

电力系统低碳转型下电氢协同的应用及展望

牛文娟 徐 箴 薛贵元 陈 琛 吴 垠 诸晓骏

(国网江苏省电力有限公司经济技术研究院)

摘要：在推动高比例可再生能源接入和能源低碳转型的进程中，我国电力系统面临着多方面的挑战。在此背景下，氢能作为一种新兴清洁能源，展现出广泛的应用潜力。研究围绕电氢协同对电力系统转型的时空支撑作用展开系统分析。首先探讨氢能供应链对电力系统秒级到中长期的多时间尺度响应能力，在此基础上进一步梳理氢能在电力系统源、网、荷侧的应用价值和具体应用场景，最后为进一步推动电氢协同发展提出建议，旨在助力其规模化推广，推动电力系统的全面转型。

关键词：电氢协同；源网荷；时空支撑；低碳转型

2025.04.DQGY
89

0 引言

为实现“双碳”目标，我国正加快能源结构调整，大力发展可再生能源以替代传统化石能源，减少碳排放。截至2024年6月底，全国可再生能源发电装机达到16.53亿千瓦，约占我国发电总装机的53.8%^[1]。数据表明，我国可再生能源在电力结构中的占比正在稳步提升，为实现能源低碳转型和“双碳”目标奠定了坚实基础。

在高比例可再生能源接入和能源低碳转型的背景下，我国电力系统面临着多方面的挑战：①随着风光等可再生能源比例的上升，其间歇性和波动性特性，在多时间尺度上对电网稳定构成挑战。②电力行业作为碳排放的主要来源之一，亟需通过技术创新和能源结构调整来实现脱碳目标。③能源转型过程中对于燃煤发电机组等传统设施，需实施升级改造策略，以提升其能效并延长使用寿命。④随着传统机组的退役，

电网的调节能力将显著降低，未来电网将需要引入大规模、跨区域的新兴调峰手段^[2]。

面对以上挑战，氢能作为一种新型清洁能源与电力耦合展现出巨大的潜力和广泛的应用前景，氢能在中国电力系统的低碳转型中扮演至关重要的角色。现有研究主要聚焦于电氢协同的技术研发、经济性研究与优化调度方面，缺乏对电氢协同应用价值和应用场景的系统性分析。因此本文以电氢协同为立足点，从时空两个维度分析氢能对电力系统的支撑作用，构建电氢协同在新型电力系统中“源网荷”各环节的应用场景。在此基础上，为进一步推动电氢协同发展，从核心技术突破、重点项目部署、政策体系完善等方面提出建议，以推动氢能与电力系统的深度融合，促进低碳转型。

1 氢能对电力系统的多时间尺度响应

氢能供应链包含“制-储-输-用”四个关键环节，这些环节协同作用能够为电力系统提供从秒级即时响应到跨季节的长期储能解决方案，有效增强电力系统的灵活性和韧性。具体而言，氢能供应链对于电力系统时间尺度的支撑作用可以分为超短期、短期和中长期。

1.1 超短期响应

超短期的支撑主要依靠电解槽和燃料电池的快速响应。目前四种常见的电解槽分别是碱性电解槽（Alkaline Water Electrolysis, AWE），质子交换膜电解槽（Proton Exchange Membrane, PEM），阴离子交换膜水电解槽（Anion Exchange Membrane, AEM）和固体氧化物电解槽（Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC），技术特征如表 1 所示。其中 AWE 和 PEM 电解槽更接近商业化，由响应速度可知，碱性电解槽满载响应时间在数十秒到分钟级，PEM 电解槽满载响应时间仅需秒级，因此从技术角度而言两种电解槽均有能力为电网提供不同水平的平衡服务。而 AEM 和 SOEC 电解水技术目前仍处于实验室研发和初步示范阶段，尚未实现大规模商业化应用。

表 1 电解槽技术参数

类型	AWE	PEM	AEM	SOEC
能效 (%)	60~70	70~80	60~70	80~90
低负荷范围 (%)	20~40	0~10	20~40	20~40
超负荷范围 (%)	100~120	100~200	100~150	100~150
响应速度	数十秒到分钟级	秒级	秒级到分钟级	分钟级

氢燃料电池通常根据电池电解质的种类对其进行区分，主要包括磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、固体氧化物燃料电池、质子交换膜燃料电池等。其中质子交换膜燃料电池结构简单、启动时间短以及良好的动态响应特性使其能在电力系统辅助调节中发挥优势，在分布式发电、可移动电源、应急电源场景下

均有大量应用。

1.2 短期响应

小时级的短期支撑主要依靠电解制氢、储氢和燃料电池的组合作用。气态、液态、固态储氢技术可以在电网负荷低谷或新能源出力富裕时制氢存储，并在负荷高峰时释放氢气通过燃料电池发电，为电网提供短期内的储能调节服务。

