

团 体 标 准

XXXX—XXXX

水电解制氢系统适应性评价方法

Method of adaptability evaluation for water electrolysis
hydrogen production system

（征求意见稿）

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国电机工程学会 发 布

目 次

前 言..... I

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 符号..... 2

5 适应性评价指标..... 2

6 适应性评价方法..... 4

附录 A（规范性附录）电流测量值测量氢气产量..... 8

附录 B（规范性附录）电压衰减率试验..... 9

附录 C（规范性附录）耐久性与安全性试验..... 10

附录 D（资料性附录）水电解制氢系统打分及评级表..... 11

参考文献..... 12

前 言

本标准依据 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。

本文件由中国电机工程学会提出。

本文件由中国电机工程学会氢能技术专业委员会归口。

本文件起草单位：中国电力科学研究院有限公司、华北电力大学、中国科学院大连化学物理研究所、重庆大学

本文件主要起草人：XXX

本文件为首次发布。

水电解制氢系统适应性评价方法

1 范围

本文件规定了水电解制氢系统适应性评价指标与评价方法。

本文件适用于水电解制氢系统在新型电力系统电源侧、电网侧、负荷侧场景下的适应性评价；适用于质子交换膜、碱性水电解制氢系统。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 3634.1 氢气 第1部分：工业氢
- GB/T 6285 气体中微量氧的测定 电化学法
- GB 12358 作业场所环境气体检测报警仪 通用技术要求
- GB 16808 可燃气体报警控制器
- GB/T 16839.1 热电偶 第1部分：电动势规范和允差
- GB/T 19774 水电解制氢系统技术要求
- GB 32311 水电解制氢系统能效限定值及能效等级
- GB/T 37562 压力型水电解制氢系统技术条件
- GB/T 37563 压力型水电解制氢系统安全要求
- T/CES 175 质子交换膜水电解制氢系统性能试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

水电解制氢 hydrogen production by water electrolysis

以直流电接入电解槽电解水，获得氢和氧的工艺过程。

3.2

水电解制氢系统 electrolysis hydrogen generation system

电解槽和附属设备、管道及其附件、箱体等构成的制氢系统。

3.3

制氢系统单位能耗 specific energy consumption values for hydrogen production systems

水电解制氢系统在额定工况下运行时，生产标准状况下1m³氢气所消耗的电量。

3.4

调节速率 regulation speed

水电解制氢系统变工况运行时，单位时间内的功率变化率。

3.5

功率控制精度 power control precision

水电解制氢系统功率跟随需求功率指令变化时，其输入功率控制的稳定程度。

4 符号

本标准中所用的符号及其含义列于表1，包括相应的单位。

表 1 符号

符号	定义	单位
t_1	上一时间点	s
t_2	最新时间点	s
t_V	实验时间	h
δ	功率控制精度	%
δ_V	电压衰减率	$\mu\text{V/h}$
T	试验时间	h
I	通过电解小室的直流工作电流	A
n	电解小室数	个
η	电流效率	%
P_m	总输入电功率	kW
M_p	调节速率	kW/s
P_2	最新功率	kW
P_1	上一时刻功率	kW
P	实际测量功率值	kW
P_s	功率设定值	kW
Q	氢气产量	m^3/h
Q_h	实验时间内氢气生成量	m^3
W_Q	平均单位能耗	kWh/m^3
V_1	初始时间水电解制氢系统的总直流电压	V
V_2	测试结束时间水电解制氢系统的总直流电压	V
S	水电解制氢系统适应性评价得分	/
I_i	水电解制氢系统指标得分	/
W_i	水电解制氢系统指标权重	/

5 适应性评价指标

5.1 运行性能指标

5.1.1 一般规定

性能指标应包括水电制氢系统运行过程中的调节速率、功率控制精度、功率波动范围、平均单位能耗等。

5.1.2 调节速率

水电解制氢系统调节速率应为评价周期内，水电解制氢系统跟随需求功率指令变化时的单位时间内的功率变化率。

$$M_p = \left| \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \right| \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- M_p ——调节速率（kW/s）；
- P_2 ——最新功率（kW）；
- P_1 ——上一时刻功率（kW）；
- t_1 ——上一时间点（s）；
- t_2 ——最新时间点（s）。

