

# 基于可再生能源的电氢耦合关键技术及示范验证

赵波<sup>1</sup>, 吴启亮<sup>1</sup>, 陈哲<sup>1</sup>, 章雷其<sup>1</sup>, 刘敏<sup>1</sup>, 张雪松<sup>1</sup>, 刘一欣<sup>2</sup>, 邓俊波<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省 杭州市 310014; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京市 海淀区 100085)

## Key Technologies and Demonstration Verification of Electric-hydrogen Coupling Based on Renewable Energy

ZHAO Bo<sup>1</sup>, WU Qiliang<sup>1</sup>, CHEN Zhe<sup>1</sup>, ZHANG Leiqi<sup>1</sup>, LIU Min<sup>1</sup>,  
ZHANG Xuesong<sup>1</sup>, LIU Yixin<sup>2</sup>, DENG Junbo<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Company Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;

3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100085, China)

**ABSTRACT:** The development of renewable energy and hydrogen is a vital strategy for achieving the goals of “carbon peak and carbon neutrality”. With utilizing renewable energy for electro-hydrogen conversion and employing hydrogen storage, the electric-hydrogen coupling system is poised to play a pivotal role in the future energy framework, serving as one of the key drivers in the evolution of new power systems. This paper presents the concept and essential characteristics of the electric-hydrogen coupling systems, elucidating key technical aspects such as resource analysis, technology selection and optimization, and energy management in the construction of these systems facing industrial areas. It further examines the distinctive interaction features of the electric-hydrogen crucial subsystems (such as electrolyzer, fuel cell, hydrogen storage system, electric-hydrogen DC converter, and energy management), and their critical roles in ensuring long-term safe and stable system operation. Finally, grounded in the current demands of the power grid and the technology level of key equipment, the paper forecasts the future development of electric-hydrogen coupling systems, offering practical insights and reference for the broader application and advancement of electric-hydrogen coupling technologies.

**KEY WORDS:** carbon neutralization; electric-hydrogen coupling; renewable energy; demonstration project; energy management

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1506800); 国家电网有限公司科技项目(52110421005H)。

National Key R&D Program (2020YFB1506800); Science and Technology Funding Project of State Grid (52110421005H).

**摘要:** 发展可再生能源和氢能是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要手段,通过可再生能源电氢转换与氢存储装置构建电氢耦合系统,将在未来能源体系中起到关键作用,是新型电力系统演化的核心推动力之一。该文介绍了电氢耦合系统的概念与核心技术特征,阐述了面向工业园区电氢耦合系统建设时所开展的场景分析、电-氢设备技术选型及效能提升、综合能量管理等关键技术,并分析各核心系统(制氢、燃料电池、储氢系统、电氢接口变换器及能量管理技术)在电-氢互动方面的技术特征以及支撑系统长周期安全、稳定运行方面的关键性作用。最后,立足当下电网需求与关键装备的技术水平,对未来电氢耦合系统发展进行展望,为电氢耦合技术推广提供实践经验与参考。

**关键词:** 碳中和; 电氢耦合; 可再生能源; 示范工程; 能量管理

## 0 引言

我国继 2020 年 9 月提出“双碳”目标后,进一步为减碳设定了阶段性目标。到 2030 年,非化石能源占一次能源消费比重将达到 25%左右,风光总装机容量将达到 12 亿 kW 以上。据能源局报告显示,截至 2023 年底,我国风、光总发电装机容量已达到 10.5 亿 kW,同比增长 38%<sup>[1]</sup>。“双碳”目标对我国能源转型提出根本性的变革要求,控制化石能源总量,着力提高利用效能,实施可再生能源替代行动<sup>[2]</sup>。

通过可再生能源电解水制取的“绿氢”是一种清洁的二次能源,也是一种新型储能方式,其制、

储、用环节具有近零碳排放特征，在显著提升可再生能源消纳能力的同时，辅助难以脱碳的传统化工、建筑等行业进行深度脱碳，可助力“双碳”目标的实现。因此，基于可再生能源制氢的电氢耦合将是未来能源系统的重要形态特征之一。

电氢耦合系统中的电氢能量转换与存储装置具有长时能量存储与快速调节能力，与可再生能源的波动特性匹配后，能够有效提升电力系统运行的稳定性与灵活性，促进可再生能源消纳。然而，制氢、燃料电池等核心设备在复杂电力系统特征下的适应性及效能有待验证，且国内外氢能装备技术水平差距较大，国内相关技术验证示范较少，面临技术、成本、基础设施等多方面的挑战。

基于上述背景，在国家重点研发计划项目“可离网型风/光/氢燃料电池直流互联与稳定控制技术”的支持下，本文以面向工业园区的电氢耦合直流微网示范工程建设运行为主线，阐述了电氢耦合系统的概念及关键特征，围绕技术选型、能量管理、运行测试等方面展开分析，展现设备典型技术实际应用效果及系统 7 天离网运行能力，并结合技术现状以及建设运行难点对电氢耦合技术的发展作了总结与展望。

## 1 电氢耦合系统

### 1.1 电氢耦合系统组成

电氢耦合系统主要由电制氢、氢发电、储氢、电氢接口变换器等组成，其结构如图 1 所示。制氢环节实现电能到氢能的转换，氢转电环节可通过燃料电池、氢燃机等技术将氢能转换为电能和热能，储氢环节是两者耦合部分。这 3 个环节构成电氢能量转换与存储的核心，可通过管路的连通与切断实现空间上的耦联及隔离。同时，制取的绿氢不仅可以用于备用发电，还可通过输/充装备用于交通与各类工业过程，如钢铁、化工以及合成燃料等，可帮助其他行业深度脱碳。电氢接口变换器起到电力系统与电解槽、燃料电池间的纽带作用，为电解和燃料电池设备的直流输入、输出提供稳定可靠的环境<sup>[3]</sup>。同时，电氢系统是实现供电、供热、供冷的综合能源系统<sup>[4]</sup>，需配置综合能量管理系统、电氢安全与保护系统，以实现系统安全、经济、高效运行。综合能量管理系统对电、氢、热多环节进行优化，对运行数据进行统一管理分析与全景监视，实现电、氢、热的最优转换与调度。电氢安全与保护系统在设备-系统等多个层面避免氢气泄漏、氢氧混合，并在发生泄漏后及时预警与处理。

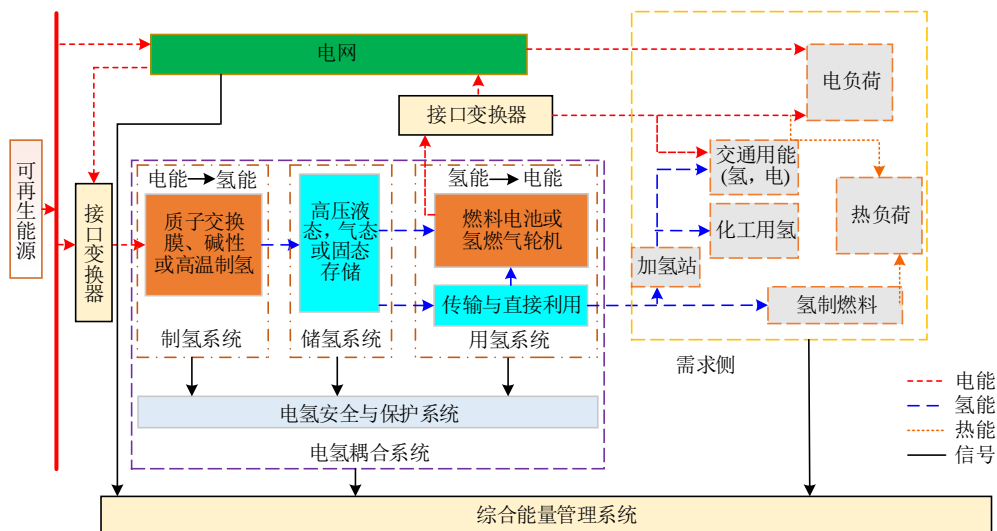


图 1 电氢耦合系统结构图

Fig. 1 Diagram of electric-hydrogen coupling system

### 1.2 电氢转换关键设备

#### 1) 电制氢。

电解水制氢是利用直流电使水在电解槽阴阳极分别产生氢气和氧气的过程，具有原料丰富、设备体积小、气体组分天然分离等优点。

根据槽内电解质的不同可分为碱性电解槽 (alkaline electrolyzer, ALK)、质子交换膜电解槽

(proton exchange membrane electrolyzer, PEM)以及固体氧化物电解槽(solid-oxide electrolyzer, SOE)。现阶段已具备市场化、工程化条件的是 ALK、PEM 技术，前者易于操作，管路结构简单，设备成本低；后者紧凑化程度高，宽负荷适应性和较快的响应速度更适用于匹配可再生能源间歇性、波动性，但质子膜存在耐久低成本高的缺点。而 SOE 技术通常运

