



团 体 标 准

T/CES XXXX—XXXX

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试规范

Test Specification of Prefabricated Cabin Type Compact Renewable Energy
Cogeneration System for Electricity, Heat and Hydrogen
(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 4

4 总则 4

5 测试条件 5

6 安全测试 5

7 控制能力测试 8

8 能效测试 9

9 入网适应性测试 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会××× (**专业**)工作组归口。

本文件起草单位：国网浙江省电力有限公司、同济大学、北京四方继保自动化股份有限公司、清华大学、河南豫氢动力有限公司、中国船舶集团有限公司第七一八研究所、中国有研科技集团有限公司。

本文件主要起草人：刘敏、吴启亮、张雪松、李文博、张存满、史翊翔、李爽、王昱瑞、张凤新、刘帅、涂正凯、常华伟、孟晓宇、汪飞杰、卢淼、王树茂、刘树。

本文件为首次发布。

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试规范

1 范围

本标准规定了预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统总则、测试条件，描述了安全测试、控制测试、能效测试、入网适应性测试等方面的测试步骤。

本文件适用于可离网型的兆瓦级及以下风能、太阳能等可再生能源电力转换、储存场景，耦合碱性电解制氢、固态储氢、燃料电池和热管理系统等功能模块紧凑化集成的电热氢联产系统的测试。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1413	集装箱 分类、尺寸和额定质量
GB/T 4208	外壳防护等级（IP代码）
GB/T 5099	钢质无缝气瓶
GB/T 5831	气体中微量氧的测定 比色法
GB/T 5832.1	气体分析 微量水分的测定 第1部分:电解法
GB/T 5832.2	气体分析 微量水分的测定 第2部分:露点法
GB/T 6285	气体中微量氧的测定 电化学法
GB/T 14549	电能质量 公用电网谐波
GB/T 15543	电能质量 三相电压不平衡
GB/T 16895	建筑物电气装置
GB/T 19774	水电解制氢系统技术要求
GB/T 20626.1	特殊环境条件 高原电工电子产品 第1部分：通用技术要求
GBT 24337	电能质量 公用电网间谐波
GB/T 24499	氢气、氢能与氢能系统术语
GB/T 27748.2	固定式燃料电池发电系统 第2部分:性能测试方法
GB/T 36547	电化学储能系统接入电网技术规定
GB/T 36548	电化学储能电站接入电网测试规程
GB/T 28816	燃料电池 术语
GB/T 33292	燃料电池备用电源用金属氢化物储氢系统
GB/T 34131	电力储能用电池管理系统
GB/T 34542.2	氢气储存输送系统 第2部分:金属材料与氢环境相容性试验方法
GB/T 34542.3	氢气储存输送系统 第3部分:金属材料氢脆敏感度试验方法
GB/T 34583	加氢站用储氢装置安全技术要求
GB/T 37562	压力型水电解制氢系统技术条件
GB/T 43528	电化学储能电池管理通信技术要求
GB/T44026	预制舱式锂离子电池储能系统技术规范
GB/T 44723	氢燃料内燃机 通用技术条件
GB 50150	电气装置安装工程电气设备交接试验标准
GB 50156	汽车加油加气加氢站技术标准
GB 50166	火灾自动报警系统施工及验收规范
GB 50168	电气装置安装工程电缆线路施工及验收规范
GB 50171	电气装置安装工程盘、柜及二次回路结线施工及验收规范
GB 50516	加氢站技术规范

DL/T 596	电力设备预防性试验规程
DL/T 995	继电保护和电网安全自动装置检验规程

3 术语和定义

GB/T 19774、GB/T 24499、GB/T 28816 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

紧凑型可再生能源电热氢联产系统 Compact Renewable Energy Cogeneration System for Electricity, Heat and Hydrogen

基于太阳能、风能等可再生能源，通过集成化技术将发电、制氢与热（冷/热）供应功能相结合的系统，能够同步输出电能、氢能及热能，并利用模块化设备实现能源高效转换、存储与梯级利用，以满足用户多元用能需求，推动能源系统低碳化发展的综合供能单元。

