

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005

# 海上风电—氢能综合能源监控系统设计

杨源<sup>✉</sup>, 陈亮, 王小虎, 谭闻

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的] 针对大规模的海上风电投产后消纳问题, 提出了海上风电—氢能综合能源监控系统。[方法] 提出了海上风电—氢能综合能源监控系统的系统架构、分析了陆上加氢站、海上制氢站、海上风电机组各监控子系统的要求, 并给出了能量管理的要求。[结果] 实现了实时数据采集、顺序控制、发电预测及计划、分布式电源管理、制氢负荷管理的要求。[结论] 系统达到了自发自用, 短时储电, 长期储氢, 负荷可控的控制要求。方案切实可行, 有望于工程应用推广。

**关键词:** 海上风电; 氢能; 综合能源监控系统; 体系架构; 功能要求

中图分类号: TK89; TK91

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0035-06

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design of Integrated Offshore Wind Power-hydrogen Energy Monitoring System

YANG Yuan<sup>✉</sup>, CHEN Liang, WANG Xiaohu, TAN Wen

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

**Abstract:** [Introduction] In order to solve the problem of large-scale offshore wind power consumption after commissioning, the integrated offshore wind power-hydrogen energy monitoring system is proposed. [Method] This article analyzed the system architecture, the requirements of each monitoring subsystem of the onshore hydrogen refueling station, offshore hydrogen production station and offshore wind turbine. In this way, the energy management requirements was stratified. [Result] It can realize the requirements of real-time data collection, sequence control, power generation prediction and planning, distributed power management, and hydrogen production load management. [Conclusion] Therefore, it can meet the control requirements of spontaneous self-use, short-term power storage, long-term hydrogen storage, and controllable load. The scheme is practical and feasible, and is expected to be popularized in engineering applications.

**Key words:** offshore wind farm; hydrogen energy; integrated energy monitoring system; architecture; functional requirement

当前海上风电发展如火如荼, 以广东省为例, 到2020年底, 建成投产2 GW以上。到2030年底, 建成投产海上风电装机容量约30 GW。大规模的海上风电投产后, 如何解决海上风电的并网及消纳问题, 成为当前迫切的问题。随着氢能技术, 特别是制氢、储氢技术的发展, 以风电制氢为代表的新能源制氢技术, 逐步成熟, 基本具备了产业化的条件。因此, 突破传统的氢能概念, 利用海上风电直接制备氢气, 并通过液氢或高压氢的储运技术, 送

出到氢能源市场。通过海上风电制氢, 所获得的“绿氢”无碳、可储存、可运输和分散的特点, 使得海上风电开发跨越电力输送的渠道, 而成为与石油和天然气类似的, 而且是一种绿色的, 优质能源战略能源类型。

### 1 海上风电—氢能综合能源系统概述

海上风电—氢能综合能源系统包括海水淡化装置、水电解制氢装置、压缩储氢装置、风电机组监控系统及配套的电气接入装置等。其中, 制氢系统集成布置于海上升压站, 储氢和加氢部分布置在陆上集控中心。储氢系统的高纯氢气可作为化工原料使用, 实现系统的“电氢”联供。

收稿日期: 2020-04-20 修回日期: 2020-05-25

基金项目: 中国能建广东院科技项目“国家能源局《能源技术创新“十四五”规划》氢能领域编制研究”(EV05561W); 中国能建广东院科技项目“海上风电智能运维策略研究”(ER05281W)

海上风电—氢能综合能源系统的定义是：利用间断式、不均衡的风电制氢、储氢的综合能源系统，该系统包括风力发电、水电解制氢系统、储氢装置、燃料电池发电装置、配电设施及有关的管线。其中水电解制氢装置的定义是：以水电解工艺制取氢气，由水电解装置、分离器、冷却器等设备组成的统称。