行温度为 ALK、PEM 的 8~10 倍(约 600~1 000℃), 该温度下的压力及物质流控制难度大、材料机械及热力损伤风险大、启停次数受限, 目前工程应用装机容量小, 处于实验室改进阶段<sup>[5]</sup>。

对于电网新能源消纳及峰谷调节需要, 电解水制氢技术与电力耦合应具备以下关键特征: ①与当地源、网待调功率相适应的配置容量及宽功率响应能力; ②作为灵活性负荷契合高比例可再生能源新型电力系统的快速响应能力; ③作为储能重要转换环节的电-氢高效转化能力<sup>[6]</sup>。

### 2) 氢发电。

氢发电技术按技术类型可分为燃料电池发电及氢燃料(或掺氢)燃气轮机发电技术。燃料电池将氢作为原电池原料构建电化学体系, 输出为直流电特性, 理论氢电转换效率能够高于该温度下的卡诺循环效率<sup>[7]</sup>, 且全过程清洁无其他副产物。氢燃料燃气轮机将氢作为燃烧原料, 借助传统热力发电形式输出交流电, 相较于燃料电池具有更好的电压、频率支撑能力, 能够辅助电网调峰调频, 提高交流电网灵活性与稳定性<sup>[8]</sup>, 同时, 氢燃料质量轻、燃烧快, 易发生回火、紊流等问题, 目前借助天然气掺氢燃烧等方式逐步提高氢燃烧比例<sup>[9]</sup>。

氢发电技术未来将应用在网侧储能、用户侧分布供能, 因此需满足即发即用、快速供电的电能需求, 同时还应满足复杂用户的综合能源需求, 兼具高效率供电、高品质供热特点<sup>[10]</sup>。

### 3) 储氢。

储氢方式根据氢气存在形式的不同, 可分为高压气态、低温液态以及固态储氢等, 在经济性、储氢能力、安全性、技术成熟度等方面存在显著差异。高压气态储氢是目前应用最广、成熟度最高的储氢技术<sup>[11]</sup>, 基于氢气的可压缩性, 使其完全填充于储氢钢瓶, 储能密度与储罐压力正相关, 同时压力越高压缩能耗越大。低温液态储氢通过将氢气冷却至沸点温度以下, 储氢密度能够达到 35 MPa 气态储氢密度的 2.8 倍, 冷却过程耗能占总储能耗的 30%, 且需要采取储罐绝热保护<sup>[12]</sup>。固态储能是借助固储材料的吸附、释放氢特性, 通过控制材料温度、压力, 灵活化氢气的释放过程, 其储氢容量及速率受到材料密度、结构、成分等条件制约。

储氢包括氢储运技术, 是构建区域性氢能源网络的核心, 未来将是电网、氢网两种能源运输方式相辅相成, 实现能源时空优化配置<sup>[13]</sup>。对于电氢耦

合电力系统, 储氢应与制氢电解槽和氢燃料电池协调耦合, 除储氢密度、成本外, 还应该充分考虑储氢温度、充氢压力与速率、供氢压力与速率、氢气纯度等<sup>[14]</sup>。对于电网及用户, 长周期储氢应具有较低的储电容量衰减率、储氢维护成本。

### 4) 电氢接口变换器。

在电氢耦合系统中, 电氢接口变换器是关键核心设备之一。电氢转化能力受电流条件的影响, 通过变换器稳定直流供能是保障氢能系统安全的必要条件。因此, 变换器不仅需要满足工程中电解槽/燃料电池的工作特性, 还要针对可再生能源波动性进行设计与选型。通常具有以下工作特性<sup>[15-16]</sup>: 1) 用电特征为低电压、高电流, 电压低于目前光伏、风电的输出电压; 2) 随着电流的增大, 制氢速度加快, 制氢效率先增大后缓慢减小; 3) 电流纹波越小, 制氢纯度越高, 系统越安全、稳定、可靠。因此, 电氢耦合系统中的电氢接口变换器需要具备低电压大电流输出、降压转换比高、转化效率高、稳定性强、低电流波纹等特性。

## 1.3 优化运行

在满足电氢耦合系统技术要求及区域整体稳定配置的前提下, 为保证日内或短周期内制氢、储能与风电、光伏间的协调匹配, 避免局域电网的失衡或阻塞, 需要对耦合系统的调度和优化运行进行控制, 通过实现限制措施等手段, 保证系统的最优运行<sup>[17]</sup>。一般地, 优化控制系统采用多层结构, 对于电氢耦合系统, 设备层是单体装备自身的安全控制及对系统运行安全的影响, 系统层则通过协调单体装备, 以期获得较低的制氢成本、较高的制氢效率及运行稳定性, 提高对局部电网的支撑作用<sup>[18]</sup>。

## 2 电氢耦合直流微网示范工程

### 2.1 场景特征及系统结构

浙江宁波慈溪电氢耦合直流微网示范工程坐落在工业园区内, 具有用能形式多样、系统稳定可靠的特点。该工程以沿海区域丰富的风光资源为基础, 通过构建含氢及电化学的长短周期复合储能系统, 满足用户对电、氢、热多样化能源需求, 实现从清洁电力到清洁综合能源转化及供应的全过程零碳, 具有长周期离网运行的能力。

该工程建设需满足以下要求: 适配区域内高渗透率接入的风/光可再生能源波动供能; 电化学储能与氢储能等长短周期混合储能协同配合, 实现离网

长周期重要负荷稳定供能；应对不定时、不定量的交通运输工具充氢需求冲击；电力网架供给应适配电氢转化设备的直流电负荷及发电特性；考虑用户侧综合热负荷需求的余热利用。

根据相关指标要求，本微网工程采用直流系统结构，在  $\pm 10\text{kV}$  直流侧布置大功率光伏发电装置及电化学直挂式储能，保障系统稳定用电；在  $\pm 375\text{V}$  直流侧布置制-储-用氢子系统，实现低压比、高效能的电-氢/氢-电转换，同时配置风/光可再生能源发电装置及电化学储能，并为系统用户提供交通充氢、充电端口。另外，采用  $\pm 10\text{kV}/\pm 375\text{V}/500\text{V}$  多端口变换器形式，保证电氢设备稳定供电。系统能量流动图如图 2 所示，系统整体拓扑图及相关设

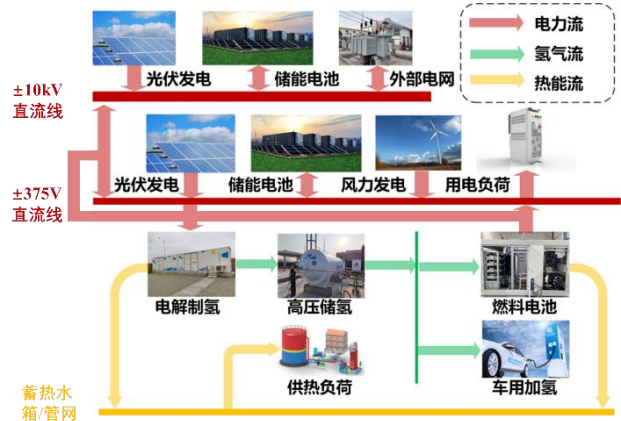


图 2 宁波慈溪电氢耦合直流微网示范工程能流图  
Fig. 2 Energy stream of the demonstration project in Cixi, Ningbo

