

可再生能源电解水制氢风险防控研究

任楠楠

华电科工股份有限公司, 北京 100160

[摘要]可再生能源电解水制氢是推进“双碳”战略的有效方式之一,但是风力发电和光伏发电等能源的高不确定性和大波动性也对整个制氢系统造成较大的安全隐患问题,文章以可再生能源电解水制氢系统为基础,对其中的风险进行系统的辨识分析,制定出相关的风险指标评价系统,在此基础上对能源波动调节控制风险、设备安全运行控制风险、储存及运输过程中的安全保护风险、自动化监控预警以及管理与应急措施等一系列的风险防护措施进行了详细的探讨并提出了风险防护体系的整体框架以及具体建议。所取得的研究成果对于提高可再生能源电解水制氢项目的安全生产有着重要意义。

[关键词]可再生能源; 电解水制氢; 风险识别; 风险评估; 风险防控

DOI: 10.33142/sca.v9i3.19354

中图分类号: TQ116

文献标识码: A

Research on Risk Prevention and Control of Hydrogen Production from Renewable Energy Electrolysis of Water

REN Nannan

Huadian Engineering Co., Ltd., Beijing, 100160, China

Abstract: Renewable energy electrolysis of water for hydrogen production is one of the effective ways to promote the "dual carbon" strategy. However, the high uncertainty and large volatility of energy sources such as wind power and photovoltaic power also pose significant safety hazards to the entire hydrogen production system. Based on the renewable energy electrolysis of water for hydrogen production system, this article systematically identifies and analyzes the risks involved, and develops a relevant risk index evaluation system. On this basis, a series of risk prevention measures such as energy fluctuation regulation and control risks, equipment safety operation control risks, safety protection risks during storage and transportation processes, automatic monitoring and early warning, and management and emergency measures are discussed in detail, and the overall framework of the risk prevention system and specific suggestions are proposed. The research results obtained are of great significance for improving the safety production of renewable energy electrolysis water hydrogen production projects.

Keywords: renewable energy; electrolysis of water to produce hydrogen; risk identification; risk assessment; risk prevention and control

引言

在国家“双碳”目标下,氢能作为一种清洁能源,受到越来越多的关注。根据国家能源局发布的《中国氢能发展报告(2025)》显示,截止到2024年底,中国氢气的生产能力达到5000多万吨/年,其中电解水制氢产能为50万吨/年左右,绿氢产业发展迅速;采用风电光伏等多种可再生能源进行电解水制氢的过程中可以做到全流程几乎无碳化,是最优的一种绿氢生产方法;但是由于可再生能源的发电存在着很大的不确定性、波动性以及随机性的特点,在这种情况下采用其来制取氢气对于系统的稳定性提出了很大的考验与难题。近年来我国发生多起质子交换膜水电解槽爆炸事故,不但造成严重的财产损

失,还导致企业、用户失去对电解水制氢技术的信任感。因此,全面进行可再生能源电解水制氢风险管控研究,找出主要的风险源,制定合理有效的风险控制机制是很有必要的。这样有利于保障绿色氢能产业的安全稳定健康发展。

1 可再生能源电解水制氢系统风险识别与分析

可再生能源电解制氢系统危害因素存在于能源供应、制氢过程以及储存运输各个阶段。从能源供应端来说,风能光伏发电出力的大起伏是首要的风险因素,由于风电光伏不经由电网调峰直接接入电解槽进行电解反应,此时电流的一瞬间变化会使得电解水槽瞬间发热,假如电解槽内的水量不足无法及时吸收产生的热量则会导致槽体内温

度上升,此现象称之为“缺水”,缺水会导致整个电解水装置中质子交换膜的导电性能下降到千分之几,使得电极板升温高达 150 上,从而膜变软乃至破裂出现裂隙,使氢气与氧气混合在一起发生剧烈爆炸燃烧^[1]。从制氢装置来说,电解槽在波动电流供电下存在膜电极退化、催化剂中毒、热疲劳等问题。电解槽长时间工作在不稳定状态下运行,它的工作响应时间为秒到分钟量级,风和光波动电源的功率调整速度是毫秒级,二者不同时间常数带来的调速难题使得系统协调工作难度增大;从储运方面来说氢气轻质化、易传播、燃烧能量很小等特点决定了氢气的扩散系数很大,在空气中扩散系数可达 $6.1 \times 10^{-5} \sim 6.8 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,最小点火能仅 $0.017\text{mJ} \sim 0.02\text{mJ}$,一旦发生泄漏很容易造成可燃爆气体。同时高压储氢装置易出现材料氢脆、疲劳失效问题,高压管道输送有泄露、泄放的安全隐患。在管理及环保角度而言,制氢厂涉及多个监管部门,权责不明晰,操作人员误操作、应急处置不到位等情况也属风险点。

