 为人口; g_t 为地区国内生产总值 (Gross Domestic Product, GDP)。

但经典 Kaya 恒等式的这些因素还不足以构成苏州市碳排放量影响因素的详细模型, 苏州市规模工业的碳排放量还有其他更为复杂的影响因素, 如能源结构、细分行业中高能耗的产业结构、外来电比例等。在此基础上对式(2)进行扩展

$$c_t = \sum_{j \in J} \left(c_{j,t}^e + \sum_{i \in I} c_{i,j,t} \right) = \sum_{j \in J} g_t \times \frac{e_{j,t}^e}{e_{j,t}} \times \frac{g_{j,t}}{g_t} \times \frac{e_{j,t}}{g_{j,t}} \times \frac{c_{i,j,t}}{e_{i,j,t}} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g_t \times \frac{e_{i,j,t}}{e_{j,t}} \times \frac{g_{j,t}}{g_t} \times \frac{e_{j,t}}{g_{j,t}} \times \frac{c_{i,j,t}}{e_{i,j,t}} = \sum_{j \in J} g_t A_{i,j,t} B_{i,j,t}^e C_{j,t} F_{i,t} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} g_t A_{i,j,t} B_{i,j,t} C_{j,t} F_{i,t}, \quad (3)$$

式中: $c_{j,t}^e$ 为细分行业 j 中电力消耗所产生的碳排放量; $e_{j,t}^e, e_{i,j,t}$ 分别为行业 j 在 t 年的电力消耗和能源品类 i 的消耗; $e_{j,t}$ 为行业 j 的能源总消耗量 (折算成标准煤); $g_{j,t}$ 为行业 j 的 GDP; 将影响碳排放量的因素分解为 5 个, 分别是经济增长、电力的能源结构 $A_{i,j,t}^e$ 和其他能源的能源结构 $A_{i,j,t}$ 、GDP 的产业结构 $B_{j,t}$ 、能源消耗强度 $C_{j,t}$ 、能源的碳排放系数 $F_{i,t}$ 。

选取某一年 t_0 为基准年, 将其碳排放量记为 c_0 , 那么, 任何所要研究的 T 年的碳排放量 c_T 可以表示为

$$c_T = c_0 + \sum_{t=t_0}^T \Delta c_t = c_0 + \sum_{t=t_0}^T \sum_{j \in J} \left(\Delta c_{j,t}^{g,e} + \Delta c_{j,t}^{A,e} + \Delta c_{j,t}^{B,e} + \Delta c_{j,t}^{C,e} + \Delta c_{j,t}^{F,e} + \sum_{i \in I} \Delta c_{i,j,t}^{g,e} + \Delta c_{i,j,t}^A + \Delta c_{i,j,t}^B + \Delta c_{i,j,t}^C + \Delta c_{i,j,t}^F \right), \quad (4)$$

式中: Δc_t 为每年的碳排放增量; $\Delta c_{j,t}^{g,e}, \Delta c_{j,t}^{A,e}, \Delta c_{j,t}^{B,e}, \Delta c_{j,t}^{C,e}, \Delta c_{j,t}^{F,e}$ 分别为经济增长、电力的能源结构、产业结构、能源消耗强度和碳排放系数对电力部分碳排放增量的影响; $\Delta c_{i,j,t}^{g,e}, \Delta c_{i,j,t}^A, \Delta c_{i,j,t}^B, \Delta c_{i,j,t}^C, \Delta c_{i,j,t}^F$ 分别为 5 项影响因素对其他能源部分碳排放量的影响。

基于 LMDI 法可以计算出各影响因素所造成的碳排放增量^[21]

$$\Delta c_t^g = \sum_{i=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \Delta c_{i,j,t}^g = \sum_{i=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{(c_{i,j,t+1} - c_{i,j,t})(\ln g_{t+1} - \ln g_t)}{\ln c_{i,j,t+1} - \ln c_{i,j,t}} \quad (5)$$

$$\Delta c_t^A = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \Delta c_t^A = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{c_{i,j,t+1} - c_{i,j,t}}{\ln c_{i,j,t+1} - \ln c_{i,j,t}} \times (\ln e_{i,j,t+1} - \ln e_{j,t+1} - \ln e_{i,j,t} + \ln e_{j,t}) \quad (6)$$

$$\Delta c_t^B = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \Delta c_t^B = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{c_{i,j,t+1} - c_{i,j,t}}{\ln c_{i,j,t+1} - \ln c_{i,j,t}} \times (\ln g_{j,t+1} - \ln g_{t+1} - \ln g_{j,t} + \ln g_t) \quad (7)$$

$$\Delta c_t^C = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \Delta c_t^C = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{c_{i,j,t+1} - c_{i,j,t}}{\ln c_{i,j,t+1} - \ln c_{i,j,t}} \times (\ln e_{j,t+1} - \ln g_{j,t+1} - \ln g_{j,t} + \ln e_{j,t}) \quad (8)$$

$$\Delta c_t^F = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \Delta c_t^F = \sum_{t=t_0}^{T-1} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \frac{c_{i,j,t+1} - c_{i,j,t}}{\ln c_{i,j,t+1} - \ln c_{i,j,t}} \times (\ln c_{i,j,t+1} - \ln e_{i,j,t+1} - \ln e_{i,j,t} + \ln c_{i,j,t}) \quad (9)$$

2 碳排放量预测

对于碳排放量的预测, 目前并没有完全成熟、可信的基于机制驱动的方法。由上一节可知, 碳排放量受经济增长以及社会用电用能等多种因素的影响, 这些因素的数据可以参考国家、省、市统计局发布的官方数据, 或者采用较为成熟的预测方法进行预测。因此, 可以通过改进的 STIRPAT 法将碳排放量预测转化为基于经济、用能等因素的预测结果而形成的间接计算结果。

2.1 不确定性建模

在获取官方公布或其他方法预测得到的碳排放量各类影响因素数据的同时, 需考虑各因素存在一定的不确定性, 本文采用箱型不确定集来描述各类因素的不确定性

$$U_t^g = \{ \tilde{p}_t^g | \tilde{p}_t^g = \bar{p}_t^g + \Delta p_t^g z_t^{g+} - \Delta p_t^g z_t^{g-} \}, \quad (10)$$

$$\bar{p}_t^g = (p_t^{g+} + p_t^{g-}) / 2, \quad (11)$$

$$\Delta p_t^g = (p_t^{g+} - p_t^{g-}) / 2, \quad (12)$$

式中: U_t^g 为 GDP 在第 t 年的不确定集; \tilde{p}_t^g 为考虑不确定性前提下 GDP 在第 t 年的预测值; \bar{p}_t^g 为预测上、下限的平均值; Δp_t^g 为预测误差; p_t^{g+}, p_t^{g-} 分别为预测的上、下限; z_t^{g+}, z_t^{g-} 为不确定集的标么化控制因子。

对于其他因素, 同理可得到分能源类型和行业的能源消耗量的不确定集。这些不确定集需要满足下式

$$U^z = \left\{ \begin{aligned} & z_{j,t}^{e+}, z_{j,t}^{e-}, z_{i,j,t}^{e+}, z_{i,j,t}^{e-} \in [0, 1] \\ & \sum_{j \in J} z_{j,t}^{e+} + z_{j,t}^{e-} + \sum_{i \in I} z_{i,j,t}^{e+} + z_{i,j,t}^{e-} \leq \Gamma_t \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

式中: $z_{i,j,t}^{e+}, z_{i,j,t}^{e-}$ 为能源消耗不确定集的标么化控制因子; Γ_t 为 t 年内所有不确定性因素波动的总预算

(Budget), 通过对该参数的设定, 可以避免出现所有因素同时到达上、下限的小概率情况。

2.2 预测方法

基于 IPAT 或 STIRPAT 法对碳排放量进行预测时, 多采用人口、GDP、能源结构等因素绝对量一定幂次的乘积对碳排放量的绝对值进行拟合, 但该方法由于采用绝对量, 因此无法在量纲上形成对应关系; 同时, 由于碳排放量与这些因素并无直接联系, 因此无法证明其拟合的合理性。本文采取对碳排放量相对变化进行拟合的方式, 从而避免上述问题, 具体表达式如下

$$\frac{c_{i,j,t+1}}{c_{i,j,t}} = \varepsilon_{i,j} \left(\frac{g_{j,t+1}}{g_{j,t}} \right)^{\alpha_{i,j}} \left(\frac{e_{i,j,t+1} / e_{j,t+1}}{e_{i,j,t} / e_{j,t}} \right)^{\beta_{i,j}} \times \left(\frac{g_{j,t+1} / g_{t+1}}{g_{j,t} / g_t} \right)^{\gamma_{i,j}} \left(\frac{e_{j,t+1} / g_{j,t+1}}{e_{j,t} / g_{j,t}} \right)^{\delta_{i,j}}, \quad (14)$$

式中: $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}, \gamma_{i,j}, \delta_{i,j}$ 分别为拟合参数; $\varepsilon_{i,j}$ 为误差系数。

为减少异方差、简化计算, 对两边取对数可以将其线性化

$$\ln \frac{c_{i,j,t+1}}{c_{i,j,t}} = \alpha_{i,j} \ln \left(\frac{g_{j,t+1}}{g_{j,t}} \right) + \beta_{i,j} \ln \left(\frac{e_{i,j,t+1} / e_{j,t+1}}{e_{i,j,t} / e_{j,t}} \right) + \gamma_{i,j} \ln \left(\frac{g_{j,t+1} / g_{t+1}}{g_{j,t} / g_t} \right) + \delta_{i,j} \times \ln \left(\frac{e_{j,t+1} / g_{j,t+1}}{e_{j,t} / g_{j,t}} \right) + \ln \varepsilon_{i,j} \quad (15)$$

通过最小二乘法进行拟合, 可以得到各参数值。

进一步考虑不确定性因素, 则可以通过求解优化问题得到预测年度碳排放量的上下限

$$\begin{cases} c_{t'}^{\max} = \max_{z_{j,t}^+, z_{j,t}^-, z_{i,j,t}^+, z_{i,j,t}^-} c_{t'} \\ c_{t'}^{\min} = \min_{z_{j,t}^+, z_{j,t}^-, z_{i,j,t}^+, z_{i,j,t}^-} c_{t'} \end{cases}, \quad (16)$$

式中: $c_{t'}$ 为 t' 年的碳排放量。

服从以下不确定集约束 (17) 以及碳排放量的多元线性回归拟合结果 (15)

$$g_{j,t} \in U_{j,t}^g, e_{i,j,t} \in U_{i,j,t}^e \quad (17)$$

3 数据来源说明

本文中, 苏州市 GDP、能源消费等数值来自苏州市统计局发布的各年度苏州统计年鉴; GDP 及其增速根据当年价格计算; 碳排放系数来自联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布的《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》及我国《省级温室气体清单编制指南》; 标准煤折算系数

来自《中国能源统计年鉴》。

4 案例分析

4.1 苏州市工业碳排放量测算与影响因素分析

2010—2019 年, 苏州市的工业经济总体呈波动增长的态势。苏州市规模以上工业 (以下简称规模工业) 产值从 2010 年的 2.47 万亿元增长至 2019 年的 3.35 万亿元, 增幅达 35.96%, 年平均增速为 3.47%, 能源消费总量也从 2010 年的 4 601 万 t 标准煤上升至 2019 年的 5 612 万 t 标准煤, 上升 21.96%, 年平均增幅达 2.23%。另一方面, 各细分行业处于产业结构与能源结构转型的时期, 如 GDP 占比最高的电气机械及器材制造业从 2010 年的 33.85% 下降至 2019 年的 20.08%, 而交通运输设备制造业和燃气生产和供应业 GDP 占比分别从 2010 年的 3.28%, 0.28% 上升至 2019 年的 6.64%, 0.85%。

随之而来的是碳排放量的逐年变化, 如图 1 所示, 2010—2019 年, 苏州市规模工业的碳排放量整体而言是小幅上升了 20.88%, 年平均增幅为 2.13%, 但在 2014, 2015 年出现了短时间下降的态势。从碳排放的能源结构来说, 煤炭类始终是规模工业碳排放的主要来源之一, 但其占比在逐年小幅下降, 从 2010 年的 68.97% 下降至 2019 年的 64.55%。随着用电负荷的上涨, 电力消耗所产生的碳排放量占比逐年上升, 从 2010 年的 25.47% 上升至 2019 年的 29.19%。总体而言, 苏州市规模工业碳排放能源结构变动不大。

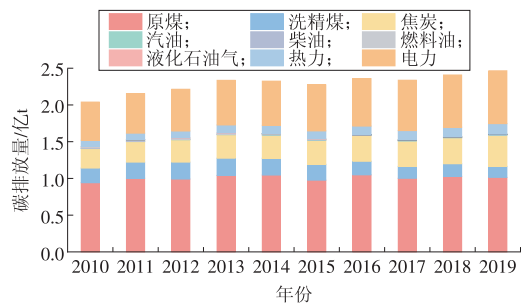


图 1 苏州市规模工业碳排放能源结构

Fig. 1 Carbon emissions from different large-scale industries in Suzhou

图 2 展示了苏州市规模工业碳排放结构的主导产业。从各细分产业的碳排放结构看, 碳排放主要来源于电力、热力生产和供应业, 黑色金属冶炼及压延加工业, 2019 年占比分别达 33.19%, 31.62%。总体而言, 各细分行业的碳排放量占比保持平稳。

对苏州市规模工业碳排放量进行分解, 如图 3 所示。由图 3 可以看到, 经济发展、电力消费结构、其他能源结构、产业结构和能耗强度对碳排放量增

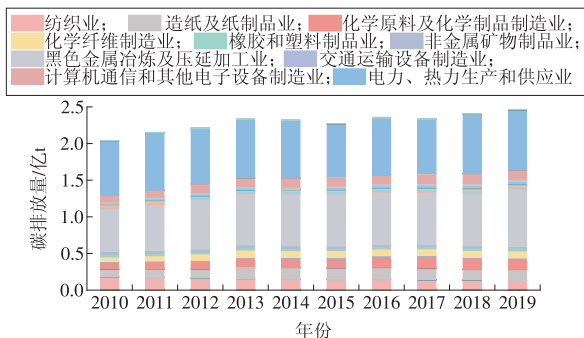


图 2 苏州市规模工业碳排放量细分产业结构

Fig. 2 Carbon emissions from subdivisional industries in Suzhou

长的贡献分别为 0.680, 0.037, -0.092, -0.300, 0.097 亿 t。总的来说,在这 10 年中,除了碳排放量下降的 2014 年和 2015 年,经济发展对碳排放量增长的贡献度始终为正;电力消费结构对碳排放量增长的贡献在不同年份不同,总体而言是略有促进作用;其他能源消费结构对碳排放量的增长有抑制作用;产业结构是碳排放量增长最主要的抑制因素之一;能耗强度对碳排放量总体是抑制的,但在不同年份的影响不同,在 2011 年和 2017—2019 年起抑制作用,在 2012—2016 年起促进作用。

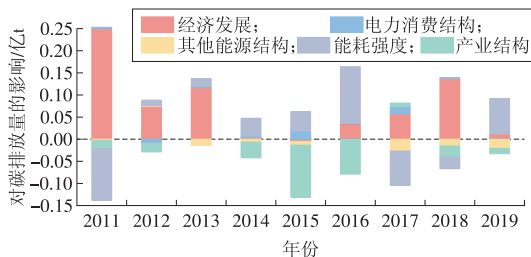


图 3 苏州市规模工业碳排放量影响因素分解

Fig. 3 Decomposition of factors affecting carbon emissions from large-scale industries in Suzhou

以上分析表明,碳排放量的抑制必然以经济发展放缓为代价。近 10 年来,苏州市产业结构变革初见成效,但能源结构优化仍有待提高,未来,希望清洁能源替代和电气替代能够有效助力“双碳”目标的实现。

4.2 苏州市工业碳排放量预测

对苏州市规模工业不同能源、不同细分行业碳排放量历史数据进行多元线性回归分析,其拟合误差如图 4 所示。由图 4 可以看出,拟合误差基本控制在合理范围内,其中误差在±0.5% 范围内的概率为 85.98%,验证了该回归方法的有效性。不同能源类型的预测精确度有所不同,其中,焦煤、汽油、电力等误差较小,如电力误差在±0.5% 范围内的概率为 97.06%,说明对这些能源的碳排放量预测较为准确。

以食品制造业煤炭消耗产生的碳排放量为例,

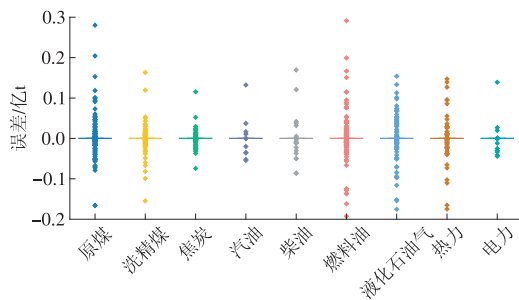


图 4 不同能源的碳排放量拟合误差分布

Fig. 4 Distribution of the fitting errors for carbon emissions by different energy

其拟合结果为

$$\frac{c_{1,4,t+1}}{c_{1,4,t}} = 0.0058 \left(\frac{g_{4,t+1}}{g_{4,t}} \right)^{0.960} \left(\frac{e_{1,4,t+1}/e_{4,t+1}}{e_{1,4,t}/e_{4,t}} \right)^{1.000} \times \left(\frac{g_{4,t+1}/g_{t+1}}{g_{4,t}/g_t} \right)^{0.029} \left(\frac{e_{4,t+1}/g_{4,t+1}}{e_{4,t}/g_{4,t}} \right)^{1.010} \quad (18)$$

其他产业下其他能源的碳排放量拟合也同理。基于拟合的参数,可以对接下来几年(2020—2024 年)的碳排放量进行预测。假设 2020—2024 年苏州市各产业的 GDP 增速与“十三五”一致,根据碳排放强度要求的不同,设置 3 组对比场景。第 1 个场景为能源强度根据“十三五”期间国务院发布的《“十三五”控制温室气体排放工作方案》下降相同的幅度,即下降 20.5%(每年下降 4.48%);第 2 个场景为控制碳排放强度不变;第 3 个场景为不控制碳排放强度,保持原有增速。预测得到 2020—2024 年苏州规模工业的碳排放结构,如图 5 所示。

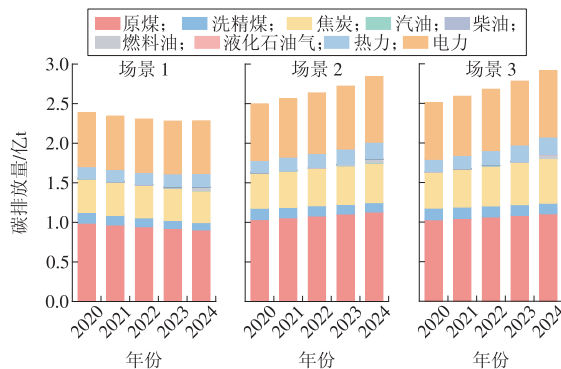


图 5 不同场景下苏州碳排放结构预测

Fig. 5 Prediction on carbon emission composition in Suzhou under different scenarios

由图 5 可以看出,碳排放强度政策不同,碳排放量的发展和结构也显著不同,总体而言,碳排放量为场景 3>场景 2>场景 1。

场景 1 中,由于对碳排放强度做了要求,因此碳排放量逐年下降,2020—2024 年预计下降 4.42%。其中,煤炭类的一次能源碳排放结构调整显著,下降了 9.59%;石油类由于较为清洁、能效较高,用于

替代煤炭类能源,2020—2024年预计碳排放量会上升431.05%;而电力由于其较为清洁的特性,占比较为稳定。

场景2碳排放强度保持不变,所以碳排放量的增长速度基本与“十三五”期间一致,2020—2024年预计上升13.72%。其中,煤炭类一次能源所产生的碳排放量稳定上涨9.33%。

场景3不控制排放强度的增长,因此增长速度基本也与“十三五”期间保持一致,2020—2024年预计增长14.12%。其中,煤炭类一次能源所产生的碳排放量稳定上涨7.33%。

以上为特定场景下的碳排放量预测,若考虑经济发展、能源消耗量等影响因素的多重不确定性,则可以得到未来碳排放量预测值的区间。假设GDP的预测误差为 $\pm 2\%$,能源消费量的预测误差为 $\pm 4\%$ 。在每个预测年份不确定集预算 $\Gamma_i = 340$ 的情况下,碳排放量的预测结果如图6所示。由图6可以看到,若不对经济发展、能源消耗强度等进行人为干预,考虑其不确定性,2024年苏州市规模工业的碳排放量将达到2019年的1.07~1.18倍。其中,最低预测区间的年平均增速约为1.43%,最高预测区间的年平均增速约为3.42%。

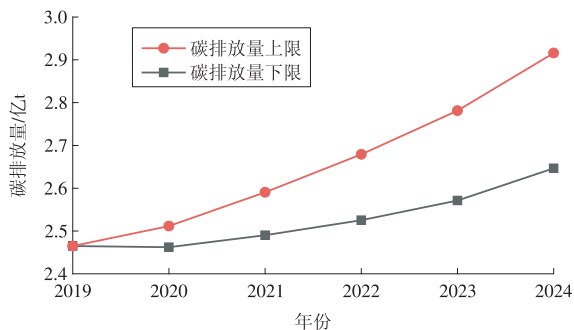


图6 苏州市碳排放量预测区间

Fig. 6 Ranges of the predicted carbon emissions in Suzhou

5 结论

本文以苏州市为例,提出了一种基于扩展的Kaya恒等式和LMDI法的碳排放量影响因素分析方法,能够同时考虑外来电以及能源消费结构和产业结构的影响。通过基于箱型不确定集的不确定性建模,在基于确定性情景分析的基础上,提出了考虑多种不确定性下碳排放量区间的预测方法;同时,对STIRPAT方法进行了改进,提出了基于相对比例的碳排放量预测模型。

通过苏州市的案例分析可以看出,煤炭类能源仍然占据能源消费的主导地位,其绝对量基本保持稳定,能源结构占比逐年小幅下降。电力类能源碳

排放量占比保持稳定。从行业来看,能源生产和供应业,黑色金属冶炼及压延加工业碳排放量占比较大。经济增长为碳排放量增长的主要驱动因素,产业结构为主要抑制因素。这说明未来苏州市仍需继续坚持产业结构升级,从一味追求经济发展向优化经济结构转变,能源结构也有待优化。从预测结果看,如果强制执行“十四五”期间降低碳排放强度的要求,将会倒逼苏州市工业能源消费结构调整,促进“碳达峰、碳中和”目标的实现。

参考文献:

- [1]胡鞍钢,鄢一龙,张君忆,等.中国碳排放趋势:从相对减排到绝对减排(1990—2050年)[C]//国情报告第十八卷,2015.
- [2]苏州日报.“十三五”期间苏州市积极推动绿色转型 碳排放强度下降超过22%[EB/OL].(2021-08-29)[2021-09-25]. <http://www.suzhou.gov.cn/szsrnzf/szyw/202108/2fa64fab21d04eeb893017ef9758b53e.shtml>.
- [3]吴振信,石佳,王书平.基于LMDI分解方法的北京地区碳排放驱动因素分析[J].中国科技论坛,2014(2):85-91.
WU Zhenxin, SHI Jia, WANG Shuping. Analysis of the driving factors of carbon emissions in Beijing based on LMDI method [J]. Forum on Science and Technology in China, 2014(2): 85-91.
- [4]柴麒麟,陈怡,徐华清.碳强度和总量双控目标下的区域指标分解方案研究——以温州市为例[J].中国能源,2015,37(4):28-32.
- [5]赵先超,丁梦,杨英.长沙市碳排放与影响因素的拟合变动分析[J].湖南工业大学学报,2012,17(1):15-20.
ZHAO Xianchao, DING Meng, YANG Ying. Fitting variation analysis of carbon emissions and influencing factors in Changsha City [J]. Journal of Hunan University of Technology Social Science Edition, 2012, 17(1): 15-20.
- [6]MA M, CAI W, CAI W. Carbon abatement in China's commercial building sector: A bottom-up measurement model based on Kaya-LMDI methods [J]. Energy, 2018, 165: 350-368.
- [7]ZHAO M, TAN L, ZHANG W, et al. Decomposing the influencing factors of industrial carbon emissions in Shanghai using the LMDI method [J]. Energy, 2010, 35(6): 2505-2510.
- [8]YUE H, WORRELL E, CRIJNS-GRAUS W. Modeling the multiple benefits of electricity savings for emissions reduction on power grid level: A case study of China's chemical industry [J]. Applied Energy, 2018, 230: 1603-1632.
- [9]XIE P, GAO S, SUN F. An analysis of the decoupling relationship between CO₂ emission in power industry and

- GDP in China based on LMDI method [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 598-606.
- [10] 聂锐, 张涛, 王迪. 基于IPAT模型的江苏省能源消费与碳排放情景研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(9): 1557-1564.
- NIE Rui, ZHANG Tao, WANG Di. The scenario analysis on energy consumption and carbon emissions based on environmental loads model [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1557-1564.
- [11] AGUIR BARGAOU S, LIOUANE N, NOURI F Z. Environmental impact determinants: An empirical analysis based on the STIRPAT model [J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2014, 109: 449-458.
- [12] HERNÁNDEZ K D, FAJARDO O A. Estimation of industrial emissions in a Latin American megacity under power matrix scenarios projected to the year 2050 implementing the LEAP model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 303: 126921.
- [13] 张国兴, 苏钊贤. 黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测[J]. *管理评论*, 2020, 32(12): 285-296.
- ZHANG Guoxing, SU Zhaoxian. Analysis of influencing factors and scenario prediction of transportation carbon emissions in the Yellow River basin [J]. *Management Review*, 2020, 32(12): 285-296.
- [14] 渠慎宁, 郭朝先. 基于STIRPAT模型的中国碳排放峰值预测研究[J]. *中国人口资源与环境*, 2010, 20(12): 10-15.
- QU Zhenning, GUO Chaoxian. Forecast of China's carbon emissions based on STIRPAT model [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(12): 10-15.
- [15] 杨玉文, 吴爱玲, 朱洋洋. 碳排放驱动因素分解及动态模拟: 以内蒙古自治区为例[J]. *统计与决策*, 36(12): 76-80.
- [16] 吴彤, 张兴宇, 程星星, 等. 基于STIRPAT模型的临沂市工业碳排放分析及预测[J]. *华电技术*, 2021, 43(6): 47-54.
- WU Tong, ZHANG Xingyu, CHENG Xingxing, et al. Analysis and prediction of industrial carbon emission of Linyi City based on STIRPAT model [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(6): 47-54.
- [17] 林珊珊. 江苏碳排放的数量测算及其影响因素——基于改进STIRPAT模型的计量检验[J]. *南通大学学报(社会科学版)*, 2015(4): 9-16.
- LIN Shanshan. Estimation and influencing factors of carbon dioxide emissions in Jiangsu Province: Based on the STIRPAT model [J]. *Journal of Nantong University (Social Sciences Edition)*, 2015(4): 9-16.
- [18] 黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 781-789.
- HUANG Rui, WANG Zheng, DING Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu Province based on STIRPAT model [J]. *Geographical Research*, 2016, 35(4): 781-789.
- [19] 陈斌. 苏州电网主变直流偏磁分析及抑制措施研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [20] 鲁航英. 基于二阶段LMDI模型的新疆碳排放驱动影响因素研究[J]. *北方经济*, 2013(22): 32-33.
- [21] LIN B, LONG H. Emissions reduction in China's chemical industry: Based on LMDI [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1348-1355.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

王盛(1994), 男, 工程师, 博士, 从事综合能源系统运行与评估、城市能源低碳发展策略研究, wangsheng_zju@zju.edu.cn。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.002

具有储能作用的用户侧资源运行特性

Operation characteristics of user-side resources with energy storage function

赵建立^{1,2}, 汤卓凡^{1,2}, 王桂林^{1,2}, 陈宇扬³, 王隽东⁴, 陈珂⁴, 吴英俊³

ZHAO Jianli^{1,2}, TANG Zhuofan^{1,2}, WANG Guilin^{1,2}, CHEN Yuyang³, WANG Weidong⁴,
CHEN Ke⁴, WU Yingjun³

(1. 国网上海市电力公司, 上海 200030; 2. 上海市智能电网需求响应重点实验室, 上海 200030; 3. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 4. 中国电力科学研究院有限公司 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室, 北京 100192)

(1.State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200030, China; 2.Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200030, China; 3.College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 4.Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-Energy Carriers Optimization and Interaction Technique, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

摘要:随着电力供需矛盾加剧,通过需求侧负荷参与电力系统调控提高电力系统稳定性成为热门课题。在负荷侧资源中选取具有储能作用的蓄电池、飞轮储能和电动汽车作为研究对象,分别建立三者的充放电模型和储能损耗模型。通过物理试验和软件仿真得到数据,并根据试验结果分别分析蓄电池、飞轮储能和电动汽车的运行特性,针对不同负荷运行特性总结其适用的典型场景,为具有储能作用的用户资源参与需求响应的后续研究提供参考。

关键词:电力供需矛盾;需求响应;储能;用户侧资源;蓄电池;飞轮储能;电动汽车;电力系统调控

中图分类号:TK 02 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0008-07

Abstract: With the intensification of the contradiction between power supply and demand, it has become a hot topic to improve the stability of power system by integrating the load on demand side into power system regulation and control. Taking batteries, flywheels and electric vehicles, three load side devices with energy storage function, as study objects, their charge-discharge models and energy storage loss models are established respectively. According to the results obtained through physical tests and software simulation, the operation characteristics of batteries, flywheels and electric vehicles are analyzed. Their typical applicable scenarios are summarized according to their operational characteristics with different loads, which provides reference for the following study on the participation of user-side resources with energy storage function in demand response.

Keywords: contradiction between power supply and demand; demand response; energy storage; user side resources; battery; flywheel energy storage; electric vehicle; power system regulation

0 引言

随着近年电力负荷的增加,供给侧的电力调控潜能已捉襟见肘,加之我国提出“双碳”目标使得调控更加困难。因此,在供给侧手段难以满足功能需求的情况下,研究负荷侧用户资源在平衡供需压力中的潜力显得十分重要^[1]。

在负荷侧用户资源中,具有储能作用的用户负荷是一类特殊资源,包括铅酸蓄电池、飞轮储能、电动汽车等既有供能特性又有用能特性的供用能负

荷^[2]。这类资源具有负荷与电源的双重特性,当电网电力过剩时,可利用这些供用能资源存蓄电能;电网电力不足时,这些资源又可以向电网提供电能。供用能资源可以提高资源利用率和平衡电网负荷,缓解供需平衡压力,使电网运行更加经济、安全和稳定。因此,研究具有储能作用的用户负荷具有深远意义。

目前,国内外关于储能技术的研究已取得丰硕成果,许多技术已日趋成熟并投入市场实现了规模化应用。根据储能方法的不同,储能可分为物理储能、化学储能和电磁储能^[3]。电力系统领域对储能装置的基本要求是存储容量大,现有的储能技术在

收稿日期:2021-09-08;修回日期:2021-11-18

基金项目:国网上海市电力公司科技项目(52090D200013)

满足这一要求的同时,往往对储能装置的选址有较高的要求,只有电化学储能才能同时满足这两种要求,因此电化学储能顺理成章地成为现阶段最热门的研究对象。文献[4]对物理储能技术的发展历史进行了阐述,说明其技术的成熟性,但同时表示物理储能技术存在受周边环境 and 地理位置影响大、建设成本高等缺点,使得其发展进入瓶颈期。文献[5]介绍了几种目前常见的电化学储能技术及各自特点。文献[6]考虑到电池复杂的降解回收,研究了一种结合可再生能源的电池储能系统最佳容量确定方法。文献[7]调查了安装在变电站中的飞轮储能系统提供调峰服务的情况,通过最小化变压器功率限制违规和飞轮能量损失,制定了飞轮功率设定优化方案。文献[8]提出了连接到单母线聚合电力系统的飞轮储能系统的集成传递函数,实现了飞轮储能系统的最佳动态性能。文献[9]着眼于电磁储能,介绍了其储能原理、应用领域和未来的发展前景。文献[10]通过对家用电动汽车进行可控充电,减小了电力系统平衡供需两侧不确定性,缓解了电力系统急需更多储能的压力。文献[11]对过去20年电动汽车模式的进展和研究发展进行了全面的回顾,从应用角度出发,研究了每种电动汽车模式类别的发展情况。

本文基于目前已有的研究,选取典型的具有储能作用的用户侧资源,分别对其进行物理仿真建模。结合仿真数据,分析了这些负荷的运行特性,为后续研究奠定了基础。

1 典型供用能负荷模型

选取蓄电池、飞轮储能和电动汽车3类典型的具有储能作用的供用能负荷,分别建立3种负荷的供用能模型。

1.1 蓄电池

1.1.1 蓄电池充电模型

蓄电池充电方式多为定电流、定电压二段充电方式^[12]。蓄电池在充电时,其端电压、电流与充电时长存在一定的物理联系。通过描述蓄电池充电时3个参数间的关系,得到其充电功率模型

$$W = U_{\text{bat}} I_{\text{bat}} = m^2 \sum_{i=0}^3 \beta_i t^i \sum_{j=0}^5 \alpha_j t^j, \quad (1)$$

式中: W 为充电功率, W ; m 为蓄电池组的个数; α_j 为蓄电池充电电流系数; β_i 为蓄电池充电电压系数。 α_j 和 β_i 统称为充电系数,不同规格的蓄电池,由于其生产厂家和生产技术不同,因此充电系数也不同。

1.1.2 蓄电池放电模型

在蓄电池的放电模型中,荷电状态(SOC)被用

作衡量蓄电池的剩余容量,在数值上SOC定义为蓄电池的剩余容量占其完全充电后容量的比值,取值范围是0~1,其值为1时,蓄电池为满充状态。SOC的计算公式为^[13]

$$SOC = \frac{At}{Q_{\max}} I_0 \left(\frac{c}{c_{\text{ref}}} \right)^{\gamma} \left\{ \exp \left(\eta \frac{\alpha_a F}{RT} \right) - \exp \left(-\eta \frac{\alpha_c F}{RT} \right) \right\}, \quad (2)$$

式中: A 为铅酸蓄电池有电活性的面积, cm^2 ; t 为放电时间, s ; Q_{\max} 为蓄电池最大容量, kW ; I_0 为蓄电池额定放电电流, A ; c 为铅酸蓄电池有电活性的物质密度, g/cm^3 ; c_{ref} 为铅酸蓄电池最初有电活性的物质密度, g/cm^3 ; F 为法拉第常数, C/mol ; R 为蓄电池的内电阻, W ; T 为温度, K ; η , γ , α_a , α_c 为蓄电池参数。

蓄电池在放电过程中,电压会随放电时间延长而逐渐降低,进而形成端电压与时间的放电曲线,其电压变化计算公式为

$$U_d = \sum_{k=0}^4 c_k (t + 1 - SOC)^k - \frac{(I_{xi} - I_{10}) \sum_{k=0}^3 d_k t^k}{10^6}, \quad (3)$$

式中: n 为蓄电池组个数; c_{10} 为蓄电池10h放电率放电容量, kW ; I_{10} 为10h放电电流, A ;二者之间的换算关系为 $I_{10}=0.1c_{10}$; c_k 和 d_k 为蓄电池的放电系数,不同厂家不同型号的蓄电池,放电系数不同; I_{xi} 为蓄电池放电电流, A 。

蓄电池放电功率 W_d 的表达式为

$$W_d = U_d I_{xi}. \quad (4)$$

1.1.3 蓄电池储能损耗模型

铅酸蓄电池的损耗一般是指蓄电池的寿命损耗。铅酸蓄电池的寿命与多种因素有关,包括温度、峰值电流、充放电循环和放电深度等^[14],其中对寿命影响最大的因素为该电池的放电深度(Depth of Discharge, DOD), DOD数值越大则蓄电池寿命越短。因此,为了简化计算,仅考虑放电深度对铅酸蓄电池寿命的影响,建立蓄电池储能损耗模型。

通过雨流计数法可以精确计算出蓄电池的循环周期,结合四阶函数拟合循环寿命与放电深度的关系^[15-16]为

$$N = -3278D_{\text{OD}}^4 - 5D_{\text{OD}}^3 + 12823D_{\text{OD}}^2 - 14122D_{\text{OD}} + 5112, \quad (5)$$

式中: N 为蓄电池在某一放电深度的充放循环寿命; D_{OD} 为蓄电池的放电深度。

1.2 飞轮储能

飞轮储能系统基本结构由飞轮转子、轴承、电动机/发电机、电力电子控制装置、真空室等5个部分组成。相较于其他技术,飞轮储能的特点在于几

乎无摩擦损耗、风阻小;比功率可达 8 kW/kg 以上,远高于传统电化学储能技术;其寿命主要取决于飞轮材料的疲劳寿命和系统中电子元器件的寿命。

1.2.1 飞轮储能充放电模型

飞轮储能系统主要由功能元件、连接及支撑元件和其他附加设备等组成,功能元件为飞轮、电力电子系统、电动机/发电机等;连接及支撑元件为真空室、轴承支撑系统、备用轴承等^[17]。在用电谷期,飞轮储能系统运行在充电模式下,从电网吸收电能,通过转速增加,将能量以机械能的形式储存在飞轮系统中,直到达到转速的峰值。在用电高峰期,飞轮储能系统调整为放电模式,通过降低转速,逐渐将所储存的机械能转化为电能,返还给电网系统,降低电网供电压力。因此,飞轮储能系统的运行状态可以分为 3 种情况,即充能加速状态、放电减速状态和空载状态。其储存能量计算公式为

$$E = \frac{1}{2} J_{\text{fes}} \omega_{\text{fes}}^2, \quad (6)$$

式中: J_{fes} 为转子的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_{fes} 为飞轮转子转速, r/s 。

飞轮储能系统可释放或储存的能量 ΔE 为

$$\Delta E = \frac{1}{2} J_{\text{fes}} \omega_{\text{fes}}^2 - \frac{1}{2} J_{\text{fes}} \omega_L^2, \quad (7)$$

式中: $\omega_{L,\text{fes}}$ 为飞轮储能系统在充放电循环中设定的最低转速, rad/s 。通常情况下,最高额定转速 ω_H 是最低额定低转速 ω_L 的 2 倍,即 $\omega_H = 2\omega_L$ 。当 $\omega_H = \omega_L$ 时,飞轮达到设计的最大储能

$$\Delta E_{\text{max}} = \frac{1}{2} J (2\omega_L)^2 - \frac{1}{2} J \omega_L^2 = \frac{3}{2} J \omega_L^2. \quad (8)$$

由式(7)可见,飞轮转速是飞轮储能性能的关键影响因素。因此,为了提高飞轮的储能性能,可以增加飞轮的旋转速度。但是,由于工艺水平的限制,大功率高速飞轮的制造难度大、造价高昂,在工程实践中很少运用。目前广泛使用的飞轮储能系统主要为 10 000 r/min 以下的钢转子储能系统。

除了提高飞轮转速以外,增加飞轮的转动惯量是另一种增大飞轮储存的能量行之有效的手段

$$J_{\text{fes}} = k_{\text{fes}} m_{\text{fes}} R_{\text{fes}}^2, \quad (9)$$

式中: k_{fes} 为飞轮材料系数; m_{fes} 为飞轮转子质量, kg ; R_{fes} 为飞轮转子的半径, m 。

能量利用率是衡量储能系统优劣的标志之一,飞轮储能系统的能量利用率与自身所储存能量的最大值和可释放的能量有关,具体如下式所示

$$R_f = \frac{\Delta E_{\text{max}}}{E} = 1 - \left(\frac{\omega_L}{\omega_H} \right)^2. \quad (10)$$

飞轮储能系统的功率 P 可表示为

$$P = \frac{d\Delta E}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{2} J \omega^2 - \frac{1}{2} J \omega_L^2\right)}{dt} = J \omega \frac{d\omega}{dt}. \quad (11)$$

1.2.2 飞轮储能损耗模型

飞轮储能损耗一般分为 2 种:摩擦损耗和涡流损耗。现代飞轮储能系统一般都工作在真空环境中,摩擦损耗很小,因此飞轮储能损耗主要为涡流损耗。根据文献[16],可得飞轮储能的损耗模型如式(12)~(15)所示

$$P_{\text{flc}} = P_{\text{Fe}} + P_{\text{el}}, \quad (12)$$

$$P_{\text{Fe}} = P_h + P_{\text{cl}} + P_{\text{ex}}, \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_h = K_h f_m K(B_m) \frac{dB(\theta)}{d\theta} \\ P_{\text{cl}} = 2\pi K_{\text{cl}} f^2 \int_0^{2\pi} \left(\frac{dB(\theta)}{d\theta} \right)^2 d\theta \\ P_{\text{ex}} = \sqrt{2\pi} K_{\text{ex}} f_m^{1.5} \int_0^{2\pi} \left| \frac{dB(\theta)}{d\theta} \right|^{1.5} d\theta \end{cases}, \quad (14)$$

$$P_{\text{el}} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{R_1}^{R_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^h \frac{|J_z|^2}{\sigma_c} r dr d\theta dz dt, \quad (15)$$

式中: P_{flc} 为涡流损耗, kW ; P_{Fe} 为转子铁心损耗, kW ; P_{cl} 为除铁心外其他部分涡流损耗, kW ; P_h 为磁滞损耗, kW ; P_{cl} 为经典涡流损耗, kW ; P_{ex} 为异常损耗, kW ; K_h 为磁滞损耗系数; f_m 为交变磁场频率, Hz ; B_m 为磁密幅值, T ; $K(B_m)$ 为因局部磁滞环引起的损耗增加系数; $B(\theta)$ 为硅钢片磁通密度, T ; K_{cl} 为经典涡流损耗系数; K_{ex} 为异常损耗系数; T 为周期, s ; R_1, R_2 分别为圆环的内径和外径, m ; h 为圆环的轴向长度, m ; J_z 为圆环内的涡流, s^{-1} ; σ 为圆环材料的电导率, S/m 。

1.3 电动汽车

考虑到用户将电动汽车接入电网充电的行为在时间和方式上均具有不确定性^[18],因此根据电动汽车是否与电网存在能量交互和信息交流(即用户与电网进行信息交流,从而避开电网峰荷进行充电,在负荷高峰期进行放电),建立 3 种电动汽车的充放电模型,即无约束充电模型,受控充电模型和基于峰/谷期的受控充/放电模型。

1.3.1 电动汽车无序充电情况

无序充电模型是指电动汽车根据实际需要进行非受控充电,且不在高峰时段向电网传输电力,具体建模思路如下。

首先需确定电动汽车充电开始时刻 t_0 ,假设 t_0 时刻后电动汽车不再出行,根据美国国家公路交通安全管理局的统计数据, t_0 满足正态分布。单台电动汽车达到满充状态所需时间可表示为当日行驶距离和充电功率的函数。同样根据统计数据可知,电

电动汽车日行驶距离满足对数正态分布[10,14]。根据函数关系可推导出充电时间的概率分布和概率密度函数,进一步得出单台电动汽车充电功率需求的函数分布。

假设 x_{t_0} 为二元变量,表示单台电动汽车的充电情况。当 $x_{t_0}=1$ 时,表示该电动汽车在 t_0 时刻开始充电;同理,当 $x_{t_0}=0$ 时,表示该电动汽车未处于充电状态。单台电动汽车的充电概率函数可由下式表示

$$\begin{cases} P(x_{t_0}=0) = F(t_{sc} > t_0 \& t_{sc} + T \leq t_0 + 24) + \\ \quad F(t_{sc} + T \leq t_0) \\ P(x_{t_0}=1) = 1 - P(x_{t_0}=0) \end{cases}, (16)$$

式中: t_{sc} 为开始充电时刻; T 为充电时长,h; F 为 t_{sc} 和 T 的联合概率分布函数,这里假定随机变量 t_{sc} 和 T 相互独立。单台电动汽车在某时刻的充电功率需求为

$$P_{t_0} = P(x_{t_0}=1) \times P, (17)$$

式中: P_{t_0} 为 t_0 时刻的充电功率需求,kW。

1.3.2 电动汽车受控充电模型

电动汽车受控充电是指电动汽车在与电网有信息交互的基础上,其被控制在电网负荷的低谷期进行充电,但不反向传输电能给电网。

电网首先会对每日负荷低谷时段进行预测,之后下发给用户。当电动汽车用户所需要的充电时长小于负荷低谷持续的时间,则电动汽车用户可以选择低谷期的任意时段进行充电;而当电动汽车用户所需要的充电时长大于负荷低谷的持续时间,则电动汽车用户只能选择在负荷低谷的起始时间同步开始充电,直到低谷期的结束。其表达式为

$$t_{sc} = \begin{cases} t_{vs} & t_c > (t_{ve} - t_{vs}) \\ t_{vs} + k_c \times (t_{ve} - t_c - t_{vs}), & (18) \\ 0 \leq t_c \leq (t_{ve} - t_{vs}) \end{cases}$$

式中: t_{sc} 为开始充电时刻; t_{vs} 和 t_{ve} 分别为谷期开始和结束的时间(以00:00—07:00为电网负荷低谷期); t_c 为充电时长,h; k_c 为[0,1]区间内的随机数。

1.3.3 基于峰谷期的电动汽车受控充/放电模型

基于峰谷期的电动汽车受控充/放电模型,由于与1.3.2节中的充电模型类似,因此不再赘述,其放电模型则需要考虑以下3方面。

(1)针对实际出行中的午高峰(11:00—14:00)和晚高峰(19:00—22:00),为电动汽车设定2种放电模式,较小的放电功率 P_{d1} 对应午高峰;较大的放电功率 P_{d2} 对应晚高峰。此外,在午高峰放电时需预留电量以确保车辆的通勤功能。在晚高峰放电时

为保护电池寿命,放电后电池电量应不低于20%。

(2)考虑到并不是所有电动汽车用户都能按要求进行放电,特设定用户放电响应度 λ ,结合车辆实际的日行驶里程统计数据,设定 $\lambda=50\%$ 。

(3)设定电动汽车在经过午高峰和晚高峰两次放电以后,在电网负荷低谷期进行充电。电动汽车的储能损耗与蓄电池的储能损耗类似,不再赘述。

2 仿真分析

根据第1.1—1.3节中3种负荷的仿真模型,分别采用实际物理试验和仿真软件进行测试,并针对试验结果分析3类负荷的特性。其中,蓄电池使用实际物理试验,飞轮储能与电动汽车仿真模型均运行于Matlab 2012仿真软件。

2.1 蓄电池试验

2.1.1 蓄电池充电

蓄电池在25℃的恒温条件下进行充放电,充电方式为恒压充电(电压分别为2.40V和2.28V),充电电流为1.0A,放电深度控制在50%。经过多次充放电试验,记录试验数据后计算其平均数值,绘制蓄电池充电特性曲线如图1所示。

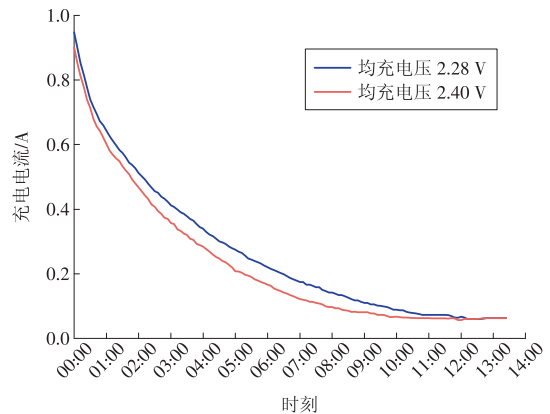


图1 蓄电池充电特性

Fig. 1 Battery charging characteristics

由图1可见,在恒压充电模式下,充电电流随着充电时间的增加逐渐减小,从0h到14h,充电电流从1.0A逐渐降到0.1A,充电末期的电流已十分微弱,说明充电速度在下降。此外,保持放电深度和充电电流不变,通过改变充电电压,可以观察到蓄电池充满电需要的充电时长几乎相同,均为13h左右。因此,在用电高峰期,可以选择使用较低的充电电压对蓄电池进行充电,而不影响充电时长。

通过充放电试验发现工作温度对蓄电池的使用寿命有较大影响。针对储存期内的蓄电池会有电量损失的问题,在蓄电池投入使用前需对其进行一次补充充电。图2展示了某蓄电池工作温度和充电电压的关系。由图2可见,充电电压随温度升高

呈现下降趋势。但是一般情况下规定最低充电电压 $\geq 2.2\text{ V}$,最高充电电压 $\leq 2.4\text{ V}$ 。

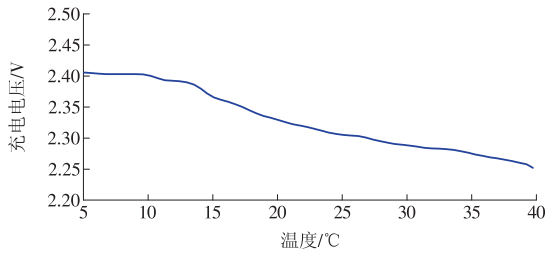


图2 蓄电池工作温度与充电电压关系

Fig. 2 Relationship between the working temperature and charging voltage of a battery

2.1.2 蓄电池放电

选取 2.0 V 阀控密封式铅酸蓄电池作为蓄电池放电仿真的试验对象,放电时间为 10 h,通过多次试验,记录数据并绘制放电特征曲线如图 3 所示。

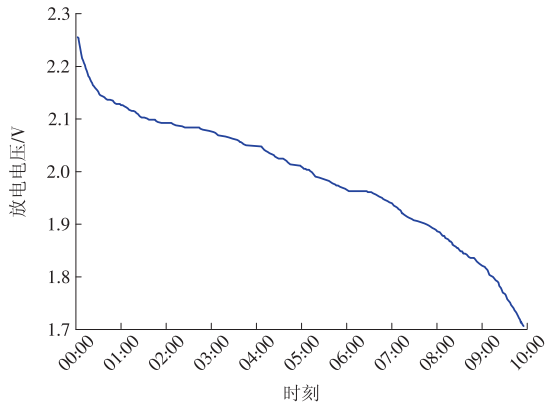


图3 蓄电池放电特性

Fig. 3 Battery discharge characteristics

由图 3 可见,在放电开始时蓄电池的端电压处于急速下降的情况,这是因为蓄电池在刚开始放电时,其极板表面和孔隙中的电解液质量浓度下降速度很快,导致放电速度过高。随着放电持续进行,蓄电池的端电压下降速度开始放缓,虽仍然呈现下降趋势,但曲线斜率较放电开始时已有明显减小,且这一阶段的持续时间很长,约占蓄电池总放电时长的 50% 以上,保持了蓄电池良好的供电可靠性。随着放电时长逐渐增加,蓄电池处于放电末期时,蓄电池极板表面的电解液质量浓度已降至很低的水平,蓄电池无法再维持稳定的放电速率,端电压急剧下降,直到放电终止。

由于蓄电池的化学特性,其放电容量受到蓄电池周围温度的影响,具体影响关系如图 4 所示。由图 4 可见,蓄电池的放电容量与温度成单调关系,温度越高,放电容量越大,在一定温度范围内近似可看成线性相关,其公式为

$$C_t = C_{10} [1 + K_T(t_0 - t)], \quad (19)$$

式中: C_t 为蓄电池非基准温度的放电容量, $A \cdot h$; K_T 为温度系数(单位温度变化引起的蓄电池容量变化率); t_0 为基准温度,一般为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 或 $20\text{ }^\circ\text{C}$; t 为非基准温度, $^\circ\text{C}$ 。