备容量结果如图 3 所示。

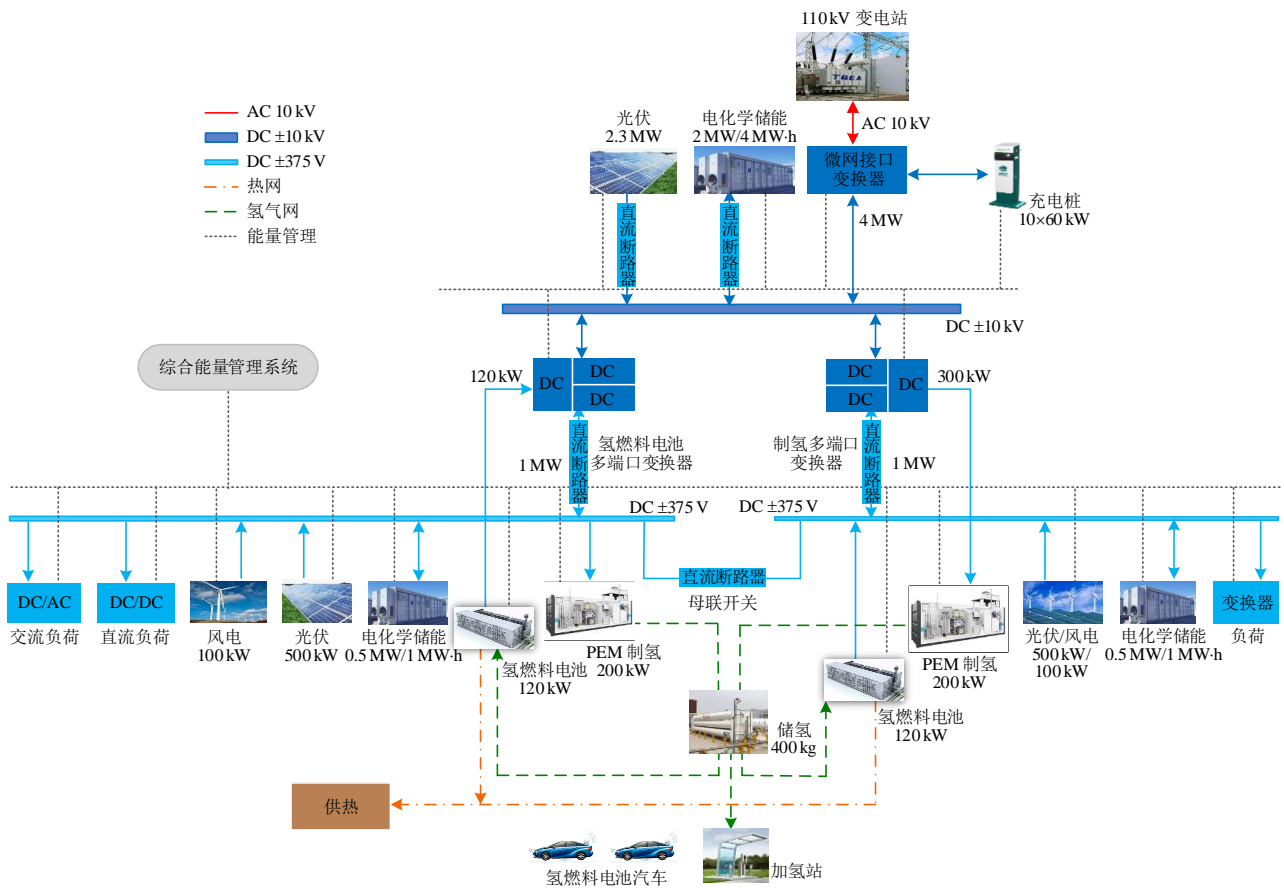


图 3 宁波慈溪电氢耦合直流微网示范工程拓扑图  
Fig. 3 Gplot of the demonstration project in Cixi, Ningbo

相比于传统以电化学储能为主的微网，该工程具有以下优势：

- 1) 在短时间尺度上，基于 PEM 电解槽快速响应的特点，与电化学储能协调配合平衡系统功率，从而提高可再生能源消纳率，避免电化学储能大规模投资，降低系统配置成本。
- 2) 在长时间尺度上，考虑了氢储能自损耗率

低、能量密度高的特点，发挥氢能长周期储能优势，提升系统离网长周期安全稳定运行能力。

## 2.2 电氢设备技术选型

### 2.2.1 电解水制氢技术

园区内分布式可再生能源装机量大、类型多样，尤其是离网时，要求制氢设备具备较快的调节速率及较宽的功率可调范围；为及时满足冲击性用

氢负荷,考虑燃料电池等典型用氢设备的氢源纯度要求,制氢系统应能够快速提供高纯氢气。综上所述,本示范工程采用 PEM 作为水电解制氢技术能更好地适应高渗透率风光消纳的场景。

PEM 电解槽宽范围快速功率调节能力受电堆温度、压力响应时间的影响,温度、压力调节速率受内部物理场热容、流阻的限制,工程设备通过精细化电解槽零部件热质模型,进而采用基于模型的温度、压力多维度控制,以提高电解槽的宽范围快速响应能力。

### 2.2.2 氢燃料电池技术

纯氢燃气轮机技术目前工业化程度低,燃料电池技术则是已有应用于固定式发电的实例,同时,本工程采用中压直流供电模式,更匹配燃料电池直流输出特性,因此采用燃料电池氢发电技术。

我国燃料电池技术研发和产业化集中在质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)和固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)。PEMFC 可以直接使用空气作为氧化剂,具有启停迅速、响应时间短、能量转换效率高、低温启动等优势,使其成为理想车用动力源且商业化程度最高<sup>[19]</sup>。SOFC 使用廉价固体氧化物材料作为膜材料,具有低污染、氢-电转化效率高、燃料适应性强、模块性强、易于大规模生产等特点<sup>[20]</sup>,在国外主要应用于固定式发电,而国内大规模工程化应用案例较少。为保障生产过程稳定,燃料电池应快速响应中小型用户电、氢、热需求的变化,起到“快启快调”的作用,且氢发电、氢制热能量占比可控。基于上述目的,采用 PEMFC 技术,具备较快启动、调载能力,满足微网应急供电及热负荷灵活调节。

为提高 PEMFC 性能,在模块方面,采用鼓风机替代空压机的阴极供气,降低寄生功耗;工艺方面,提出了全环节水热一体化利用技术,通过多级水热复用(如图 4 所示)充分回收燃料电池系统发电过程中热能;控制方面,通过调节阴极进气量,使系统过氧比维持在当前功率下的优解范围,从而提升氢气利用效率。

### 2.2.3 储氢技术

因此,工程中应采取多压力等级储氢设备协同配合的方式,以兼顾波动可再生能源制氢与燃料电池快速灵活调节的需求及低储氢能耗要求。

工程中核心氢利用设备为氢燃料电池与交通

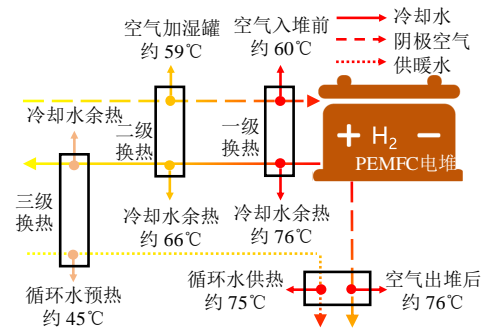


图 4 燃料电池多级水热复用技术

Fig. 4 Diagram of multistage heat utilization technology in fuel cell

用加氢机,前者电堆用氢压力为数百千帕,后者满载氢气压力一般为 35 MPa,考虑氢气输送速率要求及沿程压力损失,适宜配置 3 MPa 及 45 MPa 的氢储罐。同时,增加中级压力等级的压缩级数能显著降低压缩总能耗。当首端制氢压力为 3 MPa、终端加氢压力为 45 MPa 时,采用多级压力储存的压缩机耗能比情况如图 5 所示。