1.3 中长期响应

中长期能源供需平衡的关键在于氢气的大规模长期存储能力。氢能能量密度高，可长时间、跨季节存储，是少有的能够储存上百吉瓦时以上长时间供电的能量储备。目前，氢气的中长期大规模存储主要依靠于地质储氢，美国、英国以及德国都已建成并运行了地下储氢项目，其中盐穴储存 95% 纯度氢气的技术已经成功应用^[3]。我国拥有大量的枯竭油气藏、采卤老腔盐穴等地质空间资源，使得地质储氢的发展具有巨大的潜力。2024 年 1 月，湖北大冶绿电绿氢制储加用一体化氢能矿场综合建设项目作为国内首个地质储氢项目正式开工^[4]。

2 氢能在电力系统源网荷侧的应用场景

2.1 源侧应用场景

由于新能源的间歇性特点，弃风弃光问题随着新型电力系统中风电、光伏渗透率的不断增加日益突出^[5]。氢能作为一种清洁、高效的能源载体，其制备过程可以与可再生能源相结合，平抑风光出力波动。以新疆库车的光伏制氢示范项目为例^[6]，该项目通过建设大规模的光伏发电基地和电解水制氢设施，实现了将多余的光伏电力转化为氢能的目标，不仅提高了可再生能源的利用率，还为当地氢能产业的发展提供了有力支撑。

此外，传统火电机组在电力系统中占据重要地位，但其高碳排放和灵活性不足的问题日益凸显。我

国推行的煤电低碳化改造方案就包含绿氨掺烧。目前煤氨混燃的实验研究主要集中在工业锅炉，电站锅炉少有大规模掺烧的案例，基本是数值模拟^[7]。日本是最早在燃煤电厂探索掺氨燃烧技术的国家，2024年4月 Hekinan 热电站 4 号机组在额定输出功率为 1GW 的情况下实现了 20% 的燃料氨替代^[8]。我国也一直积极推进煤电机组掺氨燃烧试验，神华广东台山电厂 600MW 煤电机组已成功实现 500MW、300MW 等多个负荷工况下燃煤锅炉掺氨燃烧平稳运行，氨燃尽率达到 99.99%^[9]。

2.2 网侧应用场景

风光等可再生能源输出呈现季节性波动，与用电需求间产生显著不匹配。为实现能源的高效利用与多时间尺度上的供电安全，亟需长时储能技术以有效平衡供需波动，提升电网的灵活性与韧性。

氢储能具有容量与功率解耦的特性，意味着其储存的容量和释放或充电的功率可以独立调节。在电网的关键节点配置氢储能可以支撑电网的削峰填谷，同时制取的氢气可以外送促进更大区域内的协同优化。面对资源分布与用能的不匹配，氢能多样化的运输方式为电网提供了额外的能源传输途径，有效分担了传统输电线路的传输压力，实现能量的跨季节和跨区域转移^[10]。

2.3 荷侧应用场景

需求侧氢能的应用价值在于通过氢燃料电池热电联供系统等技术手段，实现终端能源的高效利用与互补。此外，单纯依靠电气化难以实现交通领域和冶金、化工等工业领域的深度脱碳，氢能在终端不仅是能源也是材料，可以与电力配合形成减排的双重驱动。目前需求侧典型的应用场景包括化工、钢铁工业、制氢加氢站、港口等。

文献 [11] 以钢铁工业园区为例，设计了氢能参与的工业能源系统方案，在钢铁工业园区中大力发展

氢冶金并引入氢能重卡，并从节能环保和经济效益两个维度验证了方案的可行性。文献 [12] 面向交通领域减排，构建了考虑燃料电池汽车加氢行为的优化调度模型，并实现了加氢站与上级电网的良性互动。文献 [13] 面向化工园区，将氢制氨作为园区的可灵活调节资源，实现了系统的协同优化调度。文献 [14] 充分利用港口的清洁能源，通过氢能的高效存储与转换，显著降低港口的碳排放。

3 面向电氢协同发展的建议

基于上述分析，氢能与电力系统的深度融合将成为推动现代电力系统转型升级的关键驱动力。为进一步推动电氢协同规模化发展，本文提出以下几点建议。

3.1 电氢关键技术突破

在推动电氢协同发展的过程中，首要任务是聚焦并突破关键技术瓶颈。目前绿氢的制取、储存、输送等基础设施还处在需要攻克技术瓶颈的发展阶段，高昂的成本不仅延缓了氢能产业自身的成熟速度，还进一步限制了其在更广泛领域的应用拓展，尤其是在从传统的化工领域向交通、能源等新兴产业领域的渗透过程中，遭遇了诸多掣肘。因此亟需进一步突破电解水制氢效率的大幅提升、氢燃料电池能量密度的增加以及氢能储存与运输技术的创新。

3.2 统筹部署重点项目

氢能对电力系统的多维度支撑研究刚刚起步，相应示范工程较少，目前主要聚焦于风光制氢和利用项目，缺乏对需求侧电氢协同优化和网侧灵活调节项目的部署。为发挥氢能供应链对电力系统各环节的支撑作用，应因地制宜开展电氢重点项目建设：在风光资源丰富的地区配套建设电解水制氢设施，实现可再生能源的就地转化和存储；在电网关键节点建设氢储能电站，利用氢能的高能量密度和长时储能特性，为电网提供稳定的备用容量和调节能力；在终端促进氢能