3.2 水电解制氢装置 the installation of hydrogen gas producer by electrolysis water

以水为原料，由水电解槽、氢（氧）气液分离器、氢（氧）气冷却器等设备组合而成，利用水电解的方式制取氢气的装置。

3.3 碱性水电解制氢模块 hydrogen production module by alkaline water electrolysis

以碱性电解质（如氢氧化钾或氢氧化钠）为电解液，利用直流电作为能源，由电解槽、气液分离装置、循环水泵、换热器、气体纯化装置及辅助系统组成的模块化装备的总称。

3.4 变压吸附提纯氢装置 the installation of hydrogen purification by pressure swing adsorption

以各类含氢气体为原料，采用变压吸附法，利用多个吸附塔从原料气中提取氢气的工艺设备组合的统称。

3.5 变压吸附提纯氢系统 hydrogen purification system by pressure swing adsorption

以变压吸附法从各类含氢气体中提纯制取氢气，由变压吸附装置及氢气加压、储存、纯化、灌装等操作单元组成的工艺系统的统称。

3.6 固态储氢装置 solid state hydrogen storage device（固态储氢模块 solid state hydrogen storage module）

利用材料对氢气的物理吸附和化学吸附作用将氢气存储在固体材料中。物理吸附机制是指通过范德华力将氢分子可逆地吸附在比表面积高的多孔材料。化学吸附机制中，氢一般是以离子键或共价键与其他元素结合，生成金属氢化物等材料，在一定条件下可逆地吸收和释放氢气。

3.7 储氢容器 hydrogen storage container

设计用于容纳氢气、金属氢化物及其内部组件的容器。

3.8 燃料电池模块 fuel cell module

以燃料电池为核心，由燃料供给与循环系统、氧化剂供给系统、水/热量管理模块和控制系统等辅助系统设备组成的发电系统。燃料电池系统源于国家标准的术语，热电联供模块源于任务书中的规定。在本标准中燃料电池系统等同于热电联供模块。

4 总则

4.1 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统外观应满足下列要求：

- 外观完整,无结构形变、剥落、锈蚀及裂痕等现象；
- 舱门和开关操作灵活；
- 对外开放的通信接口、电源接口、干接点接口、氢气接口等应有明确的标识；
- 铭牌、标志、标记完整清晰。

4.2 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统组装前，应由供货商对电制氢、储氢、氢发电、电力电子等组成单元进行型式试验。检测合格后，方可在集装箱中集成。

4.3 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统组装后,应由统一集成商进行出厂试验。检测合格后,方可运往现场进行安装。

4.4 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统的组成单元应具备结构紧凑的特点,不宜采用运行温度在极高或极低条件下的电制氢、储氢、氢发电单元。

4.5 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统组成单元单体检测要求:

- a) 用于系统储氢的钢瓶以及氢气连接管路宜进行压力试验、气密性试验、泄漏量试验,并应符合 GB 50516 规定的要求;
- b) 采用电解槽作为电制氢单元的电热氢联产系统,氢气质量测试应参照 GB/T 5831、GB/T 5832.1、GB/T 5832.2、GB/T 6285 中的方法,宜采用连续监测仪器;
- c) 采用氢气瓶作为储氢单元的电热氢联产系统,可参照 GB/T5099 规定的测试项目及开展单体测试;
- d) 采用金属氢化物作为储氢单元的电热氢联产系统,可参照 GB/T 33292 规定的测试项目及开展单体测试;
- e) 采用燃料电池作为发电单元的电热氢联产系统,可参照 GB/T 27748.2 规定的测试项目及开展单体测试;
- f) 采用氢内燃机作为发电单元的电热氢联产系统,可参照 GB/T 44723 规定的测试项目及开展单体测试;
- g) 应定期开展金属材料与氢气环境相容性试验及氢脆敏感度试验,相容性试验应符合 GB/T 34542.2 的规定,氢脆敏感度试验应符合 GB/T 34542.3 的规定;
- h) 氢气探测器和火焰探测器的检测应符合 GB 50166 规定的要求;
- i) 电热氢联产系统电气设备应单独按照 DL/T 596 的要求进行预试验。

4.6 开展可能影响系统安全的工作后,测试人员应评估重新进行检查和试验的必要性,并严格遵照测试流程进行二次测试工作。

4.7 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统应先进行安全性测试及控制能力测试,确认达到测试条件后,方可进行能效测试及入网适应性测试。