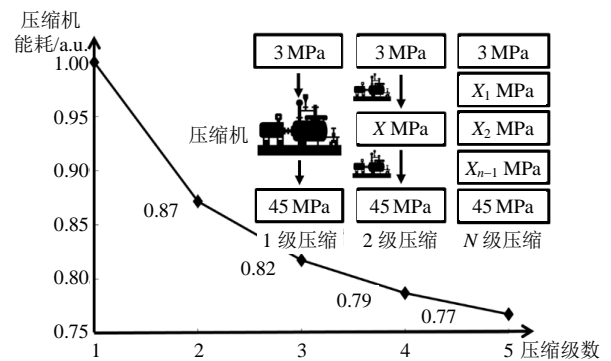


图 5 储氢压缩能耗与压缩级数关系

Fig. 5 The relationship between the energy consumption and compressed series

因此,考虑储氢设备成本及运维,采用两级压缩形式具有较高的经济性,以 20 MPa 作为主要储氢罐压力,构建 3~20~45 MPa 复数压力储氢系统。

### 2.2.4 电氢接口变换器

多端直流系统与大容量直流断路器组合形成的直流微网,能够实现多电源供电、多落点受电,并可快速切除故障,具有更高的可靠性、经济性和灵活性<sup>[21]</sup>。本工程电解槽/燃料电池并网于  $\pm 375$  V/ $\pm 10$  kV 可再生能源直流母线,低压侧电解槽电压为 100~200 V,燃料电池电压为 400~700 V。

为支撑直流微网多端中低压变换需求,工程电氢混合储能三端口变换器采用隔离型结构,拓扑如图 6 所示,通过直接磁耦合实现了制氢/燃料电池、储能电池、可再生能源/负荷间的高效多向协同,具

备高变比、宽范围输出以及电气隔离的能力。

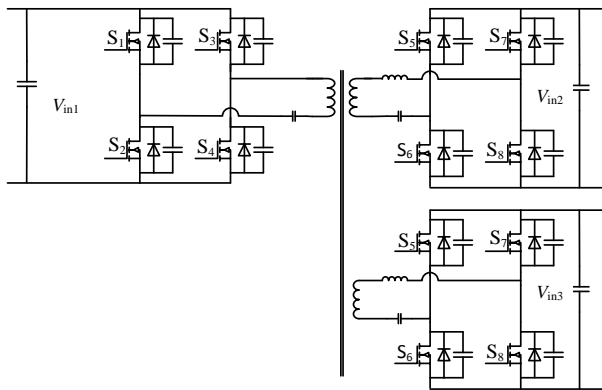


图 6 三端口直流变换器拓扑

Fig. 6 Gplot of three-port DC converter

### 2.3 电氢综合能量管理

受外部电网计划检修和台风等自然灾害影响，并基于氢储能的长周期特性，工程需要保障长周期(如 1 周)离网期间重要负荷的持续可靠供电。此时，如何实现风、光、氢等多种能源和电动汽车、氢燃料电池汽车等灵活性负荷之间的协调，充分发挥电化学储能和氢储能的差异化优势，是能量管理策略中需要考虑的核心问题。为了提升系统长周期运行可靠性，同时降低长周期功率预测误差对调度方案合理性的影响，工程中采用了如图 7 所示的长周期-日前混合优化调度框架<sup>[22]</sup>。

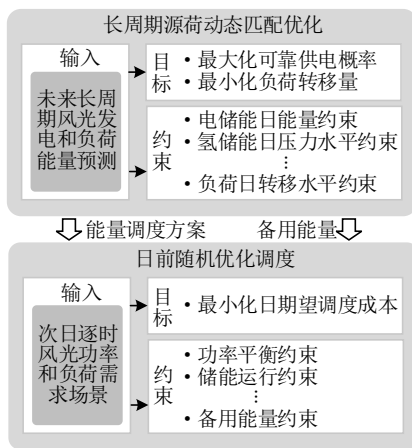


图 7 长周期-日前混合优化调度框架

Fig. 7 Long-period and day-ahead joint optimization framework

该优化框架主要由源荷动态匹配优化和日前随机优化两部分组成。其中，源荷动态匹配优化基于未来长周期的可再生能源发电电量和负荷能量需求预测，对长周期内负荷的动态转移、电化学储能和氢储能每日调度结束后的剩余能量等进行优

化，在最小化负荷转移代价前提下，实现最大化可靠供电概率目标。在此基础上，日前优化调度考虑次日源荷随机不确定性，以所有场景下的期望成本最小为目标确定次日各时段电解水制氢、燃料电池、储能等的调度方案。相比于传统日前优化方法，示范工程中所采用的方法具有以下几方面优势：

1) 以能量预测替代功率预测，可提升预测精度。长周期的源荷动态匹配优化，可充分挖掘氢储能能量存储的优势。

2) 长周期优化可为日前优化提供边界条件，根据源荷动态匹配程度，提早制定备用能量及负荷转移计划，指导日前优化合理确定调度末时刻的能量储备，从而提升长周期离网运行能力。

## 3 电氢耦合系统性能测试评价

### 3.1 电制氢系统宽范围运行与快速响应测试

为应对波动性可再生能源消纳的场景，要求电制氢系统具备宽范围运行与快速响应能力，其中宽范围运行能力可以提升对可再生能源的消纳水平，减少设备其停机，快速响应能力可以为系统在紧急工况下提供功率支撑。本文对工程中所研发的宽范围快速响应制氢系统进行了测试。需要说明的是，各项设备性能测试均进行不少于 3 次的重复性试验。制氢系统宽范围运行与快速响应测试曲线如图 8、9 所示。

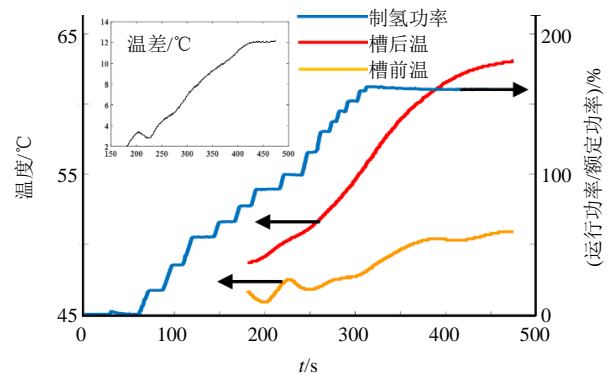


图 8 PEM 制氢宽范围运行测试曲线

Fig. 8 Curves of PEM electrolyzer during the wide power range operation

图 8 为 200 kW 质子交换膜电解槽宽范围运行测试的结果曲线，由最低点运行功率(0.31 kW)逐步加至极限运行功率(314.85 kW)，功率调节范围为额定状态的 0.65%~157%。图 9 为热机状态下的面向快速系统功率需求的阶跃测试结果，电流下降速率为 208.2 A/s，电流上升速率为 209.6 A/s，功率响应

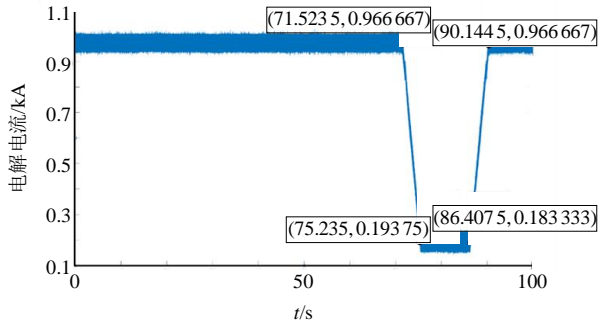


图9 PEM制氢快速响应测试曲线  
Fig. 9 Curves of PEM electrolyzer during the fast power-rised and stepped process

速度大于 20% $P_{\text{额定}}$ /s。相较于传统面向稳定工况的制氢设备,本工程样机能在宽范围内跟踪可再生能源功率波动,实现较少的启停机,同时可以为系统提供快速功率支撑能力,减少电化学储能配置。

### 3.2 燃料电池系统能效测试

燃料电池系统在各个功率状态下的综合热电效率及纯电效率,是评价燃料电池性能及状态的关键指标,分别以氢气高热值(单位质量氢完全燃烧释放的总能量,约 143 MJ/kg)及低热值(氢完全燃烧中扣除水蒸发吸热量后的总能量,约 120 MJ/kg)作为能量输入参考值。传统燃料电池技术主要面向交通场景,缺乏针对固定式发电场景的系统设计与优化方案,电热能量利用不充分。为此,本工程研发了面向固定式场景的低压燃料电池系统,结合全过程余热回收技术,提升系统综合热电效率。

