

可再生能源制氢综合能源管理平台研究

廖远旭^{1,✉}, 董英瑞¹, 孙翔², 汤翔¹, 张振¹, 汪少勇¹, 谭江平¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东广州 510663; 2. 中能建氢能有限公司, 北京 100162)

摘要: [目的] 氢能是一种绿色高效的清洁能源, 可以通过多种方式转化为电能、热能等加以利用。可再生能源制氢是实现碳达峰、碳中和目标的重要支撑。可再生能源制氢属于新型项目, 是电力行业与化工行业的结合, 系统间耦合性不强, 提高能源综合利用率是可再生能源制氢的研究重点。[方法] 文章介绍了当前主要的制氢工艺, 对比了灰氢、蓝氢和绿氢的主要特点, 阐述了风电及光伏制氢的主要系统, 并提出了通过构建综合能源管理平台对可再生能源制氢各系统进行统筹管控的思路。[结果] 在综合能源管理平台制定控制策略可以平衡功率, 实现最优调度从而减少弃风弃光, 而且还可以降低单位制氢成本。[结论] 综合能源管理平台可以提高可再生能源制氢的能源综合利用率, 对可再生能源制氢项目的推广起到支撑的作用, 为可再生能源制氢领域的研究人员提供了重要的参考借鉴

关键词: 可再生能源; 风电; 光伏发电; 制氢; 综合能源管理平台

中图分类号: TK91; TM73

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0047-06

开放科学(资源服务)二维码:



Research on Comprehensive Energy Management Platform for Hydrogen Production from Renewable Energy

LIAO Yuanxu^{1,✉}, DONG Yingrui¹, SUN Xiang², TANG Xiang¹, ZHANG Zhen¹, WANG Shaoyong¹, TAN Jiangping¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;

2. China Energy Engineering Group Hydrogen Energy Co., Ltd., Beijing 100162, China)

Abstract: [Introduction] Hydrogen energy is a kind of green and efficient energy, which can be converted into electric energy and thermal energy by many ways. Hydrogen production from renewable energy is an important support to achieve the goal of "carbon peak and neutrality." Hydrogen production from renewable energy is a new kind of project, which is the combination of electric power industry and chemical industry. The coupling between systems is not strong. Improving the comprehensive utilization of energy is the research focus of hydrogen production from renewable energy. [Method] The main hydrogen production processes at present were introduced, the main characteristics of gray hydrogen, blue hydrogen and green hydrogen were compared, the main systems of hydrogen production from wind and photovoltaic power were described. Then it was proposed to build a comprehensive energy management platform to manage and control all systems of hydrogen production from renewable energy as a whole. [Result] The control strategy formulated on the comprehensive energy management platform can balance the power, optimize the scheduling, reduce the waste of wind and photovoltaic power, and reduce the unit hydrogen production cost. [Conclusion] The comprehensive energy management platform can improve the comprehensive utilization of hydrogen production from renewable energy, play a supporting role in the promotion of hydrogen production from renewable energy projects, and have important reference significance for researchers in this area.

Key words: renewable energy; wind power; photovoltaic power; hydrogen production; comprehensive energy management platform

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2022-10-11 修回日期: 2022-11-14

基金项目: 中国能建广东院科技项目“新型电力系统下氢能与储能关键技术研究”(EV10071W)

0 引言

中国是世界上最大的能源生产和消费国之一,能源使用和生态环境问题的矛盾是中国全面建设社会主义现代化进程上面临的重大挑战。

氢能具有绿色环保、燃烧效率高、适宜储存等特点,具有极大的发展潜力,正逐步成为全球能源转型发展的重要载体之一,也为大规模储能技术提供了一种新思路^[1-2]。氢气作为能源和原料在交通、建筑、化工、电力等多种应用场景终端使用,充当能源缓冲载体,提高能源系统韧性,实现能源在不同行业和地区间进行能量再分配,促进多种能源耦合综合利用,节约一次能源消耗,提高能源系统的综合效益,加速构建“清洁低碳,安全高效”的新时代能源体系^[3-4]。