海上风电—氢能综合能源系统流程示意图1。由风力发电的电能供给水电解槽制氢，所获得的氢气经加压后，通过高压管道传输至陆上集控中心加氢站进行存储。

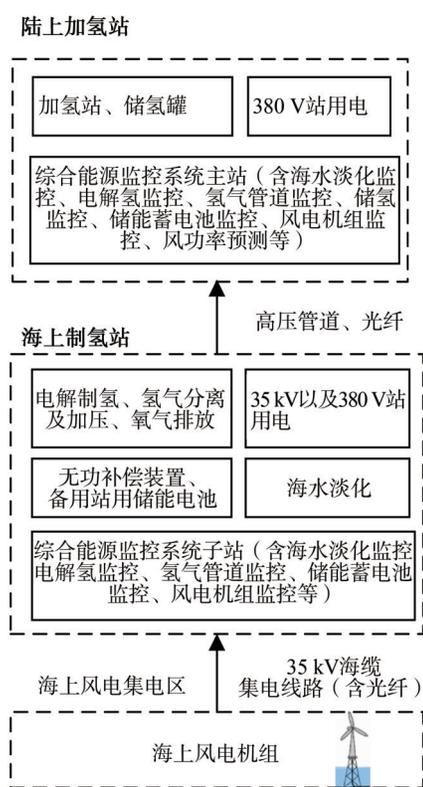


图1 海上风电—氢能综合能源系统流程示意图

Fig. 1 The schematic diagram of offshore wind power-hydrogen energy integrated energy system process

### 1.1 陆上加氢站

包括高压氢气贮存单元及氢气减压分配盘。高压储氢系统是将碱性电解槽制氢系统经压缩加压后的氢气，储存在高压储氢瓶组中，氢气贮存罐安装在室外。减压分配盘是为了使用户从氢气贮存罐中获得减压后的氢气，并配有安全阀。

### 1.2 海上制氢站

通过接收风电机组产生的电能，在电解槽中产

生氢气，并通过分离、干燥、提纯等步骤产出纯度99.99%、压力3.0 MPa的高纯氢气。高纯氢气通过加压经管道，送至陆上加氢站。水电解制氢系统包括：水电解槽、海水淡化、氢气纯化装置和氢气压缩机等设备，其产生的氧气直接排出大气。

当海上制氢站需要黑启动时，以UPS作为启动电源，先通过备用站用储能电池建立直流母线电压进而建立交流母线电压和频率，逐个投入装置自身用电负荷以及模拟风电机组发电系统，之后可按需求投入其它负荷和电解制氢装置。直流母线通过双向DC/AC变流器实现交直流电流转换，其中交流侧为380 V交流母线，接有电解水制氢装置、储氢系统用电、UPS电源等，同时在35 kV侧接有无功补偿装置；直流侧为220 V直流母线，接有备用站用储能电池，具备与380 V交流母线双向变流功能。

### 1.3 海上风电机组

海上风电机组可接受陆上综合能源监控系统的命令，根据事先约定的控制策略自动调整和控制风电场每台机组的能量输出能力，从而最终实现风电场的有功、无功控制。

综合能源监控系统需要保证风机的安全运行和制氢效益的最大化，主要由自动发电控制子系统和自动电压控制子系统组成来实现对整个风电场的调度及控制。

## 2 海上风电—氢能综合能源监控系统架构

### 2.1 系统架构

海上风电—氢能综合能源监控系统的系统典型结构图如图2所示。它可满足风电机组系统接入、电解制氢、海水淡化、储能电池等的集配电需求，基本实现内部电力电量平衡，并实现负荷预测、发电预测、短时功率平衡、经济调度、电能质量管理等功能。达到自发自用，短时储电，长期储氢，负荷可控的控制要求。

海上风电—氢能综合能源监控系统至少进行下列控制：海上风电机组、储能电池等电源和水电解制氢、海水淡化等负荷的手动/自动控制；所有电磁阀（气动阀）及泵的控制状态显示，手动/自动的选择和闭锁；当制氢或加氢的出口露点高或含氧量超过规定值时，应自动退出运行，并发出报警信号。