图 10 是燃料电池启动至额定功率阶段的纯电效率及热电联供效率的变化曲线。本工程所研发的燃料电池联供系统兼顾供电及供热能力,与常规电流-电效率曲线呈现递减趋势不同,为在升载过程中

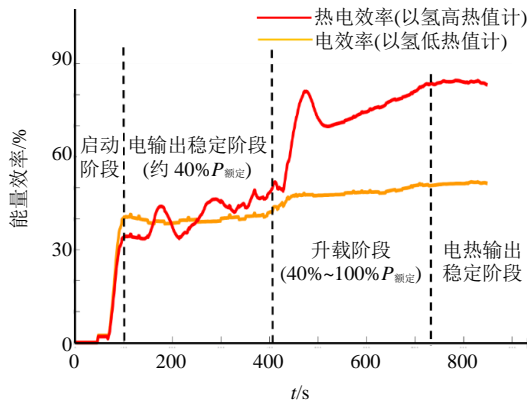


图10 PEMFC电效率(低热值)及热电综合效率(高热值)曲线

Fig. 10 Electrical efficiency (low heating value) and overall efficiency (high heating value) curves of PEMFC

保证电效率的稳定,采用升压、升温的方式将纯电效率维持在启机阶段的高水平。在升载阶段,系统电效率基本平衡,发电过程中产生的电堆余热总量及热品质提高,热效率随功率的提高而提高<sup>[23]</sup>。燃料电池系统电效率大于 51%、热电联供效率大于 85%,能够同时满足供电、供热需求。

### 3.3 储氢系统安全性模拟

为了保障系统的安全性,相异于电化学储能系统,氢储能系统的制、储、用为相互分隔的单元,氢气仅存储于储氢区域中。工程考虑了 20 MPa 储氢罐及 45 MPa 储氢罐在开放式空间阀门开口方向上的泄漏扩散情况,模拟环境温度为 20℃、无风时氢泄漏扩散,模拟结果如图 11、12 所示。

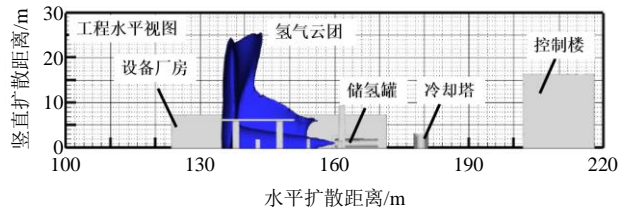


图11 20 MPa 储氢罐泄漏扩散(55s 时)

Fig. 11 Hydrogen leakage of 20 MPa hydrogen-storage tank (in 55<sup>th</sup> s)

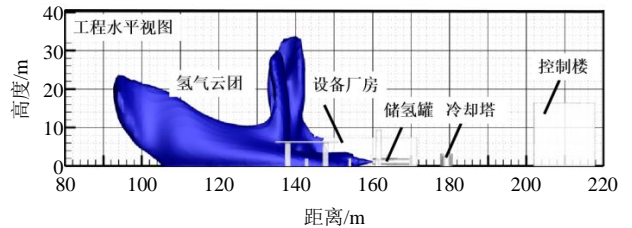


图12 45 MPa 储氢罐泄漏扩散(25s 时)

Fig. 12 Hydrogen leakage of 45 MPa hydrogen-storage tank (in 25<sup>th</sup> s)

图示蓝色区域为氢气浓度高于燃爆下限(4%)的云团可视化图谱。20 MPa 储罐氢泄漏第 55 s 时的水平扩散距离为 25.4 m, 竖直扩散距离 25.5 m; 45 MPa 储罐氢泄漏第 25 s 时的水平扩散最远距离为 67.2 m, 竖直扩散最高达到 34 m。表明 45 MPa 氢泄漏在扩散距离、扩散速度方面均危险于 20 MPa 氢泄漏,应着重监测防护。

根据泄漏扩散仿真结果,可以对氢泄漏传感器进行针对性布置,以实现氢泄漏快速识别于防护。工程储氢区域内设有 4 处氢泄漏检测探头,分别位于 3 个压力等级储氢罐上部及氢放散塔处。当氢泄漏探头感应氢浓度值高于 1.2%时,便会触发系统全面连锁停机保护和隔离,结合氢泄漏发展特征,此

时的漏氢尚未扩散至电气区域，从而保障了电气耦合系统安全，规避氢燃爆风险。

### 3.4 多端口电氢接口变换器效率测试

为满足中压直流微网中氢能设备低压供电需要及供电稳定性，对宁波慈溪电氢耦合系统中采用的多端口电氢接口变换器进行了效率测试及电压稳态偏差测试。表 1 是多端口电氢变换器直流互联效率，其中直流母线端效率 97.62%，燃料电池端口传输效率 97.75%。

表 1 多端口变换器直流互联效率

Table 1 DC interconnection efficiency of multiport converter

测试功率/kW	直流母线端		
	输入功率/kW	损耗/kW	效率/%
200	211.21	9.91	95.31
400	409.07	10.80	97.36
600	610.99	11.98	98.04
800	816.22	17.30	97.88
1000	1023.06	24.35	97.62
测试功率/kW	燃料电池端		
	输入功率/kW	损耗/kW	效率/%
24	27.35	3.45	87.39
48	51.13	3.14	93.86
72	74.71	2.61	96.51
96	97.96	1.68	98.29
120	123.08	2.77	97.75

### 3.5 余热回收技术及系统综合能效

面向电氢转化设备的余热回收系统是供热的核心技术手段。通过对子系统流动冷却介质的直接利用或二次换热至用户侧，能够实现设备恒温运作、响应系统内部热负荷要求、提高系统供能类型及综合能效、构建热电联供系统。

电解槽、燃料电池运行过程中形成的极化电势、浓度电势、欧姆电势将导致耗散功率并进一步转化为设备热能。本工程通过余热回收系统的调控功能，能够控制系统工作温度，从而调节输出功率，实现对燃料或电能的充分利用。图 13 为系统综合能效的效率传递示意图。

通过回收电解氢设备及燃料电池设备制氢、发电过程中的废热，一方面能够保障系统运行安全，另一方面能满足用户的热负荷需求，平台热回收功率及系统运行情况关系如图 14 所示。随着运行功率的提升，电氢设备余热量持续提升，在功率稳定阶段，受益于系统自身产热、散热间不平衡性，短时间内温度缓慢增加，呈现出供热功率持续提升的

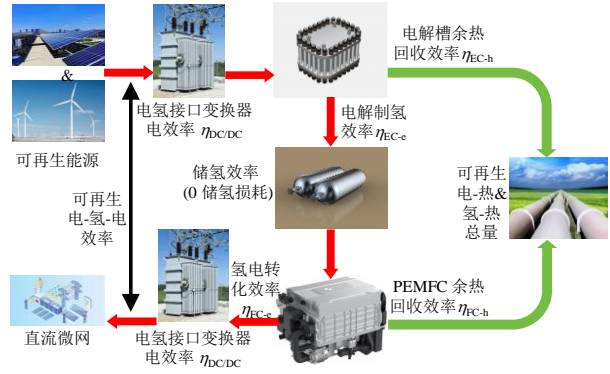


图 13 宁波慈溪电氢耦合示范工程效率计算

Fig. 13 Efficiency calculation of the demonstration project in Cixi, Ningbo

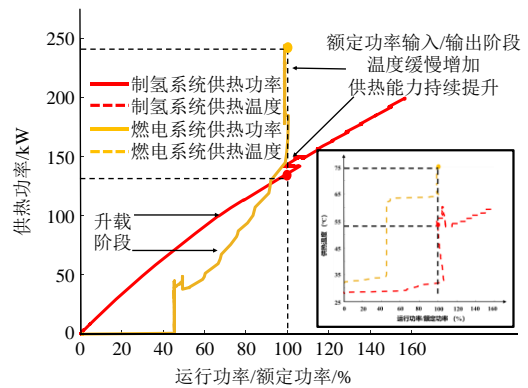


图 14 各运行工况下系统供热能力

Fig. 14 System heating capacity in various operating conditions

现象。额定功率条件下的电解槽最大供热温度约 53℃，供热功率约 131 kW，额定功率条件下的燃料电池最大供热温度约 75℃，平均供热功率 244 kW，保证在氢储能充、放电条件下均能够满足用户侧热量及品质要求。