在工业、交通、分布式发电领域的低碳转型。

3.3 制定配套政策体系

在氢能产业的顶层设计方面，中国虽然已出台了《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，但相较于国际实践，其法律效力和权威性尚显不足。在地方层面，尽管政策支持形式多样，但主要仍集中在财政补贴上，日本计划为低碳氢及其衍生品的生产商和进口商提供为期 15 年的差额合同补贴，而我国补贴周期相对较短，多为三到五年，难以充分满足氢能产业长期发展的需求。因此，为了推动中国氢能产业的持续健康发展，有必要进一步加强顶层设计，通过立法手段提升政策框架的法律效力，完善补贴政策体系，扩大补贴覆盖范围，延长补贴时间周期，以更好地支持氢能技术的研发、示范应用及商业化推广。

3.4 充分发挥市场力量

为促进电氢协同发展，充分发挥市场能力至关重要。针对电力市场，亟需完善市场准入机制、价格机制，确保电氢协同等新型市场主体的顺利参与。在碳市场层面，需要推动钢铁、化工等高排放行业纳入碳配额管控，利用绿电、绿氢减排并参与碳市场交易进行成本回收。同时积极推动氢能项目纳入国家核证自愿减排量市场交易体系，通过市场机制激励绿氢项目的开发与推广，进一步加速能源结构的绿色转型。此外，我国应积极探索并建设氢能市场的交易中心与结算中心，强化市场透明度，促进电氢能资源的有效配置与交易流通。

3.5 加快相关标准制定

一方面是安全标准，我国的氢能安全标准仍处于不断完善和发展阶段，与国际先进水平相比还有一定差距。需要深入研究并明确项目中氢能设施与电网系统之间的安全职责界定，以确保电氢协同系统的整体安全性和可靠性。另一方面是绿氢的认证标准，由于国内外碳排放标准不同，绿氢的出口也会受欧盟碳关

税的影响。因此有必要引进较成熟的国际绿氢标准并进行本土化调整，积极建立与国际接轨的绿氢认证体系，推动国内认证机构与国际认证机构互认，减少企业在国际市场上的认证障碍，从而推动中国绿氢产业在全球范围内的竞争力和影响力。

参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局 2024 年上半年新闻发布会文字实录 [EB/OL]. (2024-07-31) [2024-08-05]. https://www.nea.gov.cn/2024-07/31/c_1310783380.htm.
- [2] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望 [J]. 中国工程科学, 2022, 24 (3): 89-99.
- [3] 王浩, 徐俊辉, 陆佳敏, 等. 大规模地质储氢工程现状及应用展望 [J]. 中国地质, 2025, 52 (1): 180-204.
- [4] 湖北省科学技术厅. 湖北大冶: 争抢氢能新赛道打造“清洁能源之都” [EB/OL]. (2024-01-24) [2024-08-05]. https://kj.hubei.gov.cn/kjdt/sxkj/hs/202401/t20240123_5058913.shtml.
- [5] 吴全, 沈珏新, 余磊, 等. “双碳”背景下氢-氨储运技术与经济性浅析 [J]. 油气与新能源, 2022, 34 (5): 27-33, 39.
- [6] 赵磊. 新疆首个绿氢示范项目交易电量突破 1 亿千瓦时 [EB/OL]. (2024-03-20) [2024-08-14]. http://xj.news.cn/zt/2024-03/20/c_1130092162.htm.
- [7] 谭厚章, 周上坤, 杨文俊, 等. 氨燃料经济性分析及煤氨混燃研究进展 [J/OL]. 中国电机工程学

报, 2023, 43 (1): 181-191.

- [8] 全球氢能网. JERA 在 Hekinan 电站成功完成氨共燃试验 [EB/OL]. (2024-06-27) [2024-08-05].
<http://h2.china-nengyuan.com/news/212223.html>.
- [9] 李玲. 氨能为煤电降碳探新路 [EB/OL]. (2023-12-25) [2024-08-05]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2023-12/25/content_26035041.htm.
- [10] 郜捷, 宋洁, 王剑晓, 等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (19): 1-15.
- [11] 张鹏成, 徐箭, 孙元章, 等. 氢能驱动下钢铁园区能源系统低碳发展模式 [J]. 电力系统自动化,

2022, 46 (13): 10-20.

- [12] 袁铁江, 计力, 田雪沁, 等. 考虑燃料电池汽车加氢负荷的电-氢系统协同优化运行 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (5): 16-25.
- [13] 李颢然, 薛屹洵, 戴铁潮, 等. 考虑氢负荷响应的化工园区电-氢耦合系统协同优化调度 [J/OL]. 工程科学与技术, 2023, 55 (1): 93-100.
- [14] 王萧博, 黄文焘, 郅能灵, 等. 面向源储优化配置的港口微电网运行场景高保真压缩与重构方法 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (15): 5839-5850.

(收稿日期: 2024-09-03)