2 可再生能源电解水制氢系统风险评估

风险管理是风险管理的关键步骤,是对发现的风险进行评价,判断出风险程度大小以及风险的处理的先后顺序,定量风险评估是发现系统性风险、制定预防性对策的一种手段,通过对氢能装备零部件故障概率、氢气泄露扩散行为等因素的应用场景风险结果演变的全生命周期氢的安全量化的风险评估有利于提高水电解制氢系统的安全性设计能力和运行管理能力。在风险评估指标体系设定上要从能源供应端波动特征、生产装置运行状况、储存运输环境的安全、周围环境的影响要素以及管理控制力度等方面来拟定评价指标,能源供应端指标包括功率波动幅度、波动频率、电压纹波系数等;设备端指标有电解槽工作温度、压力、电压均匀性、膜电阻变化速度等;储运端指标有漏失监控覆盖度、排放系统的有效性、金属对氢腐蚀性能等。针对评价准则的选择可以采用系统论过程法和事故树分析相结合的方式。系统论过程分析可以从控制层面发现系统的危险源,事故树可以追索事故发生的过程,映射系统论过程分析结果到模糊贝叶斯网络体系中可进行风险的质化分析与量化计算相结合^[2]。使用这种方法来对质子交换膜水电解装置开展风险评价,预估分析结果认为氢气泄漏的概率大约为 12.63%,诊断分析发现有泵损坏,流量控制器故障,氢脆,阀门误操作的风险,管理风险和其他环境原因作为主要的风险源贡献。风险后果分析得出及时的人工紧急停机防护网对阻止事态扩大起到至关重要的作用。依据风险评价的结果可以

将风险分为低风险、一般风险、较大风险和重大风险四个级别,并根据不同的控制需求和管理层次作出相应的规定。

表 1 电解水制氢系统风险评估指标体系与等级划分

风险类别	风险指标	评价标准	风险等级
能源侧风险	功率波动幅度、电压纹波系数	波动幅度 > 30% 额定功率为高风险	较大风险
设备侧风险	电解槽温度、电压一致性	局部温差 > 50 为高风险	重大风险
储运侧风险	泄漏检测覆盖率、放空可靠性	覆盖率 < 90% 为高风险	较大风险
环境风险	通风条件、气象因素	密闭空间无强制通风为高风险	一般风险
管理风险	应急响应能力、人员资质	无应急预案或演练为高风险	较大风险

3 可再生能源电解水制氢风险防控技术

3.1 能源侧波动风险调控技术

为应对光伏发电强波动性的难题,需要从系统优化设计以及运行过程控制两个层面进行调节。对系统优化设计而言,要探索电解制氢设备的静态特性和动态特性和新能源强波动特性和电能电量平衡的关系,建立风光荷氢协同波动电源电解氢系统优化设计模型,利用启发式和人工智能等方法使得系统可以自我学习优化设计;对于设备选型来说,质子交换膜电解槽可以通过灵活改变其功率从而适应可再生能源波动性的电源,各国对其的研究处于领先地位,发展较为成熟。针对运行过程控制环节,要妥善处理好波动性电源同随机性电解制氢需求的关系,探究一种波动电源电解制氢系统的高效稳定的边端协同自适应控制方法并应用于波动电源电解制氢系统中,从而达到波动电源电解制氢系统纹波、温度、压力全参数优化的过程控制。