以制氢电解槽、燃料电池额定功率下的各项性能参数为电-氢-电/热的储氢效率计算依据，电氢耦合系统效率计算如式(1)、(2)：

$$\eta_e = \eta_{DC/DC} \eta_{EC-e} \eta_{FC-e} \eta_{DC/DC} \quad (1)$$

$$\eta_{e-h} = \eta_{DC/DC} [\eta_{EC-e} (\eta_{FC-e} \eta_{DC/DC} + \eta_{FC-h}) + \eta_{EC-h}] \quad (2)$$

式中： $\eta_e$  为电-氢-电效率； $\eta_{e-h}$  为电-氢-热电联供效率。

相关效率计算参数测试检验定值如表 2 所示，其中氢气化学能均以高热值(143 MJ/kg)计算。电氢耦合系统电-氢-电效率为 30.33%，电-氢-热电联供效率为 85.70%。特别地，本工程对电氢接口变换器余热也进行了利用，系统实际综合能源利用率约为 88%。基于氢储能的电-氢-电效率较低，余热回收

系统能显著提升可再生能源利用效率 55% 以上,同时丰富供能种类,拓宽了电氢耦合系统应用场景。此外,若考虑加氢、氢制燃料等直接用氢手段实现氢气直接利用,可以减少能量损失环节,系统综合能效也将进一步提升。

表 2 电氢耦合系统设备关键数据  
Table 2 Key data of equipment in electric-hydrogen coupling system

设备类型	效率参数	实测值/%
变换器	电-氢端口变换传输效率	97.75
电解槽	电解制氢效率	75.68
	电解槽余热回收效率	21.58
燃料电池	氢电转化效率	42.66
	燃料电池余热回收效率	45.63

### 3.6 电氢耦合系统长周期运行情况

采用 3.3 节介绍的系统综合能量管理方法,实现了长周期离网运行。以某次 7 天离网运行测试为例,系统光伏总功率、电化学储能总体荷电状态 (state of charge, SOC) 和三级储氢罐压力的变化如图 15—17 所示。

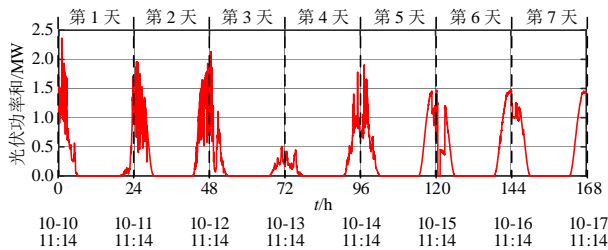


图 15 光伏功率

Fig. 15 Photovoltaic output

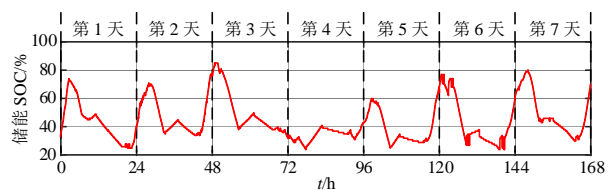


图 16 电化学储能 SOC

Fig. 16 SOC of energy storage

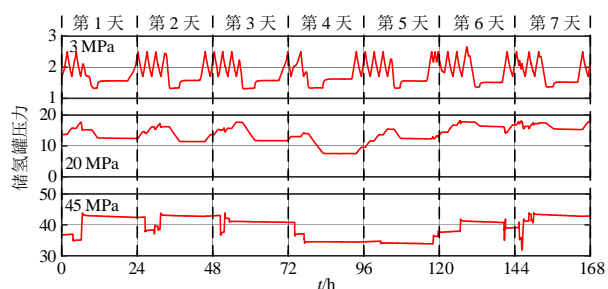


图 17 储氢罐压力

Fig. 17 Hydrogen storage tank pressure

系统运行过程中,富余的光伏电量通过电化学储能充电和电解水制氢储存,减少弃光量,提升微电网可再生能源就地消纳能力。其中,电化学储能主要是响应快速的源荷波动,氢储能则主要进行日内、日间的调节。如因预测第 3~4 天为阴雨天气,系统在 1~2 天进行满功率制氢,以满足第 3~4 天可能的能量缺额,而电化学储能的周期都在 1 天内。此外,在测试第 6 天,因预测天气为连续晴天,因此当天进行了 10 辆燃料电池汽车集中加氢和 50 辆电动汽车快充的试验,系统稳定运行。燃料电池加氢在当地交通领域有较高的需求,通过电氢协同需求侧响应,满足了多样化的终端能源需求。

## 4 电氢耦合技术展望

根据电氢耦合示范工程建设经验及运行情况,并结合电氢耦合技术发展现状,本文对电氢装备快速功率调节能力提升、电-氢-热系统能效提升、设备高效运维管理、电氢协同安全与保护、跨时空氢储能调配等方面进行了技术展望。

### 4.1 电氢装备快速功率调节能力提升技术

对于电氢耦合系统中存在电、热、质流,时间尺度差异较大,而制约电解槽、燃料电池快速调节能力的是内部温度场、压力场的缓慢爬升,相较于电化学储能存在储能效率低、平抑功率波动弱的特征。同时,较快的功率波动会加速设备老化,特别是材料强度、质子膜耐久等属性,从而会减少使用寿命。

目前限制电解设备功率爬升速率的原因主要有以下几种。碱性电解装置的运行功率范围主要受到低功率下氢氧混合的安全约束,动态响应主要受氢氧压力平衡控制的约束,启停机次数主要受到镍电极、表面催化层因化学腐蚀、机械磨损等导致的性能衰减约束,可再生能源波动性被认为是类似其停机的过程,会加速电极衰减<sup>[24]</sup>。固体氧化物制氢和燃料电池的响应特性主要受其高运行温度的约束。PEM 制氢装置由于运行温度低、可以差压工作,其动态特性相对较好,但同时也面临着贵金属催化剂耐波动性差、更换成本高的缺陷。

通过实际工程经验,为提升快速功率调节能力,一是优化设备启动阶段初始状态,针对功率升/降载过程中的关键滞速因素,如压力、温度等,采用预增压、增温的方式或优化阴阳极间的协调匹配,降低因快速调节所导致的安全风险<sup>[25]</sup>。二是采

用多组设备轮值控制策略，以设备投切控制代替功率的升降控制，减小单台装备的功率波动强度，从而提高功率控制能力<sup>[26]</sup>。三是引入快速储能技术响应高频功率变化，通过电化学储能、超级电容储能对高频段功率进行响应，而氢储能对波动性工况作缓慢调节响应，从而达到精准功率控制的目的<sup>[27]</sup>。

#### 4.2 电-氢-热系统能效提升技术

电氢耦合系统涉及电、氢、热多种能源形式，通过本体能效提升和系统能量管理，可以有效提升系统的综合能效。在宁波慈溪示范工程中，通过余热利用，系统综合能源效率提升至 70%~90% 区间段，属于较高水平，同时丰富了能量产品种，拓宽了电氢耦合系统应用场景。

然而，能量转换核心设备电-氢/氢-电过电势的存在，导致不可逆的热能产生，使得现阶段“电-氢-电”的直接电能储放效率仅为 30%~40%，降低了氢在目前电力“削峰填谷”中的经济性，是导致电氢耦合系统发展较慢的关键因素。但由电解槽、燃料电池理论能效特征可知，温度的提升将有助于减小过电势，从而提升电-氢间转换效率，因此，发展高温电解技术将是未来发展方向之一<sup>[28]</sup>。如高温固态氧化物制氢及燃料电池技术的运行温度可达 800~1100℃，理论上电-氢/氢-电转化效率可达 85%~90% 以上<sup>[29]</sup>，同时兼顾功率密度高、燃料适应性强、全固态结构、设备简单等优点，在余热量相同条件下，热的品质将显著提高，因而热能应用面及对外做功能力更强，能够满足全方位的用能需求。