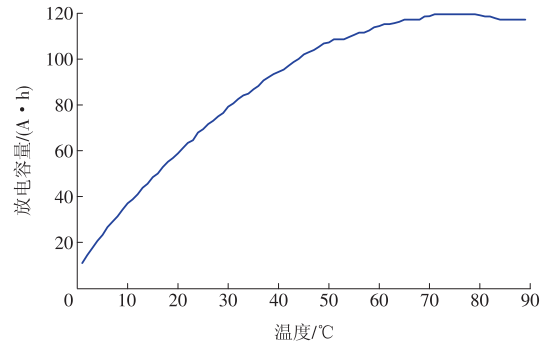


图4 蓄电池放电容量与环境温度关系

Fig. 4 Relationship between the battery discharge capacity and ambient temperature

2.2 飞轮储能仿真

图 5 和图 6 分别为飞轮储能系统功率吸收/释放功率仿真数据和飞轮转速曲线数据。参数设置为 $k_{res}=1.875 \times 10^{-5}$, $R_{res}=2\text{ m}$, $m_{res}=8\text{ 000 kg}$,功率吸收时长和释放时长均设为 90 s 。

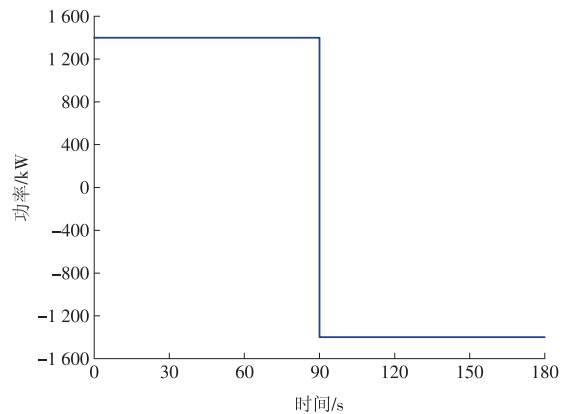


图5 飞轮系统吸收或释放功率仿真数据

Fig. 5 Simulation data of the absorbed or released power of the flywheel system

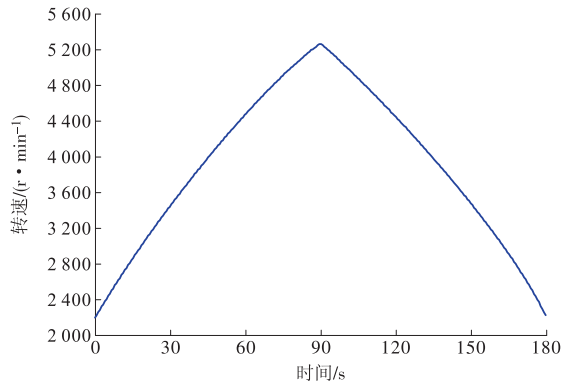


图6 飞轮转速曲线

Fig. 6 Speed of the flywheel

由图 5 及图 6 可见,飞轮在 0—90 s 处于充电状态,持续从外界吸收能量,转速从 2 200 r/min 升高至 5 200 r/min ,充电功率保持 1 400 kW 不变;在 90 s 之

后,飞轮结束充电,开始调整为放电模式,其转速逐渐从峰值5 400 r/min逐渐回落至2 200 r/min,放电功率同样保持为1 400 kW,放电持续时长为90 s。

综上分析,飞轮储能响应速度快,其运行特性与飞轮的转速呈正相关,因此用户在使用飞轮储能与电网进行互动时,需充分考虑飞轮的转速阈值。

2.3 电动汽车仿真

将1.3节中3种电动汽车充放电模型分别命名为模型1、模型2和模型3,采用Monte Carlo算法对3个模型进行迭代计算,迭代次数为1 000次。单台电动汽车单日内充放电功率曲线如图7—9所示。

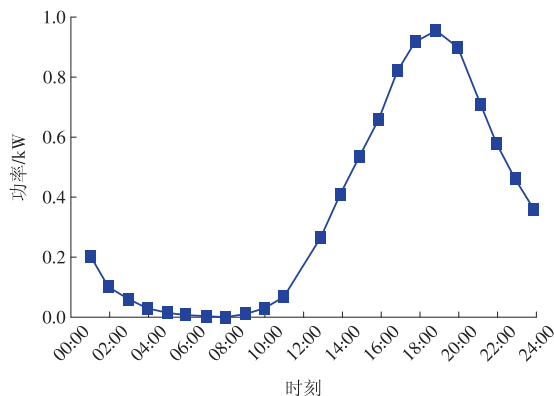


图7 单台电动汽车充电功率需求(模型1)

Fig. 7 Charging power demand of a single electric vehicle (model 1)

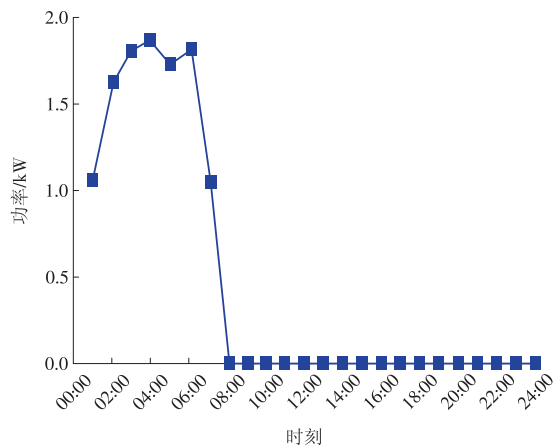


图8 单台电动汽车充电功率需求(模型2)

Fig. 8 Charging power demand of a single electric vehicle (model 2)

由仿真结果可见,模型1和模型2中电动汽车均只有充电需求,且有明显的时间特点。模型1中电动汽车的充电需求从11:00开始逐渐上升,19:00到达顶峰后逐渐降低;模型2中电动汽车主要在用电谷期(01:00—08:00)进行充电,其他时间段无充电行为。模型3中电动汽车既有充电行为也有放电行为,放电主要集中在午高峰和晚高峰时期,充电行为则与模型2类似,集中在用电谷期,对电网运行来说是一种良好的用电模式。

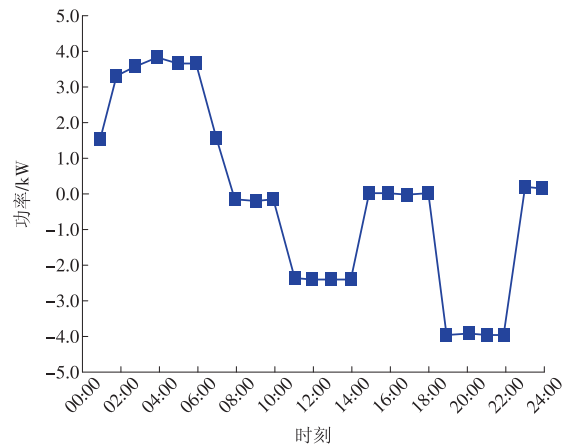


图9 单台电动汽车充电功率需求(模型3)

Fig. 9 Charging power demand of a single electric vehicle (model 3)

3 结论

选取具有储能作用的用户侧负荷,对其供用能特性进行分析。分别建立蓄电池、飞轮储能和电动汽车的仿真模型,分别通过物理试验和软件仿真模拟其实际运行情况,根据试验数据可以得到典型供用能负荷的运行特性。

(1)蓄电池有良好的运行性能,充电时即使充电电压较低,蓄电池仍能保持良好的充电速度;放电时,在绝大部分放电期内端电压变化较小。同时,研究了温度对于蓄电池充放电的影响,即充电电压随温度升高呈现下降趋势,放电容量随温度升高而增大。由于其优秀的运行特性,蓄电池已广泛应用于工业、交通航海、航天、新能源储能等领域。

(2)飞轮储能响应速度快,损耗小,其运行特性与飞轮的转速呈正相关,因此在使用飞轮储能时需要充分考虑飞轮的转速阈值。基于其运行特点,飞轮储能可应用于城市地铁和电气化铁路牵引变电所等领域。

(3)电动汽车的运行特性灵活多样,具有巨大的应用潜力,可用于需求响应项目,是负荷侧参与电网调节的重要资源。

这些典型供用电负荷的运行特性分析可为后续进一步研究具有储能作用的用户侧负荷在需求响应中的作用提供参考。

参考文献:

- [1]赵国涛,钱国明,王盛.“双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J].华电技术,2021,43(6):11-20.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng. Analysis on green and low-carbon development path for power industry to realize carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian

- Technology, 2021, 43(6): 11-20.
- [2] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.
- [3] 张翼. 电力储能技术发展和应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(4): 81-84.
ZHANG Yi. The development and application of energy storage technology [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(4): 81-84.
- [4] 张静, 李岱昕. 物理储能技术的市场现状及发展前景[J]. 储能科学与技术, 2015, 4(2): 153-157.
ZHANG Jing, LI Daixin. Current application situation and development prospect of physical energy storage technologies [J]. Energy Storage Science and Technology, 2015, 4(2): 153-157.
- [5] 李先锋, 张洪章, 郑琼, 等. 能源革命中的电化学储能技术[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 443-449.
LI Xianfeng, ZHANG Hongzhang, ZHENG Qiong, et al. Electrochemical energy storage technology in energy revolution [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 443-449.
- [6] SHIN H Y, HUR J. Optimal energy storage sizing with battery augmentation for renewable-plus-storage power plants [J]. IEEE Access, 2020(8): 187730-187743.
- [7] TZIOVANI L, HADJIDEMETRIOU L, CHARALAMPOUS C, et al. Energy management and control of a flywheel storage system for peak shaving applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4195-4207.
- [8] MOGHADDAM H A, SAEEDINIA M H, MOHAMADIAN S, et al. Integrated modeling of power network and connected flywheel energy storage system for optimal power and energy ratings of flywheel [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1589-1599.
- [9] 张雪莉, 刘其辉, 李建宁, 等. 储能技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 电气应用, 2012, 31(12): 50-57.
- [10] PAVIC I, CAPUDER T, KUZLE I. A comprehensive approach for maximizing flexibility benefits of electric vehicles [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(3): 2882-2893.
- [11] ALSHAHRANI M, KHALID M, ALMUHAINI M. Electric vehicles beyond energy storage and modern power networks: Challenges and applications [J]. IEEE Access, 2019(7): 99031-99064.
- [12] 汤清泉, 颜世超, 卢松升, 等. 三电平逆变器的功率管开路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 26-32.
TANG Qingquan, YAN Shichao, LU Songsheng, et al. Open-circuit fault diagnosis of transistor in three-level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 26-32.
- [13] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 三相变频驱动系统中逆变器的故障诊断与容错技术[J]. 电工技术, 2004, 19(12): 1-9, 36.
ZHANG Lanhong, HU Yuwen, HUANG Wenxin. Fault diagnosis and tolerant techniques of inverter in three-phase variable frequency drive system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 1-9, 36.
- [14] 尹立敏, 王琳, 雷刚, 等. 计及需求响应和蓄电池综合损耗的微电网优化调度[J]. 东北电力大学学报, 2020, 40(2): 37-48.
YIN Limin, WANG Lin, LEI Gang, et al. Optimal dispatch of microgrid considering demand response and comprehensive battery loss [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2020, 40(2): 37-48.
- [15] BINDNER H, CRONIN T, LUNDSAGER P, et al. Lifetime modelling of lead acid batteries [R]. Roskilde: Risø National Laboratory, 2005.
- [16] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97, 16.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97, 16.
- [17] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
WANG Jinxing, ZHANG Shaoqiang, ZHANG Hanwen, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 64-71.
- [18] 乔文娟. 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷预测[J]. 华电技术, 2018, 40(6): 19-22, 77.
QIAO Wenjuan. Charging load prediction of electric vehicles based on Monte Carlo simulation [J]. Huadian Technology, 2018, 40(6): 19-22, 77.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

赵建立(1983), 男, 高级工程师, 从事智能电网用电新技术研究和需求侧管理工作, 59696374@qq.com;

汤卓凡(1993), 女, 工程师, 从事需求侧管理和需求响应研究工作, tangvera@126.com;

王桂林(1996), 女, 助理工程师, 从事需求侧管理和通信系统运行维护工作, 1045388820@qq.com;

陈宇扬(1999), 男, 在读硕士研究生, 从事电力分布式交易和需求响应研究工作, yz_cheny@163.com;

王隗东(1992), 男, 助理工程师, 从事需求侧管理和需求响应研究工作, 17610229291@163.com;

陈珂(1994), 男, 工程师, 从事需求侧管理和需求响应研究工作, 824417278@qq.com;

吴英俊(1985), 男, 副教授, 博士, 从事综合能源系统优化和电力分布式交易等方面的研究, ywu_ee@vip.163.com。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.003

基于社区划分的GRU神经网络负荷建模

GRU neural network load modeling based on community division

赵省军¹, 张开鹏¹, 付鑫权², 司英莲¹, 刘志栋^{1*}, 周登钰¹
ZHAO Shengjun¹, ZHANG Kaipeng¹, FU Xinquan², SI YingLian¹, LIU Zhidong^{1*},
ZHOU Dengyu¹

(1. 国网甘肃省电力公司武威供电公司, 甘肃 武威 733000; 2. 西华大学 电气与电子信息学院, 成都 610039)

(1.State Grid Gansu Electric Power Company Wuwei Power Supply Company, Wuwei 733000, China;

2.School of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

摘要:分布式电源的广泛接入增加了配电网复杂程度,导致负荷模型描述难度大幅提高。此外,针对网络每个节点分别进行建模以及对整个配电网进行建模的方法难以适用于不断扩大规模的配电网。提出一种基于社区划分的门控循环单元(GRU)神经网络负荷建模方法。通过加文-纽曼(GN)算法对配电网拓扑进行分区处理,基于GRU神经网络分别对各个社区进行负荷建模,并在网络输入特征向量中引入度中心性来衡量节点在网络拓扑中的重要程度。对某地区的10 kV配电网进行建模分析,结果表明所建模型精度及计算效率更高。

关键词:分布式电源;负荷模型;社区划分;度中心性;GRU神经网络

中图分类号:TK 01:TM 74

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2022)02-0015-06

Abstract: The extensive access of distributed power supplies increases the complexity of power distribution networks, resulting in the difficulty of the description by load models. In addition, modeling for the whole distribution network and each node in it is inapplicable for the ever-expanding distribution network. Therefore, a Gated Recurrent Unit (GRU) neural network load modeling method based on community division is proposed. Firstly, the GN algorithm is used to partition the topology of the distribution network. Then, load model for each community is constructed based on GRU neural network, in which degree centrality is introduced into the input feature vectors to measure the importance of nodes in the network topology. Finally, modeling analysis is carried out on a 10 kV distribution network. The results show that the proposed modelling method is of higher accuracy and computational efficiency.

Keywords: distributed generation; load model; community division; degree centrality; GRU neural network

0 引言

电力系统仿真是分析研究、调度运行电力系统的主要手段。负荷模型的准确性会直接影响电力系统的仿真结果,从而对电力系统运行、控制、调度等决策造成影响。因此,建立准确、有效的电力负荷模型对电力系统仿真分析十分必要^[1]。近年来,电力系统中的负荷成分也在不断变化,各种非线性负荷占比与日俱增,大量分布式电源并入配电网,因此精确的负荷建模对提高电力系统数字仿真精度尤为重要^[2-3]。

现有的负荷建模方法可以归纳为机理性建模和非机理性建模。机理性建模通过函数模型和多

项式模型对静态负荷进行线性表达,并通过感应电动机模型或感应电动机与零膨胀泊松回归(Zero-inflated Poisson, ZIP)模型并联的简化电路模型表达部分动态负荷。机理性模型在应对分布式电源与各种非线性负荷大量接入配电网时,会出现准确性过低或模型结构复杂、参数过多等问题^[4-5]。

非机理性建模包括常微分方程模型、传递函数模型、状态空间模型、时域离散模型和考虑负荷非线性特性而提出的人工神经网络模型。近年来,随着机器学习的不断发展,各种神经网络模型被应用到负荷建模中。文献[6]和文献[7]通过引入径向基函数(Radial Basic Function, RBF)神经网络,对含有不同比例的分布式电源接入节点进行负荷建模,模型精度较高。但是该方法应用于配电网所有节点统一建模时效果欠佳。文献[8]将节点一年内每天负荷曲线进行聚类,对全年该节点每类的典型负

收稿日期:2021-08-03;修回日期:2021-09-18

基金项目:国网甘肃省电力公司科技项目(52273018000L)

荷曲线进行神经网络负荷建模。但节点数量的增加导致负荷类型增加,会出现模型复杂、参数过多等问题。文献[9]详细阐述了长短期记忆(Long Short Term Memory, LSTM)递归神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)在负荷建模中的适用性,利用 LSTM 网络的时序记忆功能,对电力系统中时序数据进行有效建模。但 LSTM 网络存在参数较多、模型收敛速度较慢等问题。

门控循环单元(Gated Recurrent Unit, GRU)是一种基于 LSTM 的优化网络^[10],简化了 LSTM 网络的内部单元结构,故其在保证较高精度的同时能够有效缩短模型的训练时间,更加适用于建立负荷模型。文献[11]提出将 GRU 神经网络引入负荷建模领域,对现代电网分布式电源与非线性负荷的接入具有很强的适应性,建立的非机理模型能够精确地得到系统的负荷值。现有的负荷建模并没有考虑电网拓扑结构,只是对单一的节点进行建模。而电力系统作为典型的复杂网络系统,且在配电网节点数越来越多的情况下,只考虑单一节点的负荷建模方式适用性较差。为实现电网运行状态在线监控及调度决策的快速制定,对配电网进行区域划分,实行“分而治之”,有效减少负荷模型的数量,提高计算速度,减小电网状态分析及调度策略制定的复杂程度^[12-14]。

综上所述,提出了基于社区划分的 GRU 神经网络负荷建模方法。主要创新点和优势在于:利用社区分类算法,将配电网分成各节点联系紧密的若干社区,再分别对社区进行建模,解决了配电网节点数过多情况下负荷模型复杂、计算效率低等问题。同时,基于 GRU 神经网络的等效负荷建模方法能够充分兼顾数据的时序性和非线性关系,有效反映时间序列数据中的长期历史过程。最后,为了考虑社区内部各节点的拓扑结构,模拟重要节点在实际网络中的影响程度更大,引入节点度中心性作为网络输入特征量。

1 社区划分

社区划分的基本思路为:同一社区内节点之间的连接更紧密,而不同社区之间的连接比较松散。文献[15]提出的加文-纽曼(Girvan-Newman, GN)算法是一种最典型的社区分裂方法。GN 算法的重要概念为边介数(Betweenness),即网络中任意 2 个节点通过此边的最短路径的数目。具体算法思路为,在网络之中,通过社区内部的边的最短路径相对较少,而通过社区之间的边的最短路径的数目则相对较多。GN 算法是基于删除边的算法,本质是

基于聚类中的分裂思想,在原理上使用边介数作为相似度的度量方法。在 GN 算法中,每次都会选择并删除边介数高的边,网络分裂速度远快于随机删除边时的网络分裂。

GN 算法的步骤如下。

(1)计算每一条边的边介数。

(2)删除边介数最大的边。

(3)重新计算网络中剩下的边的边介数。

(4)重复(3)和(4)步骤,直到网络中的任一顶点作为一个社区为止。

为了定量描述社区划分的好坏,提出了模块度的概念,对社区进行模块化描述。事实上,基于模块化优化的社区划分算法就是将质量函数 Q 最大化,从而得到更好的社区划分。质量函数 Q 的得分越高,发现的群落结构与客观事实越一致。质量函数 Q 定义为

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}) \delta_{ij}, \quad (1)$$

式中: Q 为质量函数; m 为图的边数; A 为图的邻接矩阵; k_i 为节点 i 的度; $\delta_{ij}=1$ 时,节点 i 和节点 j 在同一社区; $\delta_{ij}=0$ 时,节点 i 和节点 j 不在同一社区。

2 GRU 神经网络

文献[16]使用 LSTM 网络搭建主动式配电网的等效模型,将电力系统单个节点实测电压作为 1 个 LSTM 隐藏层和 2 个全连接(Fully Connected, FC)层隐藏层构成的神经网络的输入,并将该节点的有功功率和无功功率作为输出。这种对于单个节点的建模方式,在大规模电力系统中很难实行,会导致模型过多、参数复杂、效率低等问题。针对这一问题提出考虑整个电网所有节点的等效负荷模型,需要使用更加优化的神经网络模型,因此引入 GRU 神经网络。GRU 基本单元如图 1 所示。

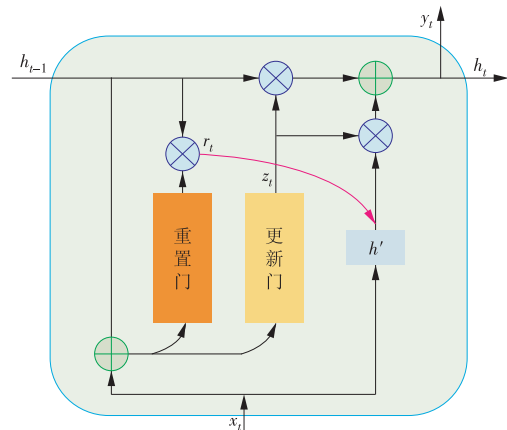


图 1 GRU 基本单元

Fig. 1 GRU basic unit

GRU神经网络是在LSTM及RNN循环神经网络的基础上,对神经元内部的组成结构进行了优化,可以显著提升模型训练的效率。文献[17-18]将GRU神经网络引入电力系统负荷预测,充分考虑负荷的时序特性,训练速度快,预测精度高。GRU网络的前向传播公式为

$$\begin{cases} r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\ z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \\ h' = \tanh(W_h \cdot [r_t \times h_{t-1}, x_t]), \\ h_t = (1 - z_t) \times h_{t-1} + z_t \times h' \\ y_t = \sigma(W_o \cdot h_t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_t 为输入向量; h_{t-1} 为上一时刻的状态变量; h_t 为当前时刻的状态向量; z_t 为更新门的状态; r_t 为重置门的状态; h' 为当前候选集的状态; y_t 为当前时刻的输出向量; W_r 为更新门与 z 及 h_{t-1} 构成的连接矩阵相乘的权重参数; W_z 为重置门与 z 及 h_{t-1} 构成的连接矩阵相乘的权重参数; W_h 为候选集与 z 及 h_{t-1} 构成的连接矩阵相乘的权重参数; W_o 为输出向量与 z 及 h_{t-1} 构成的连接矩阵相乘的权重参数; $[\]$ 表示向量连接; \cdot 表示矩阵点乘; \times 表示矩阵乘积; $\sigma(x)$ 表示sigmoid激活函数; $\tanh(x)$ 则为tanh激活函数。 $\sigma(x)$ 及 $\tanh(x)$ 的公式为

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (3)$$

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \quad (4)$$

GRU神经网络以更新门和重置门作为核心模块,输入变量 x_t 和上一时刻的状态记忆变量 h_{t-1} 的拼接矩阵经sigmoid非线性变化后输入到更新门中,决定上一时刻状态变量被带入到当前状态中的程度。重置门控制上一时刻被写入到候选集的信息量,通过 $1 - z_t$ 倍的 h_{t-1} 存储上一时刻的信息,并通过 z_t 倍的 h' 记录当前时刻的信息,再将二者相加的结果作为当前时刻的输出值。

3 GN-GRU等效负荷模型

3.1 总体模型

GN-GRU等效模型基于大电网拓扑结构原理,使用GN算法对社区进行分类,将大电网分为 n 个独立的社区,并单独对每个社区进行负荷建模。将社区内所有节点的实测电压增量以及前一时刻的有功功率、无功功率实测数据加上各个节点在社区中的度中心性作为GRU神经网络的输入数据,将当前时刻有功功率、无功功率作为输出数据,用于训练神经网络,得到由 n 个GRU模型组成的负荷模型集合,如图2所示。

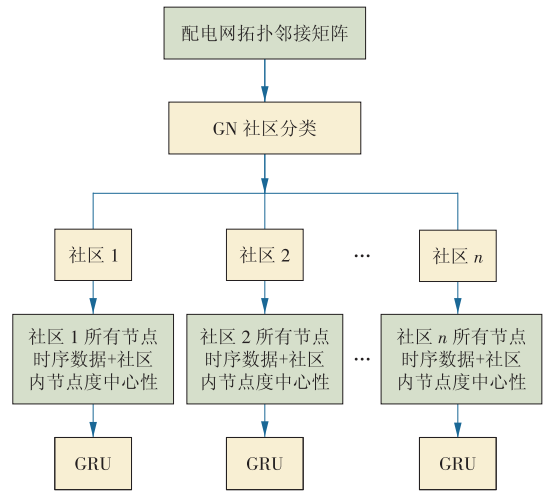


图2 GN-GRU等效模型

Fig. 2 GN-GRU equivalent model

3.2 度中心性

度中心性(Degree Centrality)是在网络分析中刻画节点中心性(Centrality)的最直接度量指标。一个节点的节点度越大就表示这个节点的度中心性越高,该节点在网络中就越重要。

在配电网这样的无向图中,度中心性量测网络中某个节点与其他所有节点相联系的程度,其公式为

$$C_D(N_i) = \sum_{j=1}^g x_{ij} (i \neq j), \quad (5)$$

式中: $C_D(N_i)$ 表示节点 i 的度中心度, g 表示整个无向图的节点数, x_{ij} 表示 i 节点与 j 节点的连接关系($x_{ij}=1$ 表示直接相连, $x_{ij}=0$ 表示未直接相连)。

为消除网络规模变化对度中心性的影响,提出了一个标准化的量测公式

$$C'_D(N_i) = \frac{C_D(N_i)}{g-1}. \quad (6)$$

在公式中,使用节点 i 的度中心性值除以其他 $g-1$ 个节点最大可能的连接数,得到与节点 i 有直接联系的网络节点的比例。

3.3 输入特征集的构建

对大规模电力系统进行社区分类,分别对各个社区进行基于节点中心性的GRU等效负荷建模,将各节点实测电压、上一时刻有功功率、无功功率以及该节点的度中心性作为神经网络的输入,将实测有功、无功作为输出,等效公式为

$$P_{i,t}, Q_{i,t} = f(\Delta U_{i,t}, P_{i,t-1}, Q_{i,t-1}, D_i), \quad (7)$$

式中: $P_{i,t}$ 和 $P_{i,t-1}$ 表示第 i 个节点 t 时刻和 $t-1$ 时刻的实测有功功率; $Q_{i,t}$ 和 $Q_{i,t-1}$ 表示第 i 个节点 t 时刻和 $t-1$ 时刻的实测无功功率; $\Delta U_{i,t-1}$ 表示 i 个节点 t 时刻的实测电压增量; D_i 表示第 i 个节点在社区中的

度中心性。

对社区内部所有节点进行负荷等效建模,需要建立具有社区电网特性的神经网络输入特征集,构建输入向量数据 X_i 为

$$X_i = U_{1,t}, P_{1,t-1}, Q_{1,t-1}, D_{1,t}, U_{2,t}, P_{2,t-1}, Q_{2,t-1}, D_{2,t}, \dots, \Delta U_{n,t}, P_{n,t-1}, Q_{n,t-1}, D_{n,t} \quad (8)$$

将实测有功功率、无功功率作为输出值,输出向量数据 Y_i 为

$$Y_i = P_{1,t}, Q_{1,t}, P_{2,t}, Q_{2,t}, \dots, P_{n,t}, Q_{n,t} \quad (9)$$

采用均方根误差 (RMSE) 作为指标,以评估 GRU 等效模型的输出与社区电网实测有功功率及无功功率, RMSE 方程式为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (10)$$

式中: N 为输入时序数据总数; y_t 为社区电网中节点测试有功功率、无功功率, kW; \hat{y}_t 为 GRU 等效模型输出值。

4 案例仿真

4.1 试验环境配置

本仿真模型采用 Python 3.7 作为编程语言,软件构架基于 Tensorflow, Keras, Scikit-learn 算法框架。配图采用 matplotlib 绘图模块绘制。仿真环境采用 Intel (R) Core (TM) i5-8250U 处理器, Intel (R) UHD Graphics 962 显示适配器。

4.2 确定网络构架超参数

需要确定的 GRU 神经网络训练超参数包括 GRU 网络层数 D 及 Dense 网络层数 d 。采用 sigmoid 激活函数及 Adagrad 优化器, 初始学习率 $lr = 0.1$ 。

对神经网络进行训练时, 设置周期数 $epochs = 50$, 批次大小 $batch_size = 4$ 。采用控制变量法对 GRU 网络层数 D 及 Dense 网络层数 d 进行最优选择, 结果见表 1, 选择 $D=3, d=3$ 作为最优神经网络超参数值。

表 1 不同层数组合的收敛时间和均方根误差

Table 1 Convergence time and root mean square error of the combination with different layers

GRU 层数	Dense 层数	收敛时间/s	均方根误差
2	1	7.71	0.068
2	2	7.62	0.059
3	2	9.20	0.063
3	3	9.13	0.057
4	3	10.82	0.066
4	4	10.91	0.063

4.3 仿真结果

为验证提出模型的准确性, 选取某 40 节点配电网作为仿真对象, 并将该配电网 192 d 负荷数据作为数据集。按照 2:1 的比例将数据集划分训练集和测试集, 其中训练集为 128 d, 测试集为 64 d, 每天 96 点采样数据。

对 GN-GRU 神经网络负荷模型进行训练, 与整体配电网 40 节点 GRU 神经网络负荷模型对比。使用 GN 算法对 40 节点配电网拓扑进行社区划分, 其中电网拓扑中联络开关视为处于闭合状态, 得到网络节点之间的分区关系如图 3 所示。分别对 6 个社区进行负荷建模, 如图 4 及图 5 所示。

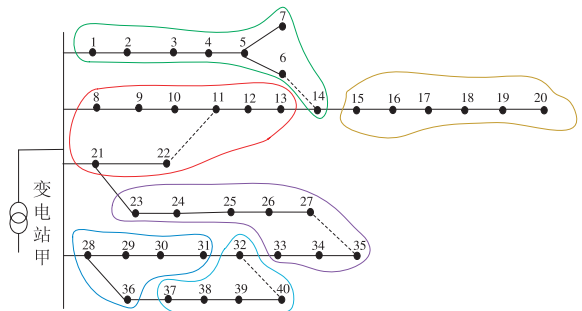


图 3 40 节点配电网社区划分结果

Fig. 3 Results of community division of the 40-node distribution network

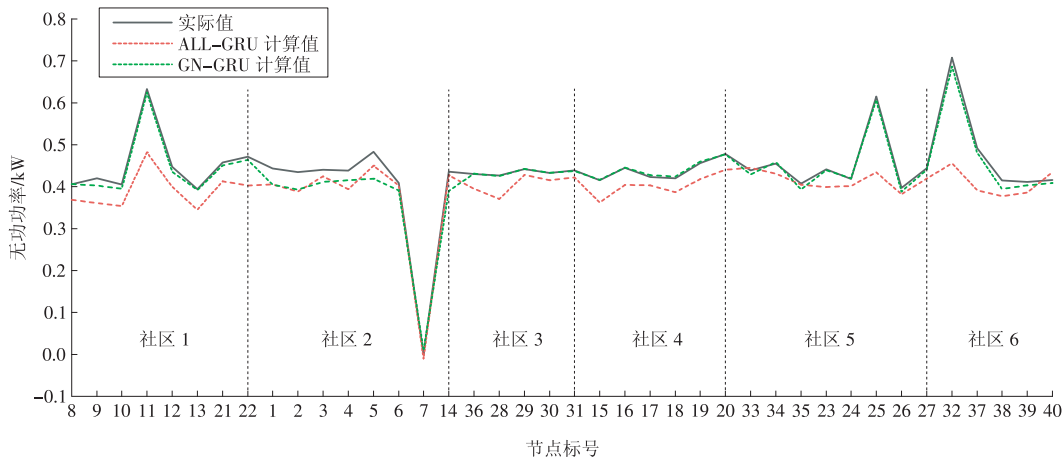


图 4 各社区无功功率对比

Fig. 4 Reactive power of each community

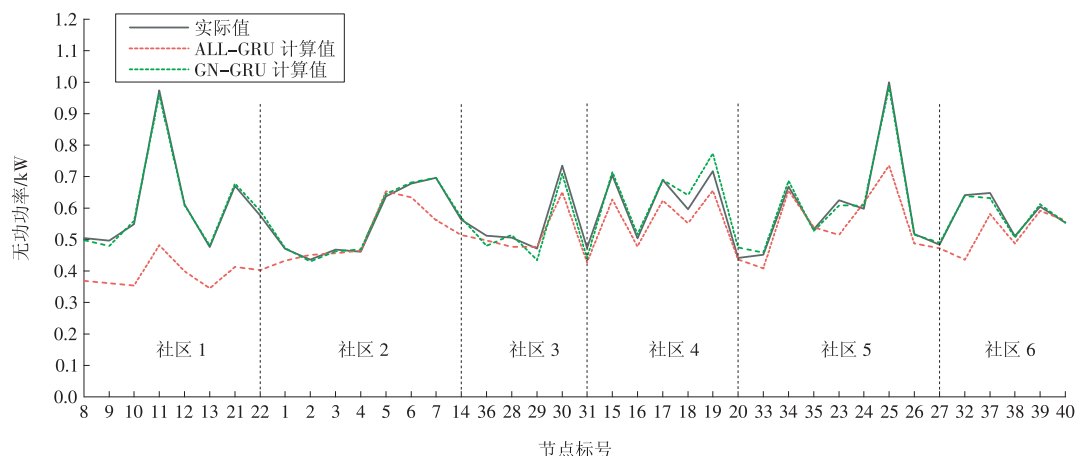


图5 各社区有功功率对比

Fig. 5 Active power of each community

将每个社区内各个节点的实际值,全部40节点网络进行GRU神经网络负荷模型(All-GRU)计算结果,以及通过GN-GRU负荷模型计算结果进行对比。其中All-GRU模型的输入输出向量与GN-GRU的输入输出向量格式相同。

由图4及图5可见,与40节点实际有功功率、无功功率比较,在训练样本相同、模型参数相同的前提下,All-GRU神经网络负荷模型由于数据维度较高、拟合度较差,导致计算结果较差。在划分社区的情况下,40个节点有效地划分为节点彼此联系紧密的6个社区,降低了神经网络输入数据维度,且提高了数据之间关联程度。使用6个GN-GRU神经网络负荷模型对6个社区分别进行负荷建模,有功功率、无功功率计算结果准确性均较高。

计算上述2个模型的测试集,结果见表2。由表2可见,GN-GRU负荷模型中6个社区负荷模型得到的平均均方根误差为0.035,明显低于对40节点配电网整体进行建模的误差结果0.057。由于网络参数的减少,GN-GRU负荷模型中6个社区负荷模型平均训练时间小于All-GRU模型训练时间。综上所述,GN-GRU模型计算精度提升且计算速度更快,相对于单个节点分别进行建模以及全部节点统一建模的2种情况,该建模方法拥有模型数量少、计算速度适中、计算精度高等优点。GN-GRU负荷建模方法更加适用于如今规模不断扩大的配电网现状,能够更加快速、有效地计算出电网负荷数据结果。

表2 负荷模型结果对比

Table 2 Comparison results of load models

负荷模型	训练时间/s	均方根误差
GN-GRU	7.66	0.035
All-GRU	9.13	0.057

5 结论

提出基于GN-GRU神经网络的负荷建模方法,首先采用GN算法对大规模配电网系统进行社区划分;再考虑大规模配电网中每个节点在电网拓扑网络中的度中心性,作为输入特征量;最后采用GRU神经网络依次对每个社区网络进行负荷建模,得到大规模配电网负荷模型集,具有以下优势。

(1)面对现今大规模配电网节点过多、结构复杂等问题,通过GN社区分类算法,将配电网划分为具有自联系的若干个社区,并分别进行建模,有效减少模型数量,提高计算效率且增加计算精度。

(2)考虑了每个节点的度中心性,将节点在社区网络中的重要性作为输入特征量,能够较真实地反应现实电力系统中重要节点功率变化所带来的同心松弛效应。

(3)使用GRU作为神经网络主要的单元,能够有效地考虑输入数据中电压值的时序特性。具有较高的计算精度。

参考文献:

[1]鞠平,马大强.电力系统负荷建模[M].2版.北京:中国电力出版社,2008.

[2]李培强,李欣然,林舜江.电力负荷建模研究述评[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(5):56-64,123.
LI Peiqiang, LI Xinran, LIN Shunjiang. Critical review on synthesis load modeling [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 56-64, 123.

[3]李培强,曾小军,李欣然,等.基于神经网络的分布式电源统一等效建模及其在PSASP中的应用[J].电网技术,2016,40(4):1224-1229.
LI Peiqiang, ZENG Xiaojun, LI Xinran, et al. Unified equivalent modeling of distributed generation using artificial

- neural network and its application in PSASP [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1224-1229.
- [4] 鞠平, 郭德正, 曹路, 等. 含主动负荷的综合电力负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 367-376.
- JU Ping, GUO Dezheng, CAO Lu, et al. Review and prospect of modeling on generalized synthesis electric load containing active loads [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(4): 367-376.
- [5] 赵静波, 鞠平, 施佳君, 等. 电力系统负荷建模研究综述与展望[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 87-94.
- ZHAO Jingbo, JU Ping, SHI Jiajun, et al. Review and prospects for load modeling of power system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 87-94.
- [6] 黄俊铭, 朱建全, 庄远灿. 基于动态 RBF 神经网络的广义电力负荷建模[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 591-597.
- HUANG Junming, ZHU Jianquan, ZHUANG Yuancan. Generalized power load modeling based on dynamic RBF neural network [J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 591-597.
- [7] LUO T Y, ZHU J Q, HUANG J M. Generalized power load modeling method with multiple RBF neural network model structures [C]//2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). 2018: 417-423.
- [8] LI W B, XING L H, HUANG K Y, et al. Generalized load modeling method based on clustering and neural network [C]//2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). 2020: 619-622.
- [9] ZENG P, LI H P, HE H B, et al. Dynamic energy management of a microgrid using approximate dynamic programming and deep recurrent neural network learning [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4435 - 4445.
- [10] CHO K, MERRIENBOER B V, GULCEHRE C, et al. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation [C]//Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2014: 1724-1734.
- [11] LI Y L, YANG J Y, WANG H X, et al. Dynamic equivalent modeling for microgrid based on GRU [C]//Energy Reports, 2020(6): 1291-1297.
- [12] 魏震波, 关翔友, 刘梁豪. 电网社区结构发现方法及其应用综述[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2600-2609.
- WEI Zhengbo, GUAN Xiangyou, LIU Lianghao. Overview of power community structure discovery algorithms and their application in power grid analysis [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2600-2609.
- [13] 管霖, 吴亮, 卓映君, 等. 面向暂态电压控制的大电网区域划分方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3753-3759.
- GUAN Lin, WU Liang, ZHUO Yingjun, et al. Large power system partitioning method of transient voltage control [J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3753-3759.
- [14] 周炳华, 王洋, 李峰, 等. 城市能源互联网视角下的主动配电网规划设计与策略研究[J]. 华电技术, 2021, 43(1): 59-65.
- ZHOU Binghua, WANG Yang, LI Feng, et al. Research on active distribution network planning and design strategy from the perspective of urban energy internet [J]. Huadian Technology, 2021, 43(1): 59-65.
- [15] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [16] ZHENG C, WANG S R, LIU Y L, et al. A novel equivalent model of active distribution networks based on LSTM [J]. IEEE transactions on neural networks and learning systems, 2019, 30(9): 2611-2624.
- [17] 姚程文, 杨莘, 刘泽健. 基于 CNN-GRU 混合神经网络的负荷预测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3416-3424.
- YAO Chengwen, YANG Ping, LIU Zejian. Load forecasting method based on CNN-GRU hybrid neural network [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3416-3424.
- [18] 彭维珂, 聂椿明, 陈衡, 等. 基于智能算法的空冷火电机组负荷预测研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 57-64.
- PENG Weike, NIE Chunming, CHEN Heng, et al. Study on load forecasting for air cooling thermal power units based on intelligent algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 57-64.

(本文责编: 惠忻)

作者简介:

赵省军(1982), 男, 高级工程师, 从事新型电力系统构建、电力系统建设工作, zhaoxj@gs.sgcc.com.cn;

张开鹏(1974), 男, 高级工程师, 从事继电保护、农电管理、变电运行管理、调度管理工作, zhangkpww@gs-sgcc.com.cn;

付鑫权(1997), 男, 在读硕士研究生, 从事电力系统数据分析及负荷特性分析研究, 745034344@qq.com;

刘志栋*(1990), 男, 工程师, 从事电网运行方式管理工作, 867533440@qq.com。

*为通信作者。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.004

计及用户端调节容量的变频空调自适应电压 调控策略

Adaptive voltage regulation strategy for inverter air conditioners considering
the regulation capacity on user side

华咏竹, 谢强强*, 秦会斌, 邵李焕, 崔佳冬

HUA Yongzhu, XIE Qiangqiang*, QIN Huibin, SHAO Lihuan, CUI Jiadong

(杭州电子科技大学, 杭州 310018)

(Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

摘要: 随着分布式新能源的高比例接入以及电动汽车的普及, 配电网过电压、欠电压、电压波动等电压质量问题与日俱增。变频空调作为一种常见的柔性负荷, 可以改变自身的运行功率为配电网提供电压调节服务, 提高配电网的电压质量。然而, 利用用户侧资源为配电网提供电压调节服务需要考虑用户侧资源的电压调节容量, 为此, 提出了一种计及用户端调节容量的变频空调自适应电压调控策略, 通过逐步计算各个节点的电压调节功率来控制补偿功率, 并建立空调的热电等效模型描述房间热动态变化, 评估空调电压调节潜力。为了验证所提出的调控策略的有效性, 计及用户端调节容量的变频空调自适应电压调控策略将用于IEEE 33节点配电系统进行配电网电压优化仿真, 仿真结果证明所提出的计及用户端调节容量的变频空调自适应电压调控策略, 能够保证配电网电压不越限的前提下, 减少调节所需的补偿功率, 并充分发挥空调的电压调节潜力。

关键词: 电压调节; 空调; 配电网; 新能源并网; 碳中和; 新型电力系统

中图分类号: TK 01*8

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2022)02-0021-08

Abstract: High penetration access of distributed renewable energy and the popularization of electric vehicles have led to voltage quality problems such as over-voltage, under-voltage and voltage fluctuation in the distribution network. As a common flexible load, the inverter air conditioner (AC) can change its operating power, provide voltage regulation service for distribution network and improve the voltage quality of distribution network. However, it is necessary to consider the voltage regulation capacity on user side as providing voltage regulation service for distribution network. Therefore, an adaptive voltage regulation strategy considering the regulation capacity on user side of inverter AC is proposed. The compensation power is controlled by calculating the voltage regulation result at each node, and the voltage regulation potential of ACs can be evaluated by the AC thermoelectric equivalent model which is established to describe the dynamic characteristics of the indoor temperature. In order to verify the effectiveness of the proposed regulation strategy, the adaptive voltage regulation strategy of inverter ACs will be simulated in an IEEE 33 node distribution system. In the regulation process, the regulation capacity on user side is considered. The simulation results show that the proposed adaptive voltage regulation strategy of inverter ACs can reduce the compensation power required for regulation without over-voltage and under-voltage events, which gives full play to the voltage regulation potential of ACs.

Keywords: voltage regulation; AC; distribution network; new energy grid connection; carbon neutrality; new power system

0 引言

随着“双碳”目标的推进落实和新型电力系统的加速构建, 光伏发电产业的迅猛发展, 光伏发电的并网容量不断增大, 光伏发电的间歇性将加剧配电网的电压波动^[1], 造成电网逆潮流、过压等问

题^[2-3]。此外, 为响应节能减排的号召, 电动汽车呈现井喷式增长, 大规模电动汽车接入配电网充电, 造成配电网线路潮流越限, 引发欠压问题^[4]。过压和欠压问题将影响配电网的供电质量, 导致电气设备无法正常工作甚至损坏。因此, 为了保证配电网电压质量, 电压调节服务变得越发重要^[5]。

传统的电压调节服务通过无功补偿来实现^[6-7]。传统的无功功率调节设备有同步调相机、有载调压

收稿日期: 2021-11-01; 修回日期: 2022-01-06

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LQ18E070002)

变压器和并联电容器^[8-10]。这些设备在调节过程中存在滞后,无法快速响应电压调节。此外,由于配电网线路的电阻和电容比值远大于输电线,有功功率补偿对电压调节效果较好^[11]。

近些年,随着信息和通信技术快速发展,用户侧的柔性负荷可被远程监控,通过改变其运行功率可为电力系统提供电压调节辅助服务,成为需求响应资源^[12-13]。柔性负荷是具备灵活特性的负荷,可对其进行时间或者空间的转移,响应电网的调控^[14]。在众多柔性负荷中,空调的能耗占据楼宇总能耗的 40% 以上^[15]。建筑能够在一定时间内存储空调所产生热能,使房间温度不会发生剧烈的变化^[16],空调可以在一定时间内调节自身的运行功率,而不影响用户的使用效果,可为配电网提供电压调节服务^[17]。目前,国内外已开展大量利用空调来优化配电网的相关研究。文献[18]在考虑室外温度变化的前提下,建立了空调的等效热参数模型,用于评估空调在电力系统调节服务中的潜力。文献[19]利用了空调等效电路模型计算房间的温度,从而保证用户的舒适度,并根在此基础上调节空调参与电力系统的优化。文献[20]提出了一种高精度的改进二维热工参数模型来评估房间的热动态变化过程,在保证用户舒适度的前提下,对配电网的电压进行优化。文献[21]以一阶等效热参数模型表征空调房间的热动态过程并评估调节潜力,根据调节潜力对空调进行分群。根据空调的集群,削减空调的运行功率,参与电网的需求响应。然而,准确评估空调调节潜力,需要建立一个精确的空调热电模型来计算房间温度,以保证用户的舒适度^[22]。考虑太阳辐射、电气设备以及用户热辐射等因素对房间温度影响的研究较少,导致上述模型对空调调节潜力的评估不准确。

在配电系统运营商调控空调参与配电系统电压调节的过程中,需要对配电网的潮流进行计算。根据配电网电压的越限情况,计算所需的补偿功率。常用的潮流计算方法有 Gauss-Seidel 法、Newton-Raphson 法、 $P-Q$ 分解法。Gauss-Seidel 法在求解过程中收敛的速度很慢,计算需要耗费大量的时间;Newton-Raphson 法在非线性方程式的计算过程中具有良好的收敛性,是最为普遍的一种潮流计算方法^[23]; $P-Q$ 分解法根据配电网特性对 Newton-Raphson 法的雅各比矩阵进行简化,从而降低迭代耗费的时间,然而由于简化受到配电网特性的限制, $P-Q$ 分解法并不适用于所有的配电网结构。此外,遗传算法和粒子群优化算法等优化算法被用于解决非线性电压调节问题。这些优化算法通常需要经过大量

的迭代过程获得最优解,耗费大量的计算资源和计算时间^[24]。电压灵敏度法能够利用 Newton-Raphson 算法计算所得的电压灵敏度矩阵,直接计算获得电压调节所需的无功功率和有功功率,将配电网电压调节至允许范围内。然而,当节点电压越限较为严重时,利用敏感系数法计算出的补偿功率通常远大于实际所需值,从而导致节点上需要配置更多的电压调节资源。在现实情况中,用户侧的空调数量有限,通过敏感系数法计算出的补偿功率通常会超出空调所能提供的最大调节功率。

为解决上述问题,本文提出了一种计及用户端调节容量的变频空调自适应节点电压调控策略,用于优化空调参与电压调节的过程。该调控策略由 3 部分组成:房间热动态通过建立详细的空调热电模型,保证房间温度保持在舒适范围内;自适应节点电压调节算法用于计算电压调节的补偿功率;空调分类调控算法用来调整空调的运行功率,为电压调节提供有功功率补偿。本文主要的研究方向也分为相应的 3 部分。(1) 提出详细的空调热电模型用于电压调节服务。该模型考虑了太阳辐射,电气设备以及用户的热辐射等因素,能够准确描述房间内部的热动态变化,评估空调的电压调节潜力。(2) 提出自适应节点电压调节算法用于计算配电网电压调节所需的补偿功率。该算法考虑用户侧灵活资源的容量,利用较少的有功功率实现对配电网的电压调节。(3) 提出空调分类调控策略用于解决电压越限问题。根据房间温度对空调进行分类,按照分类情况将电压调节所需的补偿功率分配给参与调节服务的空调,在保证房间舒适温度的前提下,充分发挥空调的电压调节潜力。

1 空调的热电等效模型

空调的热电等效模型由房间的热模型和空调的电模型组成。空调的电模型能够描述空调工作状态和空调热增益之间的关系,其中空调的热增益是影响房间温度的重要因素之一^[25]。房间的热模型能够用来描述房间的热动态变化,在空调参与调节过程中,通过计算获取房间的实时温度,避免房间温度超出舒适范围^[26]。因此,建立空调的热电等效模型是评估空调调节潜力的关键。

1.1 房间热模型

由于空调在参与电压调节服务过程中,需要考虑房间温度变化对用户的影响。房间的温度变化主要受房间内外的温度差和空调工作状态的影响。然而,光照、房间内电气设备和用户的热辐射也影响房间温度和空调的运行状态,在考虑上述影响因

素后,房间等效热参数模型如图1所示,其中:GND代表地线; C_a 为空调的等效热容量; t_{in} 和 t_{out} 分别为房间温度和室外温度; R 是等效热阻; P_{cool_AC} 为空调的制冷功率; H_{solar} 和 $H_{eq\&oc}$ 分别为太阳辐射和房间内电气设备用户所产生的热增益。房间的热动态可以表述为

$$C_a \frac{dt_{in}}{dt} = \frac{(t_{out} - t_{in})}{R} + P_{cool_AC} + H_{eq\&oc} + H_{solar}(t), \quad (1)$$

$$H_{eq\&oc} = \varepsilon_{eq} \times A + \varepsilon_{oc} \times N_{oc}, \quad (2)$$

$$H_{solar}(t) = P_{solar} \times \cos \delta(t), \quad (3)$$

式中: ε_{eq} 和 ε_{oc} 分别为电气设备和用户产生热增益的系数; A 为房间面积; N_{oc} 为房间内用户的数量; P_{solar} 为太阳辐射强度; $\delta(t)$ 为辐射角度。

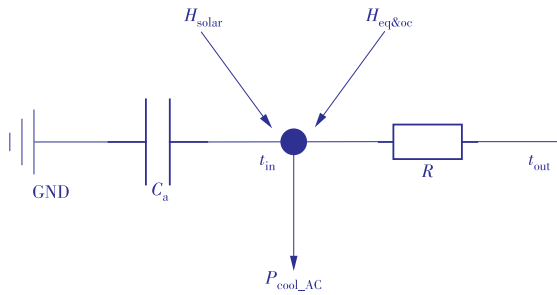


图1 等效热参数模型

Fig. 1 Equivalent thermal parameter model

1.2 空调电模型

空调电模型能够描述空调将电能转换成热能的过程。与传统的定频空调相比,变频空调能够改变压缩机的运行频率和运行功率,从而使房间温度达到设定温度,避免室温发生大幅波动。由于空调运行功率主要由压缩机消耗,因此空调的运行功率和制冷功率取决于压缩机的频率,

$$P_{cool_AC} = \alpha \times f_{AC}^2 + \beta \times f_{AC} + \gamma, \quad (4)$$

$$P_{operating_AC} = \mu \times f_{AC} + \nu, \quad (5)$$

$$P_{cool_AC} = \frac{2P_{operating_AC}^2 - 2\alpha \times \nu \times P_{operating_AC}}{u^2} + \frac{\alpha \times \nu^2}{\mu^2} + \frac{\beta \times P_{operating_AC} - \beta \times \nu}{\mu} + \gamma, \quad (6)$$

式中: f_{AC} 为空调压缩机的运行频率; α, β, γ 分别为变频空调制冷功率方程式的系数; μ 和 ν 为变频空调运行功率方程式的系数; $P_{operating_AC}$ 为空调的运行功率。