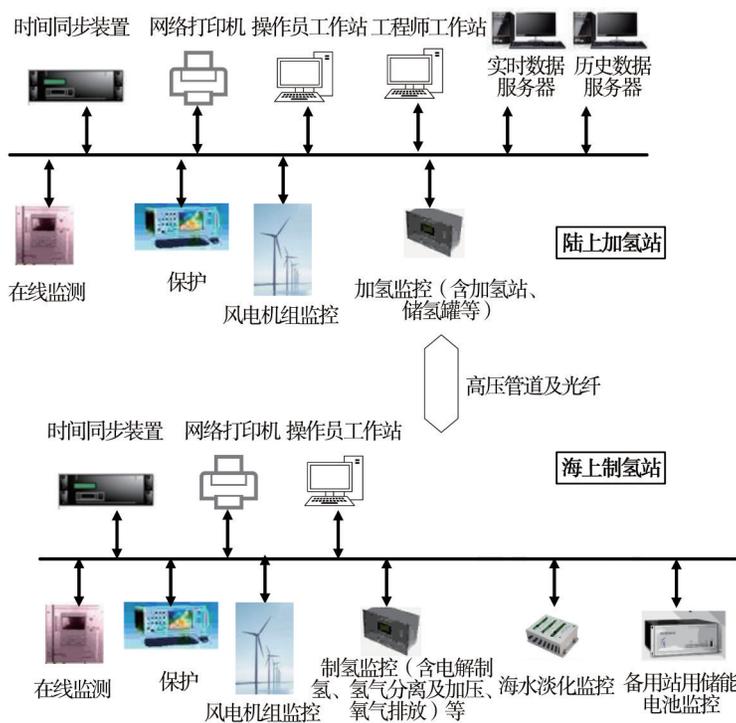


图2 海上风电—氢能综合能源监控系统架构图

Fig. 2 The architecture diagram of offshore wind power-hydrogen energy integrated energy monitoring system

因此,配置了以下硬件架构:(1)配置实时服务器、历史服务器、工作站、交换机/路由器等主要设备以及打印机、对时等;(2)包含数据采集、数据管理、网络通信、报表及权限等模块;(3)支持接收北斗、GPS信号对时;(4)可支持光纤、网络及无线通信。

### 2.1.1 实时采集数据

#### 2.1.1.1 仪表数据

包括但不限于:除盐水箱水位、碱液箱液位、制氢设备水位、电解槽温度、制氢机出口氢压、制氢站出口露点、制氢站出口氢纯度、碱液循环流量、站内含氢量、气体分离洗涤罐液位、氧中氢、氢中氧、各储氢罐压力等。

其中数据采集处理单元应满足以下要求:(1)采集通道的输入电流范围为4 mA~20 mA,最大允许误差±0.5%FS;(2)监测数据的采样频率为每秒1次;(3)显示的监测数据为每分钟数据的平均值;(4)具有30天分钟数据平均值的存储容量;(5)具有掉电保存数据的功能;(6)具有每10 min向数据处理中心传输一次分钟数据包的功能;(7)具有实时报警的功能;(8)断电后能够继续工作72 h。仪表数据技术参数表如表1所示:

表1 仪表数据技术参数表

Tab. 1 The parameters of instrument data technical

通道名称	报警阈值
制氢工作压力	工作压力上限
分离器液位	液位差压上限
氢气纯度	氢气含量≥1.5%(体积比)
制氢工作温度	工作温度上限
交流工作电压	供电缺相或三相全无
交流工作电流	交流工作电流上限
直流工作电压	直流工作电压上限
直流工作电流	直流工作电流上限
制氢室氢气泄漏浓度	达到0.4%(体积比)
储氢压力	储氢压力上限
储氢室氢气泄漏浓度	达到0.4%(体积比)

#### 2.1.1.2 电气量测数据

1) 35 kV集电海缆以及风电机组的断路器、隔离开关和接地刀闸的位置信息。

2) 风力发电机组、储能电池、制氢负荷的三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、功率因数、电能质量、频率。同时,风力发电机组、储能电池的有功电量和无功电量。

3) 无功补偿装置的三相电压、三相电流、无功功率。

### 2.1.1.3 其他数据

风力发电功率预测数据：(1) 理论功率模型：资源法理论功率、样板机理论功率、全场机头风速理论功率；(2) 气象灾害预警模块：台风预警、寒潮预警、冰雹预警；(3) 发电量预测模型：提供电力交易用0~4 h、0~24 h、0~72 h、0~168 h的发电量预测。

### 2.1.2 顺序控制

顺序控制的控制对象范围：仪表、阀门、断路器、负荷开关、变压器、无功补偿设备等。对于顺序控制设置必要的分步操作、成组操作或单独操作等，并有中断的操作功能，还应设有必要的步骤时间和状态指示，必须的选择和闭锁功能。具体要求如下：

1) 能够按照预先设定的顺序和流程控制设备动作，实现的基本功能包括启动、停运、黑启动等。

2) 实现制氢站的切/投顺控、电解液补充系统启/停顺控。对电磁阀门、泵等设备，由控制系统自动控制运行。其中泵等设备还能通过操作站对其设置闭锁控制，以便防止误操作。