5.1.3 功率控制精度

水电解制氢系统功率控制精度应为评价周期内，水电解制氢系统功率跟随需求功率指令变化时，其输入功率控制的稳定程度，按下式计算：

$$\delta = \left| \frac{P-P_s}{P_s} \right| \times 100\% \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中,

δ ——功率控制精度;

P ——实际测量功率值 (kW);

P_s ——功率设定值 (kW)。

5.1.4 功率波动范围

水电解制氢系统功率波动范围应为评价周期内,水电解制氢系统功率跟随需求功率指令变化时,其输入功率可以承受的功率波动范围,根据功率波动方向可分为功率波动上限和功率波动下限。

5.1.5 平均单位能耗

水电解制氢系统单位能耗应为评价周期内,水电解制氢系统平均单位能耗。

水电解制氢系统平均单位能耗应按式(3)计算:

$$W_Q = \frac{P_{in}T}{Q_h} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中:

W_Q ——平均单位能耗 (kWh/m³);

T ——试验时间 (h);

P_{in} ——总输入电功率 (kW);

Q_h ——实验时间内氢气生成量 (m³)。

氢气产量计算方法见附录A。

氢气质量应符合GB/T 3634.1标准的要求。

5.2 耐久性指标

5.2.1 一般规定

耐久性指标应包括水电制氢系统运行中的电压衰减率、故障率等。

5.2.2 电压衰减率

水电解制氢系统电压衰减率应为评价周期内,水电解制氢系统运行前后电压变化值与时间的比值。

电压衰减率应按式(4)计算:

$$\delta_V = \frac{V_1-V_2}{t_V} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

δ_V ——电压衰减率 (μV/h);

V_1 ——初始时间水电解制氢系统的总直流电压 (V);

V_2 ——测试结束时间水电解制氢系统的总直流电压 (V);