当空调不参与调节服务时,空调的制冷功率能够使房间温度保持在设定温度,

$$P_{operating_AC} = (t_{set} - t_{out})R - H_{eq\&oc} - H_{solar}(t), \quad (7)$$

式中: t_{set} 为设定温度。当空调参与调节服务时,空调压缩机频率发生变化,从而导致空调功率变化,变化的空调功率可以表示为

$$\Delta P_{operating_AC} = \mu \times \Delta f(t). \quad (8)$$

2 配电网潮流优化

2.1 配电网电压问题

电力系统的供电质量将直接影响用户电器设备的使用。根据《IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality》,配电网电压标幺值需要控制在0.9~1.1^[27]。简单的配电网模型如图2所示,其中: U_{e1}, U_{e2}, U_{ei} 为用户1用户2和用户*i*端的电压; U_1, U_2 和 U_i 为节点电压; Z_1 和 Z_2 为配电线路上的阻抗; Z_{e1} 和 Z_{e2} 为服务线路上的阻抗; U_0 为参考节点的电压。

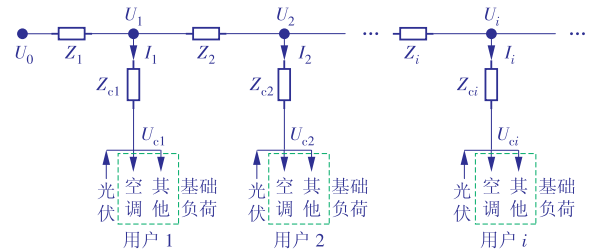


图2 简单配电网模型

Fig. 2 Simple distribution network model

光伏发电集中在白天,光照良好时,光伏出力超过用户的负荷,形成逆潮流,若电压标幺值大于1.1且持续时间超过1 min,引发过电压问题^[28];当光伏发电停止输出,则用户负荷量上升,若电压标幺值小于0.9且持续时间超过1 min,引发欠压问题。此外,由于传输线路用户1和用户2端的电压将小于参考电压,其电压值为

$$U_{ei} = U_{i-1} - Z_i(I_i + I_{i+1} + \dots) - Z_{ei} \times I_i, \quad (9)$$

$$U_i = U_{i-1} - Z_i(I_i + I_{i+1} + \dots), \quad (10)$$

式中: U_i 和 U_{ei} 分别为节点*i*的电压和用户端电压; Z_i 为节点*i-1*和节点*i*之间线路阻抗; I_i 为*i*节点电流。

2.2 敏感系数法

敏感系数法是解决非线性电压调节问题的一种有效方法^[29]。电压灵敏度系数法通过节点敏感系数和电压越限值计算获得配电网电压调节所需的补偿功率。通过牛顿-拉夫逊潮流算法可以计算获得雅可比矩阵。电压灵敏度系数矩阵*S*则是雅可比矩阵的逆矩阵

$$S = \text{Jacobian Matrix}^{-1} = \begin{bmatrix} S_{\theta P} & S_{\theta Q} \\ S_{UP} & S_{UQ} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}, \quad (12)$$

式中: $S_{\theta P} = \partial \Delta P / \partial \theta$, $S_{\theta Q} = \partial \Delta Q / \partial \theta$, $S_{UP} = U \times \partial \Delta P / \partial U$, $S_{UQ} = U \times \partial \Delta Q / \partial U$; ΔP 和 ΔQ 分别为电压补偿所需的有功功率和无功功率; $\Delta \theta$ 和 ΔU 分别为节点相角和电压的越限量。 $\Delta \theta$ 和 ΔU 可以表示为

$$\Delta\theta(t) = \Delta\theta_1(t), \Delta\theta_2(t), \dots, \Delta\theta_i(t), \quad (13)$$

$$\Delta U(t) = \Delta U_1(t), \Delta U_2(t), \dots, \Delta U_i(t), \quad (14)$$

$$\Delta U_i(t) = \begin{cases} U_i(t) - U_{\max}, & U_i(t) > U_{\max} \\ U_i(t) - U_{\min}, & U_i(t) < U_{\min} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_{\max} 和 U_{\min} 为电压上限和电压下限。当存在节点电压超过电压上限或者电压下限时, 需要计算配电网电压优化所需的补偿功率

$$\Delta P(t) = S_{\text{UP}}^{-1}(t)U(t). \quad (16)$$

配电网存在的欠压或者过压问题可通过敏感系数法计算补偿功率 $\Delta P(t)$ 来消除。然而敏感系数法没有考虑节点上可用的电压调节资源是否足够, 为此本文提出了一种自适应节点电压调节算法来优化用户端的调压资源参与配电网电压调节。

3 自适应节点电压调节算法

由图 1 可知, 用户端的电压波动主要由光伏设备和电器设备负荷引起, 电压变化量可以表示为

$$\Delta U_{ci} = Z_{ci}I_{ci} \approx \frac{R_{ci}(P_{\text{base-}ci} - P_{\text{PV-}ci}) + X_{ci}Q_{\text{base-}ci}}{U_{ci}}, \quad (17)$$

式中: R_{ci} 和 X_{ci} 分别为节点 $i-1$ 和节点 i 的线路阻抗中的电阻和电抗; I_{ci} , $P_{\text{base-}ci}$ 和 $Q_{\text{base-}ci}$ 分别为节点 i 处的基础负荷电流, 有功功率和无功功率。由式(16)可知, 基础负荷和光伏输出的变化都会引起配电网电压波动, 空调的能耗在基础负荷中占据比例巨大。因此, 调节越限节点上的空调运行功率能有效解决电压越限的问题。

敏感系数法调节的对象是整个配电网所有节点, 而本文所提出的自适应节点电压调节算法则对越限节点进行逐一调节, 因此更具有针对性, 该算法的流程如图 3 所示。当配电网出现过电压问题时, 按照节点的电压值从大到小进行排序, 选择电压最大的节点进行调节。过电压调节过程中需要提高空调的运行功率, 房间温度越高, 空调参与调节的时间越长, 调节容量也就越大。为保证用户舒适度, 从该节点中筛选出房间温度高于 22°C 的空调, 提高其压缩机的运行频率, 为该节电过压调提供补偿功率 ΔP_i 。当配电网出现欠电压问题时, 按从小到大对节点电压进行排序, 选择电压最小的节点进行调节。欠电压调节过程中需要降低空调的运行功率, 房间温度越低的空调参与调节的时间越长, 调节容量也就越大。为保证用户舒适度, 从该节点中筛选出房间温度小于 26°C 的空调, 降低压缩机的运行频率, 为该节电过压调提供 ΔP_i 。

空调参与电压调节所提供的最小功率组合可

以表示为

$$\Delta P_i = \mu(\Delta f_{\text{AC}_1} + \Delta f_{\text{AC}_2} + \dots + \Delta f_{\text{AC}_i} + \dots + \Delta f_{\text{AC}_m}), \quad (18)$$

式中: μ 为调节系数; Δf_{AC_i} 为第 i 个空调改变的压缩机运行频率。

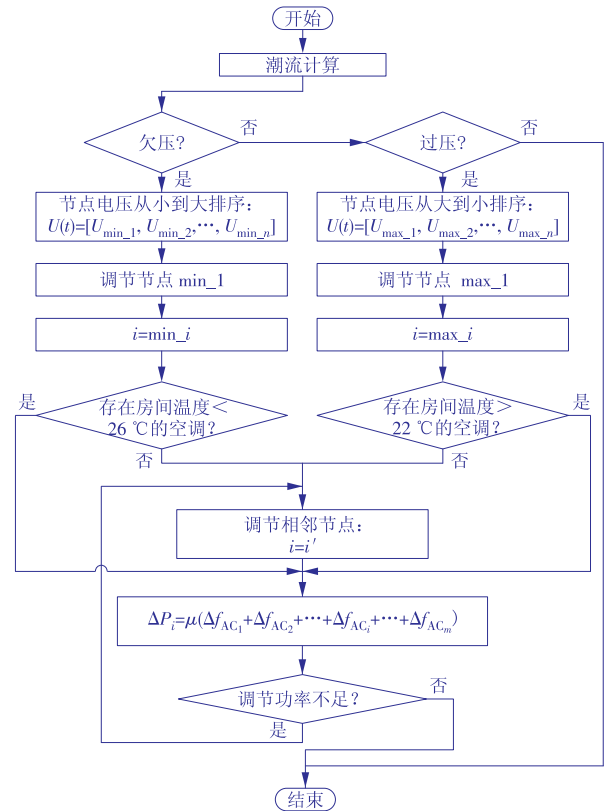


图 3 自适应节点电压调节算法流程

Fig. 3 Voltage regulation algorithm for the adaptive nodes

4 试验与结果

4.1 测试系统和参数

在 MATLAB 软件中, 采用 IEEE 33 节点配电系统对低压配电网进行仿真, 验证所提出的自适应节点电压调节算法的有效性。IEEE 33 节点配电系统如图 4 所示, 节点 1 为参考节点, 其他节点为“PQ”节点, 每个节点存在 100 个用户, 光伏和空调的渗透率分别为 85% 和 100%, 空调和热模型参数见表 1。仿真时间从第 1 天的 06:00 到第 2 天的 06:00, 总共 288 个时间节点, 每个时间节点为 5 min。光伏和基础负荷的功率来自于文献[30], 其功率曲线如图 5 所示, 图中褐色曲线表示光伏输出功率(PV), 黄色曲线表示居民日常负荷(LOAD), 粉色曲线则表示两者之差(PV-LOAD)。光伏发电的时间为 05:00—19:00, 05:00—11:30 的功率逐渐上升且最大发电功率为 7.45 MW, 11:30—19:00 功率逐渐下降, 直至为 0。全天的功率在 2.67~4.59 MW 间波动。

4.2 测试结果

当空调未参与配电网电压调控时, 房间温度曲

表 1 热电等效模型参数

Table 1 Thermoelectric equivalent model parameters

参数	定义	单位	取值范围
t_{in}	房间温度	℃	22~26
t_{set}	设定温度	℃	22~26
α	空调制冷功率方程系数		(-90.72,10.00)
β	空调制冷功率方程系数		(3 265.92,800.00)
γ	空调制冷功率方程系数		(-4 193.28,800.00)
μ	空调制运行率方程系数		(0.007 2,0.000 5)
ν	空调制运行率方程系数		(-0.009 6,0.000 5)
C_a	空气等效热容量	℃/kW	(0.48,0.10)
R	房间等效热阻	kW·h/℃	(8.33,0.10)
f_{AC}^{max}	压缩机最大频率	Hz	180

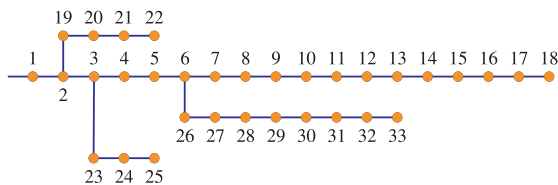


图 4 IEEE 33 节点配电系统

Fig. 4 IEEE 33 node power distribution system

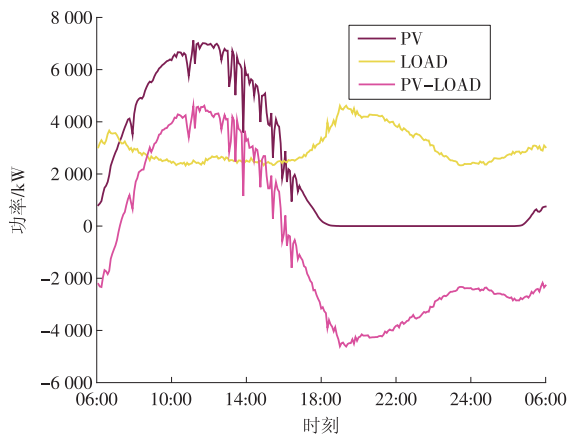


图 5 光伏和基础负荷数据

Fig. 5 Aggregated data of photovoltaics and base load

线和电压曲线如图 6—7 所示。图 6 为空调未参与电压调节时,100 台空调温度变化曲线,房间温度将逐渐下降至空调的设定温度并趋于稳定。在图 7 中每条曲线代表一个节点的电压变化,其中灰色曲线表示该节点电压标幺值在 0.9~1.1,而节点 16—18 的电压波动超出允许范围。由图 7 可知,节点 18 和节点 17 存在过压问题,节点 16—18 存在欠压问题。由于节点 18 距离参考节点距离最远,因此电压波动最为严重,在配电网出现欠压时,其节点电压标幺值在 19:20 达到最小值,0.896 7;配电网过压时,该节点电压标幺值在 11:10 达到最大值,1.1011。

当智能电压调控算法利用空调调控配电网电压后,房间温度曲线和电压曲线如图 8—9 所示。

在 19:20 时,节点 18 处的 100 台空调共降低了

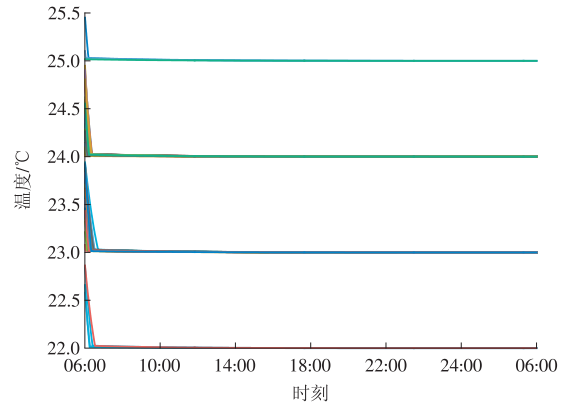


图 6 调节前房间温度曲线

Fig. 6 Curve of the room temperature before regulating

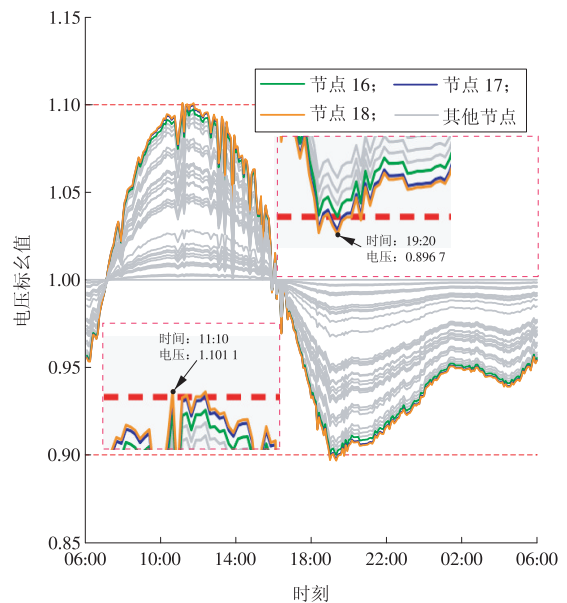


图 7 调节前的电压曲线

Fig. 7 Voltage curve before regulating

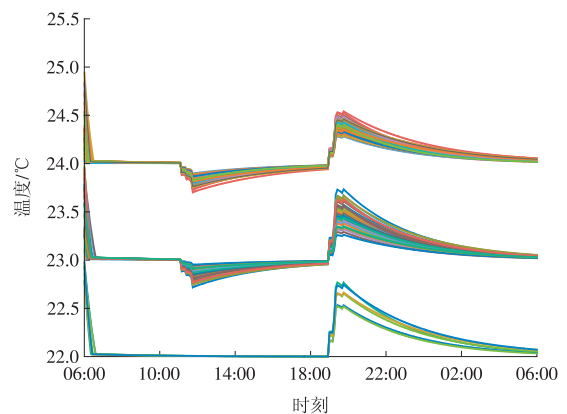


图 8 调节后房间温度曲线

Fig. 8 Curve of the room temperature after regulation

20.145 6 kW 的运行功率,节点电压标幺值从 0.896 7 上升至 0.900 3;在 11:10 时,100 台空调总的运行功率共提高了 43.780 7 kW,同时平均房间温度从 23.526 5 ℃下降至 23.450 91 ℃,节点电压

标么值从 1.1011 下降至 1.0999。

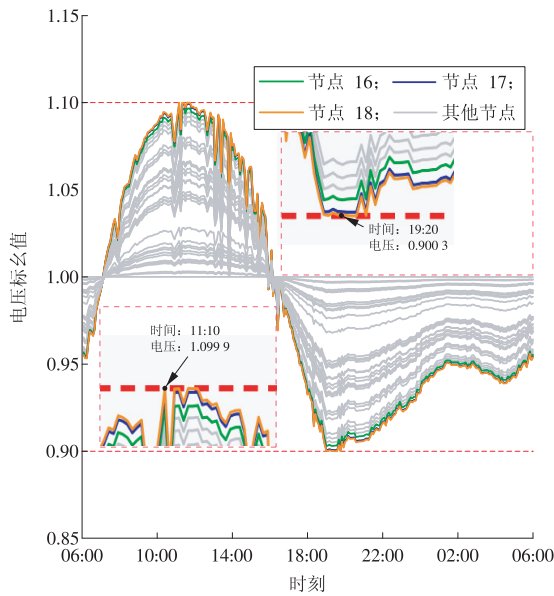


图 9 调节后的电压曲线

Fig. 9 Curve of the voltage after regulation

4.3 自适应节点电压调节算法

为了检验自适应节点电压调节算法的效果,对比了敏感系数算法对电压的调节效果。当使用敏感系数法计算配电网补偿功率时,其电压变化曲线如图 10 所示,在 19:20 时,节点 18 的节点电压标么值从 0.8967 上升至 0.9198;在 11:10 时,节点电压标么值从 1.1011 下降至 1.0903。对比智能电压调控算法和敏感系数算法的调节情况,从电压调节的效果来看,敏感系数算法需要更多的补偿功率,其节点 18 补偿功率曲线如图 11 所示。

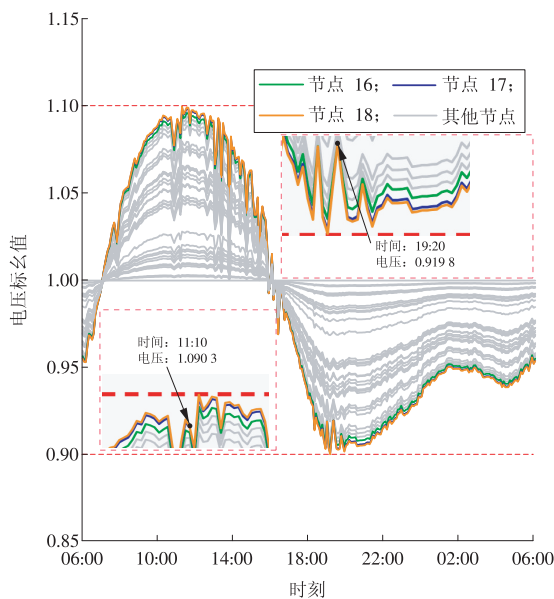


图 10 敏感系数法调节后电压曲线

Fig. 10 Curve of the voltage regulated by sensitivity coefficient method

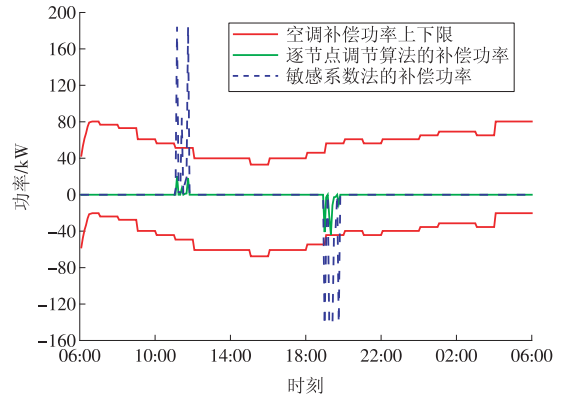


图 11 节点 18 补偿功率曲线

Fig. 11 Compensation power curve of node 18

由于空调的容量有限,当使用敏感系数法调节配电网电压时,计算所得补偿功率远远大于空调所能提供的有功功率。与此相比较,当用户端可利用的调节容量较小时,自适应电压调节算法更适用于计算电压调节所需的补偿功率。

5 结束语

本文提出利用空调作为配电网电压调节手段的自适应节点电压调节算法。当空调参与配电网电压调节服务时,需要避免空调工作状态频繁变化导致的房间温度上下波动、影响用户的舒适度。为此,本文研发了一个空调热电等效模型,用于监控房间的热动态变化,该模型充分考虑了房间内外各因素对房间温度的影响,避免房间的热动态变化误差对空调电压调节潜力评估产生影响。此外,提出的自适应节点电压调节算法充分考虑了用户侧空调电压调节容量不足的问题,能够利用有限的补偿功率解决电压越限问题。通过仿真结果可知,敏感系数法需要大量的补偿功率用于配电网电压调节,而自适应节点电压调节算法弥补了空调调节容量不足的缺陷,能够利用较少的补偿功率为配电网提供电压调节服务,提高配电网的供电质量。

参考文献:

[1] VISSER L R, SCHUURMANS E M B, ALSKAIF T A, et al. Regulation strategies for mitigating voltage fluctuations induced by photovoltaic solar systems in an urban low voltage grid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021(1):107695.

[2] ROSINI A, MESTRINER D, LABELLA A, et al. A decentralized approach for frequency and voltage regulation in islanded PV-storage microgrids [J]. Electric Power Systems Research, 2021(193):106974.

- [3]郑晓莹,陈政轩,曾琮.含分布式电源的配电网双层分区调压策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):90-97.
ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong. Double layer zoning voltage regulation strategy of distribution network with distributed generation [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 90-97.
- [4]苏粟,胡勇,王玮,等.基于电动汽车无功补偿的配电网电压调控策略[J].电力系统自动化,2017,41(10):72-81.
SU Su, HU Yong, WANG Wei, et al. Voltage regulation strategy of distribution network based on electric vehicle reactive power compensation [J]. Power System Automation, 2017, 41(10): 72-81.
- [5]FATHOLLAHI A, KARGAR A, DERAKHSHANDEH S Y. Enhancement of power system transient stability and voltage regulation performance with decentralized synergetic TCSC controller [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022(135): 107533.
- [6]MA W, WANG W, CHEN Z, et al. Voltage regulation methods for active distribution networks considering the reactive power optimization of substations [J]. Applied Energy, 2021(284): 116347.
- [7]刘会强,慕腾,邢华栋,等.基于解耦自抗扰控制的光伏并网稳定研究及应用[J].华电技术,2021,43(8):11-19.
LIU Huiqiang, MU Teng, XING Huadong, et al. Research on PV power grid connection stability based on decoupled active disturbance rejection control [J]. Huadian Technology, 2021, 43(8): 11-19.
- [8]林安妮,黄永章,林伟芳,等.不同动态无功补偿装置对直流系统故障引发送端暂态过电压的抑制效果对比[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):116-122.
LIN Anni, HUANG Yongzhang, LIN Weifang, et al. Comparison of suppression effects of different dynamic reactive power compensation devices on sending terminal transient overvoltage caused by DC system fault [J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 116-122.
- [9]伍惠斌,王淳,尹发根,等.基于功率控制的含高渗透率户用光伏低压配电网电压控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):27-35.
WU Huicheng, WANG Chun, YIN Fagen, et al. Voltage control strategy of household photovoltaic low-voltage distribution network with high permeability based on power control [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 27-35.
- [10]王文宾,靳伟,李洪涛,等.考虑光伏集群无功贡献的配电网无功电压优化调节方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):114-123.
WANG Wenbin, JIN Wei, LI Hongtao, et al. Optimal regulation method of reactive power and voltage of distribution network considering reactive power contribution of photovoltaic cluster [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 114-123.
- [11]XIE Qiangqiang, HUI Hongxun, DING Yiet al. Use of demand response for voltage regulation in power distribution systems with flexible resources [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(5): 883-892.
- [12]李彬,杨帆,赵燕玲,等.基于边缘物联代理的综合需求响应关键技术研究[J].华电技术,2021,43(4):56-62.
LI Bin, YANG Fan, ZHAO Yanling, et al. Research on key technologies for integrated demand response based on edge IoT agent [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 56-62.
- [13]HUI Hongxun, DING Yi, Zheng Menglian. Equivalent modeling of inverter air conditioners for providing frequency regulation service [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1413-1423.
- [14]FONTENOT H, AYYAGARI K S, DONG B, et al. Buildings-to-distribution-network integration for coordinated voltage regulation and building energy management via distributed resource flexibility [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 69: 102832.
- [15]WANG Yuanxia, WU Jianghong, XIE Fang, et al. Survey of residential air conditioning unit usage behavior under south China climatic conditions [C]//2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering. 2011: 2711-2714.
- [16]JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong, et al. Coordinated control of air-conditioning loads for system frequency regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 548-560.
- [17]RAJASEKHAR B, PINDORIYA N, TUSHAR W, et al. A survey of computational intelligence techniques for air-conditioners energy management [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2020, 4(4): 555-570.
- [18]LU Ning. An Evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.
- [19]LUO Fengji, ZHAO Junhua, ZHAO Yangdong, et al. Optimal dispatch of air conditioner loads in Southern China region by direct load control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 439-450.
- [20]吴润基,王冬晓,谢昌鸿,等.空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法[J].电力系统自动化,2021,45(6):215-222.
WU Runji, WANG Dongxiao, XIE Changhong, et al. Distributed control method of air conditioning load

participating in distribution network voltage management [J], Power System Automation, 2021, 45(6): 215-222.

[21]杨梓俊, 丁小叶, 陆晓, 等. 面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15):132-140.

YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response [J]. Power System Protection and control, 2021, 49(15): 132-140.

[22]LAKERIDOU M , UCCI M , MARMOT A , et al. The potential of increasing cooling set-points in air-conditioned offices in the UK[J]. Applied Energy, 2012, 94:338-348.

[23]HUA Y, SHENTU X, XIE Qiangqiang, et al. Voltage/frequency deviations control via distributed battery energy storage system considering state of charge [J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1148.

[24]TANG Z, HILL D J , LIU T. Fast distributed reactive power control for voltage regulation in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34 (1) : 802-805.

[25]CHE Y, YANG J, ZHOU Y, et al. Demand response from the control of aggregated inverter air conditioners [J]. IEEE Access, 2019(7): 88163-88173.

[26]MAHDAVI N, BRASLAVSKY J H .Modelling and control of ensembles of variable-speed air conditioning loads for demand response [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,

2020, 11(5): 4249-4260.

[27]E M Committee. IEEE recommended practice for monitoring electric power quality : IEEE Std 1159—2009[S].

[28]WANG S, DU L, FAN X, et al. Deep reinforcement scheduling of energy storage systems for real-time voltage regulation in unbalanced LV networks with high PV penetration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 2342-2352.

[29]AHMED M , BHATTARAI R , HOSSAIN S J , et al. Coordinated voltage control strategy for voltage regulators and voltage source converters integrated distribution system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(4):4235-4246.

[30]XIE Q, HARA R, KITA H, et al. Coordinated control of OLTC and multi-CEMSs for overvoltage prevention in power distribution system [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2017, 12 (5) : 692-701.

(本文责编:陆华)

作者简介:

华咏竹(1991),男,在读博士研究生,从事电力电子、嵌入式方面的研究工作, huayongzhu@hdu.edu.cn;

谢强强*(1987),男,讲师,工学博士,从事电力物联网方面的研究工作, xqq@hdu.edu.cn。

*为通信作者。

广 告 索 引

郑州科润机电工程有限公司 (后插1)

华电水务科技股份有限公司(跨版) (后插2,3)

华电环保系统工程有限公司(跨版) (后插4,5)

中国华电科工集团有限公司新能源
技术开发公司 (后插6)

国家能源生物燃气高效制备及综合利用技术
研发(实验)中心 (后插7)

华电综合智慧能源科技有限公司 (后插8)

华电通用轻型燃机设备有限公司 (后插9)

郑州华电能源科技有限公司(跨版) (后插10,11)

华电重工股份有限公司(跨版) (后插12,13)

中国华电科工集团有限公司总承包
分公司(跨版) (后插14,15)

华电科工安全环境质量科学研究所 (后插16)

山东华电节能技术有限公司 (后插17)

《华电技术》更名启事 (后插18)

华电郑州机械设计研究院有限公司 (封三)

中国华电科工集团有限公司 (封底)

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.005

基于拓扑重构与分布式电源调度的配电网灾后恢复策略

Post-disaster restoration strategy of power distribution systems based on topology reconfiguration and distributed generation scheduling

王卓容,石庆鑫*

WANG Zhuorong, SHI Qingxin*

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要:为提升配电系统在极端天气下的弹性,提出一种配电网灾后恢复算法。针对系统发生N-k故障的场景,建立拓扑重构与分布式电源协同调度模型,最小化灾害带来的切负荷损失。在调度模型中,通过混合整数线性方程表征故障场景下的网络保持辐射状拓扑约束、分布式电源约束与系统潮流约束。该方法综合考虑了可调度分布式能源、不可调度分布式能源,以及旁路电容器的运行特性。以IEEE 33节点系统为例,选取相对严重的灾害场景,验证了故障后恢复算法的有效性。

关键词:极端天气;灾后恢复;配电网弹性;拓扑重构;分布式电源;旁路电容器

中图分类号:TM 7:TK 514 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0029-06

Abstract: A post-disaster restoration (PDR) strategy is proposed to enhance the resilience of power system against extreme weather. Under the N-k fault scenarios, a cooperative dispatching model of topological reconfiguration and distributed generators (DGs) is established to minimize the load-shedding cost due to disasters. The PDR strategy model characterizes the radial topological constraints, DG scheduling constraints and system power flow constraints in fault scenarios as a set of mix integer linear equations. The proposed method fully considers the operating characteristics of dispatchable DGs, non-dispatchable DGs and shunt capacitors. Finally, the proposed PDR strategy is validated by an IEEE 33-bus system in serious fault scenarios.

Keywords: extreme weather; post-disaster restoration (PDR); distribution system resilience; topology reconfiguration; distributed generator; shunt capacitor

0 引言

近年来全球气候变化导致极端天气频发,给国内外的电力系统乃至社会经济造成了严重的损失。例如,2017年发生在美国的哈维、艾玛、玛利亚台风引发了城市配电网的大规模停电,共造成2 000亿美元经济损失^[1]。2021年河南郑州的7·20水灾,共造成479条10 kV线路停运,1.24万个配电台区不同程度停电^[2]。为了评估配电网抵御小概率、后果严重的自然灾害的能力以及灾后恢复供电的能力,学术界与工业界共同提出了弹性电网的概念,并发展成为一个重要的研究方向^[3]。

衡量配电网弹性的指标包括切负荷的经济损失与系统恢复供电的时间^[4]。近年来,国内外学者针对提升配电网弹性做了大量工作。主要方法可以总结为3个方面:一是加固关键的配电网杆塔以降低其因灾损毁的概率^[5];二是建设更多的备用线路,当某些线路发生故障时,通过拓扑重构来保证网络的连通性^[6-9];三是在配电网关键负荷附近安装分布式电源,在灾后电网成为孤岛时形成微网,以供应本地重要负荷。一般地,分布式电源包括分布式柴油发电机(Distributed Generator, DG)、光伏(Photovoltaic, PV)发电系统、电池储能系统等^[10-11]。

文献[11]将配电网的运行模式分为“常规模式”与“自恢复”模式;在“自恢复”模式中,系统被分割为若干个依赖DG供电的微网。文献[12]采用改进的维特比算法优化了系统的拓扑重构方案,但未

收稿日期:2021-12-20;修回日期:2022-01-15
基金项目:华北电力大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2021MS008)

考虑多种分布式电源的最优调度。文献[13]提出一种动态微网的形成方法,最大化系统灾后恢复的负荷。文献[14]提出一种基于模型预测控制算法的恢复策略,但该策略只考虑有功功率,忽略了与无功功率和电压的约束,且未能考虑网络拓扑重构。文献[15]提出一种主-从分布式电源调度与拓扑重构方法,使恢复的负荷最大化。文献[16]提出一种两阶段恢复算法,第1阶段确定重构的拓扑,第2阶段调度 DG 和负荷恢复量。文献[17]提出一种两阶段的弹性提升方法,第1阶段规划远动开关的位置,第2阶段在现有远动开关的基础上实现减负荷最小化。文献[18]提出一种多时间步长的动态的网络重构方法,每个时间步长进行 DG 调度。但是,频繁闭合、开断开关会影响开关元器件的寿命。如果有足够的历史运行数据,可以建立一个基于数据驱动的最优 DG 调度策略以提高弹性^[19]。总体上讲,以上文献虽然充分利用了 DG 为负荷供电,但几乎都是基于以下假设。

(1)调度策略没有充分利用主网为配电网负荷供电。事实上,主网由于冗余度高,负荷节点发生断电的概率通常小于配网。

(2)分布式电源的输出功率足以承担附近的所有负荷。

基于上述分析,本文提出了一种配电网灾后恢复(Post-disaster Restoration, PDR)策略,提升系统在极端天气(如台风、洪水等)下的弹性。该算法还利用了联络线和不同类型的可调度与不可调度的分布式电源。本文创新点总结如下。

(1)提出一种依赖线性约束条件的最优拓扑重构方法,最大限度地地为负荷供电。采用虚拟网络方法,保证配电网拓扑重构过程中保持辐射状结构。

(2)故障后最优分布式电源调度考虑了不同资源的协同运行,包括可调度的柴油发电机、不可调度的 PV 发电系统、需求响应以及具有电压调节功能的器件,如并联电容器。

1 配电系统运行特点

配电系统通常由一条或几条馈线组成,每条馈线都有几条支路。系统的保护装置是基于辐射状拓扑结构设计的,每条馈线都安装了常闭分段开关,并有几个常开开关连接馈线的末端。

极端天气事件发生后,由于线路故障,馈线的某个部分可能形成孤岛。闭合与之相连的备用线路可将这个孤岛连接到另一条馈线,并且调度分布式电源为附近负荷供电,使切负荷的损失最小化^[6],而新的拓扑结构在损坏的线路修复之前保持不变,

这种操作方式叫做配电网拓扑重构。一般情况下,存在多种重构方法保证系统的辐射状结构。因此,PDR的目的是找出最优的网络拓扑,使系统修复期间的运行成本最低。

2 配电网灾后恢复策略

2.1 目标函数

目标函数主要包含 2 个部分,第 1 部分是切负荷的补偿费用,第 2 部分为可调度分布式电源的运行费用,且假设光伏系统的运行成本为 0。在调度周期内,网络拓扑保持不变。在极端天气条件下,供应更多的电力负荷(减少缺供电量)比减少费用更重要。为了在极端事件中分布式电源持续时间更长,维持最低成本的分布式电源运行,所以目标函数中也包含了可调度分布式电源的成本,其表达式为

$$\min \sum_{t=1}^{|\Omega_t|} \Delta t \left(\sum_{j=1}^{|\Omega_{N,L}|} c_j^L \Delta P_{j,t}^L + \sum_{j=1}^{|\Omega_{N,G}|} c^G P_{j,t}^G \right), \quad (1)$$

式中: t, Ω_t 分别为时间指标和时间集合; $j, \Omega_{N,L}, \Omega_{N,G}$ 分别为节点指标、负荷节点集合、发电机节点集合; $|\cdot|$ 表示集合中的元素个数; c_j^L 为节点 j 的切负荷费用; $\Delta P_{j,t}^L$ 为节点 j 在 t 时段的切负荷量; c^G 为柴油发电机的运行费用; $P_{j,t}^G$ 为位于节点 j 的柴油发电机在 t 时段的输出功率。

2.2 拓扑重构约束

在图论中,无环连通图称为树^[20],在电力系统被称为“辐射状网络”。当线路发生故障时,调度中心需要考虑到线路的功率限制,重新形成一个新的、最优的辐射状拓扑结构,使切负荷的量达到最小。此处引入了一个与原始电网具有相同拓扑结构和开关状态变量 z_{ij} 的无损虚拟网络,如图 1 所示^[15]。在这个虚拟网络中,假设每个非源节点的负荷为 1.0,则辐射状拓扑的约束为式(2)~(7)。

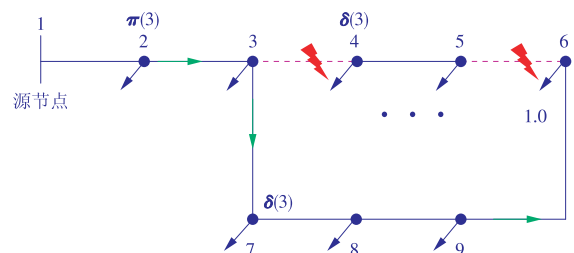


图 1 偶然故障发生后部分连接网络示意

Fig. 1 Example of a partially-connected network after a contingency

$$\sum_{ij \in \Omega_b} z_{ij} = |\Omega_N| - 1 - |\Omega_{N,fs}|, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} P_{ij} = -1, \forall j \in \Omega_N \setminus \Omega_{N,Is}, j \neq 1 \\ \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} - \sum_{i \in \pi(j)} P_{ij} = 0, \quad \forall j \in \Omega_{N,Is} \end{cases}, (3)$$

$$\sum_{k \in \delta(j)} P_{jk} = |\Omega_N| - 1 - |\Omega_{N,Is}|, j = 1, (4)$$

$$-M_1 z_{ij} \leq P_{ij} \leq M_1 z_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_B, (5)$$

$$z_{ij} = 0, \forall (i, j) \in \Omega_{B, Fa}, (6)$$

$$z_{ij} = 0, \forall (i, j) \in \Omega_{B, Is}, (7)$$

式中: z_{ij} 为开关状态(1-闭合,0-断开); Ω_N 为节点的集合; $\Omega_{N,Is}$ 为孤岛节点的集合; $\pi(j)$ 为节点 j 的相邻上游节点集合; $\delta(j)$ 为节点 j 的相邻下游节点集合; P_{jk} 为线路 (j,k) 的功率; P_{ij} 为线路 (i,j) 的功率; Ω_B 为线路的集合; $\Omega_{B, Fa}$ 为故障线路的集合; $\Omega_{B, Is}$ 为孤岛中线路的集合。

约束(2)表示闭合线路的数量等于非源节点的数量减去孤岛节点的数量。孤岛节点指在所有线路闭合的情况下,此节点与源节点没有连接路径。约束(3)表示每个节点的功率平衡,其中孤岛节点的负荷为0。约束(4)表示与源节点直接相连线路的功率。约束(5)是基于大 M 法的线路潮流约束,其中, M_1 是个足够大的常数^[21]。若 $z_{ij}=0$,则流过线路 (i,j) 的功率为0。约束(6)表示故障线路被远动开关断开后,在被修复之前保持开路。约束(7)表示这个虚拟网络中的孤岛线路无法与主网联通,因而功率为0。

2.3 系统运行约束

一般而言,柴油发电机发1 kW·h电的成本高于从电力市场购电的费用。因此,本文假设只有在发生N-k故障时才使用可调度的分布式电源。PDR算法受到设备运行约束和系统潮流约束。

系统运行约束为式(8)~(23)。由于此类约束条件均与时间有关,为简单起见,每个等式后都省略了表达式 $\forall t \in \Omega_T$ 。

$$P_j^{\text{Gmin}} \leq P_{j,t}^{\text{G}} \leq P_j^{\text{Gmax}}, \forall j \in \Omega_{N,G}, (8)$$

$$P_{j,t}^{\text{PV}} = \min(Irr_t \cdot P_j^{\text{PV,rated}}, P_j^{\text{PV,rated}}), \forall j \in \Omega_{N,PV}, (9)$$

$$0 \leq \Delta P_{j,t}^{\text{L}} \leq \gamma_{j,t} P_{j,t}^{\text{L}}, \forall j \in \Omega_N, (10)$$

$$\beta_j = \frac{Q_{j,t}^{\text{L}}}{P_{j,t}^{\text{L}}} = \frac{\sqrt{1 - (\cos \varphi_j)^2}}{\cos \varphi_j}, \forall j \in \Omega_N, (11)$$

$$\Delta Q_{j,t}^{\text{L}} = \beta_j \Delta P_{j,t}^{\text{L}}, \forall j \in \Omega_N, (12)$$

$$Q_{j,t}^{\text{C}} = Q_j^{\text{C,rated}} V_{j,t}^2 \approx Q_j^{\text{C,rated}} (2V_{j,t} - 1), \forall j \in \Omega_{N,C}, (13)$$

$$P_{j,t} = P_{j,t}^{\text{G}} + P_{j,t}^{\text{PV,mp}} + 0 - (P_{j,t}^{\text{L}} - \Delta P_{j,t}^{\text{L}}), \forall j \in \Omega_N, (14)$$

$$Q_{j,t} = 0 + 0 + Q_{j,t}^{\text{C}} - (Q_{j,t}^{\text{L}} - \Delta Q_{j,t}^{\text{L}}), \forall j \in \Omega_N, (15)$$

式中: $P_j^{\text{Gmax}}, P_j^{\text{Gmin}}$ 为节点 j 处发电机输出功率的上、下限; Irr_t 为 t 时段的平均太阳光照强度; $P_j^{\text{PV,rated}}$ 为节点

处光伏系统的额定功率; $\Omega_{N,PV}$ 为装设光伏系统节点的集合; $P_{j,t}^{\text{L}}$ 为节点 j 在 t 时段有功负荷; $\gamma_{j,t}$ 为 t 时段节点 j 处的切负荷比例; $Q_{j,t}^{\text{L}}$ 为节点 j 在 t 时段无功负荷需求; $\cos \varphi_j$ 为节点 j 处负荷的功率因数; $Q_{j,t}^{\text{C}}$ 为 t 时段节点 j 处并联电容器的无功输出; $Q_j^{\text{C,rated}}$ 为节点 j 处并联电容器的额定无功功率; $V_{j,t}$ 为节点 j 处 t 时段的电压幅值; $\Omega_{N,C}$ 为装设旁路电容器节点的集合; $P_{j,t}, Q_{j,t}$ 为节点 j 处 t 时段注入的有功功率; $P_{j,t}^{\text{PV,mp}}$ 为在最大功率点跟踪下,节点 j 处光伏系统在 t 时段输出的有功功率; $P_{j,t}^{\text{L}}, Q_{j,t}^{\text{L}}$ 为节点 j 处 t 时段的有功负荷、无功负荷; $\Delta Q_{j,t}^{\text{L}}$ 为节点 j 处 t 时段减少的无功负荷。

约束(8)表示柴油发电机的出力上下限,其出力可调度。约束(9)表示光伏发电系统始终在最大功率点运行,因此在正常范围内输出功率与光照强度成比例关系。约束(10)表示切负荷的上下限,其中 $P_{j,t}^{\text{L}}$ 可以通过历史负荷曲线来预测。约束(11)~(12)表示有功功率和无功功率的比值。为简化计算,本文假设负荷的功率因数始终恒定。旁路电容器(Shunt Capacitor, SC)的无功功率输出与电压平方成正比。由于节点电压在很窄的范围内波动,SC无功出力与电压的关系式可以线性化,如式(13)所示。约束(14)~(15)表示节点 j 注入有功、无功功率的平衡方程,包括发电机输出、光伏系统输出以及切负荷后的负荷需求。综合考虑以上公式,节点有功功率和无功功率表示为式(16)~(17)。注:光伏系统的无功输出、DG的无功输出以及电容器的有功输出均设置为0,则2个等式具有相似的形式。

$$P_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} P_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} P_{ij,t}, \forall j \in \Omega_N, j \neq 1, (16)$$

$$Q_{j,t} = \sum_{k \in \delta(j)} Q_{jk,t} - \sum_{i \in \pi(j)} Q_{ij,t}, \forall j \in \Omega_N, j \neq 1, (17)$$

$$-M_2(1-z_{ij}) \leq V_{i,t} - V_{j,t} - \frac{r_{ij} P_{ij,t} + x_{ij} Q_{ij,t}}{V_0} \leq M_2(1-z_{ij}),$$

$$\forall (i, j) \in \Omega_N, \forall (i, j) \in \Omega_B, (18)$$

$$-M_3 z_{ij} \leq P_{ij,t} \leq M_3 z_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_B, (19)$$

$$-M_3 z_{ij} \leq Q_{ij,t} \leq M_3 z_{ij}, \forall (i, j) \in \Omega_B, (20)$$

$$V^{\text{min}} \leq V_{j,t} \leq V^{\text{max}}, \forall j \in \Omega_N, j \neq 1, (21)$$

$$V_{1,t} = V_{\text{sub}}, (22)$$

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \leq S_{ij}^{\text{max}2}, \forall (i, j) \in \Omega_B, (23)$$

式中: $P_{ij,t}, Q_{ij,t}$ 为 t 时段线路 (i,j) 流过的有功、无功功率; $V_{i,t}$ 为 t 时段母线 i 的电压幅值; r_{ij}, x_{ij} 为线路 (i,j) 的电阻和电抗; $V^{\text{max}}, V^{\text{min}}$ 为电压的上、下限; M_2 和 M_3 为足够大的常数; S_{ij}^{max} 为线路 (i,j) 容量的最大值。

约束(16)~(17)表示节点 j 的有功与无功功率的平衡。约束(18)为基于线性化Distflow模型的潮流约束^[19]。 V_0 表示额定电压,通常设为1。若 $z_{ij}=1$,

则不等式约束转化为等式约束,表示电压降落 V_i-V_j 由线路潮流所决定。若 $z_{ij}=0$,则电压约束 V_i-V_j 松弛。约束(19)–(20)表示如果线路 (i,j) 断开,则此线路上没有功率。约束(21)为负荷节点的电压上下限。通常将变电站节点设置为平衡节点,如式(22)所示。约束(23)可以用 $P-Q$ 坐标系下的一个圆表示,如图2所示,圆的边界可以近似为一个外接多边形。因为在电力系统中,通常有 $|Q_{ij,t}| \leq |P_{ij,t}|$,所以非线性约束(23)可以等效为式(24)–(26)这3个分段线性方程。

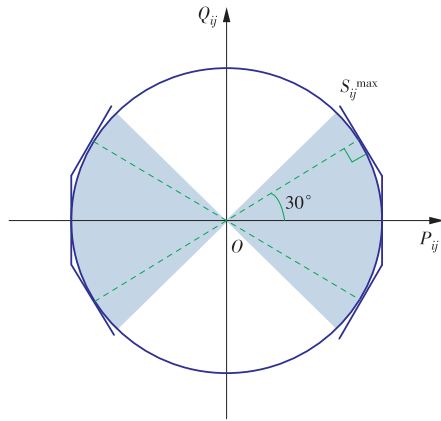


图2 线路功率限制的分段线性化示意

Fig. 2 Piece-wise linearization of line power limit

$$-2S_{ij}^{\max} \leq \sqrt{3} P_{ij,t} + Q_{ij,t} \leq 2S_{ij}^{\max}, \forall (i,j) \in \Omega_B, \quad (24)$$

$$-S_{ij}^{\max} \leq P_{ij,t} \leq S_{ij}^{\max}, \forall (i,j) \in \Omega_B, \quad (25)$$

$$-2S_{ij}^{\max} \leq \sqrt{3} P_{ij,t} - Q_{ij,t} \leq 2S_{ij}^{\max}, \forall (i,j) \in \Omega_{B^c}. \quad (26)$$

2.4 PDR方法概述

由于所有的约束都是线性的或线性化的,整个PDR方法建模为混合整数线性规划(MILP)。根据2.3节的讨论,优化模型总结如下。

目标函数:式(1);

约束条件:式(2)–(22),式(24)–(26);

决策变量: $z_{ij}, P_{j,t}^C, \Delta P_{j,t}^L$ 。

在PDR方法中,目标函数为最小化切负荷的补偿费用与柴油发电机的运行费用,约束条件包括拓扑重构约束与系统运行约束。其中,系统运行约束由发电机输出约束、切负荷上下限约束和线路潮流约束组成。

3 算例分析

本节以IEEE 33节点系统为例验证所提灾后调度策略。计算环境为具有英特尔酷睿 i7 处理器(2.8 GHz)电脑。编程由MATLAB实现,优化程序包为IBM ILOG CPLEX Optimization Studio V12.8.0。

包含分布式电源的33节点系统如图3所示,IEEE 33节点系统包含了多条支路,实线表示常闭

线路,虚线表示联络线,也即常开线路;1号节点为变电站节点,负荷分为重要负荷与非重要负荷,分别用不同颜色标注;分布式电源分为可调度的柴油发电机与不可调度的光伏发电系统;部分节点安装有旁路电容器。此外,假设1号节点至6号节点之间的线路为地下电缆,不会因极端天气而受损。系统的主要参数见表1。优化时间步长 Δt 为1 h,假设所有线路故障在第10 h发生,在第22 h得到完全修复。重要负荷和非重要负荷分别采用不同的日负荷曲线。基于预测的日负荷曲线与光照强度曲线,首先计算正常运行状态下的24 h潮流。

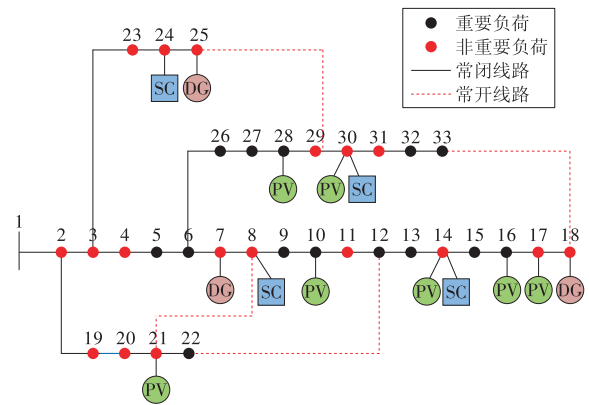


图3 包含分布式电源的33节点系统

Fig. 3 IEEE 33-bus system with DGs

表1 33节点系统相关参数

Table 1 Parameters of the IEEE 33-bus system

分类	参数	参数值
系统元件	负荷	3 715 kW+j2 300 kV·A
	柴油发电机	3台,600 kW
	光伏系统	8台,640 kW
	并联电容器	4台,1 100 kV·A
费用	c^C	1.5 元/(kW·h)
	c^L	9.0 元/(kW·h) (重要负荷) 2.5 元/(kW·h) (非重要负荷)
系统电压标么值	V^{\min}	0.93
	V^{\max}	1.05
	$V_{\text{sub}0}$	0.99

为了充分验证所提方法的作用,本节选取切负荷较严重的2个典型N-k故障场景。

场景1:线路(12,13)和线路(27,28)断开。

场景2:线路(9,10), (23,24)和线路(6,26)断开。

针对每个场景求解PDR优化模型,主要优化结果见表2。2个场景网络重构的结果如图4所示。在2种场景中,均闭合多个联络开关以保证供电中断的负荷重新供电,同时断开分段开关以避免网络形成环状结构。分布式电源和负荷的响应如图5所

示,包括柴油发电机的功率输出、所有重要负荷与非重要负荷的功率。

表 2 两个场景的主要计算结果

Table 2 Major results of the two scenarios

项目	场景 1	场景 2
最小节点电压标么值	0.988	0.966
总运行费用/万元	1.521	4.835

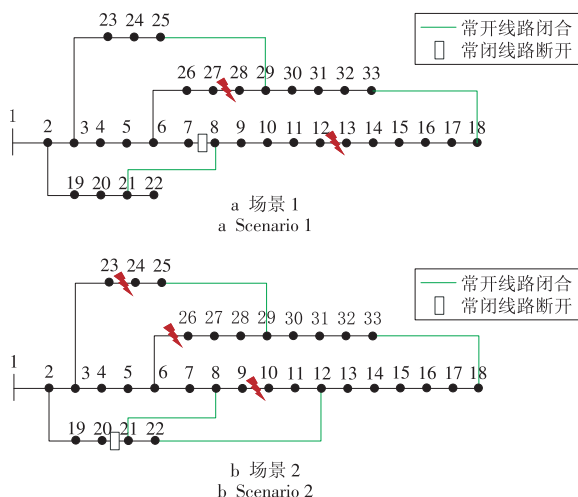


图 4 网络重构结果

Fig. 4 Network reconfiguration

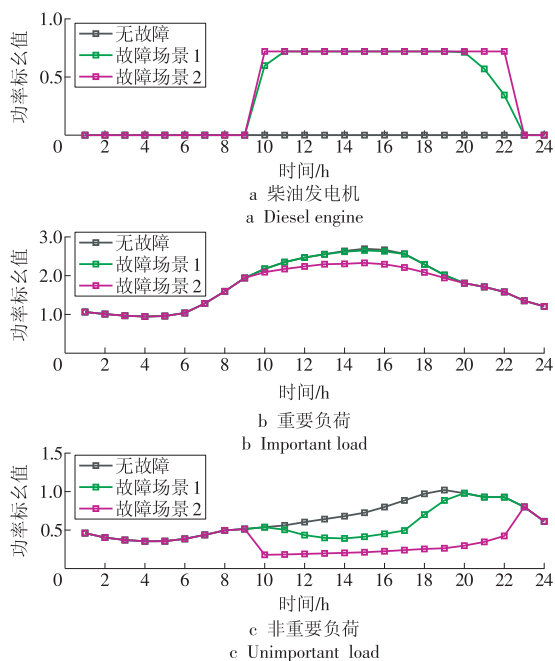


图 5 分布式电源和负荷响应

Fig. 5 DGs and demand responses

场景 1 中,2 条线路故障使节点 28—33,13—18 均形成孤岛;此时通过联络线使孤岛负荷转移至线路(23,24)与(2,19);然而,由于线路(2,19)容量有限,需要启动柴油发电机,并切除部分负荷;PDR 选取非重要负荷优先切除。场景 2 中,多条线路故障导致节点 24—25,26—33,10—18 均形成孤岛;此时

闭合 4 条联络线,同时断开线路(20,21)可将孤岛负荷全部连接到线路 2,3,⋯,8 中,通过主网供电。线路(21,22)的容量为 1 MV·A,重构后由于容量越限导致了大量的减负荷。因此,场景 2 的总运行费用较场景 1 大。

4 结论和展望

本文提出了一种考虑网络重构和分布式电源调度的 PDR 策略。利用联络线(常开线路)和可调度分布式电源来降低缺供负荷,特别是优先保障重要负荷的供电。本文主要贡献有以下 2 点。

(1)提出了一种改进的虚拟网络的方法,将具有孤岛的在网络重构中辐射状约束转化为一种线性约束。

(2)提出了一种包含可调度分布式电源、不可调度光伏系统和恢复后电压调节装置的最优调度模型。通过协同调度,实现切负荷损失的最小化。

算例分析结果表明,在所有场景下,本文所提 PDR 算法能够最大限度地保障负荷供电。与没有使用 PDR 算法相比,本文所提 PDR 算法通过分布式电源调度与拓扑重构,降低了极端情况下的切负荷损失。不足之处如下。

(1)PDR 算法没有考虑维修人员最优调度的问题。

(2)故障线路被修复后,在修复后的随后几个小时内不投入使用。因此,未来的工作将集中于确定最优序列和对 PDR 算法进行动态网络重构。

参考文献:

[1]WILLIE D.2017 Hurricane season was the most expensive in U. S. history [EB/OL]. (2017-12-01) [2021-11-10]. <https://www.nationalgeographic.com/science/article/2017-hurricane-season-most-expensive-us-history-spd>.

