



中华人民共和国国家标准

GB/T 44934—2024

电力储能用飞轮储能单元技术规范

Technical specification for flywheel energy storage unit of electrical energy storage

2024-12-31 发布



2025-07-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 编码 3

5 正常工作环境 4

6 技术要求 5

7 试验方法 9

8 检验规则 17

9 标志、包装、运输和贮存 19

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专利的责任。

本文件由中国电力企业联合会提出。

本文件由全国电力储能标准化技术委员会(SAC/TC 550)归口。

本文件起草单位：北京泓慧国际能源技术发展有限公司、中国科学院工程热物理研究所、中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司、坎德拉(深圳)新能源科技有限公司、平高集团储能科技有限公司、沈阳微控飞轮技术股份有限公司、华驰动能(北京)科技有限公司、中国电力科学研究院有限公司、贝肯新能源有限公司、北京清源飞控能源科技有限公司、中国电建集团河北省电力勘测设计研究院有限公司、中国能源建设集团天津电力设计院有限公司、中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院。

本文件主要起草人：崔亚东、李光军、张帆、戴兴建、李树胜、刘东、张庆源、刘宏超、祝保红、任晓阳、苏森、董舟、柳哲、胡东旭、彭龙、涂伟超、孟庆红、杨岑玉、白杰雪、吕夷、张柳丽、吴晓康、谢洪生、李学斌、徐婷婷、李响、王少峰、魏少帅、胡月鹏、李伟。



电力储能用飞轮储能单元技术规范

1 范围

本文件规定了电力储能用飞轮储能单元的编码、正常工作环境、技术要求、检验规则、标志、包装、运输和贮存要求,描述了相应试验方法。

本文件适用于电力储能用飞轮储能单元的设计、制造、试验、运行、维护和检修。

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 191 包装储运图示标志
- GB/T 755 旋转电机 定额和性能
- GB/T 3077 合金结构钢
- GB/T 4857(所有部分) 包装 运输包装件基本试验
- GB/T 5398 大型运输包装件试验方法
- GB/T 6402 钢锻件超声检测方法
- GB/T 7251.1—2023 低压成套开关设备和控制设备 第1部分:总则
- GB 12348—2008 工业企业厂界环境噪声排放标准
- GB/T 16471 运输包装件尺寸与质量界限
- GB/T 20113 电气绝缘结构(EIS) 热分级
- 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
- GB/T 20840.2 互感器 第2部分:电流互感器的补充技术要求
- GB/T 20840.3 互感器 第3部分:电磁式电压互感器的补充技术要求
- DL/T 860(所有部分) 电力自动化通信网络和系统
- DL/T 2528 电力储能基本术语

3 术语和定义

DL/T 2528 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

飞轮储能 flywheel energy storage; FES

以飞轮为储能载体,通过动能和电能相互转换实现电能存储、释放的物理储能形式。

[来源:DL/T 2528—2022,4.4.1.1,有修改]