#### 4.3 设备高效运维管理技术

电氢耦合系统中的电-氢转化设备涉及到复杂的电化学反应过程以及多个辅机系统，具有多变量、非线性、强耦合的特征。以燃料电池为例，就有水淹、膜干、催化剂中毒等 20 余种故障<sup>[30]</sup>，寿命衰减和运行工况强相关，准确预测寿命终点非常困难。因此，开展设备高效运维管理是提升系统运行效率的关键之一，现阶段重点关注设备侧故障诊断与寿命预测。

数据驱动方法为解决复杂工况下电氢能量转换与存储装置故障诊断与寿命预测提供了一种新的思路。近年来有大量的研究聚焦于数据驱动的燃料电池故障诊断与寿命预测<sup>[31]</sup>，涉及几乎所有的数据驱动方法与模型。目前已有利用数据驱动<sup>[32]</sup>的方法对 PEM 电解槽的运行参数进行实时在线辨识，

考虑到燃料电池和电解槽的相似性，用于燃料电池的数据驱动方法对于制氢装置有很强的借鉴意义。

结合近年来蓬勃发展的数字孪生技术，基于云边协同的架构，可在云端建立起数据驱动的电氢能量转换与存储装置的数字孪生模型，构建基于数字孪生估计器的平行故障诊断模型<sup>[33]</sup>，实现平行故障诊断，并通过与物理系统的虚实交互，对模型进行实时的矫正与优化。图 18 给出了慈溪等示范工程中统一的云边协同运维与优化架构，利用云端的大数据计算能力，构建数字孪生模型，为示范工程集群提供系统优化，设备故障诊断、寿命预测等服务，相关诊断、预测与优化结果、判定阈值，通过网络通讯下发至边缘控制器，以优化示范工程的运行。

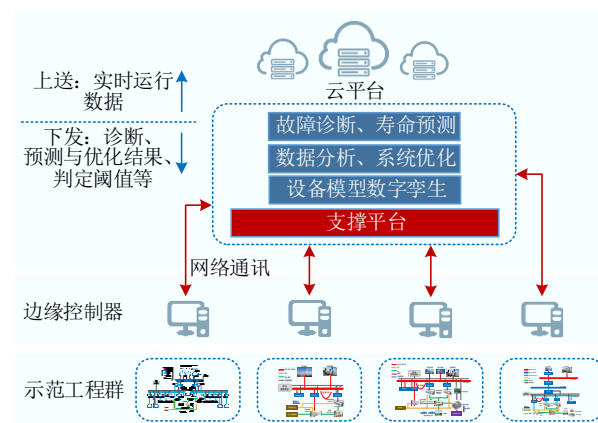


图 18 云边协同的示范工程运维与优化架构

Fig. 18 Operation, maintenance and optimization of demonstration projects based on cloud-edge architecture

#### 4.4 电氢协同安全与保护技术

氢能的安全性是影响其推广性的重要因素。与传统氢能系统相比，电氢耦合系统的独特性体现在电解槽、燃料电池以及相关电气设备，其安全系统构建与设备特性关系密切，涉及氢、电、热、高压等多种危险工况复合状态。系统中电解装置供电系统失电、电压过高或过低、功率大幅度波动、氢气/氧气泄漏等非正常运行工况均可能对系统安全、稳定性产生影响，大量电气设备也更容易使得氢泄漏后发生点燃等意外。

在电氢耦合系统安全方面，目前安全监测布局与保护策略的制定通常只能依据有限的工程经验或数值模拟，防护可靠性无法得到有效验证。在氢安全研究领域，现在已有较多氢气泄漏和扩散的研究<sup>[34]</sup>，这些研究能够为特定空间模型下的定量风险评估和氢安全标准的制定提供一定的依据。然而，对于空间较为封闭紧凑、设备密集受限空间(构筑

物/预制舱)电氢耦合系统,相关研究结果难以直接应用。复杂受限空间内的氢气泄漏扩散特性和燃爆风险、电氢耦合系统内的实时泄漏检测和故障定位、事故情景下的电氢保护配置方案等关键问题亟待研究与解决。

#### 4.5 跨时空氢储能调配

氢能是长周期新型储能,物理化学性质稳定,在储氢容器保存良好的条件下,长时间储存时储氢量维持恒定,且储量上限不随时间衰减。同时,电氢耦合系统中的氢气作为长时储能,当面临区域需求量持续较低、储罐压力趋近阈值的情况时,仍需要采取泄放氢的方式以预留可再生能源消纳制氢的空间,从而减低氢储能经济性、增加操作危险。

因此,经济、高效与安全的氢气储输技术是推进氢能在电力系统规模化应用的关键,也是实现氢能产业链终端灵活应用的重要技术手段<sup>[35]</sup>,借助氢储、输、送等手段能够实现可再生能源的跨时间、跨空间分配。同时,氢能除用以电力储能外,可通过燃烧、合成、还原等过程参与其他行业深度脱碳。但是,目前氢气运输主要通过 20 MPa 长管罐车实现,该压力等级下的储能密度较低,单位距离、单位质量的氢运输成本较高,不利于氢能的跨产业类型、跨城市集群应用,从而阻碍了氢在各个领域的深度渗透和能源替代作用。

推动跨时空氢储能调配已有两种切实可行的技术路线。一是建设氢气运输管道,我国已率先开展已有天然气管道掺氢技术研究<sup>[36]</sup>,实现了 10% 氢气比重的工程示范,相较于交通送氢成本将降低至 15%~20%。二是发展以“绿氢”为原料基础的电制 X 技术,通过将电解水产生的氢气合成氨、甲醇、甲烷等燃料,并用于交通、工业、化工等领域,能够助力多行业协同深度脱碳<sup>[37]</sup>。相比于目前氢燃料电池的小规模应用,电制 X 适用性、推广性更强,是“双碳”目标下平衡能源生产与消费的重要手段<sup>[38]</sup>。

## 5 总结

本文以面向工业园区建设的电氢耦合系统示范工程为依托,设计了电氢优化配置方法及能量调控策略,电氢转换核心装备表现出约 20%  $P_{\text{额定}}/s$  的主动调节能力,适应园区可再生能源波动平抑要求;通过余热回收利用,燃料电池综合供能效率达 85%,拓宽了电氢耦合系统的应用场景;通过氢储能电化学储能协同互补,有利于系统长周期源荷互