t_V ——测试时间 (h)。

5.2.3 故障率

水电解制氢系统故障率应为评价周期内,电解制氢系统故障发生的次数与总运行次数的比值。

5.3 运行经济性指标

5.3.1 一般规定

运行经济性指标包含水电制氢系统运行过程中涉及的运行成本、运行收益、设备成本。

5.3.2 运行成本

运行成本包含能源成本、原料成本和运维成本。

水电解制氢系统能源成本应为评价周期内，制取氢气所耗费的电能成本与制氢氢气量的比值。

水电解制氢系统原料成本应为评价周期内，制取氢气所耗费的用水/碱液成本与制氢氢气量的比值。

水电解制氢系统运维成本应为评价周期内，制取氢气所耗费的运行维护成本与制氢氢气量的比值。

5.3.3 成本回收周期

成本回收周期应为水电解制氢系统收回初始投资所需的时间长度。

5.3.4 设备成本

设备成本应包含在水电解制氢系统中购置所需设备的总体费用，主要包括电解槽和附属设备、管道及其附件、箱体等。

5.4 安全性指标

5.4.1 一般规定

安全性指标应包括水电解制氢系统运行中的氢泄露频次、氧中氢超标频次、氢中氧超标频次、电解堆过热频次。

5.4.2 氢泄露频次

氢泄漏频次应为评价周期内，水电解制氢系统发生氢气泄露的次数。

5.4.3 氧中氢含量超标频次

氧中氢含量超标频次应为评价周期内，水电解制氢系统产生氧气中氢气的含量超过安全设定的次数。

5.4.4 氢中氧含量超标频次

氢中氧含量超标频次应为评价周期内，水电解制氢系统产生氢气中氧气的含量超过安全设定的次数。

5.4.5 电解堆过热频次

电解堆过热频次应为评价周期内，水电解制氢系统电解堆温度超过安全设定的次数。

6 适应性评价方法

6.1 一般规定

6.1.1 水电解制氢系统适应性评价场景可考虑系统在电源侧、电网侧、负荷侧不同应用场景发挥的作用不同，分为电源侧新能源消纳、电网侧调峰调频、负荷侧需求响应。

6.1.2 水电解制氢系统的适应性评价应包含运行性能、耐久性、运行经济性、安全性四个方面。

6.1.3 水电解制氢系统应符合 GB 32311、GB/T 37562、GB/T 37563 标准的有关规定。

6.1.4 水电解制氢系统的适应性评价步骤宜包含：

- a) 建立适应性评价指标体系；
- b) 建立指标评分方法，可对水电解制氢系统的每个参数进行打分；
- c) 根据具体适应性评价需求，确定各个指标的权重，权重系数根据具体的电源侧、电网侧、负荷侧场景调整；
- d) 根据应用场景对指标的权重以及指标评分，得到水电解制氢系统对应用场景的适应性评分。

6.2 评价指标体系

6.2.1 水电解制氢系统的适应性评价指标体系由三层组成，第一层为目标层，第二层为准则层，第三

层为指标层。

6.2.2 水电解制氢系统的适应性评价目标层包含不同的适应性评价应用场景。

6.2.3 水电解制氢系统的适应性评价准则层包含运行性能、耐久性、运行经济性、安全性。

6.2.4 水电解制氢系统的适应性评价指标层如表 2 所示。

表 2 评价指标体系

准则层	指标层
运行性能	调节速率
	功率控制精度
	功率波动上限
	功率波动下限
	平均单位能耗
耐久性	电压衰减率
	故障率
运行经济性	运行成本
	成本回收周期
	设备成本
安全性	氢泄露频次
	氧中氢超标频次
	氢中氧超标频次
	电解堆过热频次

6.3 评分方法

6.3.1 水电解制氢系统适应性评分应根据指标得分和相应权重系数，按下式计算：

$$S = \sum I_i \times W_i \dots\dots\dots (5)$$

式中：

S——水电解制氢系统适应性评价得分；

I_i——水电解制氢系统指标得分；

W_i——水电解制氢系统指标权重。

6.3.2 得分计算标准

各个指标的得分计算依据如下：

表 3 评分依据

准则层	指标层	优秀 ≥80 分	平均 [70 分-80 分)	基准 [60 分-70 分)
运行性能	调节速率 %满功率	≥10%/s	[7%/s-10%/s)	[3%/s-7%/s)
	功率控制精度	≤0.5%	(0.5%-0.8%]	(0.8%-1%]
	运行负荷上限	≥120%	[110%-120%)	[100%-110%)
	运行负荷下限	≤10%	(10%-30%]	(30%-40%]
	堆直流电耗 (kWh/Nm3)	≤4.2	(4.2-4.5]	(4.5-5.0]
耐久性	电压衰减率 (μV/h)	≤25	(25-40]	(40-60]
	故障率	≤0.01%	(0.01%-0.05%]	(0.1%-0.5%]
运行经济性	运行成本	≤20	(20-40]	(40-60]

	(元/kg)			
	成本回收周期 (年)	3	5	7
	设备成本 (元/kW)	≤4000	(4000-8000]	(8000-12000]
安全性	氢泄露频次 (次)	≤1	(1-3]	(3-5]
	氧中氢超标频次 (次)	≤1	(1-3]	(3-5]
	氢中氧超标频次 (次)	≤1	(1-3]	(3-5]
	电解堆过热频次 (次)	≤1	(1-3]	(3-5]