5 测试条件

5.1 测试环境

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统在下列条件下应正常工作:

- a) 环境温度: 0°C~45°C;
- b) 空气相对湿度: <95%, 无凝露;
- c) 海拔高度: <2000m; 当>2000m 时, 符合 GB/T 20626.1 的规定。

5.2 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试前,应确认组成单元型式测试报告及出厂试验报告齐全,且在有效期内。

5.3 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试前,应确认通信接口、电源接口、干接点接口、氢气接口、市用水电接口均牢固连接且管道通畅。

5.4 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试前,应确认通信接口、电源接口、干接点接口、氢气接口、市用水电接口均牢固连接且管道通畅。

5.5 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统测试前,应在舱体内部设置便携式氢气泄漏报警仪、可燃气体泄漏报警仪,气体泄漏浓度达到 20%LEL 时,应中止测试并强制预制舱内通风。

6 安全测试

6.1 氢安全测试

6.1.1 氢泄漏布局有效性测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统氢泄漏布局有效性测试应参照以下步骤进行:

- a) 确定典型氢泄漏点位置,在泄漏点处以 0.8 m/s \pm 0.2 m/s 的速率释放气瓶氢气;
- b) 通过主控系统氢浓度传感器监测并记录多点位的氢浓度变化情况;

- c) 氢浓度达到预警条件前，关闭管道阀门，停止氢气泄漏；
- d) 打开排风系统，直至氢浓度传感器监测值达到极小值；
- e) 改换氢泄漏点位置，重复 a~d)，直至完成所有典型氢泄漏点测试；
- f) 对比各实验组下的单个氢浓度变化情况与试验前仿真结果；
- g) 关闭气源及电源，检查仪器状况是否完好，清理现场。

6.1.2 氢泄漏响应动作时间测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统氢泄漏响应动作时间测试应参照以下步骤进行：

- a) 连接计算机继电保护测试仪与预制舱主控系统；
- b) 向电热氢联产系统或其等效模块中以 500 mL/min 的流量释放气瓶氢气，通过氢浓度传感器观测舱内实时氢气浓度；
- c) 监测实验舱内氢浓度达到预警条件后停止氢气释放；
- d) 通过计算机继电保护测试仪测量预制舱主控系统从收到报警信号到发出控制指令的响应时间；
- e) 重复 b~d)步骤 3~5 次，并取平均值。

6.1.3 系统气密性测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统气密性测试应参照以下步骤进行：

- a) 紧固电制氢、储氢及氢发电单元间的法兰、阀门等各管路接口；
- b) 关闭氢发电管的对外排气管道阀门，并打开单元间连接管道的阀门，保持单元间传输通道顺畅；
- c) 从电制氢单元外接水气管道持续通入氮气或无油空气作为压力试验介质，通过单元压力传感器或压力仪表监测系统压力；
- d) 试验压力宜为电制氢、储氢及氢发电单元最低运行压力的 1.05 倍，系统达到试验压力后，停止试验介质释放，关闭电制氢单元外接水气管道阀门；
- e) 系统保压 10 分钟，降至最低运行压力，并保压至少 30 分钟，通过水淹法或泡沫法观察保压过程中焊缝及连接部位泄漏情况；
- f) 开启氢发电单元出口管路阀门至系统压力处于微正压状态。

6.1.4 系统泄漏量测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统气密性测试应参照以下步骤进行：

- a) 紧固电制氢、储氢及氢发电单元间的法兰、阀门等各管路接口；
- b) 关闭氢发电管的对外排气管道阀门，并打开单元间连接管道的阀门，保持单元间传输通道顺畅；
- c) 从电制氢单元外接水气管道持续通入氮气或无油空气作为压力试验介质，通过单元压力传感器或压力仪表监测系统压力；
- d) 试验压力宜为电制氢、储氢及氢发电单元最低运行压力的 1.1 倍，系统达到试验压力后，停止试验介质释放，关闭电制氢单元外接水气管道阀门；
- e) 系统保压 24 小时，记录保压结束后系统压力；
- f) 开启氢发电单元出口管路阀门至系统压力处于微正压状态。