[2]科技助力水灾抢险,郑州供电恢复率达到 98% 以上[EB/OL].(2021-7-27)[2021-11-10].<https://new.qq.com/omn/20210728/20210728A09CCH00.html>.

[3]许寅,和敬涵,王颖,等.韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J].电工技术学报,2019,34(16):3416-2429.

XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement [J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(16):3416-2429.

[4]VARTANIAN C, BAUER R, CASEY L, et al. Distributed energy resources—Technical considerations for the bulk power system [R]. Federal Energy Regulatory Commission (FERC), 2018.

- [5] TAN Y S, ARINDAM K D, PAYMAN A, et al. Distribution systems hardening against natural disasters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6849–6860.
- [6] CHEN C, WANG J H, TON D. Modernizing distribution system restoration to achieve grid resiliency against extreme weather events: An integrated solution [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1267–1288.
- [7] ADHIKARI S, LI F X, HU Q R, et al. Heuristic optimal restoration based on constructive algorithms for future smart grids [C]//2011 16th International Conference on Intelligent System Applications to Power System. Hersonissos, Greece, 2011.
- [8] 刘金豆, 成杰, 俞高伟. 基于低压直流配电网并网的并离网一体光储发电系统研究 [J]. 华电技术, 2021, 43(4): 63–70.
LIU Jindou, CHENG Jie, YU Gaowei. Research on a PV-energy storage system with integration of grid-connection and disconnection modes based on low-pressure DC distribution network [J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 63–70.
- [9] 李炜, 严川, 盛庆博, 等. 大数据背景下智能配电网运营管理方法研究 [J]. 华电技术, 2021, 43(8): 33–40.
LI Wei, YAN Chuan, SHENG Qingbo, et al. Study on smart distribution network operation and management methods in the context of big data [J]. Huadian Technology, 2021, 43(8): 33–40.
- [10] GALVAN E, MANDAL P, SANG Y H. Networked microgrids with roof-top solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resiliency to natural disasters [J]. Electrical Power & Energy System, 2020, 123: 1–11.
- [11] WANG Z Y, WANG J H. Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3139–3149.
- [12] CHEN Y, MAHESH S I, AMRIT S K. Modified viterbi algorithm based distribution system restoration strategy for grid resiliency [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 310–319.
- [13] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958–966.
- [14] FARZIN H, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M. Role of outage management strategy in reliability performance of multi-microgrid distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2359–2369.
- [15] DING T, LIN Y L, BIE Z H, et al. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration [J]. Applied Energy, 2017, 199: 205–216.
- [16] WANG Y, XU Y, HE J H, et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5781–5793.
- [17] LIU J C, YU Y X, QIN C. Unified two-stage reconfiguration method for resilience enhancement of distribution systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(9): 1734–1745.
- [18] KIANMEHR E, NIKKHAH S, VAHIDINASAB V, et al. A resilience-based architecture for joint distributed energy resources allocation and hourly network reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(10): 5444–5455.
- [19] ZHOU Z C, WU Z, JIN T. Deep reinforcement learning framework for resilience enhancement of distribution systems under extreme weather events [J]. Electrical Power and Energy System, 2021, 128: 1–12.
- [20] BALAKRISHNAN R, RANGANATHAN K. A textbook of graph theory [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [21] YE H, GAYME D F, LOW S H. Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1656–1663.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

王卓容(1999), 女, 在读硕士研究生, 从事配电网灾后抢修与恢复调度研究, iswangzhr@163.com;

石庆鑫(1988), 男, 讲师, 工学博士, 从事弹性配电网运行与规划、储能规划、需求侧响应研究, qshi@ncepu.edu.cn。

*为通信作者。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.006

适应风电参与电力市场的需求侧储能负荷运行优化研究

Study on optimal operation of the demand-side energy storage system for wind power participating in electricity market

管馨,陈涛,高赐威

GUAN Xin, CHEN Tao, GAO Ciwei

(东南大学 电气工程学院,南京 210096)

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

摘要:可再生能源随着电力工业的迅速发展逐渐大规模接入电网,形成新型电力系统和能源互联网。但由于火电机组的高污染特性,所以在一定程度上激发了可再生能源在新型发电组合中占有的高比例。风电在减少污染和改善系统经济性的同时,也存在较大随机性、间歇性等一系列现实运行场景中存在的问题。由于风电输出的不确定性以及储能系统的高成本限制了其大规模应用,对风电参与电力市场策略及风储系统的运行优化进行了分析研究。首先介绍了发展背景,分析了课题具有的重要现实意义。随后介绍了风储联合系统的结构原理及研究现状,分析了风电参与电力市场的策略和风险因素。再以风储联合系统的总收益最大为目标,以风电出力波动和市场电价波动为考虑因素,建立需求侧储能运行优化的目标模型。最后建立风储联合优化数学模型,确定其运行优化策略。

关键词:风电;储能系统;需求侧储能负荷;电力市场;可再生能源;新型电力系统;能源互联网

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0035-07

Abstract: With the rapid development of the power industry, renewable energy sources are gradually connected to the grid on a large scale. Since the development of thermal power units is limited by severe pollution problems, the proportion of renewable energy in the power generation mix gets increased to a certain extent. Wind power generation, while reducing pollution and improving system economy, has problems in practice, such as randomness and intermittency. And its large-scale application is restricted by the uncertainty of wind power output and the high cost of energy storage systems. The strategy of wind power's participation in electricity market and the operation optimization of wind-energy storage systems are analyzed. The main processes are as follows. Firstly, the development background and practical importance of the subject are introduced. Subsequently, the structure and principle of the hybrid wind-storage system, and the strategy and risk factors of wind power participating in electricity market are analyzed. The hybrid wind-storage system aims at maximizing the total revenue. Taking the fluctuations of wind power output and electricity price into consideration, a target model for optimizing the demand-side energy storage system is established. Finally, based on the mathematical model, and the optimization strategy is made.

Keywords: wind power; energy storage system; demand side load; electricity market; renewable energy; new power system; energy internet

0 引言

环境污染和化石燃料带来的压力随着社会发展越来越明显,导致可再生能源的快速开发迫在眉睫。在众多发展的能源中,风能已经成为具有未来

潜力的清洁能源^[1]。风力发电,因其具有优点的同时存在一些劣势,所以需要顺应社会需求而被不断改进。可再生能源特有的不稳定性将导致低安全、低稳定的并网情况,给系统运行增添更加严峻的考验^[2-3]。风储联合系统具有快速响应和柔性电能充放的特点,能有效降低风电的不稳定性和电源故障概率,提高电网性能^[4]。我国有多种类型的风力涡轮机组,所以当选择不同时间建造的风电机组时,

要斟酌补偿无功和经济状况等问题^[5]。中国的风机在 2015 年 1 年间增加容量 32.97 GW, 且其并网设施的装机容量增长达到 129 GW。当前, 有 2 种风储配置经常被人们使用。其中一种配置是调度中心操控存储系统, 可以火电、风电机组并行; 另一种配置是风储一体化, 即存储系统只允许风电机组运行, 由风电站操控具体的运行、管理计划^[6-7]。最新的研究报告显示: 在未来 5 年, 全球能源生产将在实现连续 10 年的快速增长后仍能继续增长。表明中国风能行业的大规模稳步前行以及欧洲风能行业的稳步发展对全球风能的快速发展产生重大影响^[8-9]。在考虑经济方面时, 不仅要提高经济效益, 更重要的是确保系统安全高效地运行, 这是风力发电的基本条件。综上所述, 人们所需的储能配置需满足清洁能源少污染的前提条件, 也要满足供电稳定性和经济性的实际应用要求。当风力强劲时, 风储系统可将过剩风能储存, 在风力衰减供需不平衡时将其释放, 极大程度上减少能源的损耗, 确保供电的稳定性。同时, 可迎合电力市场的价格来调控充放电, 具有一定的灵活性。在电价波动时, 通过控制储能系统的充放实现收益可控, 在盈亏方面满足市场需求。风储联合系统既符合未来绿色发展的要求, 同时在稳定性和经济性方面有不可替代的优势, 在新能源储能联合规划配置的实际应用方面有一定的参考意义。因此, 风电参与电力市场策略及储能运行优化的研究是必要的。

1 风储联合系统结构分析

1.1 风储联合系统结构及原理

风储联合系统其组成部分可以概括为 2 种单元: 风电单元和储能单元^[10]。风电出力通过风电单元转化为所需电能, 电能输出中波动的功率由储能单元稳定。储能单元主要是通过转变以前发电用电一同进行的方式, 让系统分开充放电, 以实现稳定功率起伏的目标。本文采用铅酸电池作为储能系统的储能元件。 P_w 为风电出力, P_{dis}^{bat} 为储能系统的充电功率, P_{ch}^{bat} 为储能系统的放电功率。当风电出力不足时, 需要电池储能系统供电。当风电出力过剩时, 可以利用储能系统将过剩电量储存下来。当 $P_{dis}^{bat} > 0$ 时表示储能电池处于放电状态, 当 $P_{ch}^{bat} > 0$ 时表示储能电池处于充电状态。风储联合系统的组成及原理概括如图 1 所示。

1.2 风储联合系统运行的研究现状

在大型风电场中采用储能装置和风电联合运行, 可极大缓解供需不平衡, 同时可提高整个系统的稳定性和经济性^[11]。当前, 对储能方面的研究主

要集中在对储能系统的实时调节方面, 并且已取得很大进展和成果。

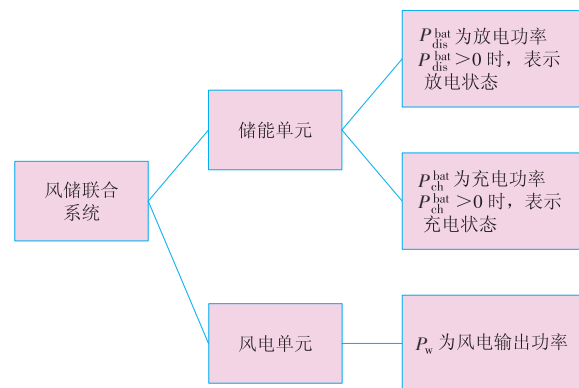


Fig. 1 Composition and principle of the hybrid wind-storage system

文献[12]在充分参考某风电场 3 个月内输出功率数据的基础上, 将储能系统与多种情况下不同容量的风电场相接, 对比输出功率的波动性。在此数据上分析出储能装置的容量优化决策。

文献[13]提出系统惩罚成本的概念, 统计了算例全天 288 个时段的功率输出情况。通过对算例结果分析出风储联合系统若想平稳运行, 必须使系统的惩罚成本与储能投入相持平。在此基础上, 提出了风储联合系统的容量优化策略。

文献[14]同时考虑了风电功率波动和需求侧负荷不匹配的情况, 在此基础上建立了风储系统中储能系统的动态经济调度模型。通过分析结果得出各机组间功率的最优分配策略, 使得系统的经济性最优。

文献[15]综合考虑了风力发电及储能系统各自独立运行时的优势及劣势, 在此基础上建立了风储系统的经济调度模型, 使其收益达到最大。再对该模型进行敏感性分析, 最后提出收益最大化时的系统配置方案。此外, 多种分布式电源和储能系统联合运行的情况同样适用该文中提到的经济调度模型和敏感性分析这 2 种分析方案。

2 风电参与电力市场交易

2.1 风电参与电力市场交易模式

相比较我国而言, 西欧国家的电力市场制度诞生较早, 所以我们可以从西欧发达国家在电力能源市场的进程中总结出以下经验来学习。已知能源产业的市场在未来的发展主要有 2 种方式: 解放打开电力能源市场; 鼓励大力发展和使用新能源, 特别提出加大对风能的使用^[16-17]。市场对于电力系统资源的配置有着及其重要的作用。

许多西方国家开放其电力市场交易是为了削减电力领域内的交易垄断,有效地调整各资源在电力市场中的配置^[18]。此外,开放市场还有利于各发电商在行业内进行公平竞争,促进消费者能够通过较便宜的价格购电。而风电在电力市场所存在的消纳问题,正需要这样灵活的市场制度解决。风电不仅参与日前市场,而且也参与日内市场。但是风电商的盈亏收入问题主要是由日内现货市场的价格来决定的。现货市场可以反映货物的市场价值,可以实时补充商品数量,有利于对市场经济的管理^[19]。

由于北欧市场属于典型实例,我们对北欧现货市场做具体分析。它的现货市场包含日前市场、日内市场和实时平衡市场。当风电商想要参与市场交易时,需要在日前市场预测自己的风电出力情况。正常情况下,其预测出力与实际结果之间存在一定误差。与此同时,该预测误差会导致不平衡量的产生。如果该不平衡量过大,即超过了市场规定的具体范围,风电商将会被不平衡费用惩罚。虽然短期预测中存在误差无可避免,但是为了避免偏差对电力市场的影响,日内平衡市场可以粗略地调整该误差,确保在存在误差的前提下风电电压、频率依然能够正常,有利于保持系统的稳定性和安全性。

2.2 风电参与电力市场交易的风险因素

由于风电出力时刻波动,所以存在对风电出力预测的困难性,从而导致风电参与电力市场存在无法规避的风险性。该风险主要由风电出力的波动性和市场电价的波动性组成。通常情况下,风电商必须在日前市场对第2天的风电出力进行预判。但在当前的技术水平下,这种预判的准确性远达不到完全准确。

在一般情况下,持续预测法经常被用作预测方法的基准。但是这种方法只对短期内的预测有效,当预测时间不断拉长,对风电出力预测的准确性会迅速下降,远低于预期^[20]。然而,无法精准地预测风电的出力,会大大增加风电商缴纳考核费用的概率,从而增大无法盈利的风险。所以对于风电商而言,类似风电这种随机出力,具有极大波动性的能源,在交易过程中产生不平衡费用是一种非常大的赔本风险。

此外,市场上的电价也是处处波动的。例如本文研究的风储联合系统,对该系统而言,电价的不断波动不仅直接影响风力发电的收益情况,而且会

影响储能系统具体的充放电决策问题。如果此时市场的日内价格偏低,则储能系统更倾向于充电,以确保更高的收益;相反,当市场的日内价格偏高时,则储能系统更倾向于放电。因此,为了保护风电企业的利益,需要每一时刻对市场电价进行滚动分析,以确定合适的竞价机制,使得企业收益最大。如果所做的决策欠妥,企业可能会有亏损的风险。综上所述,波动的电价也是一大风险。

3 风储联合系统的运行优化

3.1 目标函数

对于风储联合系统,经济性是衡量系统运行的重要标准。在满足电网调度的情况下,从储能系统的受益方面考虑,考虑使其收益达到最大目标函数。其目标函数的决策变量是系统的充放电功率,目标函数如下

$$\max f = \max(f_1 - f_2 - f_3), \quad (1)$$

式中: f_1 表示风电售出的获利,元; f_2 表示因风电预测出力与实际出力之间存在偏差而额外惩罚的不平衡费用,元; f_3 表示电池损耗累计总成本,元。

(1)风电售出的价格。由于风电实际出力和预测出力存在差异且电力市场分日前、日内价格,所以具体分为2种情况讨论:当风电预测出力大于等于实际出力时,将实际出力与日前价格相乘,再加上经过电池储能系统充放电调控后的风电出力偏差量与日内价格的乘积;当风电预测出力小于实际出力时,将预测出力与日前价格相乘,再加上经过电池储能系统充放电调控后的风电出力偏差量与日内价格的乘积,具体流程如图2所示,公式如下

$$f_1 = \sum_{t=1}^{24} \begin{cases} Q_s(t)P_{D-1}(t) + [Q_B(t) - Q_s(t) + P_{dis}^{bat}(t) - P_{ch}^{bat}(t)] & Q_B(t) \geq Q_s(t) \\ Q_B(t)P_{D-1}(t) + [Q_s(t) - Q_B(t) + P_{dis}^{bat}(t) - P_{ch}^{bat}(t)]P_D(t) & Q_B(t) < Q_s(t) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $Q_s(t)$, $Q_B(t)$ 分别为风电实际出力和风电预测出力, kW; $P_{dis}^{bat}(t)$, $P_{ch}^{bat}(t)$ 分别为储能系统电池的放电、充电功率, kW; $P_{D-1}(t)$, $P_D(t)$ 分别为时刻变化的电力市场日前价格、日内价格,元/(kW·h)。

(2)不平衡费用。由于所考虑的是以山西风电为背景,所以此处的不平衡费用考虑为符合山西政策的超额获利回收费用,后文皆以超额获利回收费用表示。此费用的目的是为了将新能源超出允许偏差外的价差收益纳入市场运营费用,公式如下

$$f_2 = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \begin{aligned} & \left\{ Q_B(t) - [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times \right. \\ & \left. (1 + \lambda_1) \right\} [P_{D-1}(t) - P_D(t)] \\ & Q_B(t) > \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times \right. \\ & \left. (1 + \lambda_1) \right\} \text{且 } P_{D-1}(t) > P_D(t) \\ & \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times (1 - \lambda_2) - \right. \\ & \left. Q_B(t) \right\} [P_D(t) - P_{D-1}(t)] \\ & Q_B(t) < \left\{ [Q_s(t) + P_{ch}^{bat}(t) - P_{dis}^{bat}(t)] \times \right. \\ & \left. (1 - \lambda_2) \right\} \text{且 } P_{D-1}(t) < P_D(t) \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中： λ_1, λ_2 分别为风电允许的日前与实际预测的偏差比例上、下限。

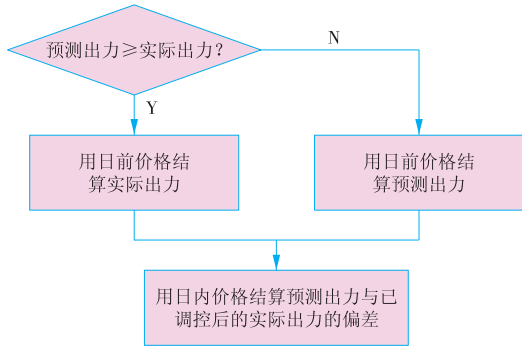


图 2 风电结算流程

Fig. 2 Wind power settlement process

(3) 储能系统的电池成本。每一次充放电都会引起电池寿命的消耗。同时,为了防止电池频繁充放电,故以电池成本来表示。通过单价、充放电电量、充放电效率和放电深度共同表示,公式如下

$$f_3 = \sum_{t=1}^{24} P_E \times \left(\frac{U_{ch}(t) P_{ch}^{bat}(t) \Delta t \eta_{ch}}{E_{battery}^{max}} + \frac{U_{dis}(t) P_{dis}^{bat}(t) \Delta t / \eta_{dis}}{E_{battery}^{max}} \right) \times (U_{ch}(t) P_{ch}^{bat}(t) \Delta t \eta_{ch} + U_{dis}(t) P_{dis}^{bat}(t) \Delta t / \eta_{dis}), \quad (4)$$

式中： P_E 表示电池充放电需要的单价,元/(kW·h); $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 表示充放电状态的转化, $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 在 [0, 1] 中取整。确保在 t 时刻只存在充或放唯一一种状态,排除了同一时刻同时充放的情况; Δt 表示一个时间区间,本文指 1 h; η_{ch}, η_{dis} 分别表示充、放电效率; $E_{battery}^{max}$ 表示电池额定容量, kW·h。

3.2 优化约束条件确定

以储能系统的容量、充放电功率、充放电状态为主,建立相应优化约束条件^[21-24]。

首先需要表示出每一时刻电池容量的动态值,并且将其容量约束在上、下限范围内。

$E_{battery}(t), E_{battery}(t+1)$ 表示电池容量在 t 和 $t+1$ 时刻的容量实时值,表示下一时刻的容量实时值是上一时刻容量实时值与这一时段内充放电之和; Δt 表示一个时间区间内,同上取 1 h,具体如下

$$E_{battery}(t+1) = E_{battery}(t) + P_{ch}^{bat} \Delta t \eta_{ch} - P_{dis}^{bat} \Delta t / \eta_{dis}, \quad (5)$$

$$E_{battery}^{min} \leq E_{battery}(t) \leq E_{battery}^{max} \quad (6)$$

与此同时需要考虑每一时刻电池只可在充电和放电这两种状态中切换,不可在同一时刻同时充电又放电,如下

$$U_{dis}(t) + U_{ch}(t) \leq 1, \quad (7)$$

其中,当 $U_{ch}(t), U_{dis}(t)$ 的值为 0 时,表示储能系统既不充电也不放电,当值为 1 时表示储能系统处于充电状态或者放电状态中的一种状态。

还需考虑每一时刻电池的充放电功率不得超过储能系统电池的充放电功率上、下限,如下

$$0 \leq P_{ch}^{bat}(t) \leq P_{ch, max}^{bat} U_{ch}(t), \quad (8)$$

$$0 \leq P_{dis}^{bat}(t) \leq P_{dis, max}^{bat} U_{dis}(t), \quad (9)$$

式中： $P_{ch, max}^{bat} U_{ch}(t), P_{dis, max}^{bat} U_{dis}(t)$ 表示电池充放电功率的最大极限值。储能运行优化的总流程如图 3 所示。

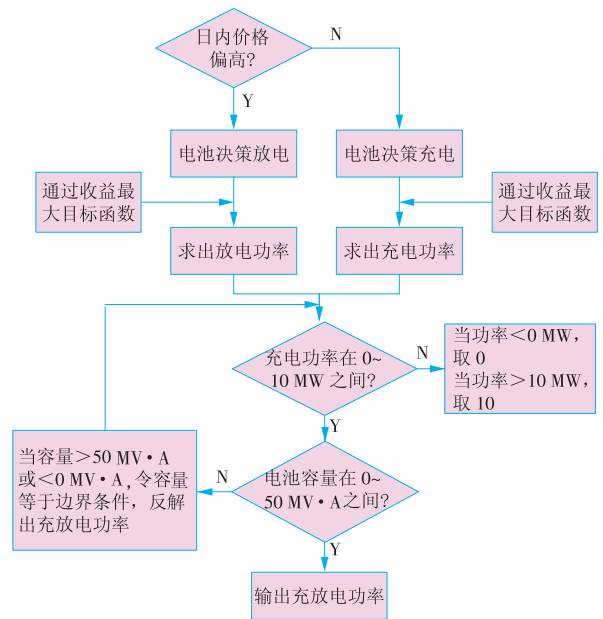


图 3 储能运行优化的总流程

Fig. 3 Overall optimized operation process for energy storage

3.3 算例验证

3.3.1 参数确立

储能系统的充放电功率不仅影响风电的售出总价,同时充放电功率过大或过小都会影响到超额获利回收费用,从而影响最终收益。所以,风储联合系统的储能运行优化实质上体现在对于电池充放电功率的具体决策上。本文以实际工程为背景,储能系统电池额定容量取 50 MV·A,最大充、放电

功率取 10 MW,其充、放电效率取 90%。 Δt 表示一个时间区间,为了简化模型,具体将 1 天划分为 24 个时间区间,以 1 h 为时间尺度参考。电池充放 1 kW·h 电需要的成本 P_E 取 4.5 元/(kW·h)(假设电池初始为满电状态)。

3.3.2 算例数据及分析

以山西电力市场为研究对象,以 2015 年某天山西某风电场数据作为风电出力曲线。如图 4—5 所示,风电的预测出力与实际出力之间存在偏差,风力发电在不同区域和时段会呈现出与需求侧负荷不相匹配的特征。

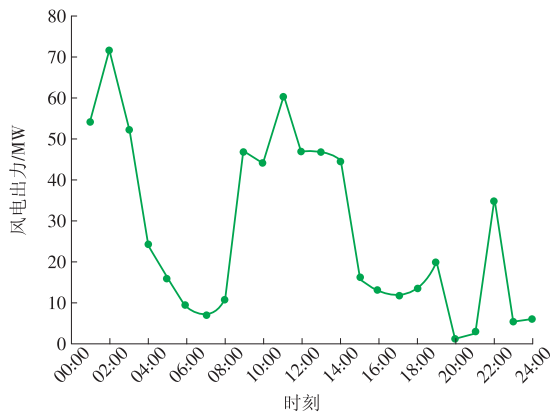


图 4 山西某风电场预测风电出力曲线

Fig. 4 Forecasted wind power output curve of a wind farm in Shanxi

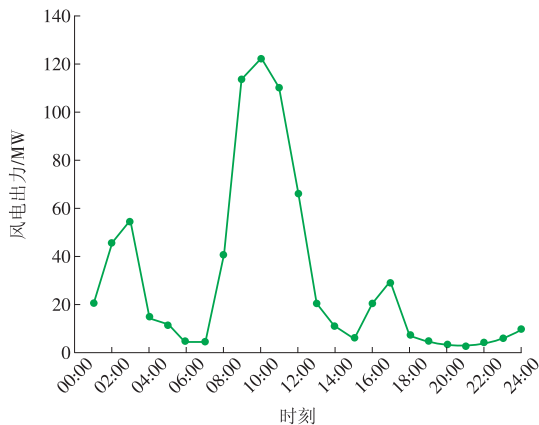


图 5 山西某风电场实际风电出力曲线

Fig. 5 Actual wind power output curve of a wind farm in Shanxi

日前、日内的波动电价以某天电力市场交易平台的数据为准,如图 6—7 所示,电力市场日前与日内价格的实时波动存在偏差。

综合以上算例,引入储能系统可有效缓解风电供需两侧的不平衡问题,可为风能的供给增加缓冲。此外,电力市场的价格偏差会影响储能系统实时的充放决策,对发电商的盈亏产生影响。因此,需要讨论风储联合系统的经济性。

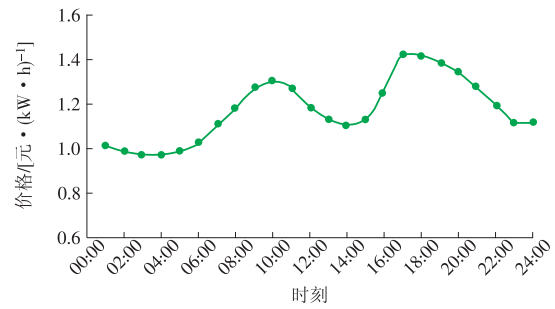


图 6 日前价格波动曲线

Fig. 6 Day-ahead price fluctuation curve

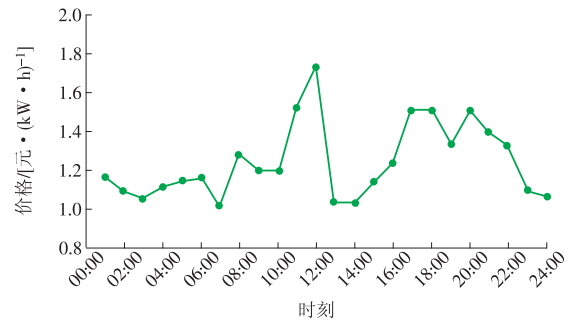


图 7 日内价格波动曲线

Fig. 7 Intraday price fluctuation curve

3.3.3 结果分析

在 MATLAB 环境下编程,以风储联合系统总收益最大为目标,对储能系统各时刻充放电功率值进行求解,如图 8—9 所示。储能系统只有在风力不足或风力过剩的情况下才会优先运行,可通过电池的充放来缓解风电供需不平衡。由于受经济性影响,储能系统没有满充满放,在某些时刻电池可休眠。极大延长了电池寿命,可减少频换电池的成本。

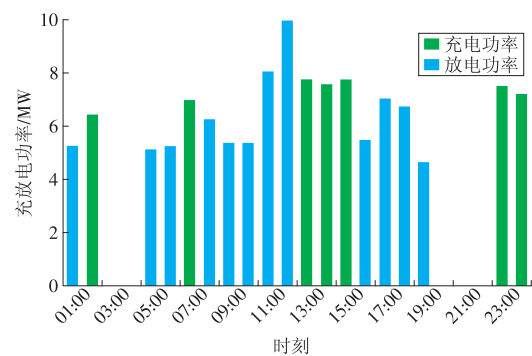


图 8 各时刻充电放电决策

Fig. 8 Charge and discharge decision

综上所述,风储联合系统的运行不仅可以有效缓解风电独立运行时因其随机性、间歇性而产生的供需不平衡等情况,而且可以解决储能系统独立运行时电池成本过高等问题。因此,风储联合运行比风电和储能完全独立分开运行更加优良。

此外,由于电池的充放电决策优化实质上是滚动优化,所以其决策是实时滚动更新的,其过程如

图 10 所示。

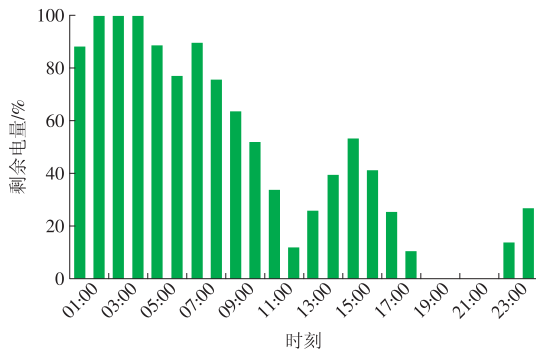


图 9 各时刻电池的剩余电量

Fig. 9 SOC of battery

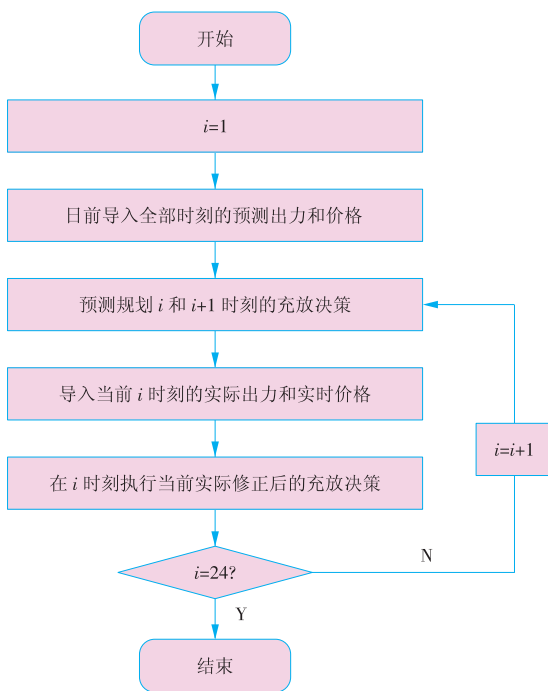


图 10 充放电决策滚动优化流程

Fig. 10 Rolling optimization process for charging and discharging decision-making

4 结束语

风力发电在减少环境污染和提高系统经济性的同时,存在着运行随机性和间歇性的问题。风储联合系统可以有效地改善其所存在的劣势,为了满足风电并网的要求,本文对风电参与电力市场策略及风储联合系统的运行优化问题进行了深刻研究。本文以风储联合系统收益最大为目标进行数学建模,与此同时为了防止储能系统存在过充过放的问题,既添加了容量和功率的约束,也增添了对每一时刻充放电唯一性的约束。然后再以实际风电的波动数据及市场电价的波动数据作为具体算例进行研究。由于引入储能可缓解风能的间歇性、随机性等特点带来的问题,这极大程度上缓解了能源的

浪费。因此,风储系统联合运行的经济性更优于风电与储能的单独运行。在如今新能源高渗透的情况下,具有现实意义。

参考文献:

[1]刘鑫.考虑风储一体化运行风险的电力系统优化调度研究[D].大连:大连理工大学,2018.

[2]郭翀.风电—储能联合系统储能容量优化研究[D].石家庄:河北科技大学,2017.

[3]杨潇.基于模糊算法的风储联合系统控制策略研究[D].济南:山东大学,2016.

[4]刘子豪.大规模风电并网对电力系统安全稳定影响的研究[D].北京:华北电力大学,2018.

[5]朱旭.世界关注中国风电跨国公司抓紧布局[J].工业设计,2009(8):24.
ZHU Xu.The world pays attention to China's wind power, multinational companies pay close attention to the layout[J]. Industrial Design, 2009(8):24.

[6]黄山.风电储能系统优化配置及运行研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.

[7]CHEN C L, LEE T Y, JAN R M. Optimal wind-thermal coordination dispatch in isolated power systems with large integration of wind capacity [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47: 3456-3472.

[8]秦云甫.我国风电产业发展问题分析与解决途径[D].北京:华北电力大学,2012.

[9]张文碧,喻炜.中国风电建设的区域分布及其对风力发电水平的影响[J].经济问题探索,2014(1):77-84.
ZHANG Wenjun, YU Wei. Regional distribution of wind power construction in China and its impact on the level of wind power generation [J]. Exploration of Economic Issues, 2014(1):77-84.

[10]艾欣,刘晓.基于需求响应的风电消纳机会约束模型研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2011,38(3):17-22.
AI Xin, LIU Xiao. Research on wind power consumption opportunity constraint model based on demand response [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2011, 38(3): 17-22.

[11]袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Application prospect analysis of energy storage technology in solving large-scale wind power grid connection problems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.

[12]梁亮,李建林,惠东.大型风电场用储能装置容量的优化配置[J].高电压技术,2011,37(4):930-936.

- LIANG Liang, LI Jianlin, HUI Dong. Optimum configuration of energy storage device capacity for large wind farms [J]. High Voltage Technology, 2011, 37 (4) : 930-936.
- [13] 王小蕾, 顾佳, 周佳威. 风储联合系统的储能容量优化配置[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 14-17.
WANG Xiaolei, GU Jia, ZHOU Jiawei. Optimization configuration of energy storage capacity of wind-storage combined system [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37 (9): 14-17.
- [14] 王魁, 张步涵, 胡永强. 考虑储能装置风电场的动态经济调度[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(1): 1-4.
WANG Kui, ZHANG Buhuan, HU Yongqiang. Considering the dynamic economic dispatch of wind farms with energy storage devices [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2011, 26(1): 1-4.
- [15] 曾鸣, 李娜, 马明娟, 等. 电力市场环境下载风储联合运行系统的经济效益评估模型[J]. 华东电力, 2012, 40(9): 1469-1473.
ZENG Ming, LI Na, MA Mingjuan, et al. Economic benefit evaluation model of wind-storage combined operation system in power market environment [J]. East China Electric Power, 2012, 40(9): 1469-1473.
- [16] 德格吉日夫, 谭忠富, 李梦露, 等. 考虑不确定性的风储电站参与电力现货市场竞价策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2799-2807.
DE Gejirifu, TAN Zhongfu, LI Menglu, et al. Uncertainty consideration of wind storage power station participation in power spot market bidding strategy [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2799-2807.
- [17] MASON K, QADRAN M, JENKINS N. Investing in generation and storage capacity in a liberalised electricity market: An agent based approach [J]. Applied Energy, 2021, 294: 11905.
- [18] 曾雪彤, 谭建成. 风电企业参与电力市场研究综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(7): 20-28.
ZENG Xuetong, TAN Jiancheng. Summary of research on participation of wind power enterprises in power market [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(7): 20-28.
- [19] ZHANG Z, ZHANG Y, HUANG Q. Market-oriented optimal dispatching strategy for a wind farm with a multiple stage hybrid energy storage system, CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(4): 417-424.
- [20] 牛浩川. 基于综合目标函数的风电场储能容量优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [21] 刘林鹏, 陈嘉俊, 朱健全, 等. 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 46-53.
LIU Linpeng, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in energy market [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 46-53.
- [22] 江水明. 平抑风电功率储能装置控制策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018.
- [23] 王金星, 张少强, 张瀚文, 等. 燃煤电厂调峰调频储能技术的研究进展[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 64-71.
WANG Jinxing, ZHANG Shaoqiang, ZHANG Hanwen, et al. Progress on the peak load regulation, frequency regulation and energy storage technologies for coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 64-71.
- [24] 童家麟, 洪庆, 吕洪坤, 等. 电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J]. 华电技术, 2021, 43(7): 17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7): 17-23.

(本文责编: 齐琳)

作者简介:

管馨(1999), 女, 从事需求侧管理、新能源并网及智能电网等方面的研究, 1595910832@qq.com;

陈涛(1989), 男, 讲师, 工学博士, 从事需求侧管理、电力市场、人工智能技术应用等方面的研究, taoc@seu.edu.cn;

高赐威(1977), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事需求侧管理、需求侧响应、电力市场等方面的研究, ciwei.gao@seu.edu.cn。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.007

楼宇型综合能源服务系统智能优化运行研究

Research on optimized operation of building-type integrated energy service systems

张爱平,赵利兴,刘静

ZHANG Aiping, ZHAO Lixing, LIU Jing

(中国华电科工集团有限公司,北京 100070)

(China Huadian Engineering Company Limited, Beijing 100070, China)

摘要:随着“双碳”目标的推进落实,综合能源项目加速推广。针对楼宇型综合能源服务系统耦合性强、边界约束条件多、用户负荷变化大、运行方式复杂等特点,提出了一种智能优化运行控制算法模型。通过采集源、网、负荷侧数据,考虑天气的影响,建立负荷预测模型;根据运行边界条件,确立多目标优化函数,在各种能源需求、能源价格的约束下,基于混合粒子群算法实现综合能源服务系统智能优化运行。以某科技园区楼宇型综合能源服务系统为例,采用智能优化运行方案后,能源综合效率提升了 6.51 百分点,自耗电减少了 2.24%,有效提高了系统运行的经济性。

关键词:综合能源服务;智能优化运行;混合粒子群算法;负荷预测;能源综合效率;碳中和

中图分类号:TK 01*8

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2022)02-0042-07

Abstract: With the implementation of the goals of carbon peak and carbon neutrality, the integrated energy projects are booming. To deal with the strong coupling, numerous boundary constraints, volatile user load and complex operation modes of integrated energy service systems, an intelligent optimized operation and control algorithm is proposed for the systems. A load forecasting model is established by taking the collected data from source, network and load side as well as weather conditions into consideration. According to the boundary conditions, a multi-objective optimization function is established. It realizes the optimized operation of building-type integrated energy service systems under the constraints of demand and price by taking mixed particle swarm optimization algorithm. Taking a demonstrative building-type integrated energy service system in an industrial park as an example, the economy of the system has been effectively improved by the optimized operation strategy with a 6.51 per cent increase of the comprehensive energy efficiency and a 2.24% decrease of the auxiliary power ratio.

Keywords: integrated energy service; intelligent optimized operation; mixed particle swarm optimization algorithm; load forecasting; comprehensive energy efficiency; carbon neutrality

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,综合能源服务项目的建设由小范围试点向全国范围推广。综合能源系统是与能源服务升级、多种能源互补发展、可再生能源大规模应用和综合能效提升等相伴而生的。综合能源服务面向能源系统终端,以用户需求为导向,通过集成多种能源系统,提高能源的互补利用,使用户用能满意度得到提升。综合能源服务旨在提供符合能源发展方向、契合用户实际需求、提升综合能源利用率的能源系统解决方案,是

推动能源革命的重要举措^[1-4]。

欧洲最早提出综合能源系统概念并付诸实施,早在欧盟第五框架(FP5)中就提及^[5],如分布式发电、运输和能源(Distributed Generation Transport and Energy, DGTREN)项目、Energie项目及Microgrid项目对综合能源系统进行研究,侧重能源协调、协同优化及靠近用户侧开发。美国注重综合能源智能管理相关理论技术的研发,美国能源部 2001 年即提出了综合能源系统、智能管理系统的建设,注重各类能源系统间的协调配合。日本的综合能源管理系统则致力于引导能源结构优化,促进可再生能源规模化开发,这与日本能源严重依赖进口的现状密不可分。

我国综合能源服务尚处于起步阶段,冷、热、

收稿日期:2021-10-28;修回日期:2021-12-24

基金项目:中国华电科工科技项目(CHECKJ20-01-09)

电、气各自独立供应,缺乏整体协调管理,存在能效低、运营成本高问题。综合能源服务系统贴近用户侧,供能负荷需要实时与用户需求相匹配,而用户负荷变化大,导致运行方式复杂^[6-10];同时,综合能源系统机组耦合性强,边际效益条件影响因素多^[11-16]。因此,需采用一套智能化控制系统,用高度集成的智能化控制设备取代人工操作,快速响应用户负荷需求变化,保障系统安全、经济运行。

楼宇型综合能源服务系统服务于园区内建筑楼宇智慧用能需求,楼宇用能具有季度性、时段性等特点。优化运行系统要实现供能与楼宇侧用能一体化数据通信,协调优化控制以及源、网、荷友好互动等功能。本文以某楼宇型综合能源服务示范项目为例,对综合能源服务系统优化运行控制策略进行研究,为类似项目提供参考。

1 系统概述

示范项目位于北京市某科技园区,为AB座、CD座、EFG座、HI座4栋独立楼座供冷、热、电、生活热水,建筑规模为:地上约17万 m^2 ,地下约8万 m^2 。综合能源供能系统包括天然气冷热电三联供系统、太阳能生活热水系统、光储系统及低温烟气余热回收系统。

其中天然气冷热电三联供系统建设2台3.300 MW级内燃机+2台烟气热水型余热溴化锂机组(制冷 $2 \times 2.908 \text{ MW}$,供热 $2 \times 1.257 \text{ MW}$ (不含缸套水热量))+2台离心式电制冷机(供冷 $2 \times 1.800 \text{ MW}$)+1台直燃机(供冷 3.490 MW ,供热 2.800 MW)+1台直燃机(供冷 3.490 MW ,供热 2.800 MW ,供生活热水 1.100 MW),为园区供冷、热、电及生活热水。太阳能生活热水集热器位于H座屋顶,共44组,作为酒店生活热水的补充供应源。光伏装机容量为187.22 kW_p,储能装机为100 kW/240 kW·h,光伏发电直接接入大楼低压配电系统。低温烟气余热回收系统为2套内燃机组+1台热泵机组及其辅助设备,每套内燃机组烟道设置1套烟气板式换热器。

园区综合能源服务示范项目自2020年开始策划实施,计划2021年年底完成建设。通过示范项目的建设,实现综合能源服务系统的优化运行。

2 研究目标

楼宇型综合能源服务系统通过采集园区楼宇侧、管网侧数据建立负荷预测模型,利用大数据分析历史用能数据,找出负荷随季节和时间的变化规律;同时,结合天气预报信息,通过已建立的负荷预测模型,给出冷、热、电、生活热水24 h负荷预测曲

线并根据实时负荷不断进行修正。

在园区能源需求、供能设备运行、外购市电及天然气价格等边界条件的约束下,通过建立多目标函数,实现负荷分配寻优,给出设备组合运行策略。

3 优化运行技术方案设计原则

优化运行技术方案决定了示范项目的运行模式以及各种运行模式下的优化运行策略,设置以下设计原则:(1)天然气供应不受限制,满足机组不同负荷工况下天然气的需求;(2)园区电采用并网上网模式,即园区多余电可以上网,不足电力可以从电网购买市电;(3)在满足园区负荷需求的条件下,尽可能提高可再生能源利用率;(4)提高综合能源利用,余热要尽可能利用;(5)提高园区供能系统运行的经济性;(6)结合项目设备特点,限制部分设备的最低负荷。

4 联供系统介绍

联供设备主要由动力设备、余热利用设备、调峰设备、多能互补系统及相关辅助设备构成。本项目动力设备采用2套燃气内燃发电机组,1台内燃机对应1台烟气热水型溴化锂机组(余热机)。内燃机的缸套水和烟气余热经三通阀连接至余热机,通过调节缸套水、烟气三通阀的开度,可分别调节余热机缸套水及烟气的送入量,即可调节余热机的负荷。2台余热机冬季可供空调热水,夏季可供空调冷水;同时,余热机集成了生活热水板式换热器,充分吸收烟气的余热,冬季设置低温烟气深度利用系统,利用低温烟气驱动热泵,制取空调热水。H座屋顶太阳能生活热水系统充分利用可再生能源,供给酒店生活热水系统。AB座屋顶布置的分布式光伏系统为示范光储系统,配置储能系统。调峰设备配置2台电制冷机组、2台直燃机组,2台直燃机组可供空调冷热水,其中一台机组还可供生活热水。系统配置了集成化板式换热器,当室外温度低于 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,获得空调冷水,对数据机房供冷。

示范项目联供系统结构如图1所示。

5 负荷预测模型设计

针对不同的负荷,结合具体负荷特点进行负荷预测;同时,根据不同负荷的运行时间进行分段和分类预测。

负荷预测模型主要计算步骤如下:(1)获取冷、热、电、生活热水负荷历史记录;(2)分析冷、热、电、生活热水负荷历史记录;(3)确定趋势因子(根据历史记录做出趋势曲线);(4)确定日内(工作时间段)

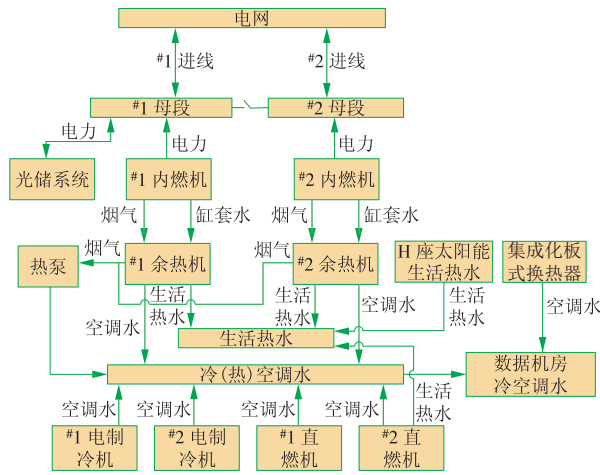


图1 联供系统结构

Fig. 1 Structure of the cogeneration system

和季节性方案;(5)预测负荷需求;(6)计算负荷预测误差以及负荷与季节的相关性;(7)将负荷预测转换至计划期段;(8)模型不断修正验算,直至满足预期结果。

负荷预测主要用于预测各类负荷在未来一段时间的变化情况,以便合理安排机组运行方式和机组的负荷调整方式,优化、控制负荷。负荷预测子系统的预测对象有冷、热、电、生活热水负荷,预测内容包括各类负荷的峰谷时刻和持续时间、典型日24 h负荷、短时内的精确负荷预测等,具体负荷预测流程如图2所示。

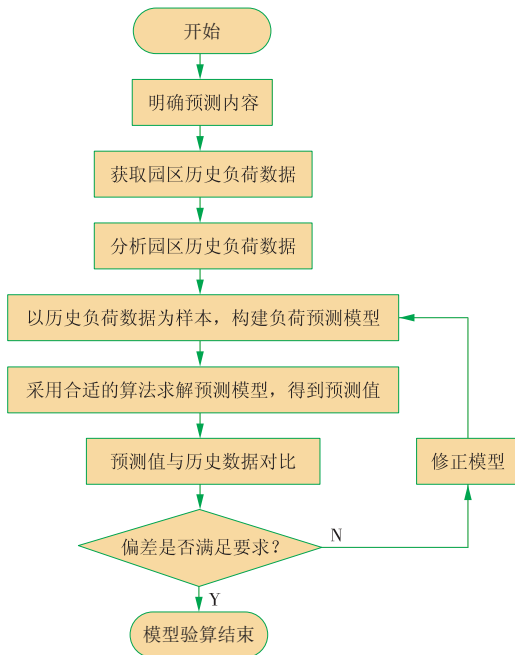


图2 负荷预测流程

Fig. 2 Process of load forecasting

5.1 电负荷预测

电负荷预测采用基于线性外推法的短期负荷预测方法,该方法的数学模型为

$$P_{t_n} = P_{t_{n-1}} + \Delta P = P_{t_{n-1}} + v\Delta t, \quad (1)$$

$$t_n = t_{n-1} + \Delta t, \quad (2)$$

式中: $P_{t_{n-1}}$ 为 t_{n-1} 时刻的负荷值; P_{t_n} 为 t_n 时刻的负荷值; ΔP 为待求时刻的负荷变化值; v 为待求时刻的负荷变化速率。

5.2 冷热负荷预测

冷热负荷要结合楼宇型综合能源的特性来考虑。影响冷热负荷的参数可以分为2类:第1类是自由属性参数,包括建筑的朝向、墙体和窗户的热阻、窗墙比等,建筑建造好后这类参数几乎不变;第2类是运行属性参数,包括建筑的工作时间段、人员安排、人体舒适度要求、内部热源(如照明等用电设备)等。

建立夏冬季单位面积平均冷热负荷数学模型

$$Q_c = Q_{c,ba} T_c \left[1 + G_c(\theta) S_c(\theta) k_1 + k_2 S_c(t) (G_c(r) + G_c(R_{wa}) + G_c(R_{wi})) \right], \quad (3)$$

$$Q_h = Q_{h,ba} T_h \left[1 + G_h(\theta) S_h(\theta) k_1 + k_3 S_h(t) (G_h(r) + G_h(R_{wa}) + G_h(R_{wi})) \right], \quad (4)$$