2020年9月22日,习近平总书记在联合国大会上作出了关于我国二氧化碳排放达峰和碳中和愿景的重大宣示,确立了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标。2022年3月23日国家发改委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》。该规划中指出,氢能在未来国家能源体系中起着举足轻重的作用,氢能产业不仅是战略性新兴产业,也是未来产业重点发展方向,到2035年,要构建起涉及交通、储能、工业等多领域的氢能应用,形成氢能产业体系,提升可再生能源制氢在终端能源消费中的比重,让可再生能源制氢在能源绿色转型的过程中起到重要支撑作用。

可再生能源制氢具有巨大的潜力。一方面,可再生能源发电近年来已逐步进入平价上网时代,同时随着电解水制氢成本的持续下降,尤其是在部分区域风电、光伏竞争性上网电价持续走低的背景下,利用可再生能源制氢具有良好的经济性;另一方面,当可再生能源装机容量在电源结构中占比较高时,单纯依靠短周期(小时级)储能难以满足电力系统稳定运行的需要。日间、月度乃至季节性的长周期储能将是实现高渗透率可再生发展的重要手段。

可再生能源制氢属于新型项目,是电力领域的可再生能源发电站和化工领域的制氢站的融合,涉及从发电到输变电到用电多个环节。不同系统相对独立耦合性较差,能源利用效率不高,如何对各个系

统进行统筹管理,提高能源利用率是重点也是难点。文章介绍了制氢技术路线及可再生能源制氢的主要形式,通过构架综合能源管理平台并研究其系统构架、主要功能和控制策略,最终实现提高可再生能源的利用率,节约成本的目的。

1 制氢技术路线

作为二次能源,氢能有两个明显的优势:一是能量密度高,单位质量热值约是煤炭的4倍,汽油的3.1倍,天然气的2.6倍;二是无碳且可以存储,可以突破时间和空间的限制。目前主要有三种制氢方式。第一种是通过化石燃料燃烧转化的产生氢气,即灰氢。该方法制氢简单且生产成本较低,是目前制氢最常用的渠道,约占当今全球氢气产量的95%。但灰氢最大的缺点碳排放量大,并且需要消耗化石能源,不是可持续发展的。第二种主要是利用天然气产生氢气,即蓝氢。虽然天然气也属于化石能源,但此方法中融入了碳捕捉与储存技术(Carbon Capture and Sequestration, CCS),捕捉温室气体,实现了低排放生产。蓝氢是由灰氢向绿氢转变的重要过渡。第三种是利用可再生能源进行电解水制取氢气,即绿氢。这种方法在生产氢气的过程中基本没有碳排放,虽然目前应用较少且成本较高,但可持续、低污染。随着成本的不断降低,绿氢受到越来越多的追捧^[5-7]。

电解水制氢技术路线主要有三种,分别是碱性水电解制氢技术、质子交换膜水电解制氢技术和固体氧化物电解制氢技术。其中固体氧化物制氢的操作温度为700~1000℃,目前还处于试验阶段^[8-10]。三种制氢路线主要优缺点如表1所示。

表1 电解水制氢技术路线优缺点

Tab. 1 Advantages and disadvantages of technology of hydrogen production from electrolytic water

电解水制氢方法	优点	缺点
碱性水电解	技术成熟,成本低,系统寿命长	电流密度低,体积和重量大,碱液有腐蚀性,能量效率低
质子交换膜水电解	启动快速,电流密度高,体积小,无腐蚀性电解液,产品气体纯度较高	成本高,原料水的水质要求高
固体氧化物电解	效率高,单机容量大,无腐蚀性电解液	技术不成熟,运行温度要求高,装置体积大