6.2 电气安全测试

6.2.1 绝缘试验

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统绝缘测试应参照以下步骤进行：

- a) 将系统调为停机状态，关闭辅机设备；
- b) 用绝缘电阻测试仪分别连接到集装箱电源接入/电力输出端正负极与接地端；
- c) 测试电压宜为 500VDC，持续测量 30s，通过测量表计读出绝缘电阻值。

6.2.2 接地电阻测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统接地电阻测试应参照以下步骤进行：

- a) 将系统调为停机状态，关闭辅机设备；

- b) 用万用表或摇表分别连接到集装箱开关门、易触碰金属管路与接地端；
- c) 调整万用表测量模式为电阻测量，或将摇表处于“倍率开关”模式下且转至 150r/min，通过测量表计读出电阻值。

6.2.3 电位均衡试验

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统电位均衡试验应参照以下步骤进行：

- a) 将系统调为停机状态，关闭辅机设备；
- b) 将电阻测试仪的两个探针分别连接外露的可导电外壳或者遮栏以及电平台；
- c) 增大测试电流，使测试电流至少达到 0.2 A，记录电阻值；
- d) 将电阻测试仪的两个探针分别连接两个外露可导电外壳或者遮栏；
- e) 增大测试电流，使测试电流至少达到 0.2 A，记录电阻值。

6.2.4 直流耐压试验

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统直流耐压试验应参照以下步骤进行：

- a) 将系统调为停机状态，关闭辅机设备；
- b) 将测试用直流发生器接地，并将外部电源及集装箱电气接口部分连接到试验支架；
- c) 将试验电压值设置为系统耐电压等级的 1.5 倍，启动直流发生器；
- d) 按照 0.5 耐压等级逐步提高直流输入电压至试验电压，且每个电压等级平台保持 1 min；
- e) 试验过程中，密切关注电压值的波动及电弧的出现，如发生异常，应立即停止测试，并进行电气检查；
- f) 试验结束后，逐步降低直流发生器输出量至 0，并关闭直流发生器，拆除试验电路。

6.3 其它安全测试

6.3.1 噪声试验

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统噪声试验应参照以下步骤进行：

- a) 将系统设置为额定制氢运行状态；
- b) 在距离装置柜体前、后、左、右 1m 处，高度 1.5m 处，采用手持式噪声测量仪器进行测量；
- c) 将系统设置为停机状态，等待 30 min 至设备恢复冷态；
- d) 将系统设置为额定发电运行状态，重复步骤 b)，并记录噪声值。

6.3.2 急停试验

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统急停试验应参照以下步骤进行：

- a) 将系统设置为 50%额定制氢运行状态；
- b) 手动拍停集装箱上急停按钮，通过主控系统观察各设备的运行状态；
- c) 将系统设置为停机状态，等待 30 min 至设备恢复冷态；
- d) 将系统设置为 50%额定发电运行状态，重复步骤 b)。

6.3.3 气体纯度测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统气体纯度试验应参照以下步骤进行：

- a) 在电解槽分离纯化单元后端、燃料电池氢气供给系统前端均应设置不少于 1 处的气体取样口；
- b) 控制电制氢系统及发电系统处于热机状态；
- c) 控制制氢功率处于 20%额定功率；
- d) 稳定 10min，从分离纯化单元后端对氢气管路、氧气管路采样，并进行纯度检测；
- e) 调节制氢功率按照 10%额定功率逐级升高，重复步骤 d)，直至达到额定制氢功率；
- f) 关停制氢系统；
- g) 控制发电功率处于 20%额定工作状态；
- h) 稳定 10min，从氢气供给系统前端对氢气管路采样，并进行纯度检测；
- i) 调节发电功率按照 10%额定功率逐级升高，重复步骤 h)，直至达到额定发电功率；
- j) 关停氢发电系统。

7 控制能力测试

7.1 基础功能测试

7.1.1 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统基础功能测试包括通信功能、控制功能、数据采集功能、报警功能测试。