注：制定各项性能指标的评分标准后，按照性能表现划分为基准、平均、优秀三个档次。

当指标位于平均与基准的区间时，所得分数按照指标区间相对应的分数区间的线性关系进行打分。

当性能指标优于优秀时，调节速率每提高 2%，分数增加 5 分；功率控制精度每下降 0.1%，分数增加 5 分；运行负荷上限每提高 2%，分数增加 5 分；运行负荷下限每降低 2%，分数增加 5 分；堆直流电耗每降低 0.1kWh/Nm³，分数增加 5 分；电压衰减率每减少 2μV/h，分数增加 5 分；故障率每降低 0.001%，分数增加 10 分；运行成本每降低 2 元/kg，分数增加 5 分；成本回收周期每减少一年，分数增加 10 分；设备成本每降低 100 元/kW，分数增加 1 分；氢泄露频次、氧中氢超标频次、氢中氧超标频次、电解堆过热频次在评价时间内为 0 次时，为 100 分。

分数上限为 100 分。

6.4 指标权重

6.4.1 水电解制氢系统的指标权重根据不同场景下各个指标的重要性程度存在差异，在电源侧、电网侧、负荷侧场景的指标权重分配结果应依据表 4 确定：

表 4 权重划分表

性能指标	电源侧（%）	电网侧（%）	负荷侧（%）
调节速率	8	15	10
功率控制精度	5	10	5
功率波动上限	13	10	5
功率波动下限	13	10	5
平均单位能耗	10	4	5
电压衰减率	8	5	5
故障率	8	8	10
运行成本	5	8	10
成本回收周期	10	10	15
设备成本	5	5	15
氢泄露频次	5	5	5
氧中氢超标频次	3	3	3
氢中氧超标频次	3	3	3
电解堆过热频次	4	4	4

注 1：电源侧权重适用于源侧新能源消纳场景；电网侧权重适用于电网侧调峰调频场景；负荷侧权重适用于负荷侧需求侧响应场景。

6.5 评价结果

6.5.1 评价结果至少应包含：

a) 评价对象的情况；

- b) 评价依据;
- c) 评价过程;
- d) 评价分数;
- e) 评价时间。

6.5.2 水电解制氢系统适应性评价结果可参考下表分级，得分大于 80 分为优级，表明该水电解制氢系统的适应性能优秀；得分为 70~80 分为良级，表明该水电解制氢系统的适应性能良好；得分为 60~70 分为合格，表明该水电解制氢系统的适应性能合格；得分低于 60 分为不合格，表明该水电解制氢系统的适应性能不合格。

表 5 评价结果

	优	良	合格	不合格
评价得分	≥ 80	[70-80)	[60-70)	<60

附 录 A

(规范性附录)

电流测量值测量氢气产量

A.1 范围

该方法适用于水电解制氢系统。

A.2 计算原理

依据电解定律——任何物质在电解过程中，数量上的变化服从法拉第定律。

A.3 水电解制氢时的法拉第定律

在标准状况下，用 $2 \times 96\,500\text{ C}$ 电量，可电解 1 mol 水制取 1 mol 氢和 $1/2\text{ mol}$ 氧。

1 mol 氢气在标准状况下的体积为 $22.43 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ；

故在标准状况下，制取 1 m^3 氢所需理论电量为式(A.1)：

$$\frac{2 \times 96\,500 \times 1000}{3600 \times 22.43} = 2390 \text{ A} \cdot \frac{\text{h}}{\text{m}^3} \quad (\text{A.1})$$

A.4 电流测试值计算气体产量

电流测试值计算气体产量按式 (A.2) 进行。

$$Q = \frac{In\eta}{2390} \quad (\text{A.2})$$

式中：

Q ——氢气产量 (m^3/h)；

I ——通过电解小室的直流工作电流 (A)；

n ——电解小室数 (个)；

η ——电流效率 (设计选定)，单位用 (%) 表示。

相关操作要求符合 GB/T 19774 标准的规定。

附 录 B
(规范性附录)
电压衰减率试验

B.1 范围

该方法适用于水电解制氢系统。

B.2 试验仪器

水电解制氢系统的总直流电压应用直流电压表检测，检测位置在水电解槽的阳极、阴极端板处，电压表的精度等级不低于 0.5 级。

B.3 试验方法

试验方法应按如下步骤：

- a) 试验开始前，保持水电解制氢系统在一定功率下，膜电极恒流、温度保持稳定，运行 20min 以上；
- b) 开始试验后，使用直流电压表测量水电解制氢系统的阳极和阴极之间的总直流电压；
- c) 记录初始时间点和测试结束时间点的直流电压表数值。