3) 实现自动调节功能。根据水箱水位的高/低控制进水阀的关闭/打开。根据电解槽水位的高/低控制进水泵的停运/启动。

4) 对开断设备具备防误操作功能。

5) 具备根据功率优化控制指令或人工设定值对风电机组、储能、制氢负荷等进行实时功率控制，保证安全稳定运行。同时，具备电压和无功功率功能。

### 2.1.3 软件界面

1) 实时监视画面支持系统主接线图、网络图、地理分布图、运行工况图和通信网络图等。

2) 具备统计分析与评估功能，包括风资源分析、制氢能耗和效益分析、可靠性分析、电能质量分析等。

3) 根据风能资源数据进行资源分析，并进行风功率预测。

4) 具备能耗分析、节能分析、成本核算、效益分析、电能质量分析等功能。

## 2.2 陆上加氢站监控子系统

在启动工况时，综合能源监控系统对管道和设

备进行氮气置换，待氢气系统中氧气的体积分数 $\leq 0.5\%$ 且氢气体积分数 $\leq 0.4\%$ 时，停止氮气置换。氮气置换完成后进行氢气置换，对系统进行氢气置换，待氢气系统中氧气体积分数 $\leq 0.4\%$ 且氢气体积分数 $\geq 99.9\%$ 时，氢气系统完成了氢气置换，开启氢气瓶组截止阀，对储氢瓶组提供氢气。

运行过程中，综合能源监控系统通过氢气侧漏仪对环境中的氢气浓度进行监测，当环境中氢气浓度超过 $0.5\%$ 时，启动强制通风机排气，当环境中氢气浓度超过 $1\%$ 时，停机检查。当系统中压力值超过安全阀的设定值时，安全阀通过排放管线对氢气进行泄放。

在停机工况时，综合能源监控系统关闭氢气瓶组截止阀，对系统管道和设备进行氮气置换，待氢气系统中氧气的体积分数 $\leq 0.5\%$ 时，停止氮气置换。

综合能源监控系统可实时采集氢气储存罐压力和供氢母管压力。其中，加氢站报警和联锁信号包括：加氢站氢压低（联锁）、加氢站氢压高（联锁）、各氢气储存罐压力高/低（报警）。同时，加氢站包括以下温度检测项目：气体（氢气、氧气）出口温度；氢气过滤器温度；环境温度；防火器后氧温度；泵换热器后温度等。

### 2.3 海上升压站制氢站监控子系统

综合能源监控系统可采用自动调节、顺控和远控操作相结合的控制方式，自动调节包括电解槽和氢、氧分离器水位控制，顺序控制包括电解槽的投运、停止的控制。

综合能源监控系统至少进行下列控制：

1) 所有电磁阀（气动阀）的打开及关闭操作，电气设备的启停控制。

2) 当制氢站出口露点高或含氧量超过规定值时，自动退出制氢站运行，并发出报警信号。

3) 对海水淡化处理各工艺系统（包括海水淡化预处理系统，海水超滤系统等）的所有被控对象进行监控，并完成设备的联锁保护，实现无人值班。

4) 可实时进行无功补偿，维持 $35\text{ kV}$ 集电海缆电压。同时，对备用站用储能电池进行充电。

综合能源监控系统可实时采集以下仪表内容：电解槽水位；电解槽温度；氢气发生器出口氢压；制氢站出口露点；制氢站出口氢纯度；制氢站出口

氧纯度;车间含氢量;氢气分离器液位;氧气分离器液位等。

综合能源监控系统可实时采集以下压力内容:干燥装置出口氢气压力;供氢母管压力;水电解制氢装置的氢侧、氧侧压力和氢氧压差;充氮口调节门后压力;过滤器后压力;补水泵出口压力;除盐水出口压力;氢气汇流排减压阀后压力;氢气汇流排压力;氢气压缩机进气、排气压力。

综合能源监控系统可实时采集以下温度内容:气体(氢气、氧气)出口温度;氢气过滤器温度;环境温度;防火器后氧温度;泵换热器后温度。

综合能源监控系统具备报警和联锁信号如下:

1) 水电解部分:水箱水位高(报警);水箱水位低(联锁);电解槽温度高(联锁);冷却水进口压力(联锁);碱液循环流量低(联锁)。

2) 氢气及氧气部分:制氢机出口氢压高(联锁);制氢站出口露点高(联锁);制氢站出口氢纯度低(联锁);氧气侧出口含氢量高(联锁);氢气侧出口含氧量高(联锁);检漏报警仪越限(联锁)。