7.1.2 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统基础功能测试应参照以下步骤进行：

- a) 断开电制氢、氢发电单元与外部电气连接，开启主控系统；
- b) 通过信号发生装置发送并接收报文唯一编码（ID）或相关指令，确认串口和网口报文；
- c) 通过信号发生装置向电池管理系统下发所有控制端口的闭合和断开指令，确认控制端口的闭合和断开状态；
- d) 分别在制氢和发电状态下，读取电压、电流、温度、氢浓度、氧中氢含量、循环水流量及温度、储氢压力等参数；
- e) 通过信号模拟装置发送电压越限、电流越限、温度越限、流量越限、液位越限、压力越限、氢中氧浓度越限、氧中氢浓度越限、环境氢气浓度越限、通信异常等指令；
- f) 清除电池管理系统故障信号并复位，关闭主控系统。

7.2 安全联动测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统安全联动测试应参照以下步骤进行：

- a) 断开预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统的电气连接，连通控制柜电源，开启紧急切断阀；
- b) 用氢气浓度不低于 0.8% 的标准气体对准氢泄漏浓度探头少量释放，触发氢浓度报警，确认通风装置、紧急切断阀连锁启动；
- c) 采用氮气对容器及管路进行吹扫置换，确认吹扫后氧含量满足 GB 19774 的要求；
- d) 调节监控的状态参量模拟信号值超过限值范围，确认控制器出现故障报警、故障码与故障等级一致、故障后的工作状态与故障代码规定的故障后工作状态对应；
- e) 模拟低压、高压及通讯中断故障，确认备用电源能投入使用、系统正常停机；
- f) 开启电制氢单元与储氢单元间管道阀门，关闭储氢单元出口阀，启动电制氢单元，电制氢单元与储氢单元间安全联动应满足以下要求：
 - i) 储氢压力超过设置的超压报警值时发出警报；
 - ii) 储氢压力达到最大允许工作压力时连锁电制氢单元停机；
 - iii) 储氢压力达到超压泄放装置动作压力时连锁开启安全阀，超压泄放装置满足 GB/T 34583 的要求；
- g) 开启氢发电单元与储氢单元间管道阀门，关闭储氢单元入口阀门，启动氢发电单元，氢发电单元与储氢单元间安全联动应满足以下要求：
 - i) 储氢压力低于设置的低压报警值时发出警报；
 - ii) 储氢压力低于氢发电单元设置的氢气入口压力低限值时连锁氢发电单元停机；
- h) 恢复预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统的电气连接，连通控制柜电源。

7.3 算法及指令下发时间

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统算法及指令下发时间试验应参照以下步骤进行：

- a) 主控系统校对；
- b) 在调用算法函数开始处打印时间 t_0 ，在调用算法函数结束处打印时间 t_1 ，两者间差值记为运算时间 δt_1 ；
- c) 在生成控制命令开始处打印时间 t_0' ，在控制命令下发前打印时间 t_1' ，两者间差值记为指令时间 δt_2 ；
- d) 计算 $\delta t_1 + \delta t_2$ ，记为算法及指令生成时间；
- e) 重复 b-d) 步骤 5 次，计算算法计算和指令生成的平均时间。

7.4 制氢/发电模式切换时间测试

7.4.1 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统制氢/发电模式切换时间测试是在额定功率条件下，

将系统调至热备用状态，测试由制氢转为发电以及由发电转为制氢模式过程中，系统所需时间的测试。

7.4.2 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统制氢/发电模式切换时间测试应参照以下步骤进行：

- 将电制氢单元、氢发电单元设置为热备用状态，确认储氢单元储氢量不高于额定储氢量的 50%；
- 调节电制氢单元运行在额定功率下，并维持 10 min，同时监控储氢压力不得超过高限值；
- 通过主控系统向电制氢单元发送停机指令、向氢发电单元发送额定功率运行指令，并打印时间 t_0 ；
- 通过主控系统确认电制氢单元到达停机状态且氢发电单元达到额定功率，打印时间 t_1 ，并计算两者差值 δt_1 ；
- 电制氢单元运行在额定功率下 10 min，同时监控储氢压力不得超过低限值；
- 通过主控系统向氢发电单元发送停机指令、向电制氢单元发送额定功率运行指令，并打印时间 t_0' ；
- 通过主控系统确认氢发电单元到达停机状态且电制氢单元达到额定功率，打印时间 t_1' ，并计算两者差值 δt_2 ；
- 重复 b~g) 过程 2 次，由制氢转为发电以及由发电转为制氢模式的切换时间取 3 次测试结果的最大值。