2 可再生能源制氢方式

根据国家能源局发布的数据, 2022年上半年, 我国可再生能源发电新增装机 54.75 GW, 占全国新增发电装机的 80%。截至 2022 年 6 月底, 我国可再生能源发电装机达 1.118 TW。其中, 水电装机 400 GW (其中抽水蓄能 42 GW, 风电装机 342 GW, 光伏发电装机 336 GW, 生物质发电装机 39.5 GW)。各种可再生能源发电装机容量占比如图 1 所示。2022 年 6 月 1 日, 国家发展改革委、国家能源局等部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》。该规划提出, 到 2030 年我国风电、太阳能发电总装机容量将达到 1.2 TW 以上。由此可见, 近些年我国可再生能源发电装机大幅增长, 并且在未来将持续大幅增长。

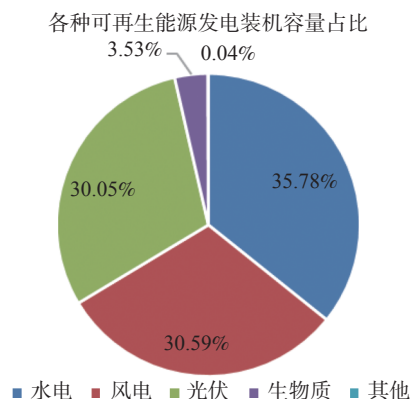


图 1 截至 2022 年 6 月底, 我国可再生能源发电装机容量占比

Fig. 1 Proportion of installed capacity of various renewable energy power generation in China by the end of June 2022

可再生能源制氢, 也叫绿电制氢, 不仅清洁高效无污染, 而且可以减少弃风弃光, 提供解决可再生能源消纳及并网稳定性问题的新渠道, 实现能源的时空平移^[1]。根据可再生能源介质不同, 主要分为光伏发电制氢、风力发电制氢、水力发电制氢以及多能耦合发电制氢。2015 年河北沽源开始建设风力发电制氢生产示范项目, 该项目建设 200 MW 风电场及 10 MW 电解水制氢系统, 每小时氢产能为 800 Nm³。2019 年李灿院士团队在兰州新区开启液态燃料示范研究项目, 该项目建设 10 MW 光伏电场及 2 台 1000 Nm³/h 的电解槽^[11-12]。

近年来各地开始大力推进可再生能源制氢项目

的落地。2021 年度内蒙古自治区风光制氢一体化示范项目清单如表 2 所示。

表 2 2021 年度内蒙古自治区风光制氢一体化示范项目清单

Tab. 2 List of wind solar hydrogen production integration demonstration projects in Inner Mongolia in 2021

项目名称	可再生能源规模	制氢规模
达拉特旗光储氢车零碳生态链示范项目	光伏400 MW, 电化学储能80 MWh	电解水制氢 9.3×10 ³ t/a
乌审风光融合绿氢化工示范项目	风电49.5 MW, 光伏270 MW	电解水制氢 10 ⁴ t/a
鄂托克前旗250 MW光伏电站及氢能综合利用示范项目	光伏250 MW	电解水制氢 6×10 ³ t/a
鄂托克前旗上海庙经济开发区光伏制氢项目	光伏250 MW	电解水制氢 6×10 ³ t/a
准格尔旗纳日松光伏制氢产业示范项目	光伏400 MW	电解水制氢 10 ⁴ t/a
达茂旗风光制氢与绿色灵活化工一体化项目	风电200 MW, 光伏200 MW, 电化学储能35 MWh	电解水制氢 7.8×10 ³ t/a
达茂旗20万kW新能源制氢工程示范项目	风电120 MW, 光伏80 MW, 电化学储能20 MWh	电解水制氢 7.8×10 ³ t/a

目前已经建成或者正在建设的可再生能源制氢项目主要是风电、光伏或者风光耦合制氢。水电制氢因水力资源地域分布不平衡、水电前期投资较大等因素目前落地项目较少。生物质发电分散, 单体装机容量较小且往往是热电联产类型, 不具备大规模制氢的条件。而风电与光伏资源丰富, 装机容量大, 建设成本不断下降, 是可再生能源制氢的优先选择。尤其是在西北地区等地, 为了减少弃风弃光以及降低大规模风电或者光伏对电网的负面影响而将其转换为二次能源氢能具有更大的市场前景^[13-14]。