式中: Q_c, Q_h 为夏季和冬季单位面积平均冷、热负荷, W/m^2 ; $Q_{c,ba}$ 为冷负荷基准值,按6—8月制冷需求计算,实际基准值可按具体时段进行调整; T_c 为工作时段制冷量比例系数之和; θ 为建筑正南方向与地理正南方向的夹角; $G_c(\theta)$ 为制冷季建筑的朝向对制冷的影响; $S_c(\theta)$ 为制冷时间段辐射系数之和; $S_c(t)$ 为制冷时间段温差系数之和; $G_c(r)$ 为窗墙比对冷负荷的影响系数; $G_c(R_{wa})$ 为外墙热阻对冷负荷的影响系数; $G_c(R_{wi})$ 为窗户热阻对冷负荷的影响系数; $Q_{h,ba}$ 为热负荷基准值,按12—2月热需求计算,实际基准值可按具体时段进行调整; T_h 为工作时段制热量比例系数之和; $G_h(\theta)$ 为制热季建筑朝向对制热的影响; $S_h(\theta)$ 为制热时段辐射系数之和; $S_h(t)$ 为制热时段温差系数之和; $G_h(r)$ 为窗墙比对热负荷的影响系数; $G_h(R_{wa})$ 为外墙热阻对热负荷的影响系数; $G_h(R_{wi})$ 为窗户热阻对热负荷的影响系数; k_1 为辐射转换系数; k_2, k_3 为墙体冷、热传导系数。

6 智能优化运行方案设计

6.1 智能优化系统功能

智能优化系统负责信息的采集、通信及优化策略的寻优与显示。系统采集综合能源、空调管网、用户侧的数据,设有负荷预测、机组性能计算、负荷

优化指令分配、机组状态监测、机组特性曲线在线学习等功能模块。智能优化系统基本策略是通过采集源、网、荷侧信息,预测未来 24 h 负荷需求,完成机组特性曲线的学习、机组性能计算,进一步实现机组负荷的最优分配并下达各负荷指令和设定参数到相关设备。

具体运行优化策略如下:智能优化系统采集综合能源源侧分散控制系统(DCS)和设备信息数据,网络服务器采集空调管网数据、用户用能数据、天气数据等负荷相关数据,智能优化系统通过智能学习算法,完成整个综合能源系统主要设备运行特性的学习;采用智能寻优算法完成机组最优运行模式分析;通过优化控制器向 DCS 发送优化控制指令(包括负荷优化分配指令、供热/供冷方式优化与调控指令),调整机组的运行模式,通过网络服务系统发布综合能源系统及空调管网的最佳运行优化策略给运行值班人员,从而实现综合能源系统的整体优化控制,达到高效低耗、经济匹配、可靠安全的运行目的。

6.2 优化技术路线

在考虑能源市场、能源资源供需平衡和设备可利用性等基础上确定技术路线,建立混合整数线性规划(Mixed-Integer Linear Programming, MILP)模型,如图 3 所示。优化内容包括最优设备组合、最优设备负荷、最优运行策略,以经济成本最小为第 1 优化目标,节能和环境指数为第 2 优化目标。

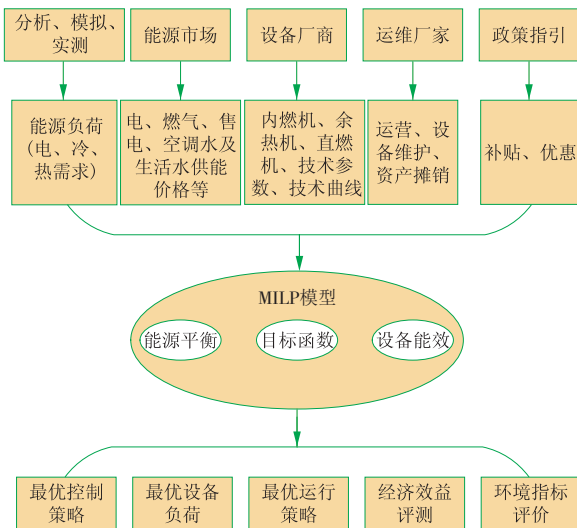


图 3 综合能源系统智能优化技术路线

Fig. 3 Roadmap of the intelligent optimization technology for the integrated energy system

6.3 确立优化目标函数

优化可分为单目标优化和多目标优化,综合能源系统中能源的协同优化多为多目标优化,求解多

目标优化问题的解法较多,基于分解的多目标进化算法就是一种常用解法。相比于一般的数学优化方法,基于分解的多目标进化算法在解决非线性整数规划问题以及多维目标优化问题上具备很大的优势。一般情况下,多目标优化问题可描述为

$$F(X) = \text{Optimal}(f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)), \quad (5)$$

式中: $X \in \Omega, f \in \Theta$,实现从 n 维向量到 m 维向量的转换,如图 4 所示; Ω, Θ 为 n 及 m 维向量域。

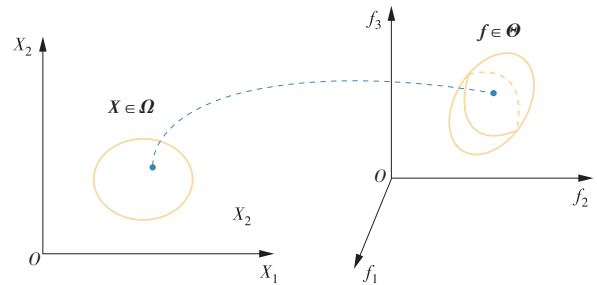


图 4 决策向量转换

Fig. 4 Transformation of the decision vector

6.4 智能优化运行计算模型

6.4.1 寻优目标函数

(1) 全年总运行成本 $C_{\text{sys_year}}$, 目标是 $C_{\text{sys_year}}$ 最小。

$$C_{\text{sys_year}} = \sum_{n=1}^4 \left(\sum_{t=1}^{24} (C_{e_net}(t) + \sum_{l=1}^m C_{\text{convert}}^l(t) + \sum_{j=1}^k C_{\text{storage}}^j(t)) T_{a_n} \right), \quad (6)$$

式中: $C_{\text{sys_year}}$ 为综合能源系统的全年总运行成本; $C_{e_net}(t), C_{\text{convert}}^l(t), C_{\text{storage}}^j(t)$ 分别为外部能源供应成本、能源转换设备成本、储能总运行成本; T_{a_n} 为该典型日在每季度所占的天数; n 表示第 n 个季度; l 为能源转换设备; j 为储能设备。

(2) 一天 24 h 时序优化目标函数,目标是使供能成本最小,尽可能利用可再生能源循环制取生活热水、光伏发电。

$$C_{\text{sys_day}} = \sum_{t=1}^{24} (C_{e_net}(t) + \sum_{l=1}^m C_{\text{convert}}^l(t) + \sum_{j=1}^k C_{\text{storage}}^j(t)), \quad (7)$$

式中: $C_{\text{sys_day}}$ 为一天 24 h 供能成本。

6.4.2 优化约束条件

(1) 能量平衡约束条件。

1) 电力平衡。园区上下网电功率、光伏发电功率、内燃机组发电功率、储能放电功率之和,满足厂用电负荷、园区用电负荷及充电负荷之和。

$$P_{e_net}(t, a) + P_{pv}(t, a) + P_{mi}(t, a) + P_{dis}(t, a) = P_e(t, a) + P_{\text{char}}(t, a) + P_{\text{auxi}}(t, a), \quad (8)$$

式中: $P_{e_net}(t, a)$ 为电网上下网电功率,下网为正,上网为负; $P_{pv}(t, a)$ 为园区光伏发电功率; $P_{mi}(t, a)$ 为园区内燃机发电功率; $P_{dis}(t, a)$ 为园区储能充电功率; $P_e(t, a)$ 为园区用电负荷; $P_{\text{char}}(t, a)$ 为园区充电负

荷,包含储能电池和充电桩; $P_{auxi}(t, a)$ 为厂用电负荷; a 表示某天; t 表示某时刻。

2)空调热水平衡。

$$Q_{h, yr}(t, a) + Q_{h, bh}(t, a) + Q_{h, zr}(t, a) = Q_h(t, a), \quad (9)$$

式中: $Q_{h, yr}(t, a)$ 为余热机组热负荷; $Q_{h, bh}(t, a)$ 为板换热热负荷; $Q_{h, zr}(t, a)$ 为直燃机组热负荷; $Q_h(t, a)$ 为园区热负荷需求。

3)空调冷冻水平衡。

$$Q_{c, yr}(t, a) + Q_{c, dz}(t, a) + Q_{c, zr}(t, a) = Q_c(t, a), \quad (10)$$

式中: $Q_{c, yr}(t, a)$ 为余热机组冷负荷; $Q_{c, dz}(t, a)$ 为电制冷机组冷负荷; $Q_{c, zr}(t, a)$ 为直燃机组冷负荷; $Q_c(t, a)$ 为园区冷负荷需求。

4)生活热水平衡。

$$Q_{s, sun}(t, a) + Q_{s, sbh}(t, a) + Q_{s, ybh}(t, a) = Q_{s, h}(t, a), \quad (11)$$

式中: $Q_{s, sun}(t, a)$ 为太阳能生活热水负荷; $Q_{s, sbh}(t, a)$ 为生活热水水板式换热器负荷; $Q_{s, ybh}(t, a)$ 为生活热水烟气板式换热器负荷; $Q_{s, h}(t, a)$ 为园区生活热水负荷需求。

(2)能源转换设备运行约束条件:每台设备在最低负荷和满负荷之间运行。

(3)能源价格约束:在优化决策过程中,考虑电力峰谷电价和燃气价格进行能源平衡。

6.4.3 优化寻优方法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是求解优化问题的常用方法,它具有收敛速度快、计算量小、易于实现等优点,但也有早熟收敛、维数灾难、易陷入局部极值等缺点^[17-20]。为避免 PSO 的缺点,采用如下解决办法。

(1)调整 PSO 的参数来平衡算法的全局探测和局部开采能力。

(2)设计不同类型的拓扑结构,改变粒子学习模式,从而提高种群的多样性。

(3)将 PSO 和其他优化算法结合,形成混合 PSO 算法。

根据园区能源系统的特点,采用混合 PSO 算法策略来寻优。算法的基本思想是,采取一种机制,当陷入局部最优或发生早熟时,能够跳出此局部区域并进入解空间的其他区域继续进行搜索,直到找到全局最优解。算法具体流程如图 5 所示。

引入种群的适应度方差 σ^2 反映粒子的聚集程度: σ^2 越小,空间中的粒子越收缩于局部; σ^2 越大,空间中粒子的多样性越好。

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n (f_i - f_{avg})^2 / n, \quad (12)$$

式中: n 为粒子个数; f_i 为第*i*个粒子的适应度; f_{avg} 为

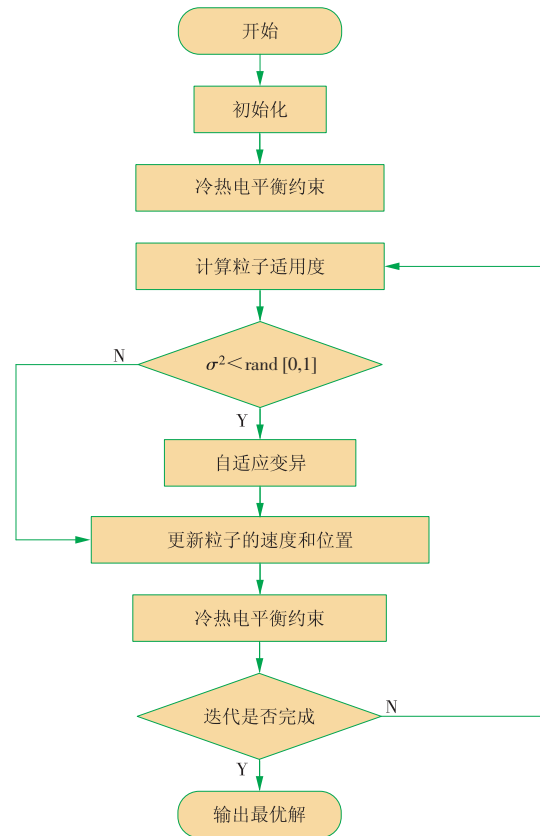


图 5 混合 PSO 算法流程

Fig. 5 Flow chart of the mixed PSO algorithm

前*i*个粒子适应度的平均值。

变异机制

$$g_{best}(i + 1) = g_{best}(i)(1 + \mu), \quad (13)$$

式中: $g_{best}(i)$ 为局部最优值; μ 为随机变量。

在算法运行过程中,找到最优值后,进行一个是否是局部最优的判断,如果是局部最优就随机改变这个粒子的位置,从而让粒子进入其他区域进行搜索。在搜索过程中,算法可能发现新的个体极值以及全局极值,然后再进行一次是否满足平衡约束的判断,最终找到全局最优解。

实时优化调度模型中,采集实时负荷值并通过优化计算得到各机组出力指令值,每次求解变量相对较少,此时采用混合 PSO 算法能够较好地解决非线性少变量的优化问题。混合 PSO 优化算法主要包括产生初始解、计算目标函数值、计算约束条件下的函数值、计算适应度值、筛选最优粒子、粒子向最优粒子移动等步骤。能源站空调水温度和发电机出力可调节,使用混合 PSO 算法求解,以空调水温度和发电机功率作为决策变量,以经济性为核心目标函数,同时考虑环境温度、机组效率、水泵功耗与供回水温差,得到最优解决方案,即最优控制策略。

7 负荷预测及优化运行

基于园区冷、热、电、生活热水特点建立负荷预测模型,同时结合外界环境温度,绘制全天24 h负荷预测曲线,如图6—8所示。由图6—8可以看出,负荷预测值与实际值的偏差控制在10%以内。

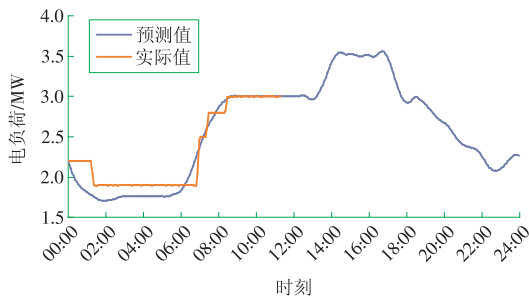


图6 电负荷预测曲线

Fig. 6 Electricity load forecasting curve

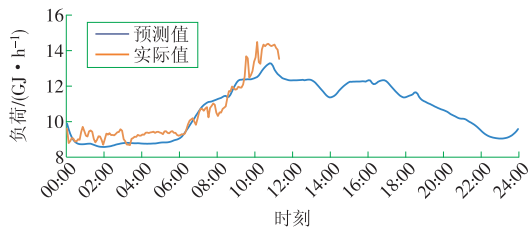


图7 空调水负荷预测曲线

Fig. 7 Forecasting curve of the load for air conditioning water load

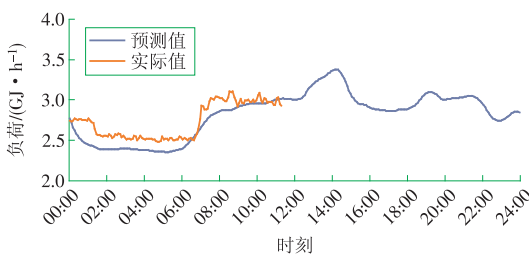


图8 生活热水负荷预测曲线

Fig. 8 Hot water load forecasting curve

根据冷、热负荷的需求,参考负荷预测值,在满足所考核的能源利用效率的前提下,以实现能源站经济效益最优为目标,对各供能设备及冷热网进行动态负荷优化分配,给出动态优化分配策略,调整设备运行组合方式及负荷参数。初步优化结果显示:通过烟气余热深度利用,可节约直燃机供空调热水的能耗,高峰时段每小时可节约 50 m^3 天然气;通过减少余电上网,可提高能源经济效益;供能初期,通过调整供能参数,实现大温差小流量供能,可节约天然气耗量及厂用电量。2021年该园区采用优化运行方案后,与2019年相比,年能源综合效率提升了6.51个百分点,自耗电减少了2.24%,见表1。

智能优化前期先开环运行,后期逐步闭环运行,直接自动调整、控制设备运行,减少人为干预。

表1 优化运行前、后数据对比

Table 1 Comparison of the data before and after optimized operation

年份	发电总量/(GW·h)	供能总量/GJ	总耗气量/ m^3	自耗电/(GW·h)	能源综合效率/%
2019	21.584 3	107 141	$6.578 6 \times 10^6$	4.081 9	76.59
2021	22.013 5	118 657	$6.581 2 \times 10^6$	3.670 7	83.10

注:2021年1—10月为实际数据,11,12月为2020年同期数据。

后期会进一步结合外界天气情况,优化冷塔运行,节约冷塔耗电量。

8 结论

本文结合楼宇综合能源服务系统的建筑用能特性,考虑季节及时段等特点,同时结合外界天气状况,建立了冷、热、电、生活热水负荷预测模型。源侧根据多能互补系统特点,考虑设备运行特性曲线、能源价格等边界条件,建立优化目标函数,优化寻优算法,实现运行优化方案的寻优。

目前,该优化系统还在不断自学习过程中,后期通过现场实际运行积累的数据,进一步优化调整负荷预测及优化运行算法,逐步细化每个设备的运行参数,为提高项目运行的经济性创造更大空间,以期能为类似项目的优化运行提供借鉴。

参考文献:

- [1]张运洲,代红才,吴潇雨,等.中国综合能源服务发展趋势与关键问题[J].中国电力,2021,54(2):1-9.
ZHANG Yunzhou, DAI Hongcai, WU Xiaoyu, et al. Development trends and key issues of China's integrated energy services[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 1-9.
- [2]张宁,薛美美,吴潇雨,等.国内外能源转型比较与启示[J].中国电力,2021,54(2):113-115.
ZHANG Ning, XUE Meimei, WU Xiaoyu, et al. Comparison and enlightenment of energy transition between domestic and international[J]. Electric Power, 2021, 54(2): 113-115.
- [3]韩峰,张衍国,严矫平,等.综合能源服务业务和合作模式[J].华电技术,2019,41(11):1-4.
HAN Feng, ZHANG Yanguo, YAN Jiaoping, et al. Integrated energy service and cooperation modes [J]. Huadian Technology, 2019, 41(11): 1-4.
- [4]张运洲.我国综合能源服务一体化发展模式研究[J].中国电力企业管理,2019(13):37-41.
- [5]何鑫,尹璐,涂彬,等.我国综合能源服务的现状与发展趋势[J].中国电力企业管理,2020(11):51-53.
- [6]FU Y, LIN H Y, MA C P, et al. Effects of uncertainties on the capacity and operation of an integrated energy system [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments,

- 2021, 48.
- [7] LU Q, GUO Q S, ZENG W. Optimization scheduling of an integrated energy service system in community under the carbon trading mechanism: A model with reward-penalty and user satisfaction [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 323:129171.
- [8] 尹硕, 郭兴五, 燕景, 等. 考虑高渗透率和碳排放约束的园区综合能源系统优化运行研究[J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 1-7.
- YIN Shuo, GUO Xingwu, YAN Jing, et al. Study on optimized operation on integrated energy system in parks with high permeability and carbon emission constraints [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 1-7.
- [9] YOU M, WANG Q, SUN H, et al. Digital twins based day-ahead integrated energy system scheduling under load and renewable energy uncertainties [J]. *Applied Energy*, 2022, 305:117899.
- [10] LI Peng, ZHANG Fan, MA Xiyuan, et al. Multi-Time scale economic optimization dispatch of the park integrated energy system [J/OL]. *Frontiers in Energy Research*, 2021 (9) : 743619 [2021-09-28] <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.743619/full>.
- [11] 隋军, 金红光, 汝林谋, 等. 分布式供能及其系统集成 [J]. *科技导报*, 2007, 25(24): 58-62.
- SUI Jun, JIN Hongguang, LIN Rumou, et al. Distributed energy system and its integration [J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(24): 58-62.
- [12] 朱晓红, 解蕾, 张延迟, 等. 天然气分布式供能系统的配置与优化 [J]. *节能技术*, 2008, 26(1): 87-91.
- ZHU Xiaohong, XIE Lei, ZHANG Yanchi, et al. Configuration and optimization of the distributed power system using natural gas as the fuel in advanced training center of CPIP [J]. *Energy Conservation Technology*, 2008, 26(1): 87-91.
- [13] 俞新祥, 翁一武, 杨锦成. 分布式供能系统控制的设计和应用 [J]. *热力发电*, 2006, 10(10): 11-16.
- YU Xinxiang, WENG Yiwu, YANG Jincheng. Design and application of control system for distributed energy supply [J]. *Thermal Power Generation*, 2006, 10(10): 11-16.
- [14] 丁明, 包敏, 吴红斌. 分布式供能系统的经济调度 [J]. *电力科学与技术学报*, 2008, 23(1): 13-17.
- DING Ming, BAO Min, WU Hongbin. Economic dispatching on distributed energy supply system [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2008, 23(1): 13-17.
- [15] 陈卉, 刘颖, 赵龙生. 楼宇型分布式能源系统在数据中心的应用 [J]. *华电技术*, 2021, 43(3): 76-81.
- CHEN Hui, LIU Ying, ZHAO Longsheng. Application of building-type distributed energy systems for data centers [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(3): 76-81.
- [16] 乔克, 吴培, 田传波, 等. 面向能源互联网的综合能源仪控平台一体化设计与研究 [J]. *仪器仪表用户*, 2021, 28(7): 101-106.
- QIAO Ke, WU Pei, TIAN Chuanbo, et al. Integrated design and research of integrated energy instrument and control platform for energy internet [J]. *Instrumentation Customer*, 2021, 28(7): 101-106.
- [17] 赵鑫, 郑文禹, 侯智华, 等. 基于粒子群优化算法的多能互补系统经济调度研究 [J]. *华电技术*, 2021, 43(4): 14-20.
- ZHAO Xin, ZHENG Wenyu, HOU Zhihua, et al. Research on economic dispatch of multi-energy complementary system based on particle swarm optimization [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(4): 14-20.
- [18] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 95-100.
- HOU Yunhe, LU Lijuan, XIONG Xingen, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems [J]. *Proceeding of the CSEE*, 2004, 24(7): 95-100.
- [19] 王哲, 王喆, 曾伟. 基于改进粒子群算法的主动配电网有功无功协调优化控制 [J]. *制造业自动化*, 2021, 43(7): 105-108.
- WANG Zhe, WANG Zhe, ZENG Wei. Optimal control active power and reactive power coordination in active distribution network based on improved particle swarm optimization [J]. *Manufacturing Automation*, 2021, 43(7): 105-108.
- [20] 徐岩, 靳伟佳, 朱晓荣. 基于遗传粒子群算法的光伏并网逆变器参数辨识 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(7): 103-109.
- XU Yan, JIN Weijia, ZHU Xiaorong. Parameter identification of photovoltaic grid-connected inverter based on GAPS0 [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(7): 103-109.

(本文责编: 刘芳)

作者简介:

张爱平(1977), 女, 高级工程师, 工学硕士, 从事综合能源项目研发工作, zhangap@chec.com.cn;

赵利兴(1970), 男, 高级工程师, 从事电力工程管理及研发工作, zhaolx@chec.com.cn;

刘静(1979), 女, 高级工程师, 从事综合智慧能源系统的设计与研究, liu-jing@chec.com。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.008

面向零售侧的点对点交易体系:概念、国际经验 与相关启示

Peer-to-peer trading system on retail side: Concept, international experience and suggestions

尚楠, 黄国日

SHANG Nan, HUANG Guori

(南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广州 510663)

(Energy Development Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

摘要:在落实“双碳”目标,构建以新能源为主体的新型电力系统下,供需双侧预计将面临深刻变化。一方面,风电、光伏等新能源大规模接入,新能源开发呈现集中式与分布式并举的局面;另一方面,分布式产消者不断涌现,推动全新的市场交易需求与商业模式出现。为适应新能源高效消纳、挖掘分布式电源价值、充分激发供需双方交易积极性,面向零售侧的点对点直接交易模式应运而生。提出一种面向零售侧的点对点交易体系,阐述了其概念与特征,与传统批发市场及虚拟电厂的联系与区别。通过对比分析国外面向零售侧的点对点交易的具体实践,总结了当下推进点对点交易的若干关键瓶颈问题,并从我国目前电力体制改革现状出发提出相关建议。

关键词:新型电力系统;零售侧;点对点交易;交易机制;分布式发电;电力体制改革;碳中和;区块链

中图分类号:TK 01:F 407.61 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0049-11

Abstract: The supply side and demand side of the new power system taking new energy as its main body are going through profound changes. On one hand, as large-scale renewable energy such as wind and solar power has been connected to the power system, new energy can be consumed in centralized or distributed mode. On the other hand, the emergence of mounting distributed energy prosumers is advancing the construction of new trades mechanisms and business models. To promote the consumption of renewable energies, explore the value of distributed energy sources and motivate the participators on supply and demand side, a peer-to-peer trading mode on retail side has been proposed. The corresponding concept and characteristics the trading mode, as well as its relation with and difference from traditional wholesale market and virtual power plants are illustrated. By analyzing domestic and overseas peer-to-peer trading systems, critical hinders in advancing the peer-to peer trading have been summarized. Moreover, relevant suggestions are also put forward based on the current situation of the power system reform in China.

Keywords: new power system; retail side; peer-to-peer trading; trade mechanism; distribution power generation; power system reform; carbon neutrality; blockchain

0 引言

在碳达峰、碳中和的目标愿景下,我国能源电力行业将发生深刻变化^[1]。在发电侧,新能源开发呈现集中式与分布式并举的局面,分布式能源作为一种清洁、低碳、高效的能源开发和利用模式,符合我国能源绿色、低碳转型的发展方向,其就近接入、就地消纳的特点可有效减少输电网投资,降低输电损耗,提高系统整体运行效率,有利于推动以新能源为主体的新型电力系统建设^[2]。我国分布式电源

发展快速,以光伏为例,2020年上半年,分布式光伏新增装机4.43 GW,占新增光伏装机的38.5%。根据《能源发展“十四五”规划》,预计2021—2025年,光伏累计装机量的年均复合增长率约为18.9%,年均新增装机67.4 GW,2025年预计累计装机达581 GW^[3]。在需求侧,随着分布式屋顶光伏、电动汽车、家庭储能的发展和大规模使用,用户由单一的能源消费者逐渐转变为同时具有能源生产及消费能力的产消者^[4]。截至2020年年底,国内已投运储能项目累计装机规模达35.6 GW,占全球市场总规模的18.6%,同比增长9.8%^[5];2020年,新能源汽车产销量分别为136.6万辆和136.7万辆,同比增长7.5%

收稿日期:2021-12-25;修回日期:2022-01-02

基金项目:南方电网公司管理创新项目(ZDKJXM20210056)

和 10.9%，其中纯电动汽车产销量分别完成 110.5 万辆和 111.5 万辆，同比增长 5.4% 和 11.6%^[6]。

相比大容量、集中式的传统发电资源，分布式发电具有数量众多、单体规模小、电压等级低、出力波动性更大、分布零散等特点，且目前国内分布式电源市场化程度低、公共服务相对滞后，市场活力仍有待进一步激发^[7]。分布式发电的固有特性决定了传统的市场化交易模式已经不再适用，以点对点交易为核心的市场体系是激活分布式电源市场活力、挖掘其商品价值的重要机制创新，对于满足用户侧差异化需求场景、高频次交易和就近用能提供了有效途径，对于促进可再生能源接近消纳具有重要意义^[8]。可见，点对点交易市场预计将成为以新能源为主体的新型电力系统框架下市场体系的重要组成部分。

当前的相关研究通常将点对点交易(P2P)作为分布式交易的一种模式。文献[9]提出分布式交易模型涵盖点对点模型、微电网交易模型和群体用户模型；文献[10]提出区域自治的分散式电力市场体系包括点对点直接交易模式、通过中间商的交易模式、两者结合的交易模式；文献[11-13]认为严格意义上的点对点交易即为主体间的直接交易，无须经过第三方。当前国内外对于点对点交易的相关研究大多聚焦于概念辨析、框架机制构想等方面，对于点对点交易的具体实施及开展方式、实际运营商业模式以及如何与我国当前电力市场建设相衔接仍处于探索阶段，且目前国内也尚无成熟运作、稳定盈利的试点经验可供参考。

本文首先明确给出点对点交易的概念及特征，辨析总结其与批发市场、虚拟电厂的联系与区别；随后，深度剖析国外面向零售侧的点对点交易的运作机制及商业模式，从交易机制、定价模式、结算模式、价值定位、关键业务、盈利模式、成本支出等方面进行横向对比总结；最后立足国内电力市场化改革现状，分析当前国内开展点对点交易所面临的关键问题，并给出推进点对点交易的相关建议。

1 点对点交易的基本概念

1.1 基本概念与特征

当前，国内外针对点对点交易的相关研究主要聚焦于低压配电网或微电网内生产者、普通消费者和产消者之间，以及以独立微电网为交易主体的多微电网群的直接交易^[2-3]。

基于已有研究与实践，本文给出点对点交易定义如下：点对点交易指以配电网作为主要能源交易通道，以风、光等分布式清洁能源为主，实现市场主

体就近直接交易的新模式。其主体包括但不限于配电网范围内分布式电源、分布式储能、智能楼宇等各类能源消费者、生产者和产消者，具有数量众多、分布零散、就近交易、单笔交易量小等特点。

在功能定位方面，点对点交易致力于通过在配电网层面建立灵活自治的分布式市场，为传统批发市场难以整合数量庞大且地域分布零散的分布式发电主体提供解决方案。其能够在更短的时间尺度内实现更高频次的供需双侧的有效匹配，激励分布式风电、光伏等清洁发电资源的“随取随用”，促进规模小、数量多、出力具有不确定性的分布式发电资源消纳。

1.2 与传统批发侧交易的区别

点对点交易是传统批发侧市场化交易的有效补充，二者之间紧密联系但又呈现不同特征，如图 1 所示。一是批发市场呈现电量交易规模大、出清方式高度集中等特征，而点对点交易主要面向小规模分布式交易主体，开展高频次、个性化、双向匹配的能源交易。二是批发市场的交易结果和价格水平，将影响到点对点交易市场的成交情况。三是在市场化环境中，售电公司、虚拟电厂、负荷聚合商等代理商在批发市场和点对点交易市场之间扮演着媒介功能，能够促进两个市场之间的协调联通。

从市场主体角度来看，普通消费者、产消者、代理商、配网运营商、交易平台扮演着不同的角色：(1)对于作为普通消费者(或产消者)的用户，一方面可以采用被售电公司等代理商代理的方式参与批发市场或点对点交易市场，此时用户只与对应的代理商有财务关系，其与批发市场或点对点交易市场的关系仅取决于代理商的决策，代理商参与批发市场的前提是其已经聚合了相当规模或数量的用户；另一方面，部分用电或容量规模较小的用户也可以直接参与点对点交易，同时交由配网运营商提供保底供电服务。(2)对于代理商，其既可以参与批发市场又可以参与点对点交易市场，但代理商在两个市场中的申报要求和基本参数(如申报节点、最小申报电量规模等)不同，代理商是将批发市场和点对点交易市场之间产生有机联系的关键主体。(3)对于配网运营商，其向配电网内的市场主体收取配网运营费用，同时承担终端保底用户的保底供电责任。(4)对于交易平台，其可根据实际需求交由配网运营商(或电网公司)运营，针对点对点交易市场设计出不同的交易、出清及结算模块。

1.3 与虚拟电厂的区别与联系

虚拟电厂是通过先进的计量、通信和控制等技术将分布式新能源、储能系统、可控负荷、电动汽车

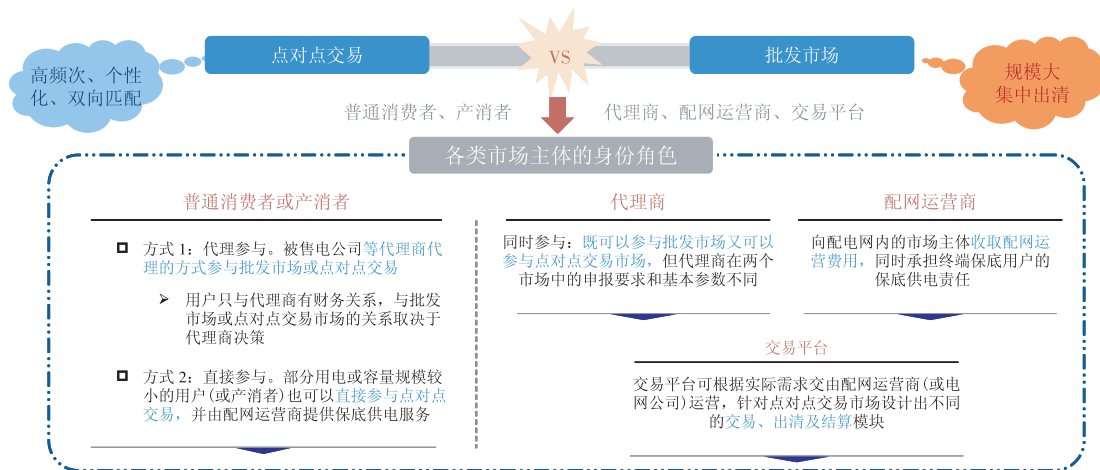


图 1 点对点交易与批发市场关系示意

Fig. 1 Relationship between peer-to-peer trading and the wholesale market

等将不同类型的分布式资源聚合起来,通过虚拟电厂智能管控运营平台,对内部灵活可调资源进行聚合调控,外部作为一个整体参与电力交易和辅助服务^[14]。如冀北虚拟电厂通过聚合用户侧资源,在新能源大发期间快速增加用电需求,达到与传统电厂同样的调节效果,并获得与调峰贡献相匹配的市场化收益。从运营效果看,冀北虚拟电厂试点自投运以来,充分响应电网调度实时指令,在晚高峰时期将用电后延,到后夜电网低谷调峰困难时期,快速抬升低谷用电负荷,调节里程达 7.85 GW·h,运营商和用户总收益约 160.35 万元,收益 204.00 元/(MW·h),按照运营商与用户签订的合同,运营商总收益 132.75 万元,平均收益 168.89 元/(MW·h);用户总收益 27.60 万元,平均收益 35.11 元/(MW·h)^[15]。

二者的区别和联系可归纳为如下几点。

首先,二者均面向用户侧,致力于解决用户侧分布式资源参与市场的难题。本文所提及的点对点交易指的是市场主体间就近的直接交易,不同地区的分布式主体不能直接进行跨区域交易;虚拟电厂聚合的分布式资源无地理范围的限制,且更强调对外的特性。

其次,二者为具有竞争又相互促进关系的业务新形态。分布式资源既可以选择直接参与点对点交易,亦可委托于虚拟电厂间接参与市场;具备聚合资源能力的虚拟电厂可以作为代理商,代理电量较小或电量大但没有能力(或不愿意花费精力)寻找交易对象的主体。

此外,两者非互斥关系,开展其中一类业务的同时可向另一类业务扩展。点对点交易具有规模效应,可在发挥规模的优势下,向虚拟电厂相关业务延伸;与此同时,在用户强烈需求的驱动下,虚拟

电厂可能向点对点交易业务延伸。

1.4 点对点交易助力实现“双碳”目标

开展点对点交易对“双碳”目标的达成具有推动作用。能源领域是实现“30·60”碳达峰、碳中和目标的主战场,通过开展点对点交易,能够形成一套政府引导、企业实施、市场推动、公众参与的清洁能源消纳新机制,不仅能为分布式新能源创造一个公平竞争的竞争平台,还可以为电力用户提供更多的交易选择。具体来说,由于分布式新能源参与电力市场交易,电力用户有更多的机会选择和利用绿色电力,一定限度降低对传统火电的依赖,实现了碳减排。此外,以点对点直接交易改进可再生能源的发展和利用模式,以市场化交易替代既有的新能源定向补贴和成本补偿,为分布式清洁能源提供可观收益。

2 点对点交易发展环境分析

点对点交易为能源电力市场化交易新业态,因此在考虑开展点对点交易前,本文采用 PEST(政治-经济-社会-技术)分析工具对国内点对点交易发展环境及适用性进行简要分析。

2.1 政策环境

在国家政策方面,2020年9月,在第七十五届联合国大会一般性辩论上我国宣布了2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标;2021年3月15日,中央财经委员会第九次会议指出,要着力提高利用效能,实施可再生能源替代行动,深化电力体制改革,构建以新能源为主体的新型电力系统。新型电力系统对构建以新能源为主体的市场化交易机制提出了新的要求,为探索点对点交易模式、推动分布式能源参与市场化交易、促进能源消费从单一被动向主动参与转变提供了良好的政策环境。

在行业政策方面,2017年,国家发展改革委、国家能源局印发了《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》等系列政策,决定组织分布式发电市场化交易试点,对分布式发电交易的项目规模、市场交易模式、交易组织方式以及分布式发电“过网费”标准等提出了指导意见,为点对点交易的框架和边界提供了有益的政策参考。

2.2 经济环境

《中共中央国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(中发[2015]9号)印发以来,新一轮电力体制改革在全国范围内快速铺开,电力市场建设成效显著,为开展点对点交易奠定了市场基础。与此同时,“十四五”期间,光伏发电等分散式发电资源制造成本快速下降,预计我国分布式光伏和分散式风电将实现平价上网。

近年来,国家积极推动实体经济企业用能成本降低,以缓解实体经济企业困难、应对经济下行压力、增强经济可持续发展能力。

点对点交易致力于在市场主体间就近开展直接交易,将对降低实体经济企业用电成本具有积极的推动作用。

2.3 社会环境

随着企业、社会公众对绿色能源消费的认识和需求在逐步提高,点对点交易将作为其购买绿电的有益补充。

可持续发展浪潮逐渐席卷全球,跨国企业对国内供应商绿色能源消费、碳排放等提出了新的要求。

与此同时,清洁、低碳的分布式能源也逐渐引起政府、社会公众的高度重视,随着社会公众对美好生活的追求和环境保护意识的提高,就近利用清洁能源、实现清洁电力的就近消纳使用、改善环境质量的诉求越来越突出,参与积极推动能源转型的殷切越来越清晰,政府、社会公众越来越期望看到企业更多地履行社会责任,参与生态文明建设,持续改善生态环境质量,共建美丽中国。

2.4 技术环境

区块链、信息通信、人工智能等诸多技术的发展,为开展点对点交易提供了有利的技术环境。以区块链技术为例,区块链是一种创新的分布式账本技术,致力于为不同主体间的交易建立一个可信任的、分布式的环境,具有去中心化、难以篡改、全程留痕、可以追溯、集体维护、公开透明等显著特点,具体应用包括智能合约、智能资产、去中心化应用、去中心化自治企业等。

3 面向零售侧的点对点交易国外实践

3.1 美国 TransActive Grid

美国 TransActive Grid 项目实现了社区间居民的点对点电力交易,允许用户通过智能电表实时获得发、用电量等相关数据,并通过区块链向他人购买或销售电力。用户可以不需要通过公共的电力公司或中央电网就能完成电力交易。随后,美国 Exergy Engineering 试点沿袭了 TransActive Grid 点对点分布式交易技术尤其是区块链技术的应用,呈现去中心化、开放性、公平性、匿名性的特点^[16]。该试点主要特征可归结为:一是加密分布式账本技术,以防篡改的方式安全保存所有数据;二是具有可扩展的智能合约,自动化处理所有交易流程;三是具有链上微网控制系统,高效管理微网电流和交易流。

3.1.1 运作机制

在交易流程方面,TransActive Grid 试点交易分为如下若干步骤:首先,市场主体收集发电状况、用电需求等市场信息,再自行申报交易偏好,如首选能源类型、价格限制等;随后,申报信息存入区块链账户,购入和售出订单得以创建,购售方开始进行匹配。一旦匹配成功则自动向区块链中添加涵盖所有当前交易信息的新的区块;最后,智能电表等设备对电能供应和需求进行计量,并通过信息系统即区块链进行账单结算。同时,在整个过程中,微电网与传统电网仍保持连接,以预防当地发电不足或超过社区需求等极端情况。

在定价模式方面,TransActive Grid 采用拍卖机制,以 15 min 为 1 个时间间隔组织拍卖,基本遵循“价格优先、时间优先”原则,较高出价者先出清,较低出价者后出清,最后的出清价格则为该时间段的市场价格。消费者(或产消者)将会为其偏好购买的能源(如本地的分布式可再生能源)申报能够接受的购入最高价,生产者(或产消者)申报能够接受的售出最低价。

在结算模式方面,目前 TransActive Grid 试点为布鲁克林地区的产消者等市场主体之间提供了分布式光伏发电等交易结算服务,并且设计了集合竞价的机制,但是没有为交易双方提供合适的报价策略模型和通过区块链进行直接结算的方法。

在与主网衔接方面,TransActive Grid 试点所在区域属于联网型微电网,与配电网并网运行,互为支撑,实现能量的双向交换。对主网而言,该微电网可以作为可控负荷进行管理。当外部电网故障时,该微电网可转为独立运行模式。

3.1.2 商业模式

在价值定位上,试点项目致力于在社区层面建立一种新的能源交易模式,促使社区内用户可以在平台上开展高频次、小规模的对点能源交易,为居民等提供潜在的收入来源,激励消费者投资分布式能源;在关键业务上,试点业务涵盖整合供需双侧信息、跟踪和显示本地(接近)实时的能源价格、交易结算、将过剩电力回馈到现有主网、智能电表的安装维护等;在盈利模式上,试点产品类收入(盈利)包括用户家用电力设备(太阳能设备、电表等)的安装收入等,服务类收入(盈利)包括平台使用或接入服务费、用户智能电表等设备的维护费用等;在成本支出上,包括平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等。

3.2 瑞士 Walenstadt

瑞士 Walenstadt(瓦伦施塔特)开展了一个基于区块链的微电网交易试点,光伏发电装机总功率为287 kW,年用电量约为4.6 GW·h,其中养老院占很大比例,约2.0 GW·h。市场主体涵盖有居民家庭、户用光伏公寓楼,以及安装了电池的公寓楼用户。可细分为户用光伏、储能、电力用户等。当前试点区域涵盖有25户居民家庭,其中8户安装了储能,2栋安装了户用光伏的公寓楼,1栋安装了电池的公寓楼^[17]。需要说明的是,该试点主要使得市场主体能够在可用的情况下就近交易能源,并向主网出售或购买剩余能源。由于交易区域局限在本地社区中,交易规模不大。

3.2.1 运作机制

在交易流程方面,试点的交易流程包括投标、出清、结算3个环节:在投标环节,交易平台从市场主体方收集订单,完成关联设备等信息验证后,将订单添加到存储设备中;在出清环节,出清过程由应用程序在每个出清间隔(每15 min)触发,出清过程将会把投标环节中所收集的订单转换为市场主体之间的交易列表;在结算环节,应用程序将24 h累计匹配成功的订单汇总成一个结算列表,进行结算操作和资金分配。

在定价模式方面,试点每15 min运行1次拍卖算法以完成市场出清形成出清价格。即订单列表每15 min运行1次,按照价格进行排序出清,价格较低的售出电能优先,购入价格较高的电能优先,此种价格机制下,每一笔交易的价格是基于各自购买方和售出方价格之间的平均值形成的。

在结算模式方面,市场交易应用程序逻辑的最后一步是将匹配的交易进行结算。具体来说,即将过去累计匹配成功的订单汇总成1个结算列表,用

于自动付款。

在与主网衔接方面,试点所在区域属于离网社区型微电网,区域涵盖各种社区资产,致力于为重要的社区服务提供弹性电力保障。独立型微电网和常规电网相连接,利用自身的分布式能源满足微电网内负荷的需求。

3.2.2 商业模式

在价值定位上,试点项目致力于构建基于区块链的社区能源系统的运行方式,同时分析区块链技术对当地太阳能利用、电网质量和能源效率的影响。在关键业务上,试点业务领域主要涵盖交易平台运维服务、附加服务(如智能电表安装维护等)2类。平台运维服务包括:一是基于对供需双侧电能计量以及市场信息披露,跟踪和显示本地(接近)实时的能源价格;二是提供拍卖服务的组织和用户个性化产品设计。附加服务包括:一是智能电表的安装维护;二是试点可以整合分布式电源供应商生产的过剩电力回馈到现有的本地电网。在盈利模式上,项目的收入来源主要有3类:一是平台接入服务费,二是能源产品费,三是售电套餐服务费。在成本支出上,包括平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等。

3.3 德国 Sonnen

Sonnen 试点为由 Sonnen Batterie 业主组成的社区,最初由德国企业 Sonnen 发起,试点范围不断扩大。德国、奥地利、瑞士和意大利均有 Sonnen 社区成员,目前 Sonnen 正在澳大利亚发展新的社区试点。在 Sonnen 试点中,存在一个中央软件连接并跟踪所有的社区成员以随时平衡能源供应和需求。Sonnen 试点用户的富余电能没有被送入传统电网,而是进入一个虚拟的能源库,在其他成员因恶劣天气而无法产生足够的电能时提供电能服务。例如,社区内用户每分享1 kW·h的电能,将获得高于电力供应商提供的经济补偿;如果在社区范围内购买电能,这些电能的价格一般会比市场价格更低廉。除获取较低价的能源供应外, Sonnen 社区成员还将获得一系列增值服务,包括设备的10年保修期、起步价23美分的电能价格、免费天气预报服务、基于天气预测的家庭能源使用优化服务、远程维护和监控服务、智能使用控制服务等^[18-19]。

3.3.1 运作机制

在定价模式方面, Sonnen 社区采用会员制,加入 Sonnen 社区的成员,每月只需缴纳19.99欧元的会员费,而不再用每月向原来的能源供应商支付基本费用。

在与主网衔接方面, Sonnen 社区试点所在区域

属于离网社区型微电网,区域涵盖各种社区资产,致力于为重要的社区服务提供弹性电力保障。独立型微电网不和常规电网相连接,利用自身的分布式能源满足微网内负荷的需求。

3.3.2 商业模式

在价值定位上,Sonnen 试点通过整合、分配资源将一个由 Sonnen Batterie 业主组成的社区结合成一个整体,具有发电资源的社区成员可以为社区内的任何市场主体分享生产的剩余电能;在关键业务上,Sonnen 社区主要包括对富余资源的整合、分配服务,同时提供包括 Sonnen Batterie 虚拟能源池在内的安装维护和售后服务;在盈利模式上,Sonnen 社区项目的收入模式主要有 3 项,一是每月 19.99 欧元的会员费,二是电池销售费用,三是潜在的附加产品费;在成本支出上,成本包括有平台开发维护成本、储能(电池)设备投资运维费用、配套设备安装运维成本等。

3.4 英国 Piclo

英国 Piclo 试点是当前国外运行相对成熟的点对点交易试点之一。基于此,英国开展了面向清洁能源的线上点对点交易市场。在该试点中,发电主体能够选择并且知悉自己售出电能的对象方,用户同样能够选择从哪个发电主体购入电能。试点平台根据市场主体双方的用电特性、所在区域、交易倾向等进行发用电双方的交易需求匹配,同时提供交易过程中的合同签署、计量数据采集、费用结算等客户服务^[20-21]。

3.4.1 运作机制

在运作方式上,Piclo 试点通过构建可信可靠的第三方交易平台促成更多的点对点交易。该平台利用电表数据、发电机定价和消费者偏好等信息,以 30 min 为间隔进行匹配,并为客户提供数据可视化和分析。在交易过程中,普通消费者(或生产者)可以优先选择从哪些生产者处购买电力,生产者也同样会对出售电能的对象具有一定的控制性、选择性和可预见性。此外,由 Good Energy 公司提供合同签订、数据计量、费用计算、客户服务、市场平衡等服务。

在交易机制上,Piclo 采用双方匹配的交易机制,平均每 30 min 就会通过各类计量仪表对运行数据、发电价格、消费者偏好等信息进行采集,并基于这些数据开展电能需求和供应的相互匹配。在试点平台上具有一定数量的零售商,这些零售商在支付一定的许可费用后就可以作为代理商来组织点对点的市场化交易,为用户提供切实存在的可再生能源供应。在市场主体与零售商签订代理合同后,

零售商将所负责客户的数据发送至试点平台并交由其公开部分信息。若为供应电能的主体,则平台公开其分布式电源所在位置、需求侧响应资源类型;对于购买电能的主体,则平台公开其用电位置、对发电资源的选择偏好(如更倾向与光伏发电开展交易等)。在通过智能电表等计量装置收集到当前各个时刻供应侧的可交易电能以及购买侧的电能需求情况之后,试点平台根据发用交易双方位置的远近、可接受的电能价格和交易倾向,借助点对点匹配算法为购买方匹配最优的供应方。若出现某个单一供应方(如分布式发电、需求侧响应资源等主体)无法完全覆盖购买电能主体的需求总量,试点同时会补充其他供应方为购买方提供电能供应。

在定价模式上,对于交易价格,Piclo 平均每 30 min 就会通过各类计量仪表对运行数据、发电价格、可交易电能、消费者偏好等信息进行采集,根据发用交易双方位置的远近、可接受的电能价格和交易倾向,借助平台内嵌的点对点匹配算法为购买方匹配最优的供应方。对于输配电价,Piclo 试点的配电网使用费用(DUoS)由配电网运营商(DNO)基于公共配电收费方法(CDCM)计算获得,以回收配电网的维护和运营成本。DUoS 的价格呈分段函数特性,在不同用电时段收取不同费用,结算周期为 0.5 h,即根据每 30 min 所计量的用电量计算。

在与主网衔接模式上,该试点属于联网型微网,与配电网并网运行,互为支撑,实现能量的双向交换。对电网来说,可以作为可控负荷进行管理。外部电网故障时,可转为独立运行模式。

3.4.2 商业模式

在价值定位上,Piclo 试点项目致力于为用户提供与本地可再生能源发电商进行直接交易的服务,且能够根据市场主体偏好进行需求匹配;在关键业务上,该试点包括交易合同签订服务、电能计量采集服务、生产者的可交易电能与消费者的用电需求收集服务、交易匹配出清服务、费用结算服务;在盈利模式上,该试点项目的收入来源主要包括用户接入平台的费用、电力零售商许可证费用等;在成本支出上,该试点包括平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等。

3.5 澳大利亚 Power Ledger

Power Ledger 成立于澳大利亚珀斯,该平台构建了一个基于剩余光伏资源的点对点交易系统。通过该区块链技术使得电能产生的过程中确定电能所有者,并且在交易过程中通过一系列协议完成电能供应商和用户之间的交易,即住户可以高于出售给电力公司的价格直接将剩余电能卖给其他

住户。在交易过程中,完全通过区块链来做协议调控,通过智能合约实现即时结算。在此框架下可再生能源的拥有者可以在微电网内或通过配电网以选定的价格出售剩余的能源,配电系统运营商(DSO)通过配电网获得能源交易收入^[20-24]。

3.5.1 运作机制

在运作方式上,Power Ledger通过智能电表进行数据读取和记录,读数间隔从1~30 min(一般在15~30 min)不等,所计量的数据实时或24 h内显示给市场主体;Power Ledger通过交易匹配在消费者和产消者之间进行直接的电能交易。市场双方的订单都是以同样的增量填补并不断循环,直到市场清仓。交易运行周期是可配置、可选择的,可根据应用服务提供商的要求设定,范围从5 min至24 h不等;此外,Power Ledger根据计量情况灵活配置交易优先组,市场主体选择进入分组,优先在市场上进行组内交易,其可通过预先配置的网络条件监控来自主决定。零售商可在最后将所有剩余订单统一组织成交,直到所有订单消耗完,以承担风险管理角色。

在定价模式上,该试点选择基于地理位置优先的出清模式的交易出清引擎,考虑网络负荷的平衡,给分布式能源部署提供激励,提高分布式网络的效率。试点中的消费者具有较高的自主选择权,可以自行决定从哪里购买能源。例如,某用户甚至可以支付相对高的价格购买本地产的太阳能,使得成交结果有利于低碳排放。此外,用户还可以通过POWER(Power Ledger)代币进行跨市场交易,比如说某一消费者从澳大利亚移居到美国,其原有电力仍可以通过POWER代币开展交易。