## 2.4 风电机组监控子系统

综合能源监控系统可具备风机监控功能,实现风电机组的远程控制,包括远程开机、停机、左右偏航、复位等。同时,可对风电场实时信息进行以下显示:

1) 风电场实时功率;正常运行、故障停机、检修等信息。

2) 各个风电机组的实时发电以及功率显示。

3) 报警事件列表。当预先定义的风场级别的报警事件发生时,报警窗口将会显示出相关报警信息,以及用恰当的方式提醒注意并处理。

4) 风机基本信息。包括:风机经纬度、单机容量、轮毂高度、叶轮直径、功率曲线等。

5) 风机实时状态数据。包括:环境参数:风速、风向、温度、湿度等;电气参数:电压、电流、频率、功率、功率因数、发电量、UPS状态等。

## 3 海上风电—氢能综合能源监控系统能量管理

### 3.1 发电预测及计划

综合能源监控系统通过历史数据、实测数据等

进行风电场的发电功率预测,配置风电资源监测功能,并配置风力发电功率预测功能。包括但不限于:

1) 根据风功率预测系统的预测数据、风电机组的实时运行数据、制氢负荷特性,合理安排风电机组发电机组、制氢计划、储能充放电计划。

2) 可对海上风电场的无功电压运行进行控制。

### 3.2 分布式电源管理

综合能源监控系统应对风电机组和储能系统进行发电管理,包括运行管理、检修状态管理、储能荷电状态管理、主从电源设置等。包括但不限于:

1) 对风电机组和储能系统进行发电管理,包括风电机组管理、储能荷电状态管理等。

2) 对风电机组和储能系统进行检修状态管理,包括检修挂牌、检修时间设置等。

3) 对储能系统的荷电状态进行状态管理,储能荷电状态过高/过低时能够预警。

### 3.3 制氢负荷管理

综合能源监控系统应根据系统负荷可靠性的要求以及中断供电对系统运行及人身安全、经济损失等因素,对负荷进行分类管理。包括但不限于:

1) 具备根据制氢负荷的实时监测数据对制氢计划进行实时管理。

2) 对氢气进行管理,包括氢气消耗统计、剩余氢气计算和显示、氢气存量预警等。

3) 能对各制氢负荷终端实施限电策略,可包括控制轮次、控制时段、功率定值、电量定值等。

## 4 结论

本文对海上风电—氢能综合能源监控系统的系统架构、分析了陆上加氢站、海上制氢站、海上风电机组各监控子系统的要求,并给出了能量管理的要求。该系统可满足风电机组系统接入、电解制氢、海水淡化、储能电池等的集配电需求,基本实现内部电力电量平衡,并实现负荷预测、发电预测、短时功率平衡、经济调度、电能质量管理等功能。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 风电场工程110 kV~220 kV海上升压变电站设计规范:NB/T 31115—2017[S]. 北京:中国电力出版社, 2017.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海上风力发电场设计规范: GB/T 51308—2019 [S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水电解制氢系统能效限定值及能效等级: GB 32311—2015 [S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 小型氢能综合能源系统性能评价方法: GB/T 26916—2011 [S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 氢气站设计规范: GB 50177—2005 [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水电解制氢系统技术要求: GB/T 19774—2005 [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [7] 中国气象局. 固定式水电解制氢设备监测系统技术要求: QX/T 248—2014 [S]. 北京:中国标准出版社,2014.
- [8] 中国电力企业联合会. 微电网监控系统技术规范: T/CEC 148—2018 [S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [9] 中国电力企业联合会. 微电网能量管理系统技术规范: T/CEC 149—2018 [S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [10] 阳熹, 杨源. 智慧型海上风电场一体化监控系统方案设计 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(1): 42-48.
- YANG X, YANG Y. Design of smart offshore wind farm integration monitoring system [J]. Southern Energy Construction,

2019, 6(1): 42-48.

#### 作者简介:



杨源

杨源 (通信作者)

1990-, 男, 广东湛江人, 工程师, 硕士, 从事海上风电新能源利用研究 (e-mail) yangyuan@gedi.com.cn。

#### 陈亮

1984-, 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统电气二次线设计 (e-mail) chenliang2@gedi.com.cn。

#### 王小虎

1974-, 男, 学士, 高级工程师, 从事电力系统电气二次线设计 (e-mail) wangxiaohu@gedi.com.cn。

#### 谭闻

1988-, 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统电气二次线设计 (e-mail) tanwen@gedi.com.cn。

(责任编辑 郑文棠)