光伏电站的发电量受辐照度、日照时间和温度等因素影响。风电场的发电量受风速、风向和温度等因素影响。两者都具有出力随着环境因素波动的特点。光伏电站在晚上没有日照的时候基本没有出力, 在中午 12 时至 14 时日照强度最大的时候出力达到峰值。风电场白天风力较弱出力较小, 夜晚风速大出力较大。光伏电站和风电场耦合制氢, 能够使电源侧出力更加平稳, 减缓功率急剧变化对电解槽设备的冲击, 减少因不能满足电解槽最低安全

运行负荷而关停重启的时间。风光耦合并网型制氢系统图如图2所示,系统由风机和光伏发电侧经输变电一直到制氢负荷用电侧。在风光出力有多余容量时,还可将该部分能量上送至电网。

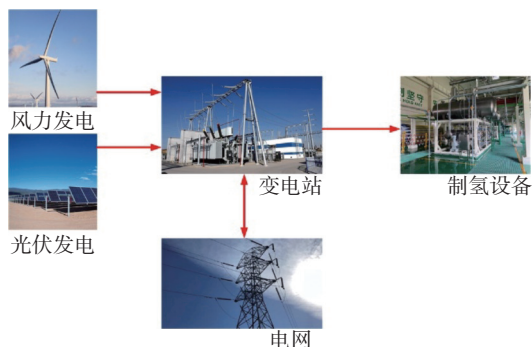


图2 风光耦合并网型制氢系统图

Fig. 2 System diagram of hydrogen generation from grid-connected wind and photovoltaic power

3 综合能源管理平台

风光耦合制氢包含三大要素:风电、光伏和制氢,不同能源系统相对独立,能源之间耦合不紧,能源使用效率总体不高^[15]。从传统的行业划分,风电和光伏属于电力行业,制氢属于化工行业。通过构建风光耦合制氢综合能源管理平台,可以将各个系统纳入监控,进行协同耦合管理。这样以来在提高可再生能源的利用率的同时可以降低单位制氢成本。

3.1 平台架构

如图3所示,综合能源管理平台采用分层分布式的架构模式,底层架构为风机、光伏阵列、输变电系统以及以电解槽为主的制氢设备等一次设备;中

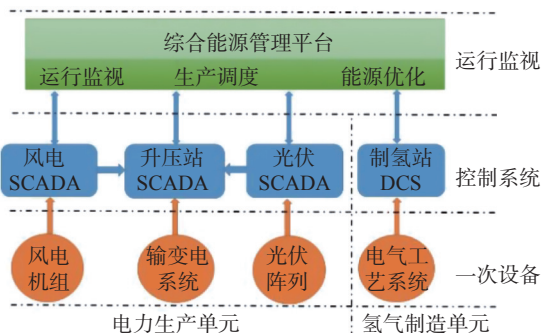


图3 综合能源管理系统架构

Fig. 3 Architecture of comprehensive energy management system

间层为风电、光伏、升压站数据采集与监控系统(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)以及制氢分散控制系统(Distributed Control System, DCS);顶层的综合能源管理平台通过与控制系统的数据传输对可再生能源制氢系统进行整体运行监视,对采集的数据进行分析,对不同系统运行进行调度,以达到能源优化控制的目的。

3.2 平台功能

3.2.1 运行监视

综合能源管理平台通过与风电 SCADA、升压站 SCADA、光伏 SCADA 以及制氢 DCS 之间的数据传输,可实时监视电力生产单元中的风电机组,光伏阵列,输变电系统,氢气制造单元的制氢站整流装置、电解槽等设备的运行状态,监视系统中开关的分合闸位置,监视市电进线,光伏、风电、制氢负荷运行、故障状态等,监视采集系统主要节点的电压、电流、相位、功率因素、有功/无功功率等。