在结算模式上,Power Ledger采用POWER和Sparkz的双重代币结算体系,通过其设计的2层区块链来进行运作。POWER代币是使用Power Ledger平台的准入代币,其作用在于让参与者访问和使用平台(如同有限的软件许可权限)。Sparkz代币类似于智能债券,由市场运营方以相应的数量发行给自己的用户,Sparkz和POWER代币之间保持稳定的兑换率。产消者所购买或供应能源的可以用Sparkz代币结算,也可以通过当地的市场运营方将Sparkz代币兑换成现金。

在与主网衔接模式上,Power Ledger试点区域属于联网型微网,与配电网并网运行,互为支撑,实现能量的双向交换。对电网来说,可以作为可控负荷进行管理。外部电网故障时,可转为独立运行模式。

3.5.2 商业模式

在价值定位上,Power Ledger平台采用基于区块链的交易代币,在电能的生产者和使用者之间建立了直接的联系,实现交易过程中无第三方机构参与(包括控制参与人的数据、价格的制定、费用支付的担保等);在关键业务上,Power Ledger平台项目的关键业务主要包括资源的整合与分配、基于智能合约的即时结算、数据计量、Sparkz与POWER代币体系运维、自主资产管理及绿色能源忠诚奖励管理等其他附加项目管理等,附加服务包括有提供移动存储放电设施、提供智能电表和太阳能电池板硬件设施服务等;在盈利模式上,Power Ledger项目的收入来源主要包括用户接入平台费、潜在的附加产品费等;在成本支出上,成本包括有平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等。

4 国外点对点交易试点对比与总结

结合国外开展点对点交易的实践经验,对我国推动构建点对点交易具有重要的参考借鉴意义,上述试点的运营模式呈现如下共性特征。

(1)搭建共享交易平台对于支撑点对点交易开展至关重要。国外开展点对点试点交易的关键在于平台服务供应商的推进。如美国TransActive Grid等试点基本围绕平台化的共享服务提供商为核心,将用户与产消者等各种主体联系起来,通过构筑一套交易标准实现高度的自由化交易。

(2)试点的稳步推进需考虑与当地能源监管政策相适应,同时重视试点组织主体甄选。一方面,点对点交易仍需要与当地的法律法规以及管理条例相契合;另一方面,当前推进点对点交易的国外企业大多为创业公司,技术和资金储备可能相对薄弱。例如,美国TransActive Grid项目因团队内部关于市场方向无法达成一致,在较长一段时期处于停滞状态,澳大利亚Power Ledger也面临着监管和资金压力。

(3)点对点交易试点的选取和推广要遵循因地制宜的原则。国外点对点交易场景主要面向分布式光伏,主要因为当地住宅安装的屋顶光伏等分布式能源的新发电量大幅增加,激增的屋顶太阳能和分布式储能,使得系统拥有了更多便宜、可靠和绿色、自给自足的电能,从而促成了富余分布式光伏的点对点、分散式交易。

同时,在国外诸多点对点交易试点的发展过程中,并没有呈现以试点为核心范围逐渐扩散的态势,而是根据各地区资源等实际情况呈现跨区域、跨国家的试点区域多点开花的现象。如澳大利亚

的 Power Ledger 不仅在珀斯开展试点,在美国宾夕法尼亚州甚至新西兰、奥地利等地都试部署了 Power Ledger 平台。

(4) 区块链技术是搭建点对点交易平台广泛采用的支撑技术。区块链的去中心化、分布式存储、较难篡改等特性,使得国外点对点交易试点普遍采用了以区块链为支撑技术的交易机制。当前国外的点对点交易平台大多部署了区块链支撑技术,以

区块链为核心的能源点对点交易成为分布式能源交易的重点应用场景。如在美国布鲁克林微网(Brooklyn Microgrid)点对点交易试点中,通过区块链使得建筑物屋顶光伏系统供应商在布鲁克林能够将过剩的电力回馈到现有的本地电网,并直接从购买者那里收到付款。与此同时,在商业模式层面,本文从价值定位、关键业务、盈利模式、成本支出 4 方面出发,对上述 5 个试点进行对比总结,见表 1。

表 1 国外点对点交易试点商业模式对比

Table 1 Business models of overseas peer-to-peer trading pilot projects

项目	价值定位	关键业务	盈利模式	成本支出
美国 TransActive Grid	促使社区内用户可以在平台上开展高频次、小规模的新能源交易,为居民等提供收入来源,激励消费者投资、使用分布式能源	市场信息披露、本地能源价格跟踪、交易结算、智能电表安装维护等	智能电表安装费,平台使用/接入服务费、计量设备的维护费用等	平台开发运维成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等
瑞士 Walenstadt	构建基于区块链的社区能源系统运行方式	电能计量、信息披露、能源价格跟踪、组织拍卖交易、提供个性化服务、智能电表安装维护等	平台接入服务费、能源产品交易中间费、售电套餐服务费等	平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等
德国 Sonnen	使得社区内的任何市场主体均可享有使用其余社区成员富余电能资源的权利	富余发电资源整合分配服务;虚拟能源池的安装、维护、运维服务等	19.99 欧元/月会员费、电池销售费用、潜在的附加产品费等	平台开发维护成本、储能(电池)设备投资运维费用、配套设备安装运维成本等
英国 Piclo	为用户提供与本地可再生能源开展直接交易的服务,且根据市场主体偏好进行需求匹配	合同签订服务、计量采集服务、发用电需求收集服务、交易匹配出清服务、费用结算服务等	用户接入平台费、电力零售商许可证费用等	平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等
澳大利亚 Power Ledger	为用户和电能供应商提供去中心化、信息透明、自动化的交易机制和出清平台	资源整合分配、基于智能合约的即时结算、数据计量、代币体系运维、附加项目等管理	用户接入平台费、潜在的附加产品费等	平台开发维护成本、平台资质获得成本、配套设备安装运维成本等

5 点对点交易运作机制及业务模式初探

5.1 运作机制

在交易产品方面,点对点交易标的可以是电能、辅助服务、金融衍生品等,市场初期可选择以电能、辅助服务为主;按交易时间尺度划分,点对点交易根据计量装置所能达到的精度确定交易的最小时间间隔,可以是日、峰平谷、小时甚至更短的时间尺度,并作为交易基本单元。市场主体可选择以交易的最小时间间隔自主灵活申报至年、多月、月、多日、日等发(用)电时段。

在成交方式上,点对点交易可以包括挂牌交易、撮合交易 2 种成交方式。挂牌交易即由购买方(或供应方)在零售平台供应方(或购买方)列表中自由选择,最终成交价格按照挂牌方的挂牌价格执行;撮合交易为购买方或供应方发起交易需求,再由零售平台根据发用交易双方位置的远近、交易偏好、可接受的价格等,按照“价格优先、时间优先”原则为购买方(或供应方)匹配最优的供应方(或购买方),最终成交价格按照匹配对交易双方的算术平

均申报价格执行。

5.2 业务模式

从商业模式视角来看,点对点交易业务模式可以初步划分为平台运营型、参与交易型以及集平台运营与参与交易于一体的混合型 3 种。其中,平台运营型即为市场主体提供交易场所,以提升市场运行效率,降低买卖主体间交易成本的业务模式;混合型即既为市场主体提供交易平台,又代理不具备能力或不愿付出精力的主体参与交易,或利用自有分布式能源等出售电能的业务模式。

对于平台运营型业务模式而言,其功能在于将 2 个或更多独立但相互依存的客户群体连接在一起,通过促进不同群体间的互动而创造价值。其重要性体现在为所有客户提供交易平台,其价值提升在于它所吸引的用户数量的增加(网络效应)。通常体现在以下 3 个方面:第一,吸引用户群体(如客户群体);第二,将客户群体进行配对;第三,通过平台提供的交易渠道降低交易成本。针对点对点平台运营型模式而言,其价值主张则体现在:为参与交易的买卖主体提供公平、公正、公开的交易平台,

提升市场运行效率,为市场主体提供便捷化购买能源的服务,降低买卖主体间的交易成本。同时,引导市场主体就地消纳分布式能源,促进清洁能源就近消纳,降低温室气体的排放。

对于参与交易型业务模式而言,其价值主张则体现在:代理能源消费量较小的中小型用户,像家庭(个人)屋顶光伏发电等分布式电源装机容量较小,或者能源消费量大、分布式电源装机容量大,但没有能力或不愿意花费精力寻找交易对象等主体参与点对点交易。此外,若商业体自身投资建设有分布式资源,也可以直接参与市场交易。

6 关键问题分析

在内涵和特征层面,点对点交易与2017年10月国家发展改革委、国家能源局印发的《关于开展分布式发电市场化交易试点的通知》(发改能源[2017]1901号)中提及的分布式发电市场化交易概念较为接近。但截至目前,试点建设推进缓慢,全国范围仍未形成成熟运作的应用示范。现阶段推进点对点交易所面临的关键问题可归纳为如下几个方面。

(1)对电网调度技术提出更高要求。点对点交易覆盖主体为风电、光伏等分布式新能源,受天气、季节、时段及自然环境的影响剧烈,具有出力不稳定、功率预测不准确、电力供应不持续等固有缺陷。上述局限性将给交易带来不确定性,可能造成交易违约、偏差电量等问题。为促进市场主体之间实现就近点对点交易,亟须提升电网运营和系统调度技术,保证成交的结果可执行。

(2)理顺点对点交易主体输配电成本分摊方式。点对点交易促使发用双方直接“见面”交易,同时电网企业为点对点交易主体提供了并网和电力备用的价值。因此,其过网费的核定方法应与输配电价体系有效衔接,使得点对点交易主体合理承担相应的输配电成本。

(3)完善电力平衡责任分摊机制。当前,电网企业为点对点交易主体无偿提供保底供电服务。随着点对点交易电量规模的增长,点对点交易主体需公平承担传统灵活性资源、储能、需求侧资源等各类灵活性资源提供的电力平衡服务所产生的相关成本。

(4)或将面临市场运营风险。受困于面向分布式资源固化的消费习惯以及用户对风险的规避心理,在初期点对点交易项目的参与主体规模可能较小,项目存在亏损可能。除此之外,在点对点市场运营前期,由于缺乏熟练的管理经验和规范化的市

场约束规则,很容易出现市场混乱和投机行为,可能对运营主体带来经济损失。

7 对我国发展点对点交易的有关启示

(1)初期以积极培育市场主体为核心。点对点交易预计将推动电力零售侧市场发生深刻变革,然而初期可能存在对分布式主体等吸引力欠缺、市场规模不足等问题。

因此,在市场建设初期,代理商等可选择适当采取一些营销手段吸引用户参与交易,以充分培育客户用能管理及市场意识,后续再通过开展能效服务、聚合代理等增值服务,完善、形成市场运营新业态和商业模式。

(2)持续鼓励商业模式创新创造。推动形成以用户需求为导向的点对点交易商业模式。稳定盈利的商业模式是点对点交易顺利运转的关键要素,市场运营主体应积极创新营销服务模式,快速响应用户需求,提升运营效率。形成明确、清晰的业务场景,共建商业生态圈,整合资源为用户提供用电能一揽子解决方案。

(3)推进区块链等关键技术的深度应用。点对点交易过程中涉及主体数量众多、单笔交易规模较小,对于交易过程中产生的争议纠纷,传统的监管方式将难以胜任。与此同时,市场主体违约违规的追责成本可能相对较高,甚至超出交易额度,需结合区块链等新技术建立新的诚信和监管机制,规范点对点交易行为,降低市场运行风险。

(4)注重与现有市场体系和低碳发展目标的衔接。点对点交易具有就近消纳、隔墙售电、区内交易等特征,其运作模式与传统批发市场具有一定差异。因此在开展点对点交易机制设计与实践过程中,应注重与现有的批发市场的交易模式、出清模式、价格机制、输配电价定价机制等关键环节相衔接,尤其注重与已经投入试运行的现货试点模式的衔接。另外也要注重对分布式发电等清洁能源接入电网、参与交易、投资建设、市场消纳等方面的激励,以促进能源低碳绿色发展。

(5)明确权责界面以保障市场平稳发展。推动点对点交易规则设计和试点落地时应界定试点主体范围,明确权责界面,落实主体责任,形成权责明确的点对点交易责任体系。例如,可选择由电网或配网运营商提供保底供电等公共服务或配套保障机制,与此同时,相关成本可以采用政府购买服务或向用户侧疏导的方式加以确定,以保障市场平稳发展。

8 结束语

在“双碳”目标下,分布式发电持续蓬勃发展,以中小用户为代表的产消者预计不断出现,进而催生点对点交易这一新业态、新模式。本文立足于当前国内推动分布式可再生能源市场化消纳的需要,提出了点对点交易的概念含义,对比了其与传统批发侧交易模式及虚拟电厂的联系与区别,梳理分析国外开展点对点交易的运作机制和商业模式,归纳总结了当前推进点对点交易面临的关键问题,最后从市场培育、商业模式创新、技术应用和权责保障4个角度提出相关建议,以期为国内开展点对点交易提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] 中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见 [EB/OL]. (2021-10-24) [2021-11-15]. http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [2] 陈政. 电力分布式交易: 可持续的电力商业运营和监管模式 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2018.
- [3] 2021 年中国光伏行业市场规模和发展趋势 [EB/OL]. (2021-04-12) [2021-11-15]. <https://new.qq.com/omn/20210412/20210412A0CR5V00.html>.
- [4] 王丹, 刘博, 贾宏杰, 等. 基于强化学习的产消用户端对端电能交易决策 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (3): 139-147.
WANG Dan, LIU Bo, JIA Hongjie, et al. Peer-to-peer energy transaction decision of prosumers based on reinforcement learning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (3): 139-147.
- [5] 《储能产业研究白皮书 2021》: 中国电化学储能新增规模突破 GW 大关 [EB/OL]. (2021-04-14) [2021-11-15]. <https://new.qq.com/omn/20210414/20210414A0EH2700.html>.
- [6] 汽势传媒. 2020 中国汽车销量和去年打了个平手 2021 狂想 2 600 万辆 [EB/OL]. (2021-01-14) [2021-11-15]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1688829123253135465&wfr=spider&for=pc>.
- [7] 陈启鑫, 王克道, 陈思捷, 等. 面向分布式主体的可交易能源系统: 体系架构, 机制设计与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7, 31.
CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Transactive energy system for distributed agents: Architecture, mechanism design and key technologies [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7, 31.
- [8] 国家能源局. 关于开展分布式发电市场化交易试点的通知 [EB/OL]. (2017-10-31) [2018-11-20]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/t20171113_3055.htm.
- [9] 林俐, 许冰倩, 王皓怀. 典型分布式发电市场化交易机制分析与建议 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 1-8.
LIN Li, XU Bingqian, WANG Haohuai. Analysis and recommendations of typical market - based distributed generation trading mechanisms [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 1-8.
- [10] 肖谦, 陈政, 朱宗耀, 等. 适应分布式发电交易的分散式电力市场探讨 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(1): 208-218.
XIAO Qian, CHEN Zheng, ZHU Zongyao, et al. Discussion on decentralized electricity market for distributed generation transactions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(1): 208-218.
- [11] JOGUNOLA O, IKPEHAI A, ANOH K, et al. State-of-the-art and prospects for peer-to-peer transaction-based energy system [J]. Energies, 2017, 10(12): 2106.
- [12] TUSHAR W, SAHA T K, YUEN C, et al. A motivational game-theoretic approach for peer-to-peer energy trading in the smart grid [J]. Applied Energy, 2019, 243: 10-20.
- [13] KHORASANY M, MISHRA Y, LEDWICH G. Market framework for local energy trading: A review of potential designs and market clearing approaches [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12 (22): 5899-5908.
- [14] 王宣元, 刘敦楠, 刘蓁, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术 [J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnann, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [15] 孙宏斌. 跨界思维在能源互联网中应用的思考与探索 [EB/OL]. (2020-11-11) [2021-11-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Suo-Y50NpnnC3qLKGDdtzw>.
- [16] Exergy. Electric power technical whitepaper [EB/OL]. (2017-12-14) [2021-11-15]. <http://www.truevaluemetrics.org/DBpdfs/Initiatives/Exergy/Exergy-2018-Technical-Whitepaper-v8.pdf>.
- [17] ABLEITNER L, MEEUW A, SCHOPFER S, et al. Quartierstrom - implementation of a real world prosumer centric local energy market in Walenstadt, Switzerland [J/OL]. arXiv: 1905.07242, 2019. <https://arxiv.org/abs/1905.07242>.
- [18] IRENA. Peer - to - peer electricity trading: Innovation landscape brief [EB/OL]. (2020-01-31) [2021-11-15]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jul/IRENA_Peer-to-peer_trading_2020.pdf?la=en&hash=D3E25A5BBA6FAC15B9C193F64CA3C8CBFE3F6F41.

[19]Germany's sonnenbatterie launches energy trading platform [EB/OL].(2015-11-16) [2021-11-15]. <https://cleantechnica.com/2015/12/06/germanys-sonnenbatterie-launches-energy-trading-platform/>.

[20]OpenUtility. A glimpse into the future of Britain's energy economy [EB/OL]. (2016-05-11) [2021-11-15]. <https://piclo.energy/publications/piclo-trial-report.pdf>.

[21]ZHANG C, WU J, LONG C, et al. Review of existing peer-to-peer energy trading projects [J]. Energy Procedia, 2017, 105: 2563-2568.

[22]张子立,张晋宾,李云波. 国际能源区块链典型项目应用及分析[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 75-82.
ZHANG Zili, ZHANG Jinbin, LI Yunbo. Application and analysis of blockchain applied in typical global energy projects[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 75-82.

[23]孙跃,杨晟,龚钢军,等. 基于可信计算和区块链的配电网内生安全研究[J]. 华电技术, 2020, 42(8): 61-67.
SUN Yue, YANG Sheng, GONG Gangjun, et al. Research on endogenous security of distribution Internet of Things based on trusted computing and blockchain technology [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 61-67.

[24]LedgerPower. Power Ledger whitepaper [EB/OL]. (2018-01-31) [2021-11-15]. <https://www.powerledger.io/company/power-ledger-whitepaper>.

(本文责编:张帆)

作者简介:

尚楠(1993),女,工程师,工学硕士,从事电力市场建模分析、能源经济的研究工作,shangnan@csg.cn;
黄国日(1990),男,工程师,工学硕士,从事电力改革、电力市场的研究工作,huanggr1@csg.cn。

“能源电力数字化转型关键技术及优选路径”专刊征稿启事

“碳达峰”和“碳中和”目标驱动下,能源革命与数字革命相融并进已成为必然趋势,能源电力行业升级转型的重要性和迫切度持续升高。国家“十四五”规划纲要明确提出“以数字化转型整体驱动生产方式、生活方式和治理方式变革”。能源电力数字化转型,即实现数字技术与以电力为中心的能源生产、传输、消费、交易、管理等环节的深度融合。近年来,云计算、大数据、人工智能、区块链、数字孪生等新兴技术层出不穷,发展迅猛,数据采集、传输、分析、管理、决策、执行等过程将迎来变革式创新,为能源电力行业创造新价值、培育新动能。值得注意的是,数字化转型是一个长周期、系统性的过程,而现阶段数字技术融合应用存在瓶颈,运营与监管体系尚不完善,信息物理安全风险不明。因此,亟须围绕能源电力数字化转型,科学设计顶层架构与总体目标,综合分析现阶段水平与未来发展趋势,全面梳理基础理论与关键技术,统筹规划发展路径与示范应用,进而整体提升能源电力行业的资源配置能力、安全保障能力和智能互动能力,为落实“碳达峰”和“碳中和”目标提供重要支撑。

鉴于当前的问题与机遇,《综合智慧能源》(原《华电技术》)拟推出“能源电力数字化转型关键技术及优选路径”专刊,特邀浙江大学李知艺研究员、东北林业大学班明飞副教授和长沙理工大学施星宇讲师担任特约主编,共同探讨能源电力数字化转型相关的前沿成果、关键技术、工程案例以及未来发展趋势,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)能源电力数字化转型的顶层设计、路径优化。
- (2)数字化转型下的能源电力系统投资、规划模式。
- (3)数字化转型下的能源电力系统运营、交易技术。
- (4)能源电力大数据的智能分析技术与应用。
- (5)能源电力数字化转型的监管体系与标准化工作。
- (6)能源电力系统的信息物理安全风险分析与防护。
- (7)能源电力系统的预测、运行控制、故障诊断技术。
- (8)能源电力系统数据要素的价值挖掘与隐私防护技术。
- (9)人工智能、区块链、数字孪生等技术的融合应用。
- (10)智慧园区、车联网与需求侧主动支撑技术。

二、时间进度

专刊拟于 2022 年 7 月 1 日截稿,2022 年择期出版。

三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,论文模板请在网站(www.hdpower.net或www.ienergy.cn)首页作者中心下载。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.ienergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:zhiyi@zju.edu.cn(李老师);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060/13838002988;杨满成 010-63918755/ 13801175292。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.009

虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述

Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants

张凯杰¹, 丁国锋^{1*}, 闻铭¹, 惠红勋², 丁一³, 贺民¹, 褚杰锋¹, 谢康³, 俞楚天⁴, 张利军⁴
ZHANG Kaijie¹, DING Guofeng^{1*}, WEN Ming¹, HUI Hongxun², DING Yi³, HE Min¹,
CHU Jiefeng¹, XIE Kang³, YU Chutian⁴, ZHANG Lijun⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315016; 2. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室, 澳门特别行政区 999078; 3. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 4. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310016)

(1.State Grid Ningbo Electric Power Supply Company, Ningbo 315016, China; 2.State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China; 3.College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 4.Economic and Technological Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310016, China)

摘要:为应对环境污染的持续加剧和化石燃料的日益短缺,推进落实“双碳”目标,风电、光伏等可再生能源在电网中的接入比例不断提高。然而,可再生能源发电具有间歇性和波动性,且接入位置分散,增加了电力系统安全稳定运行的难度。虚拟电厂的提出为解决可再生能源问题提供了新思路,阐述了虚拟电厂(VPP)的概念与实现架构,并从综合能源、电动汽车、可再生能源3个角度分析了VPP参与系统运行优化调度的关键技术,分别实现与电、热、气等综合能源的交互并降低系统运行成本,缓解电动汽车无序充放电对电网产生的负面影响,平抑可再生能源的间歇性和波动性出力。此外阐述了市场环境VPP基于博弈论等方法的策略,并梳理了VPP典型工程应用,为我国VPP的建设与发展提供借鉴。

关键词:虚拟电厂;综合能源;电动汽车;可再生能源;碳中和;市场机制;需求响应;分布式能源;能源互联网

中图分类号:TK 01:TM 73 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2022)02-0060-13

Abstract: In order to cope with the continuous aggravation of environmental pollution and increasing shortage of fossil fuels, the proportion of renewable energy such as wind power and photovoltaic in power grid has been soaring. However, renewable energy power generation is intermittent and fluctuating, and its access points are scattered, which increases the difficulty of safe and stable operation of the system. Virtual power plants provide a new train of thought for the problem above. The concept and implementation architecture of a VPP are expounded. The key technologies for VPPs to participate in power system optimal operation scheduling are analyzed from three perspectives, integrated energy, electric vehicles and renewable energy. The technologies realize the interaction between electricity, heat, gas and other integrated energy, lower the operating cost of the system, alleviate the side effects of disordered charging and discharging of electric vehicles on the power grid, and suppressed the intermittent and fluctuating output of renewable energy as well. In addition, the VPP's market strategies based on game theory and other methods under market environment are analyzed. Sorting out the typical engineering applications of VPPs can provide reference for the construction and development of VPPs in China.

Keywords: virtual power plant; integrated energy; electric vehicle; renewable energy; carbon neutrality; market mechanism; demand response; distributed energy storage; energy internet

0 引言

能源危机的日益加深及化石燃料带来的环境污染,使可再生能源在全球范围内得到广泛应用。

然而,可再生能源发电的可预测性有限,与传统发电机组相比具有间歇性和波动性特征,使得可再生能源的调度变得十分困难^[1]。为实现可再生能源的最佳高效利用,国内外已经进行了大量研究,其中需求响应(Demand Response, DR)和分布式储能(Distributed Storage, DS)被认为是2种关键且潜力

巨大的方案。DR 通过信息通信技术,向电力用户提供变动电价或激励措施,引导用户调节用电行为,从而达到消纳间歇性可再生能源^[2-3]、削峰填谷等目的^[4-5]。DS 通过调节储能设备的充放电状态和功率大小,平衡可再生能源发电给系统带来的波动性^[6-7]。与 DR 相比,DS 的调节速度更快,可以更好地参与电力系统调频等快速调节服务^[8]。

为了实现可再生能源、DR 以及 DS 的有效整合,更好地促进电力系统运行的安全性、稳定性和经济性,虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)的概念应运而生。VPP 是通过先进的通信技术,将区域内的各种分布式电源、储能系统以及可控负荷等聚合成一个整体,实现高效的能源交互,提高电网运行的稳定性^[9-11]。目前已有大量研究聚焦于风电、光伏及储能系统的整合与协同调度,实现 VPP 最优化运营,平抑可再生能源引入的系统波动,充分挖掘可再生能源的发电潜力^[12-14]。

此外,在电源侧,发展综合能源是全球能源未来发展的趋势,通过气、热等储能形式实现不同能源的梯级利用,提高终端能源利用效率,同时提升电力系统灵活性。因此,VPP 与综合能源的协同优化调度逐渐受到更多关注,文献[15-16]分别将风电机组和燃气热电联产机组,热电机组、燃气锅炉和风电机组组成虚拟电厂,实现平抑风电波动、降低发电成本的目标。

在负荷侧,快速增加的电动汽车(Electric Vehicle, EV)具有储能能力,显示出与电力系统灵活互动的巨大优势^[17-18]。然而,大规模电动汽车接入电网充电,也会造成新的负荷增长,加剧电网负荷峰谷差^[19]。VPP 的出现为有效管理日益增多的 EV 提供了新的方法,可更大限度发挥 EV 在降低成本等方面的优势。

本文从综合能源、EV、可再生能源 3 个角度入手,对 VPP 参与系统优化运行的关键技术进行剖析,并研究梳理 VPP 参与电力市场的竞价策略和商业模式^[20-21]。首先,本文对 VPP 的定义进行了全面透彻的阐述,并介绍了 VPP 的实现架构;然后,从冷热电气等综合能源、电动汽车以及风电光伏等可再生能源 3 个角度入手,论述了 VPP 参与电力系统优化调度的关键技术;最后,详细介绍了 VPP 相关的市场机制实现综合电力系统综合效益最大化,并介绍了世界范围内 VPP 的典型工程应用。

1 VPP 的功能与定义

VPP 作为一项蓬勃发展的技术,有多种不同角度的定义。VPP 这一概念,最早起源于 1997 年

Shimon Awerbuch 博士的著作《虚拟公共设施:新兴产业的描述、技术及竞争力》,其中对虚拟公共设施进行了定义^[22]。虚拟公共设施被定义为独立实体间的一种灵活合作,这些实体受市场驱动,能够为消费者提供所需的高效电能服务而不必拥有相应的资产^[22]。此后,行业内众多专家学者都发表了各自的观点与见解,但由于这些研究各具特点,对 VPP 的研究侧重也不尽相同,学术领域尚未形成对 VPP 这一概念准确而统一的定义。

文献[9]将 VPP 定义为分布式发电机组、柔性负荷和储能系统的有机组合,它们作为一个整体在控制中心的管理下参与电网运行。文献[10]中 VPP 被定义为一种先进的区域性电能集中管理模式,依靠这种模式,在不改变电网结构的前提下,可以有效整合区域内各种形态的电源和用电负荷,并经济高效地控制区域内的发电和用电单元。文献[11]将虚拟电厂视为能源互联网技术的一个典型代表,利用先进的信息技术,将大量分散安装的分布式电源、受控负荷和储能单元聚合起来,实现广域范围的能源互联与共享。文献[23]将 VPP 看作一种需求侧响应的实现方式,通过在电力需求侧安装特定装置,提高用电能效调节用电需求,达到与实际发电厂相同的效果,也称为“能效电厂”。文献[24]将 VPP 定义为在不改变现有电网网络拓扑结构的前提下,通过先进的测量、通信和控制技术,由不同类型、不同地域的分布式电源聚合而成的发电联合体。文献[25]从狭义和广义 2 个层面对 VPP 进行了描述,狭义上的 VPP 由直接并网的分布式发电机组和储能装置组成,广义上的 VPP 还包括需求侧的可控负荷、电动汽车等灵活性资源。

在工程实践中, FENIX (Flexible Electricity Network to Integrate Expected Energy Solution) 项目定义 VPP 为众多分布式电源经过整合接入电网后,通过关键传输机制作为配电网和输电网的控制源,并通过综合表征各分布式电源的参数建立整体的运行模式,为系统提供频率控制、电压控制、潮流控制,降低系统运行费用和电能输送成本,提升系统的安全性和可靠性^[26],如图 1 所示。图中 DER (Distributed Energy Resource) 为分布式能源。

综上所述,VPP 技术的核心由 2 点组成,其一为“通信”,其二为“控制”。“通信”是指 VPP 通过先进的通信装置和技术,将分布式电源、储能系统以及需求侧灵活负荷聚合为一个有机整体,具备协调优化调度的能力。“控制”是指通过各类优化算法对 VPP 内的组成元素进行调度控制,实现对分布式电源发电、储能充放电以及可控负荷的灵活调节。

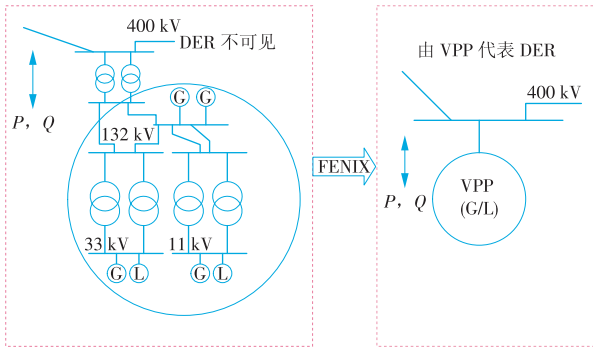


图1 FENIX项目中的VPP架构
Fig.1 VPP architecture in FENIX project

2 VPP的典型控制架构

VPP的控制对象主要包括各种分布式电源、储能系统、可控负荷以及电动汽车,控制结构主要包括集中控制、集中-分散控制、完全分散控制3类,分别如图2—4所示^[10,22,26]。

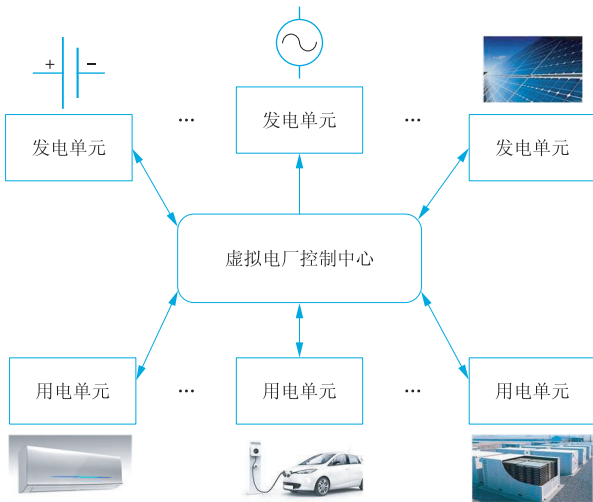


图2 集中控制结构
Fig.2 Centralized control structure

(1)集中控制结构中,VPP的全部负荷信息均传递至控制协调中心(Control Coordination Center, CCC),CCC拥有对VPP中所有单元的控制权,制定各单元的发电或用电计划。CCC控制力强且控制手段灵活,但通信压力大且计算量繁重,兼容性和扩展性也不理想。

(2)集中-分散控制结构中,VPP被分为2个层级,分别为低层控制和高层控制。在低层控制中,本地控制中心管理本区域内有限个发用电单元,彼此进行信息交换,并将汇集的信息传递到高层控制中心;高层控制中心将任务分解并分配到各本地控制中心,然后本地控制中心负责制定每一个单元的发电或用电具体方案。此结构有助于改善集中控制方式下的数据拥堵问题,并使扩展性得到提升。

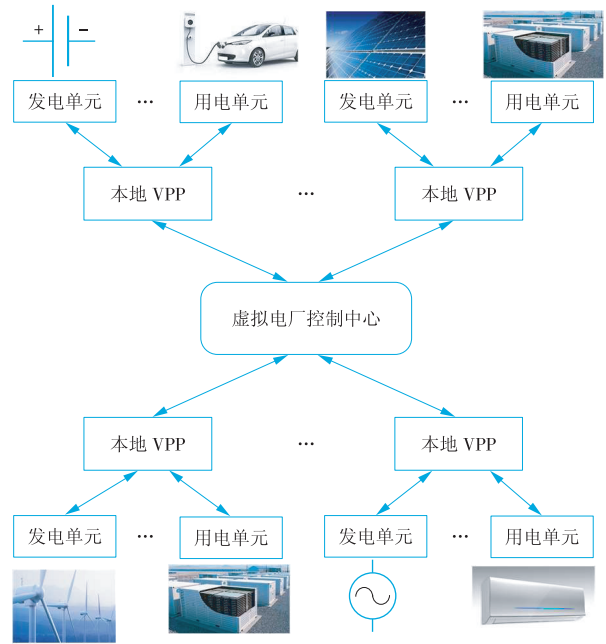


图3 集中-分散控制结构
Fig.3 Centralized-decentralized control structure

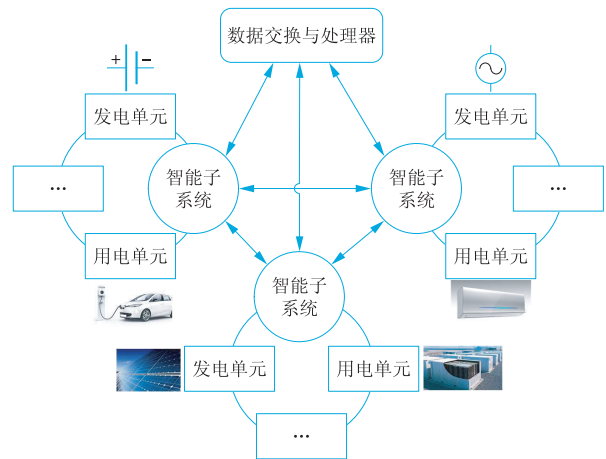


图4 完全分散控制结构
Fig.4 Fully decentralized control structure

(3)完全分散控制结构中,VPP被划分为若干个自治的智能子系统,这些子系统通过各自的智能代理彼此通信并相互协作,实现集中控制结构中控制中心的功能,控制中心则成为数据交换与处理器中心。

VPP的优化调度主要是利用先进的通信技术和控制策略,对内部的分布式电源进行聚合,调节它们的出力,使之参与电力市场和辅助服务市场的运行。其目标为在满足用户负荷需求的前提下,使发电成本、污染物或碳排放量最小。目前主流的VPP模型目标函数为^[27-32]

$$\max P_{\text{rofit}} = P_{\text{rofit}}^{\text{out}} + P_{\text{rofit}}^{\text{in}} - C_{\text{market}} - C_{\text{dg}} - C_{\text{wind}} - C_{\text{PV}} - C_{\text{bat}} - C_{\text{DR}}, \quad (1)$$

式中: $P_{\text{rofit}}^{\text{out}}$ 和 $P_{\text{rofit}}^{\text{in}}$ 分别为VPP从电力市场和内部售电获利; $C_{\text{punish}}^{\text{market}}$ 为当VPP实际出力不满足合同要求时进

行的赔偿; C_{dg} 为燃气轮机的综合成本,包括运行成本、启停成本、备用成本等; C_{wind} 为风电的弃风成本和运行维护成本的总和; C_{pv} 为光伏的弃光成本和运行维护成本的总和; C_{bat} 为电池的充放电使用成本; C_{DR} 为VPP中的DR成本。具体的表达式可根据实际研究的侧重点进行定义。同时,VPP优化调度还需满足以下约束条件。

(1)燃气轮机约束:

$$\begin{cases} P_{dg,i}^{\min} \leq P_{dg,i}^t + R_{dg,i}^t \leq P_{dg,i}^{\max} \\ P_{dg,i}^{\downarrow} \leq P_{dg,i}^{t+1} - P_{dg,i}^t \leq P_{dg,i}^{\uparrow} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{dg,i}^{\max}$ 和 $P_{dg,i}^{\min}$ 分别为第*i*个燃气轮机功率的上、下限; $P_{dg,i}^{\uparrow}$ 和 $P_{dg,i}^{\downarrow}$ 分别为第*i*个燃气轮机向上、向下爬坡的功率限值; $P_{dg,i}^t$ 为第*i*个燃气轮机*t*时刻功率; $R_{dg,i}^t$ 为第*i*个燃气轮机*t*时刻备用容量。

(2)风电、光伏约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{wind,i}^t \leq P_{wind,i}^{pre} \\ 0 \leq P_{pv,i}^t \leq P_{pv,i}^{pre} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{wind,i}^t$ 和 $P_{pv,i}^t$ 分别为*t*时刻第*i*个风电、光伏机组可调度功率; $P_{wind,i}^{pre}$ 和 $P_{pv,i}^{pre}$ 分别为预测的*t*时刻第*i*个风电、光伏机组可调度功率。

(3)储能充放电约束:

$$\begin{cases} SOC_i^{\min} \leq SOC_{bat,i}^t \leq SOC_i^{\max} \\ SOC_{bat,i}^t = SOC_{bat,i}^{t-1} + P_{bat,i}^t \\ P_{bat,i}^{\text{discharge}} \leq P_{bat,i}^t \leq P_{bat,i}^{\text{charge}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: SOC_i^{\max} 和 SOC_i^{\min} 分别为第*i*个储能设备的容量和最小储能值; $P_{bat,i}^{\text{charge}}$ 和 $P_{bat,i}^{\text{discharge}}$ 分别为第*i*个储能设备的最大充电功率和最大放电功率。

(4)DR约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{curt,i}^t \leq P_{curt,i}^{\max} \\ \sum_{i=1, i \in VPP}^N P_{curt,i}^t = P_{curt}^t \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{curt,i}^t$ 为*t*时刻第*i*个DR用户的中断负荷功率; P_{curt}^t 为*t*时刻VPP中所有DR用户的中断负荷功率; N 为VPP中DR用户的数量; $P_{curt,i}^{\max}$ 为*t*时刻第*i*个DR用户的中断负荷功率上限。

(5)系统功率平衡约束:

$$P_{dg}^t + P_{wind}^t + P_{pv}^t + P_{bat}^t + P_{curt}^t = P_{load}^t + P_m^t \quad (6)$$

式中: P_{load}^t 为VPP的内负荷功率; P_m^t 为VPP向能量市场提供的功率,正值代表向能量市场输出功率,负值代表从能量市场输入功率。

(6)线路潮流与母线电压约束:

$$\begin{cases} P_{ij}^t \leq P_{ij}^{\max} \\ U_i^{\min} \leq U_i^t \leq U_i^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_{ij}^t 为节点*i,j*之间支路的传输功率; P_{ij}^{\max} 为节点*i,j*之间支路的传输功率极限; U_i^t 为节点电压; U_i^{\min} 和 U_i^{\max} 分别为节点电压的下、上限。

3 VPP的优化调度技术

3.1 VPP对综合能源的优化调度

近年来,随着综合能源概念的不断发展和能源行业的发展模式愈加要求高效、安全和可持续,VPP可以有效帮助冷热电联供(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)型综合能源系统实现协调优化控制。VPP参与能量市场和旋转备用市场,可以加强系统内部各单元间的协调调度,提高系统决策灵活性,获得更为可观的经济效益。文献[32]在考虑热电联产机组参与旋转备用市场情景下,建立了能量市场和旋转备用市场下VPP的日前热电联合调度优化模型,针对VPP面临的不确定性和由此带来的风险,采用鲁棒优化处理能量市场(Energy Market, EM)电价、旋转备用市场(Spinning Reserve Market, SRM)电价、风电出力、光伏出力、电负荷和热负荷的不确定性,降低了系统风险。文献[33]研究了包含风电供热的VPP“热电解耦”负荷优化调度,提出了将供热区域内的大型热电厂、风力发电、光伏发电整合成VPP参与电网运行,并加入风电供热作为热负荷侧可调度资源,构建了含风电供热的全因素VPP热电负荷优化调度模型,设计了VPP运行策略及偏差补偿策略。文献[34]则针对燃煤热电联产机组“以热定电”的运行方式造成的灵活调节能力不足的问题,运用基于拉丁超立方采样的场景法处理风光出力的不确定性,提出了一种基于实时电价的VPP运行策略,优先利用新能源发电,在获得较好经济效益的同时,使电力系统的运行更加低碳、安全。文献[35]在之前的基础上加入了冷负荷,建立了多区域VPP综合能源协调调度优化模型,该模型考虑了VPP内不同区域间的冷、热、电交互,以及区域内的冷、热、电互补问题,将单区域VPP的热电协调调度优化问题扩展到多区域VPP的冷热电协调调度优化问题。文献[36]在VPP中进一步增加了电转气单元,同时考虑VPP参与由EM,SRM及天然气市场组成的多种市场,并提出了参与多种市场的电、热、气协调优化调度模型。

综上所述,VPP通过双向通信技术实现发电侧、需求侧、电力交易市场等各个部分的信息与数据的调度,可有效提升系统的能源利用效率,使系统运行更加灵活可靠,充分实现了资源的优化配置。

3.2 VPP对电动汽车的优化调度

EV因其节能、零排放的优点,近年来得到了快速发展,但大规模EV接入电网充电时会加剧电网峰谷差,对电网运行的安全稳定造成影响。然而,通过VPP聚合EV既可有效缓解EV无序充放电给

电网产生的负面影响,又可丰富电力系统的运行和控制手段,使 VPP 参与系统削峰填谷、提供频率稳定和备用容量等辅助服务^[19]。

文献[37]针对慢充 EV 集群,提出了一种电动汽车虚拟电厂(Electric Vehicle Virtual Power Plant, EVVPP)多时间尺度响应能力评估模型,在日前对 EVVPP 响应能力进行评估,日内基于响应时间裕度和荷电状态裕度对 EVVPP 响应能力进行滚动修正,分析了 EV 状态变化对 EVVPP 响应能力的影响。

此外, EV 并网时的鲁棒优化也是 VPP 应用中人们密切关注的一个核心问题。文献[19]为解决可调度电动汽车数量的随机性与不确定性问题,构建了含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度模型,并分析了 VPP 和 EV 对日运行成本及环境的影响。文献[38]建立了含 VPP 的双层逆鲁棒优化调度模型,分析了风电消纳水平和电动汽车入网充放电功率之间的极限制约关系。

3.3 VPP 对可再生能源的优化调度

随着我国经济社会的快速发展,化石燃料大量燃烧带来的环境问题日益突出, VPP 中的分布式电源多以风电、光伏为主,其绿色低碳的特性可有效缓解能源危机。然而,可再生能源发电站具有间歇性或随机性以及存在预测误差等特点^[22],并网后会在一定程度上对电网运行的稳定性造成不利影响。

针对可再生能源的波动性,提高风电、光伏等可再生能源的功率预测精度能有效缓解这一问题。文献[39]提出了基于堆叠降噪自编码器的风光功率预测模型,用以实现场站区域风光功率的月度预测。文献[40]采用基于机器学习的集群聚类划分方式,利用每个子区域中的特征电站结合神经网络法实现区域电站未来 3 d 的功率预测。文献[41]以风电功率、光伏发电功率和负荷间的互动耦合关系为依据,提出了基于变量注意力机制-多任务学习的风-光-荷联合预测方法,实现了 15 min 时间尺度上风-光-荷预测精度的同时提升。文献[42]就目前风电场的短期功率预测技术进行了归纳分析,建立了效率高、时间短的风电场短期功率预测模型 SVM_PSO,实现了 10 min 时间尺度上的功率预测。

VPP 的核心功能是将分布式电源、储能系统(Energy Storage Systems, ESS)、可控负荷等参与对象整合为一个有机整体,其中的储能系统在解决间歇性和波动性方面具有极大优势,大量研究引入 ESS 用于平衡风机和光伏电站出力的随机变化。文献[43]利用 ESS 平抑光伏波动,使得光伏发电的电能质量和经济效益显著提升。文献[44]基于机会约束规划,在 VPP 的优化调度中充分发挥 ESS 平衡风

机出力不确定性的作用,有效降低了系统的失负荷概率和弃风概率。文献[45]利用 ESS 削峰填谷,减少日负荷波动,提升电网消纳风电的能力。文献[46]则构建了含有 ESS 调度和 ESS 优化目标函数的 ESS 优化配置模型,并采用混合整数线性规划和粒子群优化算法进行求解,使 ESS 在 DR、削峰填谷和提高电压质量方面发挥重要作用。文献[47]针对解决分布式电源难以分配、控制和管理的问题,引入 VPP 概念,与能效电厂进行联合调度优化。

建立科学合理的模型,细致量化可再生能源带来的不确定性,也是 VPP 在消纳可再生能源时的一个有效途径。文献[48-49]提出了考虑条件风险价值(CVaR)的 VPP 多电源容量优化配置模型,利用 CVaR 来度量可再生能源出力及市场电价不确定性给规划 VPP 带来的风险,基于成本效益分析获得多电源容量最优配置方案。文献[50]针对大规模风电并网消纳的难题,在风电并网系统的需求侧引入 DR-VPP,提出了一种考虑 DR-VPP 的风电并网系统分布式日前经济调度模型,实现了电网经济调度和风电消纳的全局最优。文献[51-52]在风电的基础上进一步考虑了光伏。文献[51]为促进以风光为代表的分布式能源优化利用,考虑以风险损失后的 VPP 运营净收益最大化为目标,建立随机调度优化模型,利用 CVaR 理论和置信度方法描述 VPP 运行不确定性。文献[52]将光热电站聚合到一般的风火虚拟电厂中,构建了计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度模型,充分挖掘了光热电站调节潜力并提升了虚拟电厂调节能力。文献[53]研究了 VPP 参与电力市场的情况,在分析 VPP 在市场中与独立系统运营商(Independent System Operator, ISO)之间运行规则的基础上,设计和引入相关奖惩措施,更大限度减少弃风。文献[54]通过日前经济性和环境效益目标建立多目标优化调度模型,得到日前计划出力值,再以日内滚动优化调度中的最小电源调整量和最小调整成本为目标,于日内滚动修正计划出力值。文献[55]用等效负荷的方法处理风电机组出力,并引入碳交易机制,以系统联合调峰成本最低为优化目标建立核-火-虚拟电厂 3 阶段联合调峰模型,有效降低了系统的运行成本与碳排放。

3.4 VPP 中负荷控制的时延优化

由于电力系统电力电量存在实时平衡的特殊性,对其传输网络有低时延和高安全性的要求。面对虚拟电厂中负荷控制多样化高标准的通信服务需求,5G 网络将迎来重大的发展机遇。传统“一刀切”的网络架构已无法解决负荷控制在带宽、时延、

可靠性等方面的个性化需求,网络切片技术为 5G 通信适应多种类型设备和不同服务的需求,提供了新的思路和解决方案^[56]。文献[56]定义了电力系统中端到端的时延,将其分为 3 部分,即固有时延、传播时延、排队时延。

针对负荷控制中具体的时延量化工作,文献[57]提出了一种线性估计模型,用以量化通信时延,同时在分析实验室条件下广域闭环控制系统中设备的操作时延基础上,提出了基于实时数字仿真器硬件在环平台的波形对比测量法,用正态分布拟合操作时延的分布特性。文献[58]在综合考虑了通信时延与操作时延后,以估计实际系统中的闭环时延分布为目标,提出了正态分布模型,以及确定正态分布模型参数的方法。

实际负荷控制迫切需要有效的补偿修正方法来尽可能地减少通信时延对控制流程的影响,实现控制效果的优化。针对此需求,文献[59]将时延补偿与闭环控制系统的实现相结合,提出了一种分层预测补偿方法,通过该预测方法为控制策略提供近似的实时数据,使时延的影响与闭环控制策略隔离,进而保证控制效果。文献[60]针对实际电力系统的负荷调控过程中不可避免的通信时延和参数测量误差,提出了基于云边双端测量和回溯修正的负荷集中-分散控制架构,从而解决了通信时延带来的系统振荡和测量误差带来的容量控制精度问题。

4 VPP 的市场机制与工程应用

4.1 VPP 的市场机制

VPP 的顺利发展与配套的商业模式关系密切,因此,应加大对 VPP 竞价策略的研究,使 VPP 作为一个市场主体,在售电侧逐步放开的环境下尽可能多得从市场中获益。

在市场架构方面,文献[61]从经济资本概念切入,阐述了 VPP 调度模型中风险计算的经济学含义,并引入条件在险现金流确定 VPP 经济资本的需求量。文献[62]提出了 VPP 批发、零售 2 级市场的商业模式与典型交易组织模式,并结合我国泛在电力物联网建设和电力市场的建设方向,给出了 VPP 发展建议,即 VPP 对外参与电力批发市场,对内整合零售市场,基于此项运营特点,构建 VPP 对内、对外的 2 级市场交易体系。

在竞价策略方面,对于 VPP 竞价策略的研究重点主要集中在处理 VPP 内部资源的不确定性,构建 VPP 参与市场竞价的相关模型。文献[63]构建了含 EV 和风电机组的 VPP 参与日前能量市场和调节市场时的联合最优报价策略,并利用数学编程语言

AMPL(A Mathematical Programming Language)进行求解。文献[64]在考虑用户多种博弈行为的基础上设计研究竞价策略,建立了未来智能电网用户并网多目标优化模型,设计了基于 VPP 技术的未来智能电网用户并网规则。

在参与模式方面,部分研究又进一步将 DR 纳入 VPP 竞价策略的考虑之中。文献[25]将市场导向的 DR 分为价格型 DR 和激励型 DR,分别对各自参与 VPP 运营的情况进行了论述。文献[30]分析了 VPP 同时参与双边合同市场、日前市场、实时市场和平衡市场的 3 阶段竞标流程,并在此基础上建立了同时参与多类电力市场情况下计及 EV 和 DR 的 VPP 3 阶段竞标模型。文献[65]在对 VPP 竞价策略进行研究时,一方面考虑售电侧放开对其参与电力市场的影响;另一方面考虑 VPP 通过聚合各类负荷,采用电价或激励引导其用电行为,使其作为发电资源参与电力市场,构建了售电侧放开环境下计及 DR 的虚拟电厂参与市场交易的流程。

一般的组织流程为 VPP 以整体收益最大为目标对内部分布式单元进行日前优化,并根据优化结果上报计划参与市场竞价,经调度中心进行市场出清,依据调度指令下发日前计划,各分布式单元进行日内计划执行,并在日后进行结算及零售商再选择。

上述竞价策略中,均采用最大化 VPP 净收益或 VPP 各成本之和最小作为目标函数,但在电力市场中存在多个主体,且仅考虑 VPP 经济性所得的最优调度方案往往无法满足配电网的安全需求,为使各类资源获得最优分配,平衡各市场主体利益以及 VPP 的经济性和配电网的安全性,最大化综合效益,研究者们又将博弈论的理念引入到了 VPP 的市场机制当中。文献[28]提出了双层优化理念,针对具备发电能力并拥有配网运营权的发电型售电公司,提出售电公司利用 VPP 技术辅助参与市场的双层优化调度模型和求解方法,配网层优化售电公司运营收益,VPP 层使 VPP 经济效益最高。文献[66-68]将主从博弈应用于 VPP,文献[66]认为电价竞标和电量竞标 2 个阶段存在主从递阶关系,建立了 VPP 的电价竞标模型和电量竞标模型,将 Stackelberg 博弈理论应用于 VPP 的电价竞标和电量竞标过程中。文献[67]构建了以 VPP 作为售电商的 EV 主从博弈模型,以 EV 充电站为充电代理实现二者的博弈均衡。文献[68]建立了运营商和多虚拟电厂的一主多从博弈模型,用以研究运营商动态定价行为和 VPP 能量管理,兼顾了配电网运营商和 VPP 的利益,并提出一种基于 Kriging 元模型的主从