补,满足离网运行需求。

基于设备测试及系统运行状况,电氢耦合微网展现出匹配高功率可再生能源接入的高效、稳定运行能力。结合全环节需求分析,电氢装备快速功率调节、电-氢-热系统能效提升、设备高效运维管理、电氢协同安全与保护、跨时空氢储能调配将是未来电氢耦合系统实现经济、稳定、安全运行以及多场景覆盖的重要研究方向。同时,开展示范工程的建设,为国产化电氢耦合系统装备提供了技术验证平台,有助于推动电氢耦合系统全产业链发展,助力新型电力系统建设与“双碳”目标的实现。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2023 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2024-01-26). [http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c\\_1310762246.htm](http://www.nea.gov.cn/2024-01/26/c_1310762246.htm).
- [2] 尹积军, 吴文传. 浙江构建新型电力系统的技术路径与实践[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5404-5414. YIN Jijun, WU Wenchuan. Technical path and practice for constructing the new type power system in Zhejiang Province[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5404-5414(in Chinese).
- [3] 郭小强, 魏玉鹏, 万燕鸣, 等. 新能源制氢电力电子变换器综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 185-199. GUO Xiaoqiang, WEI Yupeng, WAN Yanming, et al. Review on power electronic converters for producing hydrogen from renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 185-199(in Chinese).
- [4] 许世森, 张瑞云, 程健, 等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2531-2536. XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2531-2536(in Chinese).
- [5] 戴凡博. PEM 电解水制氢催化剂及直接耦合光伏发电系统建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020. DAI Fanbo. Study of catalyst in PEM water electrolysis and directly coupling photovoltaic system simulation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [6] 姜一鸣, 安之, 刘斯伟, 等. 面向高比例新能源接入的电氢耦合系统设计及分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 1-8. XIAN Yiming, AN Zhi, LIU Siwei, et al. Assumption and analysis of electricity-hydrogen coupling system for high proportion of new energy[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2024, 44(4): 1-8(in Chinese).
- [7] 曾洪瑜, 史翊翔, 蔡宁生. 燃料电池分布式供能技术发展现状与展望[J]. 发电技术, 2018, 39(2): 165-170.  
ZENG Hongyu, SHI Yixiang, CAI Ningsheng. Development and prospect of fuel cell technology for distributed power system[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(2): 165-170(in Chinese).
- [8] NAZARI M A, ALAVI M F, SALEM M, et al. Utilization of hydrogen in gas turbines: a comprehensive review[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2022, 17: 513-519.
- [9] 吕光普, 刘潇, 张志浩, 等. 氢燃气轮机燃烧技术研究进展[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(1): 1-15.  
LÜ Guangpu, LIU Xiao, ZHANG Zhihao, et al. Research progress of combustion technology in hydrogen gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(1): 1-15(in Chinese).
- [10] WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, YANG Zhifang, et al. Exploring the trade-offs between electric heating policy and carbon mitigation in China[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 6054.
- [11] 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.  
CAO Fan, GUO Tingting, CHEN Kunyang, et al. Progress and development prospect of coupled wind and hydrogen systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2187-2200(in Chinese).
- [12] 丁镠, 唐涛, 王耀萱, 等. 氢储运技术研究进展与发展趋势[J]. 天然气化工—C1 化学与化工, 2022, 47(2): 35-40.  
DING Liu, TANG Tao, WANG Yaoxuan, et al. Research progress and development trend of hydrogen storage and transportation technology[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(2): 35-40(in Chinese).
- [13] 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.  
GAO Jie, SONG Jie, WANG Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 1-15(in Chinese).
- [14] DING Zhao, LI Hao, SHAW L. New insights into the solid-state hydrogen storage of nanostructured  $\text{LiBH}_4\text{-MgH}_2$  system[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 385: 123856.
- [15] ZHANG Xiyuan, WANG Bowen, XU Yifan, et al. Effects of different loading strategies on the dynamic response and multi-physics fields distribution of PEMEC stack[J]. Fuel, 2023, 332: 126090.
- [16] 周京华, 孟祥飞, 陈亚爱, 等. 基于新能源发电的电解水制氢直流电源研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 389-397.  
ZHOU Jinghua, MENG Xiangfei, CHEN Yaai, et al. Research on DC power supply for hydrogen production from electrolytic water based on new energy generation[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6): 389-397(in Chinese).
- [17] GUTIÉRREZ-MARTÍN F, AMODIO L, PAGANO M. Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(57): 29038-29048.
- [18] MATUTE G, YUSTA J M, BEYZA J, et al. Optimal dispatch model for PV-electrolysis plants in self-consumption regime to produce green hydrogen: a Spanish case study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(60): 25202-25213.
- [19] STONE C, MORRISON A E. From Curiosity to “power to change the world” [J]. Solid State Ionics, 2002, 152-153: 1-13.
- [20] 刘少名, 邓占锋, 徐桂芝, 等. 欧洲固体氧化物燃料电池(SOFC)产业化现状[J]. 工程科学学报, 2020, 42(3): 278-288.  
LIU Shaoming, DENG Zhanfeng, XU Guizhi, et al. Commercialization and future development of the solid oxide fuel cell (SOFC) in Europe[J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(3): 278-288(in Chinese).
- [21] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8(in Chinese).
- [22] LIU Yixin, SHI Haoqi, GUO Li, et al. Towards long-period operational reliability of independent microgrid: a risk-aware energy scheduling and stochastic optimization method[J]. Energy, 2022, 254: 124291.
- [23] AY M, MIDILLI A, DINCER I. Exergetic performance analysis of a PEM fuel cell[J]. International Journal of Energy Research, 2006, 30(5): 307-321.
- [24] BRAUNS J, TUREK T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review[J]. Processes, 2020, 8(2): 248.
- [25] ZHANG Yuan, CHEN Bin, GUAN Daqin, et al. Thermal-expansion offset for high-performance fuel cell cathodes[J]. Nature, 2021, 591(7849): 246-251.
- [26] LI Yangyang, DENG Xintao, ZHANG Tao, et al. Exploration of the configuration and operation rule of the

- multi-electrolyzers hybrid system of large-scale alkaline water hydrogen production system[J]. Applied Energy, 2023, 331: 120413.
- [27] 蔡国伟, 彭龙, 孔令国, 等. 光氢混合发电系统功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 109-116. CAI Guowei, PENG Long, KONG Lingguo, et al. Power coordinated control of photovoltaic and hydrogen hybrid power generation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 109-116(in Chinese).
- [28] ZHANG Weizhe, LIU Menghua, GU Xin, et al. Water electrolysis toward elevated temperature: advances, challenges and frontiers[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(11): 7119-7192.
- [29] 杨智敏, 林比宏. 不可逆高温燃料电池的性能分析与参数优化[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1443-1446, 1474. YANG Zhimin, LIN Bihong. Performance analyses and parametric design strategies of irreversible high temperature fuel cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1443-1446, 1474(in Chinese).
- [30] 陈维荣, 刘嘉蔚, 李奇, 等. 质子交换膜燃料电池故障诊断方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4712-4721. CHEN Weirong, LIU Jiawei, LI Qi, et al. Review and prospect of fault diagnosis methods for proton exchange membrane fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4712-4721(in Chinese).
- [31] 李奇, 刘嘉蔚, 陈维荣. 质子交换膜燃料电池剩余使用寿命预测方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2365-2375. LI Qi, LIU Jiawei, CHEN Weirong. Review and prospect of remaining useful life prediction methods for proton exchange membrane fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2365-2375(in Chinese).
- [32] ABOMAZID A M, EL-TAWHEEL N A, FARAG H E Z. Novel analytical approach for parameters identification of PEM electrolyzer[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(9): 5870-5881.
- [33] 朱静, 赵静欣. 质子交换膜燃料电池系统数字孪生故障诊断模型研究[J]. 控制理论与应用, 2022, 39(3): 527-534. ZHU Jing, ZHAO Jingxin. Digital twin fault diagnosis model analysis of proton exchange membrane fuel cell systems[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(3): 527-534(in Chinese).
- [34] KIM E, PARK J, CHO J H, et al. Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(3): 1737-1743.
- [35] 刘海镇, 徐丽, 王新华, 等. 电网氢储能场景下的固态储氢系统及储氢材料的技术指标研究[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3376-3384. LIU Haizhen, XU Li, WANG Xinhua, et al. Technical indicators for solid-state hydrogen storage systems and hydrogen storage materials for grid-scale hydrogen energy storage application[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3376-3384(in Chinese).
- [36] 严思韵, 周登极. 综合能源天然气网混氢运输的仿真与调度综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8816-8831. YAN Siyun, ZHOU Dengji. Review of simulation and scheduling of hydrogen-blended transportation in natural gas network of integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8816-8831(in Chinese).
- [37] 徐钢, 薛小军, 张钟, 等. 一种基于电解水制氢及甲醇合成的碳中和能源技术路线[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 191-200. XU Gang, XUE Xiaojun, ZHANG Zhong, et al. A new carbon neutral energy technology route based on electrolytic water to hydrogen and methanol synthesis[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 191-200(in Chinese).
- [38] 张红, 袁铁江, 谭捷, 等. 面向统一能源系统的氢能规划框架[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 83-93. ZHANG Hong, YUAN Tiejia, TAN Jie, et al. Hydrogen energy system planning framework for unified energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 83-93(in Chinese).



赵波

在线出版日期: 2024-11-15。

收稿日期: 2024-01-11。

作者简介:

赵波(1977), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为分布式电源、储能及微电网等相关技术等, zhaobozju@163.com。

(责任编辑 李泽荣)