3.2 制氢设备安全运行控制技术

制氢装置的安全运转调控是最主要的风险管理部分。对于波动功率下电解水制氢装置复杂的运行特性,在此背景下需要构建出如下一种波动性电源制氢系统的最优化防护策略:即“合理配置、及时调整、全程安全、积极维保”。从控制策略上来说可以以高性能冗余 DCS 为主导来完成电解槽群组统一管理以及提升制氢水平;基于模型预测控制法使得电解温度-压力-电流密度三个要素同时达到最佳状态,并将其保持在一个合理的范围内;利用 OPC 统一下发的信息协议连接控制系统及 MES 进行联动,同时根据电价变化情况对生产负荷做相应的调节,从而达到减少整体制氢费用的目的^[3]。材料和结构上要研究更可靠的复合增韧膜材料,在保证良好性能的

基础上提高热机械稳定度，避免膜破损导致氢氧混合燃烧爆炸。

3.3 氢气储存与输送安全防护技术

氢气的贮存运输为安全管理的核心内容，在氢气存储过程中对高压储存容器中发生的氢脆问题要选择抗氢脆材料并作作好无损探伤；在氢气管道运送过程方面，国内首次 10MPa 高压 DN250mm 立管口径氢管道全尺寸放空调试成功，包括 1MPa~10MPa 的压力级别，不同立管长度及不同阻火器条件下的放空系统适应性和可靠性均得到了验证，为我国建立自己的氢气管道放空技术标准体系提供了重要支撑；安全防护方面，需要安装有快速泄压、氮气吹扫装置，在系统出现事故情况能够自动进行处理排除危险。而且对于氢气管线里多余的水份、氧气流量控制等问题的风险因素也应予以考虑。

3.4 自动化监测与预警系统

自动化监控及报警系统是防范风险提前预知的技术基础，要构建智能型多参量综合报警系统，集合电压，温度，气体含量等多种参数进行故障提前预警的功能。对检测设备需配备氢气泄露报警仪，压力及温度监测仪，气体分析仪等设备。而固定式的氢气监测仪器技术指标与性能检测标准也正在研制当中，可增强氢气区域防护效能。关于功能安全，在 IEC 61508 和 IEC 61511 的基础上，增加了 IEC 62061 和 ISO 13849 供选择，使设备制造商有更多样性的选择来满足不同的工业安全架构^[4]。面对越来越多对于信息化以及远程监控的需求，这是第一次把网络安全列入到强制性条款里面去，规定所有支持远程监控的系统必须达到 ISO/IEC 27001 标准。

3.5 安全管理与应急处置机制

安全管理和应急管理是风险管理的最后一道屏障。氢能公司要按照行业分类进行安全管理归口管理，住房城乡建设主管部门对建筑施工单位安全生产实施监督管理，应急管理主管部门对氢能生产环节进行安全生产监督管理，市场监管部门对特种设备实施安全监督管理，消防部门对消防安全进行监督管理。应急管理上，县级人民政府要建立健全生产安全事故的信息报告、分析会商、指挥调度和协同应对工作机制，在发生氢能事故时第一时间启动应急预案，组织应急管理、住建、生态环境、公安、卫生、交通运输等部门根据事故应急预案开展应急救援工作。企业在单位内部要设立专门安全管理机构，落实好应急响应、指挥、处置、救援、恢复等工作职责。对于氢气泄漏的情形下，迅速人工强制停车屏障对避免事故扩大的意义重大作用显著。

表 2 电解水制氢风险防控技术措施分类

技术类别	防控对象	关键技术措施	实施效果
能源侧调控	功率波动	边端协同自适应控制、风光互补配置	平抑波动、稳定输入
设备安全控制	电解槽异常	MPC 多变量协同优化、复合增强膜	防止膜穿孔、延长寿命
储运安全防护	泄漏与爆炸	高压放空系统、氮气吹扫、氢相容材料	防止泄漏、控制事故
监测预警	风险超前识别	AI 多参数融合预警、功能安全标准	提前预警、主动防护
安全管理	组织与应急	多部门协同、应急预案与演练	快速响应、控制损失

4 风险防控体系构建与优化

4.1 风险防控体系总体架构

可再生能源电解水制氢安全保障体系建设要建立“技术-管理-标准”的三重保障体系。从技术层面上来讲主要包括了能源侧治理，设备安全监管，储存运输防护，监控预警等多种技术手段；在管理方面包括组织机构职责，安全管理机制，应急预案，教育培训等管理内容；在标准方面包括了设计指导，运行准则，检验方法，评价指标等技术规范，三大方面互相配合、相互补充、共同构成了全面的安全保障闭环。