B.4 电压衰减率计算方法

电压衰减率应按下式计算：

$$\delta_V = \frac{V_1 - V_2}{t_V} \dots\dots\dots(B.1)$$

式中：

- δ_V ——电压衰减率（ $\mu V/h$ ）；
- V_1 ——初始时间水电解制氢系统的总直流电压（V）；
- V_2 ——测试结束时间水电解制氢系统的总直流电压（V）；
- t_V ——测试时间（h）。

附 录 C
(规范性附录)
耐久性与安全试验

C.1 范围

该方法适用于水电解制氢系统。本试验用于检测系统耐久性指标中的故障率与安全性指标中的氢泄露频次、氧中氢超标频次、氢中氧超标频次、电解堆过热频次。

C.2 试验条件

试验中需要配备固定式氢气检测报警仪、氧中氢分析仪、氢中氧分析仪、电解堆温度传感器等仪器，相关仪器性能应符合 GB 12358 和 GB 16808、GB/T 16839.1 等标准的规定，检测过程中各操作符合 GB/T 6285 标准的规定。

固定式氢气检测报警仪的检测器应安装在氢气易泄露和积聚处，生成的氢气与氧气能够进入分析仪进口接头，温度传感器接入电解堆并调试完成。

C.3 试验方法

试验方法应按如下步骤：

- a) 试验开始前，系统以额定产氢量输出运行 20min 以上；
- b) 保持系统以额定产氢量输出运行，开始试验；
- c) 试验过程中，当空气中的氢气含量达到 0.4%（体积分数）时，氢气检测报警仪应报警；
- d) 试验过程中，氧中氢分析仪中氢气含量达到 0.4%（体积分数）时，氧中氢分析仪应报警；
- e) 试验过程中，氢中氧分析仪中氧气含量达到 1%（体积分数）时，氢中氧分析仪应报警；
- f) 试验过程中，温度传感器温度超过设备规定温度时，电解堆温度传感器应报警；
- g) 记录试验过程中的设备故障次数、氢泄露频次、氧中氢超标频次、氢中氧超标频次、电解堆过热频次。

C.4 故障率计算方法

故障率应为评价周期内，水电解制氢系统设备故障发生的次数与总运行次数的比值。

附 录 D
(资料性附录)

水电解制氢系统打分及评级表

水电解制氢系统的各适应性性能指标评分结果记录在表 D.1 水电解制氢系统性能指标评分表中。

表 D.1 水电解制氢系统性能指标评分表

性能指标	指标参数	性能得分	权重系数
调节速率			
功率控制精度			
功率波动上限			
功率波动下限			
平均单位能耗			
电压衰减率			
故障率			
运行成本			
成本回收周期			
设备成本			
氢泄露频次			
氧中氢超标频次			
氢中氧超标频次			
电解堆过热频次			

水电解制氢系统的最终评价结果记录在表 D.2 水电解制氢系统打分及评级表中。

表 D.2 水电解制氢系统打分及评级表

评价对象				
评价标准	优 (≥80)	良 ([70-80))	合格 ([60-70))	不合格 (<60)
评价得分				
评价结果等级				

参 考 文 献

- [1] GB/T 3634.1-2006 氢气 第1部分：工业氢
- [2] GB 12358-2006 作业场所环境气体检测报警仪 通用技术要求
- [3] GB 16808-2008 可燃气体报警控制器
- [4] GB/T 16839.1-2018 热电偶 第1部分：电动势规范和允差
- [5] T/CES 175-2022 质子交换膜水电解制氢系统