8 能效测试

8.1.1 换热能力测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统换热能力效率试验应参照以下步骤进行：

- 试验前，使制氢系统处于额定制氢工作状态，稳定 30min；
- 用非接触式声波流量计，按照 10s 间隔，分别测量并记录系统换热器单元冷却管路、供热管路流量，取 1min 内平均流量值；
- 通过控制系统读出换热器单元冷却管路、供热管路进出口温度值，或采用热成像仪读出 1min 内平均温度值；
- 根据对流式换热器换热量计算公式分别计算冷却管路、供热管路的内能变换量 ΔQ ，并计算两者比值，即换热效率；
- 关闭制氢系统，启动氢发电系统并处于额定制氢工作状态，稳定 30min；
- 重复步骤 b)~d)；
- 关闭氢发电系统。

8.1.2 储能效率测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统储能效率试验应参照以下步骤进行：

- 试验前，通过开启电制氢或氢发电单元，使储氢单元储氢量处于 50% 满载量状态；
- 以额定制氢功率开启电制氢单元，至储氢单元满载时停止制氢，记录制氢过程中电热氢联产系统的电源能耗 E_1 和辅机能耗 W_1 ；
- 以额定发电功率开启氢发电单元，至储氢单元储氢量处于 50% 满载量时停止发电，记录发电过程中电热氢联产系统的发电量 E_2 和辅机能耗 W_2 ；
- 按照 $(E_2 - W_2) / (E_1 + W_2)$ 计算储能效率；
- 重复 b-d) 步骤 3 次，计算平均储能效率。

8.1.3 热电综合能效测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统热电综合能效试验应参照以下步骤进行：

- 试验前，在集装箱供暖水管进出口端挂接蓄热水箱，并升温至约 50°C，通过开启电制氢或氢发电单元，使储氢单元储氢量处于 50% 满载量状态，并记录水箱蓄水量 Q ；
- 记录蓄热水箱实时温度 T_1 ，同时以额定制氢功率开启电制氢单元，至储氢单元满载时停止制氢，记录制氢过程中电热氢联产系统的电源能耗 E_1 和辅机能耗 W_1 ；
- 以额定发电功率开启氢发电单元，至储氢单元储氢量处于 50% 满载量时停止发电，记录发电过程中电热氢联产系统的发电量 E_2 和辅机能耗 W_2 ，记录此时蓄热水箱实时温度 T_2 ；
- 静置系统 10 分钟，按照 $[E_2 - W_2 + QC \cdot (T_2 - T_1)] / (E_1 + W_2)$ 计算热电综合能效， C 为纯水比热容；

e) 重复 b-d) 步骤 3 次，计算平均热电综合能效。

9 入网适应性测试

9.1 电能质量测试

9.1.1 三相电压不平衡测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统在制氢和发电状态下分别测试，并按照 GB/T 15543 的相关规定进行系统的三相电压不平衡测试。

9.1.2 电压偏差

在空载和额定阻性负载(平衡负载)条件下分别测试变流器交流侧输出电压，幅值偏差应不超过额定电压的 $\pm 5\%$ ，相位偏差应小于 3° 。

9.1.3 谐波测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统在制氢和发电状态下分别测试，按照 GB/T 14549 的相关规定进行系统的谐波测试，按照 GB/T 24337 的相关规定进行系统的间谐波测试。

9.1.4 直流分量测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统直流分量测试应参照以下步骤：

- 将系统与模拟电网装置（公共电网）相连，所有参数调至正常工作条件，且功率因数调为 1；
- 调节系统输入/输出电流至额定电流的 33%，保持 10 分钟；
- 测量系统输入/输出端各相电压、电流有效值和电流的直流分量（频率小于 1Hz 即为直流），在同样的采样速率和时间窗下测试 5 分钟；
- 当各相电压有效值的平均值与额定电压的误差小于 5%，且各相电流有效值的平均值与测试电流设定值的偏差小于 5% 时，采用各测量点的绝对值计算各相电流直流分量幅值的平均值；
- 调节系统输入/输出电流分别至额定电流的 66% 和 100%，保持 10 分钟，重复步骤 c)~d)。