4.2 技术标准与规范体系

标准体系建立是我国风险控制科学化的有力支撑，现阶段我国正在推进氢能标准的制定工作，《电解水制氢系统风险评估指南》（计划号：20255088-T-469）已经立项，即将制定关于电解水制氢系统风险评估的方法和指标，作为风险辨识以及控制的基础。本标准针对的是大型集中式的、规模化的电解水制氢设施设备的安全风险评估，制定了其评估程序及内容等相关标准规范，同时也在制定《非金属材料氢气环境适应性评价》《固定式氢气探测装置》等相关标准。国际上，ISO 22734-1:2025《水电解制氢装置 第 1 部分：安全》已经于 2025 年进行修订出版，在将安全标准由原来的以控制技术为中心转向更为全面的风险管理的方法的同时，第一次提出了氢气与氧气互相交叉污染的具体防范措施。

4.3 组织管理与责任体系

明晰组织管理和职责界定是机制顺畅运转的核心。绿氢工程项目建设要依法审批手续，在化工园区之外可以建设太阳能、风能等清洁能源电解水制氢等绿氢工程项目，制氢、储氢、加氢站建设项目实行县一级政府备案制度，在责任机制方面发展改革部门负责绿氢产业规划，应急管理部门负责安全生产监管，市场监管部门负责特种设备安全监管，住建部门负责施工安全监管，消防部门负责消防

安全监督, 交通部门负责氢能道路运输的安全监管^[5]。企业应当承担好安全生产责任主体的作用, 设立安全管理机构, 建立健全全体员工的安全生产责任制。

4.4 体系优化策略与持续改进

体系建设应形成不断改进机制。一是设立风险动态管理机制, 定期进行风险管理, 根据评估结果改变风险管理方案; 二是建设事故案例库以及数据分析平台, 收集风险信息并不断更新故障诊断模型; 三是进行不同工况下的长期安全检测, 用以完善有关的技术标准; 四是促进智能化运维系统的研究, 利用数字孪生仿真电解槽内流体流动情况及化学过程变化, 实时调节运行条件, 加快工艺优化调整速度; 五是设立体系建设运行效果评估指标, 开展定期评审和修订活动, 保证风险控制体系的有效性。

5 结语

可再生能源电解水制氢技术是“双碳”目标下的一项关键技术途径, 而对可再生能源水电解制氢的安全隐患预防是产业健康发展的重要保证, 本文通过全面梳理分析出可再生能源水电解制氢过程中在能源端、设备端、运送储存端以及管理方面的安全风险因素并建立了相应的风险评测指标库, 在此基础上提出了一系列针对上述不同风险因素的安全风险控制办法, 如: 控制能源输入变化、保证设备安全稳定运行、储存运输过程加强保护措施、采用智能化监控报警装置、加强管理预防事故的发生等方法来防范相关的安全风险事件; 并且形成了以“技术创新-安全

管理-制度标准”三位一体的安全管理模式, 研究的成果可以为未来的绿色氢能项目的安全生产提供一定的参考依据。在氢能产业发展迅速的同时, 还应在今后加大风险演变机理研究力度, 加强智能监测报警技术研发、健全标准法规制度等来为氢能产业健康持续发展提供安全保障。

[参考文献]

- [1]张书铖.可再生能源电解水制氢风险防控研究[D].北京:华北电力大学,2025.
- [2]王宇飞,纪淑琴,王莹露,等.可再生能源电力电解油田采出水制氢的可行性研究[J].石油炼制与化工,2025,56(10):50-55.
- [3]杨晓,姚明宇,韩伟,等.大规模可再生能源电解制氢技术现状及发展研究[J].热力发电,2025,54(5):33-43.
- [4]Zhang Y, Wang X, Nie G, et al. Robust dispatch of multi-electrolyzer systems for renewable energy hydrogen production under wind forecast uncertainty[J]. Applied Energy,2026,40(9):127483.
- [5]Yao P ,Dai J ,Bi S , et al.Efficient Conversion and Storage of Marine Renewable Energy - Hydrogen Production by Electrolysis of Seawater[J].Journal of Physics: Conference Series,2026,3178(1):012078-012078.

作者简介:任楠楠(1987.9—),华电科工股份有限公司,女,汉,高级工程师,研究方向:电解水制氢领域。