博弈均衡算法。在主从博弈中,常用的双层目标博弈模型为

$$\max F_i = \sum_{t=1}^T \left[\lambda_{i,t} (\bar{P}_{i,t} - \Delta P_{i,t}) - f(\bar{P}_{i,t}) \right], \quad (8)$$

$$\max F_{dj} = \sum_{t=1}^T \left[-\lambda_{dj,t} (\bar{P}_{dj,t} - \Delta P_{dj,t}) \right], \quad (9)$$

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 - F_4, \quad (10)$$

式中: F_i 为分布式电源*i*的效用函数; $\lambda_{i,t}$ 为VPP为分布式电源*i*制定的电价; $\bar{P}_{i,t}$ 为*t*时刻机组*i*的实时出力; $\Delta P_{i,t}$ 为*t*时刻机组*i*的弃电量; $f(\bar{P}_{i,t})$ 为*t*时刻机组*i*的发电成本; F_{dj} 为负荷*j*的效用函数; $\lambda_{dj,t}$ 为负荷*j*的电价; $\bar{P}_{dj,t}$ 为*t*时刻负荷*j*的实时需求量; $\Delta P_{dj,t}$ 为*t*时刻负荷*j*的负荷调整量; F 为VPP的运行成本; F_1 为VPP支付给内部分布式电源和负荷的费用,可正可负,其值为正表示VPP支付费用,其值为负表示VPP获得收益; F_2 为弃风弃光成本; F_3 为DR成本; F_4 为与配电网发生交易的收益。

式(8)与式(9)为下层模型,解决电量优化问题,式(10)为上层模型,解决电价优化问题。

文献[69-70]选取了非合作博弈,前者运用非合作博弈理论构建发电侧和用户需求侧的互动模型,并同时考虑用户满意度,以各自效用最大化为目标进行博弈寻优运算,在兼顾用户满意度的前提下实现用户负荷侧经济最优以及发电侧效用最优;后者提出了考虑VPP经济性和配电网安全性的非合作博弈模型,通过循环迭代求解使双方达到Nash均衡。文献[71]进一步考虑了博弈论中的合作模式,基于寡头竞争的博弈均衡理论,分别建立了风电商和EV聚合商以VPP合作模式和非合作模式参与投标竞争的电力市场多时段随机博弈均衡模型。

4.2 VPP的工程应用

具有代表性的VPP工程应用,主要集中于欧盟和美国。欧盟的VPP项目,主要聚焦于对分布式电源的整合与应用。2001起实施的欧盟虚拟燃料电池发电厂(Virtual Fuel Cell Power Plant, VFCPP)项目将31个分散的居民燃料电池聚合成1个有机的热电联产整体,降低了生产成本和峰值负荷^[72]。2005年欧盟实施FENIX项目,采用北部和南部2个方案,聚合了大量分布式电源,使欧盟供电系统实现高性价比、安全、可持续的技术体系和商业框架^[73]。2007年,荷兰研究中心提出了功率匹配器的概念,基于此实施了包含10个微型热电联产机组的VPP项目,实现了在电价的驱动下降低配电网峰值^[74]。同在2007年,卡塞尔大学将德国的风力涡轮机、太阳能系统、沼气电站和水电站组成最大的VPP项目^[25]。2009年丹麦的EDISON项目采用VPP技术

对电动汽车智能充放电进行管理,为大规模的EV并网提供了支撑^[75]。2010年启动的欧盟WEB2ENERGY项目以VPP的形式将分布式电源与需求侧资源进行聚合,并利用智能计量技术,实现了智能能量管理和智能配电自动化^[76]。文献[25]还提出2012年德国莱茵集团(RWE)开始运营第一家商用规模的虚拟电厂,采用西门子设计的能量管理系统对绿色能源设备进行组合管理,实现了稳定供电,并获得政府补贴。

与欧洲VPP项目相比,美国的VPP研究更关注DR^[77]。例如,纽约ISO(NYISO)电力市场下的DR产品包括紧急DR计划、日前DR计划、有自备发电装机的特殊资源以及需求侧辅助服务计划4类;PJM电力市场下的DR分为参与PJM能量市场的DR、参与PJM容量市场的DR和参与PJM辅助服务市场的DR3类,其中第3类对检测设备要求最高;德克萨斯州电力可靠性委员会(ERCOT)的DR是一种自愿的负荷响应,参与的负荷作为一类独立资源的负荷,具有和发电机相同的遥测和调度要求,在负载之上进行能量平衡。

综合上述事例,可以总结出欧洲实行VPP主要针对分布式电源在电力系统中的配置与利用,美国的VPP更加侧重于DR,可控负荷在其中占据重要地位。

我国同美国相似,虚拟电厂的工程应用更侧重其内部灵活负荷的DR。我国的VPP项目起步较晚但发展迅速,上海市于2019年12月组织开展虚拟电厂运营项目“迎峰度冬”试点交易工作^[78],将客户用能设备进行深层连接和精准接入,实现对闲散负荷的聚合,同时通过终端移动App,实现用户对自身能耗情况的检测,进一步提升自身电力能源的精细化管理水平^[78]。河北省的实践主要集中在DR方面^[79],出台了《关于大力开展电力需求侧管理的意见》,为需求侧管理项目的开展设立了专项资金,并将“十项绿色工程”作为重点工作。江苏省于2015年出台了《江苏省电力需求响应实施细则》^[79],并自2016年起,开始实施国家重点研发计划“城区用户与电网供需友好互动系统”,立足于“科学合理的机制及模型设计”和“高效便捷的用户及电网侧装备”,选取苏州环金鸡湖地区和常州武进地区为示范工程,使示范互动家庭用户综合能耗下降5.5%以上,示范区峰谷差下降5.8%以上。南方电网公司以“绿色行动”为契机,于2010年成立了南方电网综合能源有限公司,开展合同能源管理节能服务项目共115项,已建成或初步建成合同能源管理项目72项^[80]。

4.3 VPP的研究展望

随着技术的快速提升以及新需求的不断涌现, VPP的研究也将不断深入,有待研究的热点问题主要包含以下 2 个方面。

首先,随着 5G 通信技术的进步与普及,信息传输速度愈发迅捷,应当更加关注 VPP 中灵活负荷的调控指令在传输时的通信延迟问题,使之与 5G 技术紧密结合,对调控效果实现优化。当 VPP 通过调节内部灵活负荷参与电力系统辅助服务时,需要减小通信延迟,提高调控速度^[60]。但是,目前大部分针对灵活负荷集群控制方法的研究,其关注焦点集中在控制方法设计本身,在研究中往往将环境设定为负荷调控指令在传输时没有通信延迟,调控行为能够瞬间实现,并且假设电力系统的频率偏差可以被精确检测而没有测量误差^[81-84]。在 VPP 的实际运行过程中,通信延迟和测量误差难以避免,这将对 VPP 提供辅助服务的性能产生极大影响。

其次,当 VPP 聚合工业用户时,其主要调控负荷多为公共能源系统中的灵活负荷,如空调等温控负荷、空气压缩机等设备。研究过程中的物理建模以及控制策略,也多是针对上述对象提出^[85-87]。在工艺能源系统方面,现有研究稍显薄弱。针对工艺终端,可梳理开采、输运、使用全寿命周期内高能耗点及易于调节点,从能源活动排放、净调入电力、工业生产过程 3 方面展开研究,计算碳排放量及 VPP 的外特性参数,提出工艺终端灵活负荷的调控优化策略,实现助力“双碳”以及为电力系统提供辅助服务的效果,并结合环境经济效益提出 VPP 中工艺能源系统的优化调度评估模型。

5 结论

VPP 是通过先进的通信技术,在不改变电网原有拓扑结构的基础上,将地理位置分散的分布式电源、储能系统、可控负荷等单元聚合成 1 个协调管理系统,依靠一系列控制手段使其参与到电力市场和电网运行当中。它的概念侧重于对外界表现出的功能与效果,其核心内容可概括为“通信”与“控制”。

VPP 的控制结构分为集中控制、集中-分散控制、完全分散控制 3 类,在优化调度层面聚焦于 3 点。

(1) 与电-热-冷-气等综合能源协同优化,促进能源行业安全、高效发展,缓解能源危机。

(2) 与 EV 进行协调优化调度,降低 EV 大规模并网时产生的峰谷差。

(3) 消纳风电、光伏等可再生能源,平抑分布式

电源发电的间歇性和随机性带来的影响,减少弃风弃光现象,提高电网运行的经济性和可靠性。除优化调度外,建立适合我国 VPP 发展的市场机制也非常重要,需找到适合我国 VPP 发展的商业模式,通过对竞价策略的研究确保 VPP 在市场环境下的收益,并结合博弈论使综合效益最大化。

在工程实践方面,欧洲 VPP 项目关注对分布式电源的聚合与控制,美国则更偏向于使用可控负荷参与 DR,我国 VPP 项目起步较晚但发展迅速,是未来发展的重点领域。随着我国电力体制改革的推进,VPP 在电力市场的发展和能源物联网的建设方面都有着更加重要的作用。

参考文献:

- [1] KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: A stochastic bi-level approach [J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2016, 7(2): 794-806.
- [2] FARHANGI H. The path of the smart grid [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1): 18-28.
- [3] ZIADI Z, TAIRA S, OSHIRO M, et al. Optimal power scheduling for smart grids considering controllable loads and high penetration of photovoltaic generation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2350-2359.
- [4] HUI H X, DING Y, SHI Q X, et al. 5G network - based internet of things for demand response in smart grid: A survey on application potential [J]. Applied Energy, 2020, 257: 113972-113986.
- [5] XIE K, HUI H X, DING Y. Review of modeling and control strategy of thermostatically controlled loads for virtual energy storage system [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-13.
- [6] HILL C A, SUCH M C, CHEN D, et al. Battery energy storage for enabling integration of distributed solar power generation [J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2012, 3(2): 850-857.
- [7] LEE D, KIM J, BALDICK R. Stochastic optimal control of the storage system to limit ramp rates of wind power output [J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2013, 4(4): 2256-2265.
- [8] 孔见虹,李平,黄未,等.基于分布式储能的光伏并网系统调频策略研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 80-83, 96. KONG Jianhong, LI Ping, HUANG Wei, et al. Research on frequency modulation strategy of photovoltaic grid - connected system based on distributed energy storage [J]. Power Electronics, 2020, 54(4): 80-83, 96.
- [9] 王海冰,王简,王承民,等.计及风险约束的虚拟电厂能量管理建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5942-

5950.
WANG Haibing, WANG Jian, WANG Chengmin, et al. Risk-constrained energy management modeling of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5942-5950.
- [10] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [11] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 753-761.
LIU Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761.
- [12] 别朝红, 胡国伟, 谢海鹏, 等. 考虑需求响应的含风电电力系统的优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 115-120.
BIE Chaohong, HU Weiguo, XIE Haipeng, et al. Optimal dispatch for wind power integrated systems considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 115-120.
- [13] YU R, JAN K, SONIA M. Storage size determination for grid-connected photovoltaic systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1): 68-81.
- [14] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 含大规模储热的光热电站-风电联合系统多日自调度方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 17-23.
JIN Hongyang, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Multi-day self-scheduling method for combined system of CSP plants and wind power with large-scale thermal energy storage contained [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 17-23.
- [15] HOUWING M, PAPAETHYMIU G, HEIJNEN P W, et al. Balancing wind power with virtual power plants of micro-CHPs [C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009.
- [16] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [17] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与作用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10.
HU Zechun, SONG Yonghua, XU Zhiwei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10.
- [18] 高赐威, 张亮. 电动汽车充电对电网影响综述[J]. 电网技术, 2011, 32(5): 127-131.
GAO Ciwei, ZHANG Liang. A survey of influence of electric vehicle charging on power grid [J]. Power System Technology, 2011, 32(5): 127-131.
- [19] 孙国强, 袁智, 耿天翔, 等. 含电动汽车的虚拟电厂鲁棒随机优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 44-50, 79.
SUN Guoqiang, YUAN Zhi, GENG Tianxiang, et al. Robust stochastic optimal dispatching of virtual power plant containing plug-in electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 44-50, 79.
- [20] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: Part I problem formulation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(2): 949-956.
- [21] 梅生伟, 刘锋, 魏韡. 工程博弈论基础及电力系统应用[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 65-67.
- [22] 卫志农, 余爽, 孙国强, 等. 虚拟电厂的概念与发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [23] 姜海洋, 谭忠富, 胡庆辉, 等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力, 2010, 43(6): 37-40.
JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui, et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry [J]. Electric Power, 2010, 43(6): 37-40.
- [24] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2295-2301.
ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Economic analysis of virtual power plants based on bi-level optimization dispatch [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2295-2301.
- [25] 徐峰, 何宇俊, 李建标, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 2-6.
XU Feng, HE Yujun, LI Jianbiao, et al. Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 2-6.
- [26] 夏榆杭, 刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 100-106, 115.
XIA Yuhang, LIU Junyong. Review of virtual power plant based on distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 100-106, 115.
- [27] 吴威辰, 王旭, 蒋传文, 等. 计及需求侧响应的虚拟电厂运行优化研究[J]. 新能源发电控制技术, 2019, 41(2): 29-32, 94.

- WU Weichen, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Research on operation optimization of virtual power plants under consideration of demand-side response[J]. The New Energy Power Control Technology, 2019, 41(2): 29-32, 94.
- [28] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 952-960. ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 952-960.
- [29] 刘祚宇. 含电动汽车虚拟电厂的规划与优化调度[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [30] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1759-1766. ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1766.
- [31] 赵洪山, 刘然. 奖惩机制下虚拟电厂优化调度效益分析[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 2840-2846. ZHAO Hongshan, LIU Ran. Benefit analysis of optimal schedule of virtual power plant under reward-punishment mechanism[J]. Power System Technology, 2017, 41(9): 2840-2846.
- [32] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 等. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3118-3128. SUN Guoqiang, ZHOU Yizhou, WEI Zhinong, et al. Thermal and electrical scheduling of a virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets based on robust optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3118-3128.
- [33] 袁桂丽, 王琳博, 王宝源. 基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4974-4985. YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [34] 袁桂丽, 贾新潮, 房方, 等. 虚拟电厂源荷双侧热电联合随机优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 2932-2940. YUAN Guili, JIA Xinchao, FANG Fang, et al. Joint stochastic optimal scheduling of heat and power considering source-side and load-side of virtual power plant[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 2932-2940.
- [35] 周亦洲, 孙国强, 黄文进, 等. 多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6780-6790. ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
- [36] 许福鹿, 周任军, 曹俊波, 等. 多种市场下虚拟电厂电-热-气协调优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(9): 35-42. XU Fulu, ZHOU Renjun, CAO Junbo, et al. Coordinated optimal dispatching of power-heat-gas for virtual power plant participating in multiple markets[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 35-42.
- [37] 张亚朋, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 电动汽车虚拟电厂的多时间尺度响应能力评估模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(12): 94-103. ZHANG Yapeng, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Response capability evaluation model with multiple time scales for electric vehicle virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(12): 94-103.
- [38] 卢志刚, 王荟敬, 赵号, 等. 含V2G的虚拟电厂双层逆鲁棒优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1245-1252. LU Zhigang, WANG Huijing, ZHAO Hao, et al. Strategy of bi-level inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1245-1252.
- [39] 刘永前, 林爱美, 阎洁, 等. 基于深度学习的风光场群功率预测方法研究[J]. 分布式能源, 2021, 6(2): 14-21. LIU Yongqian, LIN Aimei, YAN Jie, et al. Research on power forecasting method for wind farms and photovoltaic stations based on deep learning[J]. Distributed Energy, 2021, 6(2): 14-21.
- [40] 崔杨, 陈正洪, 许沛华. 基于机器学习的集群式风光一体短期功率预测技术[J]. 中国电力, 2020, 53(3): 1-7. CUI Yang, CHEN Zhenghong, XU Peihua. Short-term power prediction for wind farm and solar plant clusters based on machine learning method[J]. Electric Power, 2020, 53(3): 1-7.
- [41] 王函. 风光发电功率与用电负荷联合预测方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [42] 刘小瑞. 基于数据驱动的风电场功率预测及其在源荷协调中的应用[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018.
- [43] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97. HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [44] 齐军, 杨帅帅, 张红光, 等. 基于机会约束规划的含储能虚拟电厂调度模型[J]. 工业技术创新, 2019, 6(1):

- 70-76.
- QI Jun, YANG Shuaishuai, ZHANG Hongguang, et al. Dispatch model for energy storage virtual power plant based on chance constrained programming [J]. *Industrial Technology Innovation*, 2019, 6(1): 70-76.
- [45] 严干贵, 冯晓东, 李军徽. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(28): 27-35.
- YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(28): 27-35.
- [46] 韦立坤, 赵波, 吴红斌, 等. 虚拟电厂下计及大规模分布式光伏的储能系统配置优化模型[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(23): 66-74.
- WEI Likun, ZHAO Bo, WU Hongbin, et al. Optimal allocation model of energy storage system in virtual power plant environment with a high penetration of distributed photovoltaic generation [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(23): 66-74.
- [47] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 考虑不确定性和储能系统的虚拟电厂与能效电厂联合调度优化模型及仿真应用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(7): 1736-1743.
- NIU Dongxiao, ZHAO Donglai, YANG Shangdong, et al. Cooperative scheduling optimization model and simulation application for virtual power plant and efficiency power plant considering uncertainty and energy storage system [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(7): 1736-1743.
- [48] 卫志农, 陈妤, 黄文进, 等. 考虑条件风险价值的虚拟电厂多电源容量优化配置模型[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 39-46.
- WEI Zhinong, CHEN Yu, HUANG Wenjin, et al. Optimal allocation model for multi-energy capacity of virtual power plant considering conditional value-at-risk [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 39-46.
- [49] 吕梦璇, 娄素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2874-2882.
- LÜ Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi-type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2874-2882.
- [50] 陈厚合, 王子璇, 张儒峰, 等. 含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2615-2624.
- CHEN Houhe, WANG Zixuan, ZHANG Rufeng, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2615-2624.
- [51] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. *电网技术*, 2017, 41(11): 3590-3597.
- XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for virtual power plant of integrated wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response [J]. *Power System Technology*, 2017, 41(11): 3590-3597.
- [52] 彭院院, 周任军, 李斌, 等. 计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(4): 21-28.
- PENG Yuanyuan, ZHOU Renjun, LI Bin, et al. Two-stage optimal dispatch model for solar-wind-thermal virtual power plant considering the characteristic of concentrating solar power [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2020, 32(4): 21-28.
- [53] 周任军, 徐健, 王仰之, 等. 利用市场交易奖惩措施的风电-垃圾焚烧虚拟电厂优化运行[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(10): 90-96.
- ZHOU Renjun, XU Jian, WANG Yangzhi, et al. Optimized operation of virtual power plant with wind power and waste incineration based on market trading incentives [J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2020, 32(10): 90-96.
- [54] 吕蒙. 考虑风光不确定性的微网多时间尺度优化调度[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [55] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2460-2470.
- LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2460-2470.
- [56] 魏向欣, 何涛, 李一航, 等. 5G网络切片承载电力系统业务的时延特性研究[J]. *电力信息与通信技术*, 2019, 17(8): 7-12.
- WEI Xiangxin, HE Tao, LI Yihang, et al. Research on time delay characteristics of 5G network slice in carrying power communication service [J]. *Electric Power ICT*, 2019, 17(8): 7-12.
- [57] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(一): 通信时延及操作时延[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(22): 5768-5777.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, Part I: Communication delay and operational delay [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(22): 5768-5777.
- [58] 张放, 程林, 黎雄, 等. 广域闭环控制系统时延的测量及建模(二): 闭环时延[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35

- (23):5995-6002.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Delay measurement and modeling in a wide-area closed-loop control system, Part II: Closed-loop delay [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):5995-6002.
- [59]张放,程林,黎雄,等.广域闭环控制系统时延的分层预测补偿[J].中国电机工程学报,2014,34(19):3194-3201.
- ZHANG Fang, CHENG Lin, LI Xiong, et al. Prediction based on hierarchical compensation for delays of wide-area closed-loop control systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19):3194-3201.
- [60]惠红勋.温控负荷参与电力系统动态响应的建模与控制方法研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [61]刘扬洋,蒋传文,谭胜敏,等.考虑风险调整资本收益率阈值约束的虚拟电厂优化调度策略[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4617-4626.
- LIU Yangyang, JIANG Chuanwen, TAN Shengmin, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering risk adjusted return on capital constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4617-4626.
- [62]王宣元,刘敦楠,刘蓁,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.
- WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous internet of things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9):3175-3183.
- [63]杨甲甲,赵俊华,文福拴,等.含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J].电力系统自动化,2014,38(13):92-102.
- YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13):92-102.
- [64]邵炜晖,许维胜,徐志宇,等.基于虚拟电厂技术的未来智能电网用户并网规则设计及仿真[J].电力系统自动化,2015,39(17):140-146.
- SHAO Weihui, XU Weisheng, XU Zhiyu, et al. Design and simulation of grid connection mechanism for future smart grid users based on virtual power plant technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17):140-146.
- [65]何奇琳,艾芊.售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J].电力建设,2019,40(2):1-10.
- HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2):1-10.
- [66]方燕琼,甘霖,艾芊,等.基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J].电力系统自动化,2017,41(14):61-69.
- FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):61-69.
- [67]张高,王旭,蒋传文.基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度[J].电力系统自动化,2018,42(11):48-55.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11):48-55.
- [68]董雷,涂淑琴,李焯,等.基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理[J].电网技术,2020,44(3):973-983.
- DONG Lei, TU Shuqin, LI Ye, et al. A stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method [J]. Power System Technology, 2020, 44(3):973-983.
- [69]路尧,刘继春,许立雄.非合作博弈下考虑用户满意度的虚拟电厂经济优化运行[J].分布式能源,2017,2(1):23-29.
- LU Yao, LIU Jichun, XU Lixiong. Economic optimization operation of virtual power plant considering the users' satisfaction based on non-cooperative game theory [J]. Distributed Energy, 2017, 2(1):23-29.
- [70]孙国强,钱苇航,黄文进,等.考虑配电网安全性的虚拟电厂优化调度博弈模型[J].电力自动化设备,2019,39(5):7-14.
- SUN Guoqiang, QIAN Weihang, HUANG Wenjin, et al. Optimal dispatch game model for virtual power plant considering security of distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):7-14.
- [71]王晔,张华君,张少华.风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J].电力系统自动化,2019,43(3):155-162.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):155-162.
- [72]SOTER S, BERTLING F. Adjustable converter for injection of fuel cell power as a part of a virtual power plant [C]// IEEE 35th Annual Power Electronic Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [73]卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂欧洲研究项目述评[J].电力系统自动化,2013,37(21):196-202.
- WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Review on European research project of virtual power plant [J].

- Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (21) : 196-202.
- [74] KOK K J, WARMER J C, KAMPHUIS G I. The power matcher: Multi-agent control of electricity demand and supply[J]. IEEE Intelligent System, 2006, 21(2): 89-90.
- [75] BINDING C, GANTENBEIN D, JANSEN B, et al. Electric vehicle fleet integration in the Danish Edison project—A virtual power plant on the island of Bornholm [C]//IEEE PES General Meeting, Minneapolis, MN, USA, 2010.
- [76] FENN B, HOPP O, AHNER M. Advanced technologies of demand side integration by VPPs and through smart metering in households - experiences from a lighthouse project [C]//CIGRE 2012, Paris, France, 2012.
- [77] 阮文俊, 刘莎, 李扬. 美国需求响应综述[J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(2): 61-64.
RUAN Wenjun, LIU Sha, LI Yang. Overview of demand response in the USA[J]. Power Demand Side Management, 2013, 15(2): 61-64.
- [78] 应志玮, 余涛, 黄宇鹏, 等. 上海虚拟电厂运营市场出清的研究与实现[J]. 电力学报, 2020, 35(2): 129-134.
YING Zhiwei, YU Tao, HUANG Yupeng, et al. Research on clearing the operation market of Shanghai virtual power plant[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(2): 129-134.
- [79] 谢康, 张凯杰, 栾开宁, 等. 电力体制改革背景下的需求响应积分方案探索[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3): 7-10.
XIE Kang, ZHANG Kaijie, LUAN Kaining, et al. Exploration of demand response score scheme under the background of electric power system reform [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 7-10.
- [80] 张勉荣. 中国南方电网公司的电力需求侧管理实践[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(1): 7-8.
ZHANG Mianrong. DSM practice of China Southern Power Grid [J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(1): 7-8.
- [81] 邓宇鑫, 王磊, 李扬, 等. 温控负荷直接负荷控制策略与优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(6): 18-25.
DENG Yuxin, WANG Lei, LI Yang, et al. Direct load control strategies and optimization scheduling of thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(6): 18-25.
- [82] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于需求响应的集群温控负
荷建模及参与低频减载策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 99-108.
QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on under frequency load shedding strategy using aggregated thermostatically controlled loads based on demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 99-108.
- [83] 刘林鹏, 陈嘉俊, 朱建全, 等. 风储联合参与电能量与快速调频市场的优化投标策略[J]. 华电技术, 2021, 43(9): 46-53.
LIU Linpeng, CHEN Jiajun, ZHU Jianquan, et al. Optimization bidding strategy for wind power and energy storage participating in energy market [J]. Huadian Technology, 2021, 43(9): 46-53.
- [84] 姚垚, 张沛超, 王永权. 温控负荷参与快速频率调整的双层控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
YAO Yao, ZHANG Peichao, WANG Yongquan. A two-layer control method for thermostatically controlled loads to provide fast frequency regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 4987-4998, 5296.
- [85] 张青. 温控负荷聚合建模及其功率控制[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [86] 王兴兴, 孙建桥, 陈明. 储能火电联合调频系统设计与研究[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 72-76.
WANG Xingxing, SUN Jianqiao, CHEN Ming. Design and research on energy storage and thermal power combined frequency modulation systems [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 72-76.
- [87] 彭维珂, 聂椿明, 陈衡, 等. 基于智能算法的空冷火电机组负荷预测研究[J]. 华电技术, 2021, 43(3): 57-64.
PENG Weike, NIE Chunming, CHEN Heng, et al. Study on load forecasting for air cooling thermal power units based on intelligent algorithm [J]. Huadian Technology, 2021, 43(3): 57-64.

(本文责编: 张帆)

作者简介:

张凯杰(1996), 男, 助理工程师, 工学硕士, 从事虚拟电厂、电力市场以及需求响应技术研究工作, 2089225187@qq.com;

丁国锋*(1982), 男, 高级工程师, 从事虚拟电厂、需求响应以及电力计量技术研究工作, 20933791@qq.com。

*为通信作者。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.010

电力现货市场背景下的水电出力优化与光伏发电消纳

Hydropower generation optimization and photovoltaic generation consumption in the spot market for electricity

王一铮¹, 胡嘉骅¹, 唐琦雯², 赵一琰³, 沈琪⁴

WANG Yizheng¹, HU Jiahua¹, TANG Qiwen², ZHAO Yiyang³, SHEN Qi⁴

(1. 国网浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310020; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007; 3. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014; 4. 杭州华电半山发电有限公司, 杭州 310015)

(1. Economic and Technology Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310020, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310007, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company Limited, Hangzhou 310014, China; 4. Hangzhou Huadian Banshan Power Generation Company Limited, Hangzhou 310015, China)

摘要:在“双碳”目标实现、新型电力系统建设和电力现货市场建设中,水电发挥着重要的灵活调节作用的同时,面临着发电收益下降的风险。水电机组可以通过出力优化来提升自身的市场化发电收益,同时为光伏等新能源提供更多消纳空间。基于浙江电力现货市场,针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。对现货市场背景下的水电与光伏发电特点以及二者之间的关系进行分析。构建了水电机组出力的优化模型,在日发电量和日发电能力不变的前提下,优化水电日内发电策略,最大化水电机组的市场化发电收益。以浙江3次电力现货结算试运行案例进行分析,并针对现货市场建设和新能源消纳提出建议。

关键词:“双碳”目标;电力现货市场;光伏发电;出力优化;新能源消纳

中图分类号:TK 79 文献标志码:A 文章编号:2097-0706(2022)02-0073-07

Abstract: In the construction of new power system and electricity spot market to achieve the goals of carbon peaking and carbon neutrality, hydropower plays a crucial role in boosting the flexibility of power regulation. But it might reduce the total revenue of power generation. Hydropower generation units can increase their income of power generation by optimizing the output, and strengthen the renewable energy accommodation capacity of the power grid. Taking the spot market for electricity in Zhejiang as the example, the optimal scheduling of hydropower and the consumption of photovoltaic power are studied. The characteristics of hydropower and photovoltaic power in the power spot market and their interrelationship are analyzed. Then, based on the output optimization model of a hydropower unit, an optimal power generation strategy pursuing the maximum power generation revenue under constant power generation and daily power generation capacity is made. Three settle transactions during the trial operation of the energy spot market in Zhejiang are analyzed, and corresponding suggestions for the energy spot market construction and renewable energy accommodation are put forward.

Keywords: goals of carbon peaking and carbon neutrality; electricity spot market; PV power; output optimization, renewable energy accommodation

0 引言

2020年9月,我国正式提出了“碳达峰、碳中和”目标^[1]。作为减碳的重要切入点,光伏、风电等新能源受到了广泛关注。随后,各地区、各行业相继出台了“双碳”行动方案^[2-4],国家也进一步提出建设以

新能源为主体的新型电力系统^[5-6]。与此同时,浙江省等8个省市作为第1批试点,正在探索建立电力现货交易机制,构建中长期交易与现货交易相结合的电力市场体系。实现“双碳”目标、新型电力系统建设和电力现货试点建设相叠加,带来了更多的机遇和挑战。

截至目前,浙江省已经完成了季度现货结算试运行,其他试点地区也都在推进长周期的结算试运

行。根据国情省情,不同地区有着差异化的电力现货市场建设路径,在探索过程中也遇到了不同的阶段性问题。浙江省是典型的能源受端省份,同时有着相对丰富的水电资源,水电在电力系统中发挥着重要作用。在“双碳”背景下,浙江省计划在“十四五”期间实施“风光倍增”,新能源装机规模和发电量都将有明显提升,这给系统电力电量平衡带来了新的挑战^[7]。

在电力现货市场背景下,水电机组的收益较计划模式发生了一定的变化,尤其是在辅助服务市场机制仍需完善、辅助服务产品种类仍待补充的情况下,水电机组面临较大的收益下降风险。与此同时,在市场中,水电企业尚未完全掌握现货市场规则和电价规律,水电机组出力曲线与市场中电能需求的匹配程度有待提升,造成其电能量潜在收益的流失,相应地也挤占了光伏发电的消纳空间。浙江省负荷低谷时段与光伏发电峰值时段部分重叠,在未来光伏发电倍增后,新能源消纳需要更多空间。

文献[8]—[11]针对水电研究了电力现货市场机制设计、与中长期交易衔接、竞价策略等关键问题。针对水电出力优化,现有文献中已有一些研究。文献[12]针对外送能源受端的调峰压力较大问题,研究了兼顾多电网调峰与水电消纳的水电调度方法。部分文献还考虑了电力现货市场。文献[13]在日前市场的背景下,针对下游水电站,提出了“峰前腾库、峰后蓄水”的出力调整策略和两阶段出力优化策略。文献[14]考虑电力现货市场,提出了一种耦合日合同分解及日前市场竞价的梯级水电站短期鲁棒优化调度方法,以最大化梯级水电站总收益。部分文献考虑了新能源与水电的协同。文献[15]针对大规模间歇性可再生能源接入系统,提出了构建考虑库容弹性空间的水电经济调度模型,以促进水电、风电消纳,降低电网运行成本。文献[16]针对含风电、抽水蓄能、水电和火电4类异质电源的多能互补系统,建立了协调调度模型,充分发挥多能互补作用,提升清洁能源消纳能力。文献[17]针对自调度的水电站,提出了促进间歇性可再生能源消纳的水电定价与能量管理策略,在最大化水电发电收益的同时,最小化弃风弃光量。但是截至目前,在现货市场背景下,关于水电出力优化以及水电新能源发电协同的研究还不够深入。

在此背景下,本文针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。首先,基于浙江省电力现货市场,对现货市场背景下的水电与光伏发电特点以及二者之间的关系进行分析。然后,构建以最大化水电机组的市场化电能电费为目标的优化模型。

最后,以浙江省3次电力现货结算试运行为案例进行分析,并针对现货市场建设和新能源消纳提出建议。

1 现货市场背景下的水电与光伏发电特点

1.1 水电与光伏的发电量时间分布

以浙江省2020年5月(单周)、2020年7月和2021年3—5月(选取3月数据)3次电力现货结算试运行期间的数据为例进行分析,见表1。在3次试运行中,水电机组均在日前申报固定出力曲线,无需申报价格,不参与出清,事后与其他统调机组一同结算;光伏发电机组不实际参与市场,仍按照计划模式进行结算。总体而言,水电机组主要集中在白天发电,一般在日内单一时段内或多个时段内连续发电,出力曲线多为阶梯状。在相近日期内,光伏发电机组每日的发电时段基本一致,发电量在日间存在差异。

水力发电与光伏发电机组存在较多重叠。在每日光伏发电时段,统调水电机组的发电量平均为1 953.29, 4 128.20, 1 960.81 MW·h,占全天发电量的77.6%, 72.6%, 72.3%,与季节变化的关系不明显;而光伏发电时段约占全天发电量的56.0%, 67.0%, 46.0%,与季节变化的关系较为明显。在每日的光伏发电出力水平较高时段(出力水平超过当月最大值的50.0%),统调水电机组的电量平均为586.02, 796.19, 355.51 MW·h。统调负荷扣除光伏发电后(以下称为净负荷)的尖峰时段(当日负荷水平最高的30 min),统调水电机组的发电量平均为112.88, 140.14, 89.42 MW·h;在净负荷高峰时段(负荷水平超过当日最大值的90.0%),水电机组的发电量平均值为1 254.70, 2 359.40, 1 275.20 MW·h。

1.2 电力现货市场量价关系

能否有效地将市场中电能供需关系反映在电能价格上,是评价市场效用的重要方面。以2020年5月现货市场单周结算试运行结果为例。如图1所示(每30 min为1个时点,下同),日前和实时市场中,全量电量(现货市场中出清的总电量)与全量平均电价曲线波动趋势较为相近,峰谷时段也较为匹配。由于全量电量可以体现市场对电能的需求,因此,可以认为市场中电能的量价关系较为匹配,全量平均电价可以体现电量的市场价值。

对于水电机组而言,其电量与全量平均电价曲线波动趋势存在较大差异,峰谷时段也不完全匹配。如图2所示,水电机组在全量平均电价谷值时段的出力仍处于当日较高水平,全量平均电价峰值

表 1 不同时段水电与光伏发电量统计

Table 1 Hydropower and photovoltaic power generation in different period

项目	2020年5月	2020年7月	2021年3月
水电日均发电量/(MW·h)	1 953.29	4 128.20	1 960.81
光伏发电时段内的水电发电量(每日)/(MW·h)	1 515.29	2 995.31	1 418.33
水电、光伏发电量分布的重合率/%	77.60	72.60	72.30
光伏大发时段内的水电发电量(每日)/(MW·h)	586.02	796.19	355.51
净负荷尖峰时段的水电发电量(每日)/(MW·h)	112.88	140.14	89.42
净负荷高峰时段的水电发电量(每日)/(MW·h)	1 254.70	2 359.40	1 275.20

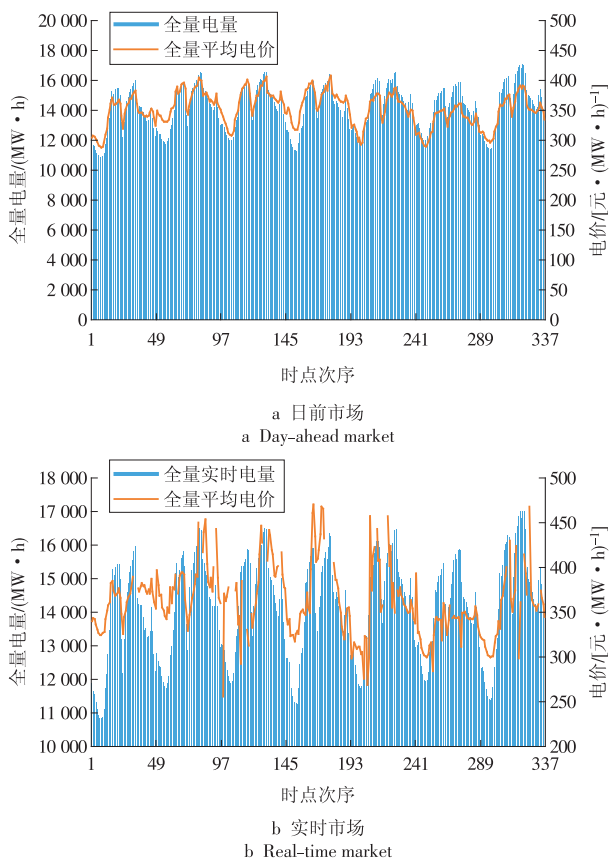


图 1 电力现货市场中的全量电量与平均电价 (2020年5月单周)

Fig. 1 Total generation quantity of a week and average electricity price in the spot market (a week in May, 2020)

时段的电量也远不及次高峰时段的电量(为便于展示分析,剔除图 2 b 中的异常点,即超过四分位距的 1.5 倍的数据点)。

全量平均电价体现了电能的市场价值,而水电电量与全量平均电价的匹配性却相对较低,因此,当前的水电量价关系还存在一定的优化空间。水电机组本身具有较强的灵活性,可通过优化申报的出力曲线,充分利用机组灵活性,尽可能在价格较高时段申报出力,最大化电能市场收益。同时,光伏出力的高峰时段与电价的低谷时段存在一定重叠。量价相关性的改善,也可以为光伏发电腾挪

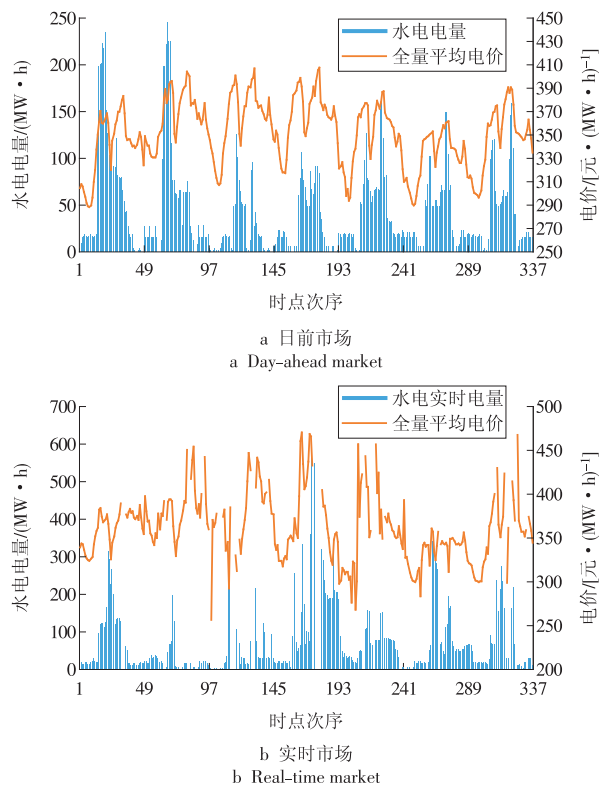


图 2 电力现货市场中的水电电量与平均电价 (2020年5月单周)

Fig. 2 Hydropower generation quantity and average electricity price in the spot market (a week in May, 2020)

更多空间。

2 电力现货市场背景下的水电出力优化

在不改变日发电量的基础上对水电日出力曲线进行事后优化分析,将发电量尽可能分布在市场出清电价的较高时段,提高水电电量与市场电能量需求的相关性。

2.1 目标函数

在现货市场环境下,每个水电站的电能电费都按照“日前基准、实时增量、合约差价”进行结算,即水电站在日前市场的出清电量按照日前市场价格结算;然后,其在实时市场的出清电量超出日前市场的部分,按照实时价格结算;最后,其合约电量按

照合约价格与日前市场价格的差值进行结算。优化模型的目标函数为最大化水电站的电能电费,可表示为

$$\max F = \sum_{t=1}^T p_t^{\text{da}} q_t^{\text{da}} + \sum_{t=1}^T p_t^{\text{rt}} (q_t^{\text{rt}} - q_t^{\text{da}}) + \sum_{t=1}^T (p_t^{\text{cm}} - p_t^{\text{da}}) q_t^{\text{cm}}, \quad (1)$$

式中: F 为水电站的电能电费; T 为一天的时段数; p_t^{da} 为水电站在第 t 个时段的日前市场电价; p_t^{rt} 为水电站在第 t 个时段的实时市场电价; p_t^{cm} 为水电站在第 t 个时段的合约电价; q_t^{da} 为水电站在第 t 个时段的日前市场出清电量; q_t^{rt} 为水电站在第 t 个时段的实时市场出清电量; q_t^{cm} 为水电站在第 t 个时段的合约电量。

2.2 约束条件

实际运行中,不靠考虑弃水的情况下,水电机组的日发电量主要由水的调度方式决定,与水流成正比。在事后优化分析的情境下,水电站日发电量可以取当日实际发电量,即不改变水电站日发电能力。假定水电作为价格接受者,以“报量不报价”的形式参与现货市场,水电机组在日前市场和实时市场中的出清电量保持不变,需要满足

$$\sum_{t=1}^T q_t^{\text{da}} = Q^{\text{da}}, \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T q_t^{\text{rt}} = Q^{\text{rt}}, \quad (3)$$

式中: Q^{da} 为水电站在第 t 个时段的日前市场电量; Q^{rt} 为水电站在第 t 个时段的实时市场电量。

水电站的出力受到机组容量、来水量、水位等因素的综合影响。在事后优化分析的情境下,假定水电站受到的影响因素不发生变化,即需要满足

$$q_t^{\text{da}} \leq \max(\{q_t^{\text{da}'}, t \in [1, T]\}), \quad (4)$$

$$q_t^{\text{rt}} \leq \max(\{q_t^{\text{rt}'}, t \in [1, T]\}), \quad (5)$$

式中: $q_t^{\text{da}'}$ 为水电站在实际运行中第 t 个时段的日前市场电量; $q_t^{\text{rt}'}$ 为水电站在实际运行中第 t 个时段的实时市场电量。

式(1)~(5)所构建的模型是线性规划问题,可以在Matlab环境中采用Yalmip/Gurobi求解器求解。

3 算例与分析

3.1 算例介绍

以浙江省电力现货市场2020年5月(单周)、2020年7月和2020年3月结算试运行的实际电量、电价数据为案例,对水电出力进行事后优化分析,并研究其对光伏发电消纳的影响。考虑到水电发电量占总发电量的比例较小,这里忽略水电出力优化对现货市场中电价的影响。同时,由于光伏发电

机组暂未参与浙江省电力现货市场,因此在水电出力优化后,光伏发电机组的出力曲线不发生改变。

3.2 水电机组电能量收益

水电机组通过优化在日前市场和实时市场中的发电量分布,提高自身电能电费。以2020年7月7日为例,如图3所示,发电量较大为08:30—11:00和13:00—17:00,上述时段的电能需求较大,电价水平较高,发电收益也较高。在11:00—13:00时段,水电发电量接近0,上述时段的电能需求相对较低,电价水平也较低;由于该时段同时是光伏大发的时段,水电的出力优化也为光伏发电的消纳提供了空间。

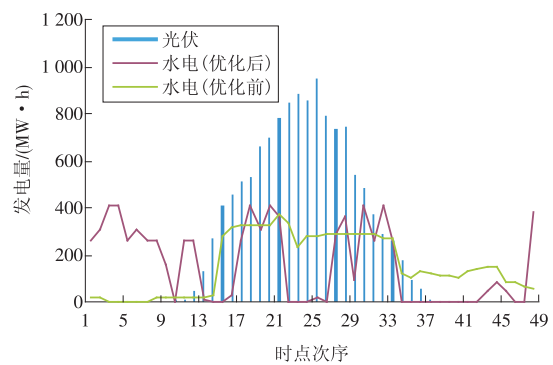


图3 水电和光伏发电量时间分布

Fig. 3 Generation time distribution of hydropower and photovoltaic power

优化结果显示,水电机组收益提升主要源于2个方面:一是通过发电量的时移提升收益,即尽可能在电价较高的时段发电,该调整在日前市场价格和实时市场价格较为接近的日期较为明显。由于电价能够反映市场中对电能的需求,因此水电发电量的时移也能够改善水电发电量与全量平均电价的匹配关系。以B水电站为例,如图4所示,当日日前市场与实时市场价格接近,相较于优化前,优化后的电量主要分布在电价的高峰和次高峰时段;二是水电机组也依靠日前市场与实时市场的价差进行盈利,该调整主要发生在日前市场价格和实时市场价格差距较大的日期。以B水电站为例,优化后,水电站除,将发电量时移至电价的高峰和次高峰时段(08:00—11:00, 16:30—17:30),在21:00—23:30通过日前和实时市场的价差获利。

各个发电厂的平均电价以及电费见表2。在2020年5月(单周)试运行期间,优化前,平均电价最高为662.42元/(MW·h),最低为406.99元/(MW·h);整体平均电价为521.23元/(MW·h)。优化后平均电价最高为739.69元/(MW·h),最低为446.25元/(MW·h),整体平均电价为566.60元/(MW·h)。在2020年7月试运行期间,优化前整体平均电价为

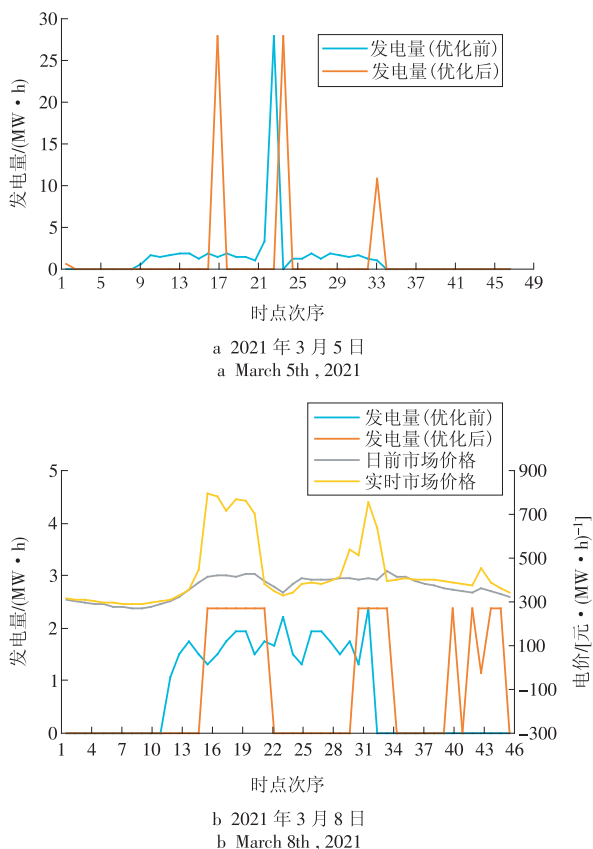


图 4 B 站的发电量时间分布

Fig. 4 Generation time distribution of station B

449.63 元/(MW·h); 优化后为 536.40 元/(MW·h)。在 2021 年 3 月试运行期间,优化前整体平均电价为 501.29 元/(MW·h); 优化后为 646.93 元/(MW·h)。在现货市场试运行周期内,各站的平均电价普遍提高,在电能市场中获得更多收益。

表 2 水电平均电价和水电站电费

Table 2 Average electricity price of hydropower stations

项目	2020 年 5 月(单周)	2020 年 7 月	2021 年 3 月
原有平均电价/ [元·(MW·h) ⁻¹]	521.23	449.63	501.29
优化后平均电价/ [元·(MW·h) ⁻¹]	566.60	536.40	646.93
优化后水电电费 增量/万元	124.08	2 220.77	1 770.57
水电电费增量比 例/%	8.7	19.3	29.1

3.3 水电与光伏发电量的分布

水电出力优化后,水电与光伏的发电量重叠明显减少,水电机组在光伏发电时段的发电量大幅降低,见表 3。在 2020 年 5 月(单周)、2020 年 7 月和 2020 年 3 月分别降低了 21.1%, 19.8%, 32.6%。在光伏大发时段,水电发电量的降幅更为明显,分别降低了 37.7%, 53.9%, 87.2%。主要因为光伏发电的峰值时段与负荷谷值时段存在一定重叠,这些时

段的电价水平也相对较低,出力优化后水电机组将更多发电量时移到了光伏发电的非峰值时段,为光伏发电腾挪了消纳空间。

从净负荷角度来看,不同月份的水电出力优化带来了差异化的影响。在 2020 年 5 月(单周)和 2020 年 7 月,尖峰负荷时段的水电发电量都有所提升,且 2020 年 5 月(单周)提升幅度较大,较优化前提升了 42%,发挥了平衡电力供需的作用。但在 2021 年 3 月,尖峰负荷时段的水电发电量反而下降,这是由于出力优化后,水电机组出现了较多利用日前和实时市场价差获利的行为,电价信号没有发挥应有的引导作用。在 2020 年 5 月(单周),高峰负荷时段的水电发电量有所提升,但在 2020 年 7 月和 2021 年 3 月,高峰负荷时段的水电发电量却下降,引起差异的原因与尖峰负荷时段相似。

表 3 不同时段水电发电量统计

Table 3 hydropower generation in different period MW·h

时段		2020 年 5 月	2020 年 7 月	2021 年 3 月
每日光伏发电时段	优化前	1 515.29	2 995.31	1 418.33
	优化后	1 195.72	2 401.45	956.59
每日光伏大发时段	优化前	586.02	796.19	355.51
	优化后	365.03	366.99	45.44
每日净负荷尖峰时段	优化前	112.88	140.14	89.42
	优化后	160.35	144.29	49.07
每日净负荷高峰时段	优化前	1 254.70	2 359.40	1 275.20
	优化后	1 304.30	2 050.40	1 113.20

4 结论

本文针对水电机组出力优化和光伏发电消纳进行研究。首先,在浙江电力现货市场背景下,分析了水电与光伏的发电量分布特点,以及市场中的电能量价关系。然后,构建以最大化水电机组的市场化电能为目标的优化模型,对其发电量的日内时间分布进行优化。最后,以浙江 3 次电力现货结算试运行为案例进行事后仿真分析,仿真结果显示,水电出力优化可以为光伏发电消纳提供空间,在一定条件下可以降低负荷尖峰和高峰时段的电能平衡压力。根据仿真结果,提出以下建议。

(1) 加强市场主体能力建设。应当引导水电企业主动积累市场数据和经验,加强对市场供需情况和出清价格情况的预测,优化日出力曲线申报,依靠灵活性在电能市场中获得更多收益,进而实现不同种类发电资源的互补配合,促进风电、光伏等间歇性可再生能源消纳。

(2) 完善信息披露机制。电力市场各主体交易

策略的完善,依赖于市场信息的及时合规披露。市场运营机构应按照信息发布的要求,及时合规向市场主体提供市场相关信息,支撑市场主体更好优化申报策略。

(3)完善电力市场机制。考虑到能源受端的特点和“双碳”目标,需要继续鼓励水电发展,不适合对其在日前和实时市场间的盈利进行过多限制。为了降低市场间盈利行为对量价关系的影响,应当持续完善辅助服务市场,适时引入备用、灵活调节产品等服务,以市场化手段引导水电机组在净负荷尖端和高峰时段提高出力水平,发挥市场机制提升新型电力系统灵活性的重要作用。

参考文献:

- [1]人民日报社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[N].人民日报,2020-09-23(1).
- [2]国家电网公司.国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N].国家电网报,2021-03-02(1).
- [3]浙江省科技厅.浙江省出台碳达峰碳中和科技创新行动方案[EB/OL].(2020-7-19)[2021-12-20].http://www.most.gov.cn/dfkj/zj/zxd/202106/t20210618_175262.html.
- [4]吉斌,孙绘,梁肖,等.面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J].华电技术,2021,43(6):33-40.
JI Bin, SUN Hui, LIANG Xiao, et al. Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 33-40.
- [5]人民日报社.推动平台经济规范健康持续发展把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N].人民日报,2021-03-16(1).
- [6]喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges faced by energy and power industry with the goal of carbon neutrality and carbon peak [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [7]浙江省发改委.浙江省可再生能源发展“十四五”规划(征求意见稿)[EB/OL].(2021-07-19)[2021-12-20].
http://fzggw.zj.gov.cn/art/2021/3/12/art_1229123367_2251024.html.
- [8]路轶,胡晓静,孙毅,等.适应高水电占比的电力现货市场机制设计与实践[J].电力系统自动化,2021,45(9):162-170.
LU Yi, HU Xiaojing, SUN Yi, et al. Design and practice of electricity spot market mechanism adapting to characteristics of high proportional hydropower [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 162-170.
- [9]于旭光,李亚鹏,贾泽斌,等.考虑现货市场竞价空间的梯级水电站中长期合同电量分解模型[J].电力系统自动化,2021,45(6):62-71.
YU Xuguang, LI Yapeng, JIA Zebin, et al. Medium and long term contract energy decomposition model for cascade hydropower station considering spot market bidding space [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 62-71.
- [10]于旭光,李刚,李亚鹏,等.计及电价风险和差价合同的梯级水电站日前市场竞价模型[J/OL].电力系统自动化:1-11(2021-11-29)[2022-2-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1321.002.html>.
YU Xuguang, LI Gang, LI Yapeng, et al. Day-ahead market bidding model for cascade hydropower station considering price risk and contract for price difference [J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-11 (2021-11-29) [2022-2-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20211126.1321.002.html>.
- [11]贾泽斌,申建建,程春田,等.基于梯级电量联动控制的高比例水电电力市场日前现货出清方法[J].中国电机工程学报,2021,41(23):8033-8046.
JIA Zebin, SHEN Jianjian, CHENG Chuntian, et al. Day-ahead clearing method for high proportion hydropower electricity market based on cascade energy linkage control [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8033-8046.
- [12]钟儒鸿,程春田,廖胜利,等.兼顾多电网调峰与水电消纳的跨流域梯级水电站调度方法[J].电力系统自动化,2021,45(14):114-122.
ZHONG Ruhong, CHENG Chuntian, LIAO Shengli, et al. Inter-basin scheduling method of cascaded hydropower plants considering multi-grid peak shaving and hydropower accommodation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 114-122.
- [13]张粒子,刘方,许通,等.多主体梯级水电参与日前市场下游电站自调度投标策略[J].电力系统自动化,2018,42(19):27-33.
ZHANG Lizi, LIU Fang, XU Tong, et al. Self-scheduling bidding strategy for downstream station in day-ahead market with participation of multi-operator cascade hydropower stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 27-33.
- [14]于旭光,李刚,李亚鹏,等.耦合日合同分解及日前市场竞价的梯级水电站短期鲁棒优化调度[J].电网技术,2021,45(10):4016-4025.
YU Xuguang, LI Gang, LI Yapeng, et al. Short-term robust optimization scheduling of cascade hydropower stations coupled with daily contract decomposition and day-ahead market bidding [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4016-4025.
- [15]温世杨,余娟,代伟,等.考虑水电库容弹性的电力系统

经济调度[J].电力系统自动化,2020,44(19):73-82.