9.2 频率/电压响应测试

9.2.1 频率响应测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统频率响应测试应参照以下步骤：

- 参照 GB/T 36548 的方式，将系统与模拟电网装置相连；
- 设置系统运行在额定制氢状态；
- 调节模拟电网装置频率至 49.52Hz~50.18Hz 范围内，在该范围内合理选择包括临界点的 3 个特征频率进行测试，每个点连续运行至少 5 分钟，应无跳闸现象，否则停止测试；
- 设置储能系统运行在发电状态，重复步骤 c)。

9.2.2 电压响应测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统电压响应测试应参照以下步骤：

- 参照 GB/T 36548 的方式，将系统与模拟电网装置相连；
- 设置系统运行在额定制氢状态；
- 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 86%~109% 范围内，在该范围内合理选择包括临界点的 3 个特征频率进行测试，每个点连续运行至少 5 min，应无跳闸现象，否则停止测试；
- 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 111%~119% 范围内，在该范围内合理选择包括临界点的 3 个特征频率进行测试，每个点连续运行至少 20 s，记录系统运行状态及相应动作电压、动作时间；
- 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 121%~129% 范围内，在该范围内合理选择包括临界点的 3 个特征频率进行测试，每个点连续运行至少 2 s，记录系统运行状态及相应动作电压、动作时间；

- f) 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 21%~84%范围内，在该范围内合理选择包括临界点的 3 个特征频率进行测试，每个点连续运行至少 4 s，记录系统运行状态及相应动作电压、动作时间；
 - g) 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 131%范围内，每个点连续运行至少 1 s，记录系统运行状态及相应动作电压、动作时间；
 - h) 调节模拟电网装置输出电压至拟接入电网标称电压的 19%范围内，每个点连续运行至少 1 s，记录系统运行状态及相应动作电压、动作时间；
- 设置储能系统运行在发电状态，重复步骤c~h)。

9.3 故障穿越测试

9.3.1 低电压穿越测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统低电压穿越测试应参照以下步骤：

- a) 参照 GB/T 36548 的方式，将系统与数据采集系统、电网故障模拟发生装置、公用电网相连；
- b) 选取包含 $0\%U_N$ 和 $20\%U_N$ 在内的 5 个跌落点，在 $20\%U_N < U < 50\%U_N$ 、 $50\%U_N < U < 75\%U_N$ 、 $75\%U_N < U < 90\%U_N$ 三个区间内均有分布，并按照图 1 选取跌落时间；
- c) 测试结束后，断开电网故障模拟发生装置与设备的连接，恢复公用电网供电。

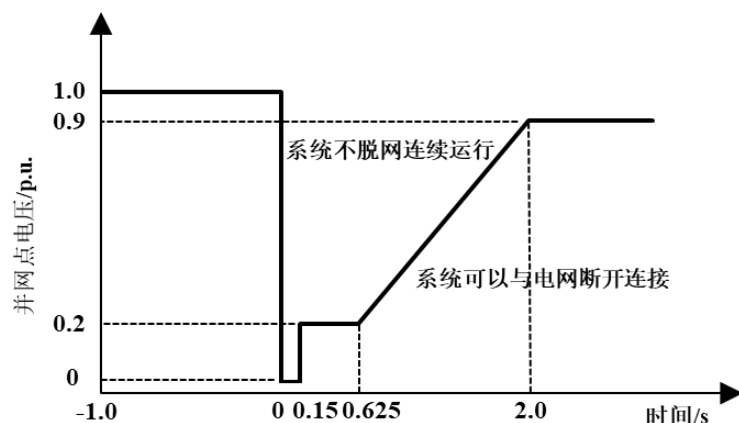


图1 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统低电压穿越要求

9.3.2 高电压穿越测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统电压高电压穿越测试应参照以下步骤：