3.2

飞轮 flywheel

由金属或纤维增强复合材料等组成的用于存储动能的旋转体。

3.3

飞轮转子 flywheel and motor rotor

飞轮和电机转子的组合体。

3.4

发电/电动机 generator/motor

在飞轮储能单元中实现机械能和电能转换的电机。

注：充电时，作为电动机将电能转换成机械能；放电时，作为发电机将机械能转换成电能。

3.5

轴承 bearing

飞轮转子支承部件。

注：包括机械轴承、永磁轴承、电磁轴承、超导磁轴承的一种或多种的组合，其中电磁轴承含控制器。

3.6

机壳 housing

保护与支承发电/电动机、飞轮转子等部件并与安装基础连接的外部壳体。

3.7

飞轮本体 flywheel assembly

由飞轮、发电/电动机、轴承(包含磁轴承控制器)、机壳等构成，在飞轮储能单元中存储和释放能量的机电设备组合。

3.8

辅助装置 auxiliary equipment

维持飞轮储能单元运行的冷却装置、真空装置等设备的组合。

3.9

飞轮储能单元 flywheel energy storage unit

由飞轮本体及辅助装置组成的能独立充放电的储能装置。

注：飞轮储能单元典型结构见图 1。

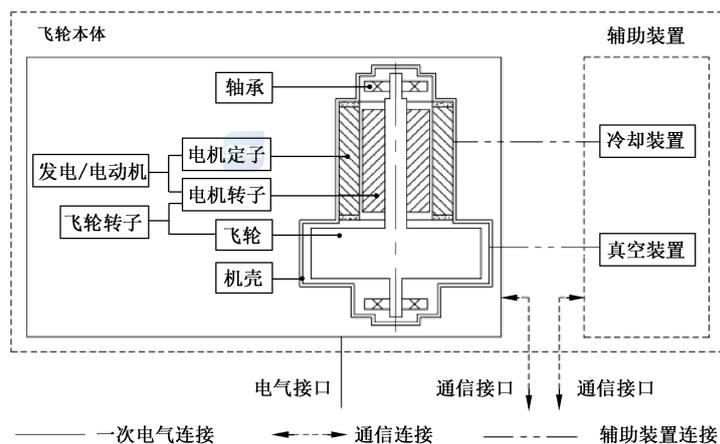


图 1 飞轮储能单元典型结构图

3.10

工作转速上限 maximum working speed

飞轮储能单元在额定功率下能稳定运行的最高转速限值。

3.11

工作转速下限 minimum working speed

飞轮储能单元在额定功率下能稳定运行的最低转速限值。

3.12

工作转速区间 working speed range

飞轮储能单元在工作转速上限和工作转速下限之间的运行区间。

3.13

额定充电功率 rated charging power

飞轮储能单元在充电状态下、工作转速区间内,能持续稳定工作的输入有功功率保证值。

3.14

额定放电功率 rated discharging power

飞轮储能单元在放电状态下、工作转速区间内,能持续稳定工作的输出有功功率保证值。

3.15

额定充电能量 rated charging energy capacity

在规定条件下,飞轮储能单元以额定充电功率,能持续稳定存储的最大电能量保证值(取额定充电功率与相应的标称充电持续时间的乘积)。

3.16

额定放电能量 rated discharging energy capacity

在规定条件下,飞轮储能单元以额定放电功率,能持续稳定释放的最大电能量保证值(取额定放电功率与相应的标称放电持续时间的乘积)。

3.17

自放电率 self-discharge rate

飞轮储能单元与外部电网无电能交换时,存储在飞轮本体的能量消耗率(取飞轮储能单元由工作转速上限自由降速 30 s 后所存储的动能减少量与工作转速上限时存储的动能的比值,用百分比表示)。

3.18

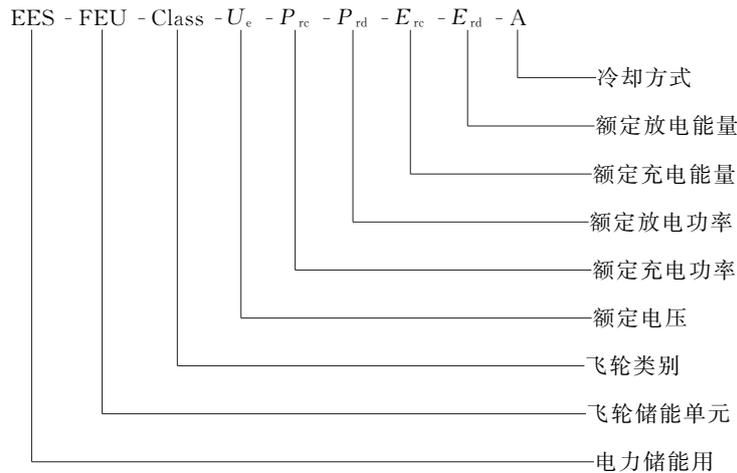
充放电循环效率 charge and discharge cycle efficiency

在额定功率下,飞轮储能单元由工作转速上限至工作转速下限放电运行过程中释放能量,与同循环过程中由工作转速下限至工作转速上限充电运行过程中吸收能量的比值。

[来源:DL/T 2528—2022,4.4.3.7,有修改]

4 编码

电力储能用飞轮储能单元的编码应符合图 2 的规则。



标引序号说明：

EES —— 电力储能用；

FEU —— 飞轮储能单元；

Class —— 飞轮类别，包含：Stl——钢制飞轮、Com——复合材料飞轮；

U_e —— 额定电压，由数值和单位组成，单位为伏(V)；

P_{rc} —— 额定充电功率，由数值和单位组成，单位为千瓦(kW)；

P_{rd} —— 额定放电功率，由数值和单位组成，单位为千瓦(kW)；

E_{rc} —— 额定充电能量，由数值和单位组成，单位为千瓦时(kW·h)；

E_{rd} —— 额定放电能量，由数值和单位组成，单位为千瓦时(kW·h)；

A —— 飞轮储能单元冷却方式，包含：AC——风冷、LC——液冷、ALC——风液组合、X——其他。

图 2 飞轮储能单元编码规则图示

示例 1：电力储能用飞轮储能单元，钢制飞轮，额定电压 380 V，额定充电功率 300 kW，额定放电功率 300 kW，额定充电能量 50 kW·h，额定放电能量 45 kW·h，风冷，编码为：EES-FEU-Stl-380 V-300 kW-300 kW-50 kW·h-45 kW·h-AC。

示例 2：电力储能用飞轮储能单元，复合材料飞轮，额定电压 690 V，额定充电功率 500 kW，额定放电功率 500 kW，额定充电能量 150 kW·h，额定放电能量 135 kW·h，液冷，编码为：EES-FEU-Com-690 V-500 kW-500 kW-150 kW·h-135 kW·h-LC。