WEN Shiyang, YU Juan, DAI Wei, et al. Economic dispatch of power system considering capacity flexibility of hydropower reservoir [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 73-82.

[16]李健华,刘继春,陈雪,等.含可再生能源的多能互补发电系统容量配置方法[J].电网技术,2019,43(12):4387-4398.

LI Jianhua, LIU Jichun, CHEN Xue, et al. Capacity allocation of multi energy complementary system including renewable energy [J]. Power System Technology, 2019, 43(12): 4387-4398.

[17]王一铮,李忠德,黄晨宏,等.促进间歇性可再生能源发电消纳的水电定价与能量管理策略[J].电力建设,2021,42(3):107-116.

WANG Yizheng, LI Zhongde, HUANG Chenhong, et al. Hydropower pricing and energy management strategies for

promoting accommodation of intermittent renewable energy power generation [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 107-116.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

王一铮(1997),男,工程师,工学硕士,从事电力市场改革、电价机制方面的研究工作,sgcc_wangyz@163.com;

胡嘉骅(1992),男,工程师,工学博士,从事电力市场改革、电价机制方面的研究工作,dreaminghu2009@163.com;

唐琦雯(1989),女,高级工程师,工学硕士,从事电力市场方面的研究工作,tangqiwen8888@126.com;

赵一琰(1984),女,高级工程师,工学硕士,从事电力市场和电力系统分析方面的研究工作,finalfantasy4ever@qq.com;

沈琪(1983),男,工程师,从事电力市场和发电计划管理方面的研究工作,56735487@qq.com.

“固体氧化物电池”专刊征稿启事

化石能源是当今时代主要的燃料,燃烧时会释放出大量二氧化碳以及硫、氮氧化物,造成了严重的温室效应和环境污染。气候变化是人类面临的全球性问题,随着温室效应的进一步加剧,如何控制二氧化碳的排放量已经成为全球性的系统问题。

在这一背景下,世界各国以全球协议的方式减排温室气体,我国由此提出了“2030年碳达峰,2060年碳中和”的战略目标。然而,想要实现“双碳”目标,还必须改变以化石能源为主体的能源结构,建立以清洁能源为源头、以氢能作为媒介的新型能源体系。在新型能源体系中,固体氧化物燃料电池(SOFC)和固体氧化物电解池(SOEC)将起到关键的作用。通过SOEC可将风光水电等低品质电能直接、高效地转化为储存在碳氢化合物中的高品质化学能,通过SOFC可将碳氢化合物中的化学能持续、高效、稳定地转化为电能,并且这个过程不受卡诺循环的限制。然而,想要真正发挥SOFC和SOEC在新型能源体系中的关键作用,必须要克服性能、衰退、规模这三大挑战。

鉴于当前的问题和机遇,《综合智慧能源》(原《华电技术》)特推出“固体氧化物电池”专刊,邀请武汉大学刘通副研究员、哈尔滨工业大学张雁祥教授、武汉大学王瑶副教授担任特约主编,共同探讨固体氧化物电池性能、稳定性和产业化发展等方面的研究进展,并对相关研究进行总结和展望,欢迎业内同仁踊跃投稿。

一、征稿范围(包括但不限于)

(1)固体氧化物电池高温CO₂电解研究。(2)固体氧化物电池原位溶出纳米电极研究。(3)管式电池及管式电池堆研究。(4)平板电池及平板堆研究。(5)固体氧化物电池电极材料研究。(6)固体氧化物电池质子导体研究。(7)固体氧化物电池电极表面过程研究。(8)固体氧化物电池电极内传质行为研究。(9)质子型固体氧化物电池堆研究。(10)固体氧化物电池电极制备工艺研究。(11)固体氧化物电池电极结构-性能模拟研究。

二、时间进度

专刊拟于2022年5月31日截稿,2022年择期优先出版。

三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。

(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用Word软件排版,论文模板请在网站(www.hdpower.net或www.ienergy.cn)首页作者中心下载。

(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。

(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.ienergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。

(2)邮箱投稿:liu_tong@whu.edu.cn(刘老师);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。

(3)咨询联系:刘芳0371-58501060/13838002988;杨满成010-63918755/13801175292。

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2022.02.011

黏性电力用户参与需求侧响应的行为决策建模与分析

Modeling and analysis on decision making behavior of loyal users participating in demand-side response

吉斌^{1,2}, 孙绘^{1,2*}, 昌力^{1,2}, 张丹丹^{1,2}
JI Bin^{1,2}, SUN Hui^{1,2*}, CHANG Li^{1,2}, ZHANG Dandan^{1,2}

(1.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司),南京 211106; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211106)

(1.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute Company Limited), Nanjing 211106, China;
2.NARI Technology Company Limited, Nanjing 211106, China)

摘要:在推进落实“双碳”目标,构建新能源为主体的新型电力系统背景下,负荷侧电力用户的可调弹性负荷资源越来越受到重视。负荷用电具有随机性、趋利性及模仿其他电力负荷主体用电行为的主观性,很难高效、有序、公平地开展负荷侧市场运营。首先分析了电力用户黏性的影响因素并提出了黏性模型;然后对配网系统的黏性电力用户进行聚合建模,并提出了电力响应机制和效益评估模型;最后通过算例进行定量分析,验证了本文所设计的黏性电力用户电价刺激模型的正确性和效益优势,为负荷侧市场主体参与需求响应提供参考。

关键词:碳中和;新型电力系统;负荷侧;黏性电力用户;需求响应;电价刺激;用电调整

中图分类号:TM 71:F 123.9

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2022)02-0080-09

Abstract: With the implementation of the goals of carbon peak and carbon neutrality and the construction of a new energy-oriented new power system, the adjustable elastic load resources on power user side have drawn more and more attention. Power consumption is random and profit oriented, and the users tend to subjectively imitate the power consumption behaviours of other power users. It is difficult to keep the user-side market operating efficiently, orderly and fairly. The stickiness model is established based on the influence factor analysis of power user stickiness. Then, based on the aggregation modelling for the stickiness of power users in distribution networks, electric demand response mechanism and economic benefits evaluation model are established. Finally, quantitative analysis on cases verified the correctness and effectiveness of the pricing model stimulated by stickiness of users, which provides a reference for load-side market participants to participate in demand-side response.

Keywords: carbon neutrality; new power system; load side; loyal power user; demand response; electricity price stimulation; electricity consumption adjustment

0 引言

随着碳达峰、碳中和工作的推进,新能源大规模并网,将给电网带来高比例可再生能源、高比例电力电子设备的“双高”挑战。在此背景下,发电侧和负荷侧的不确定性急剧增加,对电网的安全性和稳定性产生巨大影响。随着新兴技术的引入,负荷

侧的弹性资源参与电力市场是大势所趋^[1-2]。相对于高比例并网的新能源,负荷侧的大用户、聚合商、产消用户具有被动和主动参与电网安全稳定维护的能力,因此,可调节的弹性负荷资源越来越受到重视^[3]。电能市场中既有一般商品属性,也有自身属性,主要体现在发用电需实时平衡和不可大量存储;电能的商品属性是由成本和供需关系共同决定的,在一定范围内价格和成本也反作用于供求关系^[4]。

在电力市场化初期,仅发电主体参与有限的市场运作,割裂了发、用电主体之间的经济联系,市场

收稿日期:2021-11-01;修回日期:2022-01-02

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5100-202155294A-0-0-00);南瑞集团(国网电力科学研究院)资助项目(524609210158)

效力很难显现,存在可调控资源不足、电力调度优化压力大、维护电网安全稳定的经济性不佳等问题。在低碳和“双高”现实环境中,部分专家对负荷侧的用户聚合商^[5]、虚拟同步机^[6]、大用户^[7]、产消主体^[8]参与电力市场进行了研究,但关于电力用户主观参与市场行为的研究较少。负荷侧市场主体无序参与电力市场交易,可能会给电力市场和电网的安全稳定运行带来风险,主要风险来源于:(1)相比于发电主体参与电力市场,用户参与配电侧市场的准入门槛将更低,市场主体的专业能力有限;(2)负荷侧市场主体受到的约束和监控更少,目前针对负荷侧市场主体的监控设施不完善,反演难度较大,存在交易争端风险;(3)电力用户消费的趋利性和利己性可能导致电力用户间用电行为的模仿和趋同现象^[9],如不能有效引导电力消费行为,将给电网的电力供需平衡带来严重影响。因此,及时开展关于负荷侧市场主体参与电力交易的基础设施建设和响应行为研究迫在眉睫,以引导电力用户合理有序地响应电网安全稳定运行。

目前,关于电力用户用电行为的研究主要采用数据统计和数学算法。文献[10]利用数据挖掘技术提取电力用户的用电负荷曲线并从中提取特征曲线,用于用户行为特征分析。文献[11]在考虑负荷纵向随机性的基础上,基于经验模态分解提出了用户用电行为识别方法,即通过用电数据统计和预测方法进行用电行为的预测。文献[12]提出了一种基于用户信息与历史负荷数据的用户分类和用电潜力预测分析方法。但是,电力用户具有社会属性,基于大数据的用电行为预测和分析是根据结果来预测用户未来电力响应行为,忽视了电力用户的主观交易取向,会影响负荷响应预测的精度和用电行为预判引导的成效。

对于缺失电力需求响应技术和策略的负荷侧而言,电力市场主体会通过模仿彼此用电响应行为进行负荷调整。模仿行为从单个电力用户角度来看,类似于元胞之间的影响^[13]。从宏观角度考虑元胞之间的影响,可以反映电力市场主体之间的影响,形成片区聚合的模仿效应,定义为理性人的黏性(以下简称黏性),是指理性社会人在交流的过程中会无意识地相互模仿或跟随对方行为的现象。文献[14]指出,理性人在社会交流时会相互无意识地模仿对方的一些动作、表情和行为方式,而用户的趋利性和避害性是刺激用户互相模仿的重要因素。文献[15]指出模仿效应在中国人中普遍存在,但会受情绪和个体差异的影响;同时,情绪会互相影响,从而间接趋于同一类型市场主体的行为。文

献[16]指出模仿效应既是无意识的模仿也是自身对环境的主动参与,且主动参与有规律可循。参与电网需求响应的电力市场主体从理性人角度看应具有互相影响和互相模仿的特性,本文称为“黏性”,因此,需要对电力用户间响应电网需求的行为进行研究,以实现负荷侧安全、高效、有序调控。

本文以负荷侧市场主体为研究对象,引入电力用户之间的响应“黏性”概念,对电力市场主体之间相互跟随和模仿的响应行为进行建模。然后,从单个负荷市场主体和局部配网入手,开展黏性影响因素和用电行为分析;接着,针对互相模仿的市场主体响应行为进行响应市场的电价建模;最后,进行负荷侧市场主体黏性特征下的响应效益算例验证。

1 黏性特征定义与分析

在日常生活中,人与人之间的行为都具有一定的相互模仿特性,如穿衣风格、消费倾向等。相对而言,负荷侧的电力用户为获得更好的用电经济性和舒适性,通常会学习或模仿身边通过合理规划用电获得较好用电经济性和舒适性的用户。但是,电力用户模仿其他主体的方式、模仿程度以及对配网的影响亟须定量研究。

负荷主体模仿或跟随大用户的负荷调整方案进行用电规划和调整,类似于变色龙通过调整色素细胞的颜色融入环境来保护自己^[17]。而负荷侧市场主体通过模仿或跟随其他市场主体的用电行为融入电网响应环境,称为电力用户的响应黏性。

影响电力用户黏性的因素包括主观和客观2个方面。负荷侧电力用户主动调整用电行为通常是受到外界用电环境客观因素的刺激,如用电价格、用电需求等;电力用户的主观判断和自身条件也是影响模仿和跟随其他电力用户响应电网需求的重要影响因素,包括电力用户对天气、供需平衡的判断,负荷调整速度及响应时间等;针对局部配网而言,客观环境会随着市场主体主观行为的调整而呈现一个动态渐变的过程,与时间有关。综合以上3个因素,影响市场主体的黏性因素可表示为

$$f = (\alpha_i, v_j, t_i) = \sum_{t_0}^{t_1} \sum_{j=0}^m (\alpha_i v_j), \quad (1)$$

式中: f 为模仿其他市场主体响应电网不平衡量的黏性,是一个累积的过程,采用归一化处理,无量纲; i 为电力用户主体; α_i 为电力用户对电力需求响应影响因素的敏感度; v_j 为环境因素集合; j 为第 j 个环境影响因素; t_i 为连续时间段, t_0 和 t_1 分别为该时段的起始和结束时间点; m 为影响电力用户响应电网平衡的环境因素个数。

局部电网的供需平衡维护响应需要电力用户之间协同作用,采用分布式跟随方式逐渐趋于维持配网电能供需平衡。其中,电力用户参与配网需求响应市场时,会受到实时电价和用电需求 2 个方面的影响。电力用户受到实时电价的直接刺激见式(2),电力用户的用电需求权衡见式(3),电力用户的负荷最终响应调节系数见式(4)。

$$I_{\text{irr}} = \beta f, \quad (2)$$

$$A_{\text{adj}} = \delta f, \quad (3)$$

$$H_{\text{rect}} = I_{\text{irr}} + A_{\text{adj}} = \sum_{j=0}^m \sum_{t_0 \rightarrow t_1} v_j \alpha_i (\beta + \delta), \quad (4)$$

式中: I_{irr} 为电力用户受到实时电价的直接刺激后响应电量调整的被动行为系数,用影响系数 β 和黏性 f 的乘积表示; A_{adj} 为电力用户的用电需求权衡调偏行为系数,是电力用户权衡用电需求和用电价格之后理性响应电量的综合系数,具有主动性和主观性,主要指根据当前所处的环境对用电行为进行调整的意愿度; H_{rect} 为电力用户因主、被动因素刺激而响应电网需求的最终响应调节行为系数; δ 为不同主体对当前环境的评判因子,是该时段内形成的连续且有目的的行为改变。

电力用户为了更经济地满足用电需求,需要模仿其他电力用户响应电网需求,电力用户响应电网需求的行为调整可表示为

$$Q_{\text{rect},0 \rightarrow t} = H_{\text{rect}} \int_{t_0}^t P_t dt, \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{rect},0 \rightarrow t}$ 为局别配网的所有电力用户从时间 0 到 t 的负荷用电调整量; P_t 为局部配网可调负荷。

2 电力用户的黏性效应分析

2.1 电力用户黏性分析与建模

静态环境因素影响必要用电部分,短时间内必要用电量不可调节;动态环境因素影响供、用电量的不平衡关系,随发用电两端市场主体发用电能力和需求而变化。动态环境因素需要转变为能够驱使电力用户随供用电环境变化而变化的刺激,主要包括实时电价、用电安全、用电舒适性。

在动态环境因素影响下,主体调节自身用电行为包括 2 个方面:(1)电力用户在动态环境因素(主要为电价和供需状态)的刺激下做出负荷调整的“第一应激反应”,是一个短时间决策的固定用电行为调整动作;(2)电力用户会通过评估动态用电环境因素,结合用电主体的环境敏感度以及自身价值取向,在负荷应激调节行为的基础上再进行负荷用电调整,其中,自身价值取向又分别为用电安全性、用电经济性、用电舒适性取向,因此,电力用户的主

观用电行为调整是以应激性为基础的用电决策行为。黏性电力用户响应电网供需的响应电量见式(6),其中主观用电调整和对客观环境判断后做出的用电调整分别见式(7),(8)。

$$Q_{\text{rect}} = G + X, \quad (6)$$

$$G = \zeta \sum_{a=0}^z \frac{G_a}{z}, \quad (7)$$

$$X = \lambda \sum_{t_0 \rightarrow t_1} (\sigma A + sE + \tau S), \quad (8)$$

式中: Q_{rect} 为电力用户的用电调整量; G 为根据应激反应而调节的电量,是历史用电调整行为的积累,与电力用户主体的调整特征系数 ζ 有关; z 为电力用户历史应急响应次数; X 为电力用户根据环境因素和自身意愿在负荷应激调节行为的基础上调整的负荷用电; A, E, S 分别为用电的安全性、经济性和舒适性,对应的系数 σ, s, τ 分别表示各用电主体的用电取舍程度; λ 为电力用户主观响应用电需求的用电环境敏感度, $\lambda \in (0, 1]$ 。

黏性电力用户的电网需求响应影响系数可表示为

$$\lambda = \begin{cases} 0 \\ \frac{dE_{i,t}}{dp_{\text{real}}} \cdot \frac{\Delta p_{\text{real}}}{\Delta E_{i,t}}, \end{cases} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{1}{n_1} \sum_{i=0}^{n_1} \frac{d(\Delta Q_i / \Delta Q_i)}{d(\Delta p_i / \Delta p_i)}, \quad (10)$$

式中: p_{real} 为实际结算电价; Δp_{real} 为电网实际不平衡量导致的结算价格变动量; $E_{i,t}$ 为电力用户 i 在 t 时段的计划用电经济性; $\Delta E_{i,t}$ 为电力用户 i 在 t 时段调整量的经济性变化量; n_1 为历史用电调整次数; ΔQ_i 为本次响应不平衡电量; $\Delta Q_{i,t}$ 为历史各时段的响应不平衡电量; Δp_i 为本次响应不平衡电量的价格; $\Delta p_{i,t}$ 为历史响应不平衡电量的价格。

对于电力用户而言,被动响应电网不平衡电量的负荷调整,通常都是通过牺牲舒适性来获得更多用电的经济性。因此,响应电网不平衡电量负荷调整的经济性和舒适性是互斥的,在一定用电支付能力下,经济性系数 s 和舒适性系数 τ 之和为一个定值

$$s + \tau = \frac{d(\Delta Q_i) / Q_i}{d(\Delta E) / E} + \frac{d(\Delta P_i) / P_i}{d(\Delta S_i) / S_i} = 1, \quad (11)$$

式中: Q_i 为 t 时段的总用电量; ΔE 为响应电量对应的用电费用降低量; E 为原计划用电的费用; ΔS_i 为响应电网需求的舒适性变化量; S_i 为原用电舒适性; ΔP_i 为响应需求的负荷调整量; P_i 为电力用户计划负荷。

电力用户响应电网安全需求,但不能无限制地

进行负荷调整,电力用户响应电量应在经济性可接受和用电舒适性最大忍耐范围内。用电的经济性和舒适性由电力用户主观决定,但实际执行量与电气设备的额定容量有关。用电设备的额定容量越大,可调节的电量就越大,可获得的经济性就越显著;同时,享受到的电气设备服务精准控制程度就越高,舒适度也越高。所以,电力用户参与电力需求响应行为需要在保证局部配网电量平衡安全和自身用电安全的前提下,获得用电经济性和用电舒适性的最优组合。实际生活中,电网因用电不平衡而影响用电安全的概率非常小,即安全性系数 σ 很小,通常情况下可以忽略不计,但在故障电路中需要考虑供用电平衡对用电的影响,则电力用户考虑用电安全的需求响应电量可表示为

$$\sigma A = \begin{cases} \sigma A_{\max} & \sigma \rightarrow 0, A_{\max} \rightarrow \infty \\ \sigma A_{\min} & \sigma \rightarrow 0, A_{\min} \rightarrow 0 \end{cases}, \quad (12)$$

$$F = \begin{cases} [\varepsilon \sum_n \bar{F} + \lambda \sum_{t_0 \rightarrow t_1} (\sigma A + sE + \tau S)]_h \\ [\varepsilon \sum_n \bar{F} + \lambda \sum_{t_0 \rightarrow t_1} (\sigma A + sE + \tau S)]_l \end{cases}, \quad (13)$$

式中: F 为当前环境下安全用电的响应电量; A_{\max} , A_{\min} 分别为电力用户的最大和最小用电安全需求; \bar{F} 为电力用户的历史用电行为调节量; n 为历史响应用电安全的调节次数; h, l 分别为用电供不应求和供过于求的电网环境。

综上所述,电力用户的响应电量可表示为

$$\Delta Q = Q_{\text{now}} [\varepsilon \sum_n \bar{F} + \lambda \sum_{t_0 \rightarrow t_1} (\sigma A + s \sum_n \bar{E} + \tau \sum_n \bar{S})], \quad (14)$$

式中: Q_{now} 为电力用户当前所需的用电量; \bar{E} 为电力用户历史用电行为调整量的用电经济收益; \bar{S} 为电力用户历史用电行为调整量的用电舒适性。

2.2 实时电价分析与建模

负荷侧市场主体参与电网不平衡电量响应的直接刺激主要来源于实时用电价格,因此,负荷侧需求响应需要实时反映电网电量的供需平衡与实时电价的关联关系。为区分预测电价与实际交易价格,本文引入关联实时电量供需平衡的弹性电价^[18-19]

$$p_{\text{T}} = \frac{\Delta Q p_i^0}{\varepsilon Q_{\text{need}}}, \quad (15)$$

式中: p_{T} 为实际弹性电价; ΔQ 为配网实际响应电量; p_i^0 为上一时段的结算电价; ε 为弹性系数; Q_{need} 为配网原本需要的电量。

负荷侧市场主体参与调峰辅助服务市场的实

际结算电价可表示为

$$p_{\text{real}} = p_h + \frac{\Delta Q p_i^0}{\varepsilon Q_{\text{need}}}, \quad (16)$$

式中: p_{real} 为响应电网需求的电力用户实际用电价格; p_h 为电力用户计划用电申报电价。

黏性电力用户的用电行为调整受用电经济性和舒适性影响,用电舒适性变化主要通过被动调整负荷用电量来反映,见式(17)。用电经济性是实际响应用电后的电费与原计划用电量情况下电费的比值,比值越小经济性越好。从用电费用节约角度看,用电经济性主要由用电费用减少量来表示,见式(18)。所以,负荷侧市场主体的用电目标是响应最少的电量获得最大的收益,即用电经济性和用电舒适性进行最优配置,见式(19)。

(1)用电舒适性 S , S 越小舒适性越低。

$$S = \frac{Q_{\text{now}} - \Delta Q}{Q_{\text{now}}}. \quad (17)$$

(2)用电经济性 E , E 越大经济性越高。

$$E = p_{\text{real}} \Delta Q = (p_h + \frac{\Delta Q p_i^0}{\varepsilon Q_{\text{need}}}) \Delta Q. \quad (18)$$

(3)用电响应目标函数

$$U = \max [\tau U_{\text{com}} + s U_{\text{eco}}] = \max [\tau (1 - \frac{\Delta Q}{Q_{\text{now}}}) + s (1 - \frac{p_{\text{T}}}{p_h})], \quad (19)$$

式中: U_{com} 为电力用户响应电网需求的用电舒适性函数; U_{eco} 为电力用户响应电网需求的用电经济性函数。

2.3 电力用户用电跟踪调整方式

类比元胞聚合作用,电力用户响应电力不平衡量的行为受环境和自身主观选择2个方面的影响。刺激电力用户用电调整的起始扰动会导致用电环境发生改变,扰动包括但不限于其他电力用户的行为调整、系统用电不平衡量、实时电价以及电力调整指令,但用电价格和其他电力用户的负荷调整是最直接的刺激因素。黏性电力用户接受环境刺激后,主观做出负荷调整决策并动作;负荷调整后电网供需会发生变化,导致电力市场环境重构,出现新的电力需求;有条件的黏性电力用户结合环境新需求和自身负荷状态继续调整自身用电决策和负荷状态,直到环境变化幅度低于电力用户最低感知阈值时才停止用电调整。

局部电网黏性电力用户响应供需平衡的动态调整过程如图1所示。

2.4 黏性电力用户用电跟随负荷调整模型

对于用户而言,可调负荷的调节灵活性与电力用户的负荷类型、负荷调整习惯等有关,本文引入

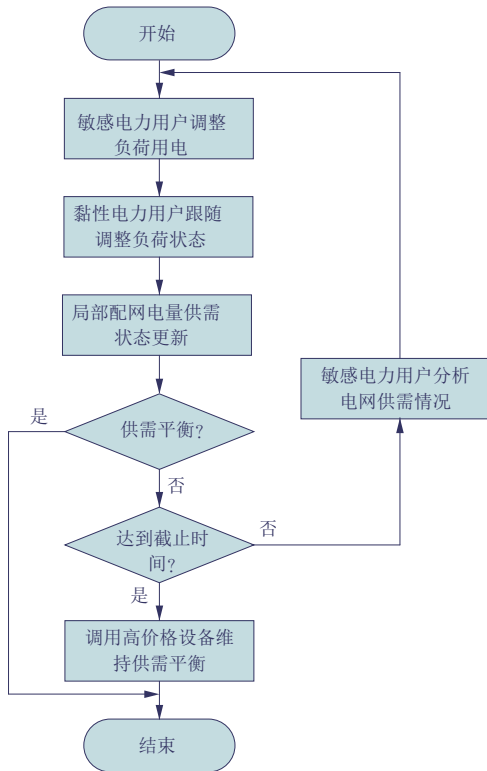


图 1 黏性用户用电负荷调整过程示意

Fig. 1 Adjustment process of the electricity load of power users with stickiness

固定调整基准 θ 表示响应不平衡电量的单次最小调节量, 则最小调整的价值和 t 时间内响应的不平衡电量为

$$p_i = \theta p_{\text{real}} = \theta(p_h + p_r), \quad (20)$$

$$\Delta p' = p_i T = \theta \left(p_h + \frac{\Delta Q p_i^0}{\varepsilon Q_{\text{need}}} \right) N, \quad (21)$$

式中: p_i 为电力用户第 i 轮响应电网需求获得的收益; θ 为电力用户响应不平衡电量消纳的单次最小调节量; $\Delta p'$ 为 N 个响应周期的收益。

配网用户群的不平衡电量是一个持续响应和动态变化的过程, 动态不平衡电量见式(22)。由式(22)可以看出, 用户单次响应系统的电量随系统不平衡电量的降低而减少, 从而导致系统响应的弹性电价降低。针对电力市场环境, 需要设置不同的弹性电价响应强度, 通过弹性系数 ε 来调节电网不平衡电量对应的价格, 从而适应不同市场环境并提升响应速度。

$$\Delta Q = \Delta Q^0 - \sum_{i=1}^n \Delta Q'_i = \Delta Q^0 - \left[\theta N \left(p_h + \frac{\Delta Q' p_i^0}{\varepsilon Q_{\text{need}}} \right) \right], \quad (22)$$

式中: ΔQ^0 为初始不平衡电量; $\Delta Q'$ 为上一轮响应之后的剩余不平衡电量; ΔQ 为本轮响应之后的不平衡电量。

2.4.1 系统效益分析模型

电力用户的黏性是用电行为协同调整的现象。用户群响应配电侧电力需求而改变负荷状态可降低发电侧的火电备用容量, 具有环保效益^[20]; 同时, 电力用户协同负荷调整可以在紧急时刻响应电网需求, 主动参与电网供需调整, 从而加强配网的互动性和坚强性, 助力泛在配网市场化运营。本文从经济角度衡量电力用户协同响应配电需求的效益, 用户实际响应不平衡电量的备用容量和日前调峰/调频容量以及价格很难具体到局部配网, 已有文章提出利用环境保护电价计算不平衡电量的增加成本^[5], 但这会导致实时电价提高。为保证本文电价具有一般性, 用 p_x 表示临时电量需求变化所引起的单位电价成本 (p_x 的初始价格等于电力用户的固定用电价格 p_0), 用 F_x 表示不平衡电量带来的增加费用。

$$\begin{cases} F_x = \Delta Q p_x \\ \sigma_m = \frac{F_x}{p_h (Q_{\text{need}} - \Delta Q)}, \\ \sigma_p = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{need}} - \Delta Q} \end{cases} \quad (23)$$

式中: σ_m 为系统费用效益系数; σ_p 为系统用电效益系数。

2.4.2 用户效益分析模型

相对于用户来说, 用电费用降低是响应电力需求的直观表现。电力用户协同响应电力不平衡量将以计划用电申报电价 p_h 购得原定电量; 反之, 电力用户将以当前固定电价 p_0 购买所需的任意电量。将 2 种方式的用电费用比值定义为用电费用率 κ_c 。

$$\kappa_c = \frac{p_h (Q_{\text{need}} - \Delta Q)}{p_0 Q_{\text{need}}}. \quad (24)$$

3 算例验证

为验证本文所设计的黏性电力用户电价刺激模型的正确性和效益优势, 具备引导电力用户响应系统电力需求的潜力, 设某时段配网系统需求电量为 $1\,000 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 而实际可供电量为 $800 \text{ kW}\cdot\text{h}$, 电力用户为理性人, 具备相互模仿和跟踪其他电力用户负荷调整和获取电网实时供需平衡的能力。

3.1 模型参数验证

3.1.1 模型的单个参数验证

电力用户单次响应电网不平衡电量体现负荷调整的灵活性, 由于初期的可调负荷资源有限且灵活性一般较低, 则最小可调节的响应电量 θ 在 $30\sim 150 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 范围内以 $20 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 为梯度等梯度取

值,研究 θ 与单次响应不平衡电量的关系。需求相应的补贴价格为 0.3 元/(kW·h),弹性价格的弹性系数 ε 取 0.2。

选取不同的 θ ,达到平衡时响应周期数和单次响应电量如图 2 所示。从图 2 纵向看, θ 越大,第 1 个响应周期可调整的不平衡量越多;从横向看, θ 越大,不平衡电量过度调整的周期数就越少,但是超调量就会越多,所以灵活性相对来说较低。由于黏性电力用户响应电网不平衡量时对响应周期有严格要求,所以在超调量可接受范围内, θ 越大越好。

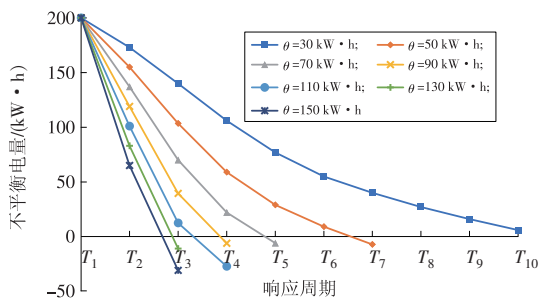


图 2 不同 θ 下单次响应电量与响应周期的关系

Fig. 2 Relationship between the power of a single response and response time with different θ value

验证弹性系数 ε 对实时弹性电价的影响,假设需求电量和不平衡电量不变, ε 在 0.1~1.0 范围内等梯度取 10 个值。根据式(15)求得弹性电价与弹性系数之间的关系,如图 3 所示。

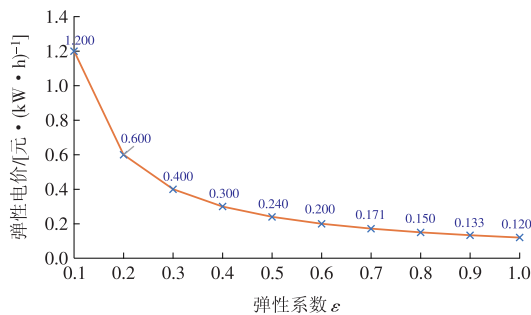


图 3 ε 与弹性电价的关系

Fig. 3 Relationship between ε and elastic electricity price

本文设计的实时弹性电价模型的弹性电价与 ε 成反比,即 ε 越小弹性电价越高,由于电价在 1 个周期内可以引导电力用户响应的不平衡电量越多,消纳不平衡电量的速度越快。因此,本文通过设计弹性电价,按照不平衡电量实时调整交易电价,引导电力用户及时响应电网不平衡量。

为验证不同 θ 对响应周期的影响,弹性系数 ε 取 0.2,响应周期和 θ 的关系如图 4 所示。

通过图 4 可以看出, θ 越大需求响应的周期越少。从整体看, θ 取 30,50,70 kW·h 时,弹性电价均是先增后减,这是因为弹性电价与不平衡电量正相

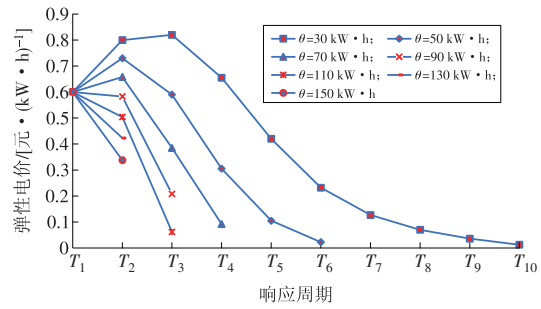


图 4 不同 θ 下弹性电价与响应周期的关系

Fig. 4 Relationship between elastic electricity price and demand response time with different θ value

关, θ 较小时第 1 次响应的不平衡电量小于第 2 次,则第 2 次的弹性电价大于第 1 次,接着剩余不平衡电量越来越少,导致弹性电价降低;当 θ 较大时,第 1 次固定消纳的不平衡电量较多,剩余不平衡电量少,则对应的弹性电价就会直线下降。所以,根据上述分析可以得出, θ 过大弹性电价会失去调节的灵活性, θ 过小会增加调节周期。

3.1.2 模型的连续性验证

在一轮平衡电量响应过程中,需要考虑电力用户连续响应不平衡电量后,实时不平衡电量对弹性电价的连续影响。为了便于分析,电力用户的属性参数为: $\theta=50$ kW·h, $\varepsilon=0.2$, $p_h=0.3$ 元/(kW·h), $p_0=0.6$ 元/(kW·h),实际需求电量为 1 000 kW·h,实际可供电量为 800 kW·h。如图 5 所示,不平衡电量超过 15 kW·h 时,在前 4 个周期,通过弹性电价引导消纳的电量较多;随着剩余不平衡电量的减少,弹性电价降低,从而引导市场主体响应不平衡电量的积极性降低,最终趋向供用电平衡;直到第 7 个消纳周期,出现富余过调量后,固调量 50 kW·h 已经大于不平衡电量,导致后续的调节失效,所以在第 8 个周期后消纳的不平衡电量会出现超调,由于固调量大于超调量,继续响应的结果是在平衡量 800 kW·h 上下交替波动。

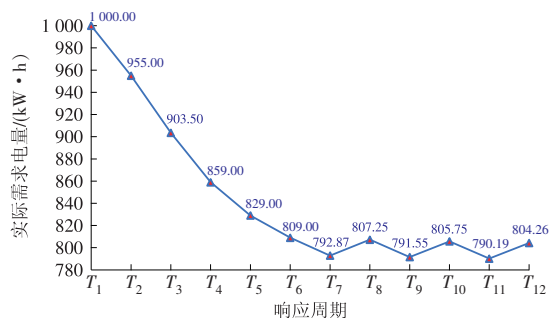


图 5 实际需求电量与响应周期的关系

Fig. 5 Relationship between actual power demand and response time

为验证模型的正确性,根据式(15)–(22)可以计算得到各响应周期的数据,见表1。

表1 各响应周期数据
Table 1 Data about response time

响应周期	响应电量/ (kW·h)	弹性电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	实际电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	不平衡电 量/(kW·h)	系统电量/ (kW·h)
T_1	0	0	0.600 0	200.000	1 000.000
T_2	45.000	0.600 00	0.900 0	155.000	955.000
T_3	51.500	0.730 00	1.030 0	103.500	903.500
T_4	44.500	0.590 00	0.890 0	59.000	859.000
T_5	30.000	0.305 00	0.605 0	29.000	829.000
T_6	20.000	0.105 00	0.405 0	9.000	809.000
T_7	16.130	-0.022 50	0.277 5	-7.130	792.870
T_8	14.380	0.012 48	0.290 0	7.250	807.250
T_9	16.283	0.025 70	0.315 7	-9.033	790.970
T_{10}	14.250	0.015 90	0.315 9	5.750	805.750
T_{11}	15.560	0.001 13	0.298 9	-9.814	790.186
T_{12}	14.070	0.018 60	0.318 6	4.256	804.256
T_{13}	15.421	0.008 40	0.291 6	-11.165	788.835

单次响应电量和实时电价与响应周期的关系如图6所示。通过图6可见,需要响应的不平衡电量与弹性电价变化趋势一致,且弹性价格跟随供需不平衡量出现平稳波动,为最后实际黏性电力用户响应电网需求电量的响应结算价格。通过连续的响应申报和实时价格滚动,最大限度激发本时段交易的用户侧实际可响应电量,体现电网实际不平衡量所对应的市场价值,在保证市场经济性的前提下激发负荷侧资源,引导市场主体参与电量响应。

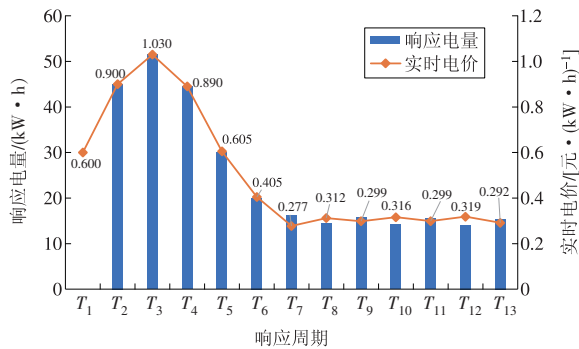


图6 单次响应电量和实时电价与响应周期的关系

Fig. 6 Relationship between power of a single response, real-time electricity price and response time

综合以上结果:在第6和第7周期之间可以获得系统电量的平衡,之后一直处于不平衡电量的小幅度波动状态且长期处于该状态;弹性电价与不平衡电量正相关,在第7周期后可调节的电量较少,但调节的方向始终朝着减少不平衡电量的方向;相比于弹性电价, θ 是固定值,对应电力用户响应不平衡电量而投切固定功率的负荷设备,缺乏灵活性。

3.2 效益分析

3.2.1 用户效益

设电力用户对用电经济性和舒适性的要求相等,则 α, β 均为0.5, $p_0=0.6$ 元/(kW·h)。根据式(24)可得响应电力需求的用户用电经济性费用率 κ_c 为0.50,不响应电力需求的用电价格和用电量按用户需求供应,则 κ_c 为0.25;响应系统电力需求的用电舒适度 S_1 为0.65,不响应用户电力需求的用电舒适度 S_2 为0.25。综合用户用电的经济性费用率和舒适性2个方面可以看出,电力用户响应配电系统电力不平衡电量的性价比更高,也反映出本文所提的机制在一定条件下可以为有需要的电力用户提供参与响应电网不平衡电量的机会。

响应电力需求与不响应电力需求的效益对比如图7所示。由图7可以看出,响应电力需求的系统效益和用户效益分别提高了100%和160%,说明本文设计的需求侧响应模型具有很强的价格刺激作用。

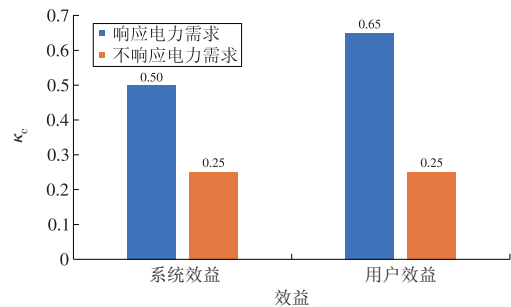


图7 响应电力需求与不响应电力需求的效益对比

Fig. 7 Benefits with demand response or without demand response

3.2.2 其他方式的电价效益对比

为验证本文电力用户协同响应电力需求的 $p_h=0.3$ 元/(kW·h)有优势,与文献[21]算例中一部制和二部制电价的全天24h实时最低电价进行对比。一部制电价和二部制电价分别为0.413 2, 0.534 4元/(kW·h),本文的 p_h 比一部制和二部制电价分别降低了37.73%, 78.13%。如果考虑电量供需平衡的辅助服务费用 and 环境保护效益,如文献[7]煤电环境保护电价高达1.412元/(kW·h),比本文电价 p_h 高了370.67%。可见,价格引导黏性电力用户协同消纳不平衡电量,严格按照既定购电合约进行电力交易,可避免调频、备用和其他辅助服务费用对自身用电带来经济影响,从而通过主动响应电网需求,调整用电策略可以获得良好的用电经济收益。

4 结束语

在当前电力市场不断深入推进的形势下,进行

电力用户需求响应行为研究具有重要意义。本文分析了电力用户的黏性影响因素,从用户属性、行为调整依据以及调整方式和流程对理性电力用户的黏性进行建模研究。从用电安全性和经济性2个方面考虑电力用户的用电行为调整依据,建立激励模型并设计了电力用户响应系统电力需求流程。通过算例计算结果可以看出,在特定的电力市场环境下,电力用户的趋利性会引导其主动参与电力不平衡量的响应。

本文已验证所设计电价方案能够适应黏性用户响应电网需求并为电力用户带来经济效益,下一步工作将对弹性系数与固定调整基准的优化匹配、黏性电力用户个体差异、用户群全状态进行深入研究,以建立最优用户响应电价行为模型。

参考文献:

- [1]吉斌,昌力,朱丽叶,等.区块链系统节点私钥泄露的电力数据防篡改方法与验证机制设计[J].电力自动化设备,2021,41(12):87-94.
JI Bin, CHANG Li, ZHU Liye, et al. Anti-tampering method and verification mechanism design of power data for private key leakage of node in blockchain system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 87-94.
- [2]吉斌,昌力,陈振寰,等.基于区块链技术的电力碳排放权交易市场机制设计与应用[J].电力系统自动化,2021,45(12):1-10.
JI Bin, CHANG Li, CHEN Zhenhuan, et al. Blockchain technology based design and application of market mechanism for power carbon emission allowance trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 1-10.
- [3]王云泽,王秋瑾,马欣欣.基于区块链技术的能源互联网交易方案设计[J].华电技术,2020,42(8):83-89.
WANG Yunze, WANG Qiujin, MA Xinxin. Design of energy internet trading system based on blockchain technology[J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 83-89.
- [4]张粒子,刘方,王帮灿,等.巴西电力市场研究:市场机制内在逻辑分析与对我国电力市场建设的启示[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3201-3214.
ZHANG Lizi, LIU Fang, WANG Bangcan, et al. Brazil's electricity market research: The internal logic analysis of market mechanism and its enlightenment to China's power market construction [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3201-3214.
- [5]王晔,王留晖,张少华.风电商与DR聚合商联营对电力市场竞争的影响[J].电网技术,2018,42(1):110-116.
WANG Xian, WANG Liuhui, ZHANG Shaohua. Impacts of cooperation between wind power producer and DR aggregator on electricity market equilibrium [J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 110-116.
- [6]杨斌,杜文娟,王海风.数据驱动下的虚拟同步发电机等效建模[J].电网技术,2020,44(1):35-43.
YANG Bin, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Equivalent modeling of virtual synchronous generator based on data-driven method[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 35-43.
- [7]刘妍,谭建成.基于区块链技术的大用户直购电模式实现研究[J].电力信息与通信技术,2018,16(7):94-100.
LIU Yan, TAN Jiancheng. Application of blockchain technology in large consumers' direct purchase [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(7): 94-100.
- [8]吉斌,莫峻,谭建成.高比例光伏电能产消群电力需求响应机制设计[J].电网技术,2018,42(10):3315-3323.
JI Bin, MO Jun, TAN Jiancheng. Design of power demand response mechanism for high proportion of photovoltaic prosumer [J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3315-3323.
- [9]平健,严正,陈思捷,等.基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145,7487.
PING Jian, YAN Zheng, CHEN Sijie, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145, 7487.
- [10]冯志颖,唐文虎,吴青华,等.考虑负荷纵向随机性的用户用电行为聚类方法[J].电力自动化设备,2018,38(9):39-44,53.
FENG Zhiying, TANG Wenhui, WU Qinghua, et al. Users' consumption behavior clustering method considering longitudinal randomness of load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 39-44, 53.
- [11]邱起瑞,李更丰,潘雨晴.基于用电行为综合指标的用户负荷分类研究[J].智慧电力,2018,46(10):26-31.
QIU Qirui, LI Gengfeng, PAN Yuqing. Research on user load classification based on synthetic index of electricity consumption behavior [J]. Smart Power, 2018, 46(10): 26-31.
- [12]CHARTRAND T L, BARGH J A. The chameleon effect: The perception-behavior link and social interaction [J]. Journal of Personality and Social Psychology, 1999, 76(6): 893-910.
- [13]肖白,张小娜,姜卓,等.考虑本位元胞接受能力和相邻元胞负荷影响的空间负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(12):57-64.
XIAO Bai, ZHANG Xiaona, JIANG Zhuo, et al. Spatial load forecasting considering the acceptance capacity of standard cells and the load of adjacent cells [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12):

- 57-64.
- [14]汪寅,臧寅垠,陈巍.从“变色龙效应”到“镜像神经元”再到“模仿过多症”——作为社会交流产物的人类无意识模仿[J].心理科学进展,2011,19(6):916-924.
WANG Yin, ZANG Yinyin, CHEN Wei. From "chameleon effect" to "mirror neurons" and to "Echopraxia": Human mimicry comes from social interaction [J]. Advances in Psychological Science, 2011, 19(6): 916-924.
- [15]陈巍.情绪对无意识模仿的影响:来自中国人“变色龙效应”的证据[C]//中国心理学会.心理学与创新能力提升——第十六届全国心理学学术会议论文集.中国心理学会,2013.
- [16]LAKIN J L, JEFFERIS V E, CHENG C M, et al. The chameleon effect as social glue: Evidence for the evolutionary significance of nonconscious mimicry [J]. Journal of Nonverbal Behavior, 2003, 27(3): 145-162.
- [17]徐磊,杨秀,张美霞.基于数据挖掘的工业用户用电行为分析[J].电测与仪表,2017,54(16):68-74.
XU Lei, YANG Xiu, ZHANG Meixia. Industrial users of electricity behavior analysis based on data mining [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(16): 68-74.
- [18]吉斌,刘妍,朱丽叶,等.基于联盟区块链的电力碳权交易机制设计[J].华电技术,2020,42(8):32-40.
JI Bin, LIU Yan, ZHU Liye, et al. Design of carbon emission permit trading mechanism in power industry based on consortium blockchain [J]. Huadian Technology, 2020, 42(8): 32-40.
- [19]吉斌,孙绘,梁肖,等.面向“双碳”目标的碳电市场融合交易探讨[J].华电技术,2021,43(6):33-40.
JI Bin, SUN Hui, LIANG Xiao, et al. Discussion on convergent trading of the carbon and electricity market on the path to carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 33-40.
- [20]高亚静,吕孟扩,梁海峰,等.基于离散吸引力模型的用电需求价格弹性矩阵[J].电力系统自动化,2014,38(13):103-107,144.
GAO Yajing, LYU Mengkuo, LIANG Haifeng, et al. Electricity demand price elasticity matrix based on discrete attractive model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 103-107, 144.
- [21]周玲芳.智能电网条件下的用户侧实时电价机制研究[D].北京:华北电力大学,2015.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

吉斌(1992),男,工程师,工学硕士,从事电力市场、电力自动化调度以及区块链技术的应用融合技术研究工作,1498206259@qq.com;

孙绘(1993),男,工程师,工学硕士,从事区块链技术研究与应用以及软件研发工作,sunhui@88.com。

*为通信作者。

 中国华电科工集团有限公司
CHINA HUADIAN ENGINEERING CO.,LTD.

华电郑州机械设计研究院有限公司
HUADIAN ZHENGZHOU MECHANICAL DESIGN INSTITUTE CO.,LTD.



设计咨询与技术服务

高端装备研发与制造

系统工程总承包

电话：0371-58501491 传真：0371-58501234 网址：www.hdmdi.com
地址：河南省郑州市郑东新区龙子湖湖心岛湖心环路 27 号 邮编：450046

中国华电集团有限公司
CHINA HUADIAN CORPORATION LTD.

中国华电科工集团有限公司
CHINA HUADIAN ENGINEERING CO., LTD.

CHEC

清洁 高效 节能 减排 降碳

同心同向同行
创业创新创效

ONE UNITED MIND, ONE CONSISTENT
ORIENTATION, ONE ULTIMATE GOAL.
ENTREPRENEURSHIP, INNOVATION,
BENEFIT-MAKING

电话: 010-63918999
传真: 010-62267226
网址: www.chec.com.cn
地址: 北京市丰台区汽车博物馆东路6号院
邮编: 100070

中国标准连续出版物号

ISSN 2097-0706
CN 41-1461/TK

国内定价: 24 元
国外定价: 10 美元

ISSN 2097-0706



9 772097 070228