- a) 参照 GB/T 36548 的方式，将系统与数据采集系统、电网故障模拟发生装置、公用电网相连；
- b) 高电压穿越测试应至少选取 2 个点，并在 $110\%U_N < U < 120\%U_N$ 、 $120\%U_N < U < 130\%U_N$ 两个区间内均有分布，并按照图 2 中高电压穿越曲线要求选取抬升时间。
- c) 测试结束后，断开电网故障模拟发生装置与设备的连接，恢复公用电网供电。



图2 预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统高电压穿越要求

9.4 入网保护测试

9.4.1 涉网保护功能测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统涉网保护功能测试,参照DL/T 995的相关规定进行涉网保护功能测试。

9.4.2 非计划孤岛保护功能测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统非计划孤岛保护功能测试,参照GB/T 36548的相关规定进行涉网保护功能测试。

9.5 功率波动适应性测试

9.5.1 电制氢系统功率波动适应性测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统变功率动态性能试验应记录加/减载过程中氧中氢浓度的变化情况,确保氧中氢始终处于制氢装置最大允许安全范围内,应参照以下步骤进行:

- a) 试验开始前,系统在额定运行状态下运行 30 min 以上;
- b) 开始试验,在额定功率下继续工作 30min 以上;
- c) 以 1s 或更短的时间间隔测量电能输入(含电压、电流、功率)、工作温度、氢气/氧气压力、氢中氧浓度、氧中氢浓度);
- d) 以一定速率将电制氢系统功率从额定功率升高的最大功率,并稳定运行至少 15min 以上;
- e) 将电制氢系统运行目标值设定为制造商规定的最小功率点,开始以允许的最大速率进行功率减载操作,并记录操作开始时刻;
- f) 当电制氢系统功率达到最小功率时(功率减载过程中氧中氢浓度不能超过安全允许的最大值,当氧中氢浓度超过最大值,则需调节降低减载速率,并从试验初始状态 b)步重新开始上述试验),记录对应时刻,并在该功率下稳态运行 30min 以上;
- g) 将电制氢系统运行目标值设定为制造商规定的最大功率点,开始以允许的最大速率进行功率加载操作,并记录操作开始时刻;
- h) 当电制氢系统功率达到最大功率时(功率加载过程中氧中氢浓度不能超过安全允许的最大值,当氧中氢浓度超过最大值,则需调节降低加载速率,并从试验 6 步重新开始上述试验),记录对应时刻,并在该功率下稳态运行 15min 以上;
- i) 重复 d~h),至少 3 个循环;
- j) 记录电制氢系统的额定功率输入、最大/小功率输入、从最小/大功率升高到最大/小功率所需的最短时间,计算电制氢系统的功率调节范围及最大加载/减载速率。

9.5.2 氢发电系统功率响应特性测试

预制舱式紧凑型可再生能源电热氢联产系统应参照以下步骤对电/热功率输出上升/下降响应进行测试:

- a) 电功率输出上升响应应该根据以下过程测试:
 - i) 应确认发电系统达到最小净电功率输出的稳态运行条件;
 - ii) 为了达到额定净电功率输出状态,上升信号应发送至发电系统的控制器;
 - iii) 根据这个控制信号,增加净电功率输出;
 - iv) 测试从电功率输出改变开始到达到额定净电功率输出所用的时间。
- b) 电功率输出下降响应应该根据以下过程测试:
 - i) 应确认发电系统在额定净电功率输出的稳态运行条件下;
 - ii) 为了达到最小净电功率输出状态,下降信号应发送至发电系统的控制器;
 - iii) 根据这个控制信号,减少净电功率输出;
 - iv) 测试达到最小净电功率输出所用的时间。
- c) 热功率输出上升响应应该根据以下过程测试:

- i) 应确认发电系统达到最小热功率输出的稳态运行条件下;
 - ii) 为了达到额定热功率输出状态, 上升信号应发送至发电系统的控制器;
 - iii) 根据这个控制信号, 增加热功率输出;
 - iv) 测试从热功率输出改变开始到达到额定热功率输出所用的时间。
- d) 热功率输出下降响应应该根据以下过程测试:
- i) 应确认发电系统在额定热功率输出的稳态运行条件下;
 - ii) 为了达到最小热功率输出状态, 下降信号应发送至发电系统的控制器;
 - iii) 根据这个控制信号, 减少热功率输出;
 - iv) 测试达到最小热功率输出所用的时间。