3.2.2 生产调度

综合能源管理平台可对风光耦合制氢进行生产调度,对可控设备进行遥调和遥控操作。遥调是指对可调数值的下发,包括设定值和保护值。遥控是指远方控制断路器、刀开关的分合。远方操作具有防误闭锁功能,需要严格执行用户的操作权限管理,同时对相应的操作事件进行记录。通过综合能源管理平台可以统筹光伏、风电出力及制氢设备用电。

3.2.3 能源优化

综合能源管理平台中,能源优化是其最核心也是最复杂的环节,是指在综合管理平台中制定先进的控制策略减少弃风弃光并降低单位制氢成本。

风电和光伏发电具有间歇性、波动性、随机性等特点。近些年来,风电和光伏发电装机占比不断增加,加上电网建设和消纳机制滞后,导致弃风弃光开始出现,一些弃风弃光严重区域风电和光伏建设陷入停滞。风光耦合制氢,可以将不可储存的电能转化为方便储存的氢能进而减少弃风弃光。

可再生能源制氢项目包括投资成本和运营成本,运营成本又主要包括电力成本、水资源成本以及维护成本。综合能源管理平台可对设备及系统健康状态进行评估,提前发出故障预警,尽量避免故障扩大化,减少由此带来的损失,最终达到控制全生命周期成本,延长资产使用寿命的目的。

3.3 平台控制策略

可再生能源制氢综合能源管理平台的控制策略按照运行工况主要分为“以电定氢”和“以氢定电”两种模式,两种模式均可在平台任意选择切换。

在“以电定氢”工况下,通过光功率和风功率预测系统的辅助,平台可对未来若干时间(包括小时级和天数级)的电源侧出力进行整体预测并拟合出发电曲线,根据发电曲线制定控制策略。当预测电源出力较高时,计划性地提前增多电解槽投入使用,加大制氢产能;当预测电源出力较低时,计划性地提前减少电解槽投入使用,减少制氢产能,通过平衡功率调用最优调度可最大程度减少弃风弃光。

在“以氢定电”的工况下,氢气产量要求相对稳定,在综合能源管理平台设定氢气产能值(以天为单位),将市电电价、光伏出力和风电出力数据纳入平台,对未来24h的用电成本进行分析计算。在用电成本低时加大产能,在用电成本高时减少产能,通过减少电力成本降低单位制氢成本。

4 结论

利用可再生能源制氢符合能源产业发展方向,是实现碳达峰、碳中和的重要途径。目前可再生能源制氢存在的主要问题是成本高经济性差,与化石能源制氢相比竞争力较差。利用综合能源管理平台降本增效,对推进可再生能源制氢的发展具有重大意义。

可再生能源制氢包含多元系统。在未来,需要将综合能源管理平台与虚拟电厂技术进行融合,通过先进的通信、分析计算对大量中小规模能源资源进行统一管理和协调优化调度,实现制氢效益最大化。

参考文献:

- [1] 李建林, 李光辉, 梁丹曦, 等. “双碳目标”下可再生能源制氢技术综述及前景展望 [J]. *分布式能源*, 2021, 6(5): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2106528.
- LI J L, LI G H, LIANG D X, et al. Review and prospect of hydrogen production technology from renewable energy under targets of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Distributed Energy*, 2021, 6(5): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2106528.
- [2] MORIARTY P, HONNERY D. Intermittent renewable energy: the only future source of hydrogen? [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(12): 1616-1624. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2006.12.008.
- [3] 曹蕃, 郭婷婷, 陈坤洋, 等. 风电耦合制氢技术进展与发展前景 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2187-2200. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452.
- CAO F, GUO T T, CHEN K Y, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2187-2200. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.200452.
- [4] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4071-4083. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180241.
- SUN H X, LI Z, CHEN A B, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4071-4083. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.180241.
- [5] 刘坚, 钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望 [J]. *中国能源*, 2019, 41(2): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007.
- LIU J, ZHONG C F. Current status and prospects of hydrogen energy development in China [J]. *Energy of China*, 2019, 41(2): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2019.02.007.
- [6] 蒋珊. 绿氢制取成本预测及与灰氢、蓝氢对比 [J]. *石油石化绿色低碳*, 2022, 7(2): 6-11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0942.2022.02.002.
- JIANG S. Cost prediction: green hydrogen VS grey/blue hydrogen [J]. *Green Petroleum & Petrochemicals*, 2022, 7(2): 6-11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0942.2022.02.002.
- [7] POIMENIDIS I A, TSANAKAS M D, PAPA KOSTA N, et al. Enhanced hydrogen production through alkaline electrolysis using laser-nanostructured nickel electrodes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75): 37162-37173. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.010.
- [8] 颜畅, 黄晟, 屈尹鹏. 面向碳中和的海上风电制氢技术研究综述 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 30-40. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.003.
- YAN C, HUANG S, QU Y P. Review on hydrogen production technology from offshore wind power to achieve carbon neutrality [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(5): 30-40. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.003.
- [9] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2440-2454. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.003.
- [10] KUMAR S S, HIMABINDU V. Hydrogen production by PEM water electrolysis — a review [J]. *Materials Science for Energy Technologies*, 2019, 2(3): 442-454. DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [11] 肖宇. 氢储能: 支撑起智能电网和可再生能源发电规模

- 化 [J]. *中国战略新兴产业*, 2016(1): 46-49. DOI: [10.19474/j.cnki.10-1156/f.2016.01.011](https://doi.org/10.19474/j.cnki.10-1156/f.2016.01.011).
- XIAO Y. Hydrogen storage: supporting the scale of smart grid and renewable energy power generation [J]. *China Strategic Emerging Industry*, 2016(1): 46-49. DOI: [10.19474/j.cnki.10-1156/f.2016.01.011](https://doi.org/10.19474/j.cnki.10-1156/f.2016.01.011).
- [12] 光伏制氢+耦合煤制百万吨甲醇零碳排放项目签署合作协议 [J]. *煤化工*, 2020, 48(5): 44.
Signed a cooperation agreement for the zero-carbon emission project of photovoltaic hydrogen production + coupled coal production of one million tons of methanol [J]. *Coal Chemical Industry*, 2020, 48(5): 44.
- [13] 黄格省, 阎捷, 师晓玉, 等. 新能源制氢技术发展现状及前景分析 [J]. *石化技术与应用*, 2019, 37(5): 289-296. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0045.2019.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0045.2019.05.001).
HUANG G S, YAN J, SHI X Y, et al. Development status and prospect analysis of hydrogen production with new energy technology [J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2019, 37(5): 289-296. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0045.2019.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0045.2019.05.001).
- [14] 时璟丽, 高虎, 王红芳. 风电制氢经济性分析 [J]. *中国能源*, 2015, 37(2): 11-14. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2015.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2015.02.002).
- SHI J L, GAO H, WANG H F. Economic analysis on wind power for hydrogen production [J]. *Energy of China*, 2015, 37(2): 11-14. DOI: [10.3969/j.issn.1003-2355.2015.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-2355.2015.02.002).
- [15] 孙宏斌, 郭庆来, 吴文传, 等. 面向能源互联网的多能流综合能量管理系统: 设计与应用 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(12): 122-128,171. DOI: [10.7500/AEPS20190228003](https://doi.org/10.7500/AEPS20190228003).
SUN H B, GUO Q L, WU W C, et al. Integrated energy management system with multi-energy flow for energy internet: design and application [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(12): 122-128,171. DOI: [10.7500/AEPS20190228003](https://doi.org/10.7500/AEPS20190228003).

作者简介:



廖远旭

廖远旭 (第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 江西上饶人, 工程师, 注册电气工程师, 中国科学院大学电工理论与新技术专业硕士, 主要从事发电控制保护自动化研究及设计(e-mail)liaoyuanxu@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)