5 正常工作环境

飞轮储能单元在下列环境下应正常工作。

- a) 环境温度：-20℃~40℃。
- b) 相对湿度：小于 95%，无凝露。
- c) 海拔高度：小于 2 000 m；当海拔高度大于 2 000 m 时，符合 GB/T 20626.1 的相关规定。
- d) 应用在海洋性气候下，满足耐盐雾要求。

6 技术要求

6.1 外观、尺寸和质量

6.1.1 外观

飞轮储能单元的外观应满足下列要求：

- a) 表面无划痕、锈蚀、裂纹等现象,无结构变形；
- b) 螺栓无松动；
- c) 标识、标志完整清晰。

6.1.2 尺寸和质量

飞轮本体的外形尺寸和质量满足下列要求：

- a) 飞轮本体的外形尺寸可采用“长×宽×高”或“最大外直径×高(或长)”表示,外形尺寸绝对偏差应满足表 1 要求。

表 1 外形尺寸绝对偏差要求

单位为毫米

外形尺寸值 L	$L \leq 500$	$500 < L \leq 2\ 000$	$L > 2000$
尺寸绝对偏差	10	15	20

- b) 飞轮本体的质量相对偏差应满足表 2 要求。

表 2 质量相对偏差要求

质量 M kg	$M \leq 5\ 000$	$5\ 000 < M \leq 25\ 000$	$M > 25\ 000$
质量相对偏差 %	1.5	1	0.05

6.2 机械性能

6.2.1 额定功率工作转速

飞轮储能单元按额定功率充放电时,工作转速下限应不大于工作转速下限标称值,工作转速上限应不小于工作转速上限标称值。

6.2.2 振动

飞轮储能单元在工作转速区间运行,飞轮本体振动速度限值应满足表 3 要求。

表 3 振动速度限值

单位为毫米每秒

支承类型	振动速度均方根值 v_{rms}	对应的振动速度(峰值) v
刚性支承	≤ 12.5	≤ 18
挠性支承	≤ 25	≤ 35

6.2.3 噪声

飞轮储能单元以额定功率运行时,在距离设备水平或垂直位置 1 m 处的噪声应不大于声压级 85 dB(A)。在距离飞轮储能单元水平位置 1 m 处的声压级噪声大于 70 dB 时,应在外壳上标注“保护听力”标识符号。

6.2.4 温升

飞轮本体在额定功率连续工作运行条件下,温度及温升应满足下列要求。

- 飞轮本体温度不超过 GB/T 20113 规定的电机绝缘结构热分级或电机转子材料耐受温度的最低限值。
- 温升满足 GB/T 755 中规定的温升限值要求。当海拔和环境温度超过正常工作条件时,按 GB/T 755 中规定的限值修正规则进行温升和温度限值修正。

6.3 电气性能

6.3.1 额定充电功率

飞轮储能单元充电功率应不小于额定充电功率。

6.3.2 额定放电功率

飞轮储能单元放电功率应不小于额定放电功率。

6.3.3 额定充电能量

飞轮储能单元充电能量应不小于额定充电能量。

6.3.4 额定放电能量

飞轮储能单元放电能量应不小于额定放电能量。

6.3.5 充放电循环效率

飞轮储能单元充放电循环效率应不低于 85%。

6.3.6 自放电率

飞轮储能单元与外部电网无能量交换,由工作转速上限自由降速 30 s 后所存储的动能减少量与工作转速上限时存储的动能的比应不大于 2%。

6.3.7 过载能力

6.3.7.1 额定功率放电持续时间大于 15 min 的飞轮储能单元过载能力应满足下列要求:

- a) 从工作转速下限以 110% 额定充电功率持续运行时间不少于 10 min, 无异常告警或保护;
 - b) 从工作转速上限以 110% 额定放电功率持续运行时间不少于 10 min, 无异常告警或保护。
- 6.3.7.2 额定功率放电持续时间不大于 15 min 的飞轮储能单元过载能力应满足下列要求:
- a) 从工作转速下限以 110% 额定充电功率持续运行到工作转速上限, 无异常告警或保护;
 - b) 从工作转速上限以 110% 额定放电功率持续运行到工作转速下限, 无异常告警或保护。

6.4 安全性能

6.4.1 机械安全

飞轮储能单元的机械安全应满足下列要求。

- a) 飞轮转子在设计寿命周期内, 不发生因强度导致的失效破坏。
- b) 采用合金钢锻件的飞轮转子, 锻件设计材料性能取样段化学成分符合 GB/T 3077 的要求, 疲劳寿命 $S-N$ 特性满足设计寿命要求, 力学性能满足表 4 工作转速超速设计要求; 其粗坯检验的质量级别符合 GB/T 6402 规定的 3 级质量标准。

表 4 工作转速超速对照表

单位为转每分

最高工作转速 S_N	超速
$S_N \leq 10\ 000$	$(1.1 \sim 1.15)S_N$
$S_N > 10\ 000$	$(1.05 \sim 1.1)S_N$

- c) 飞轮本体安装在防护罩/防护掩体或下沉式防护结构内。

6.4.2 电气安全

6.4.2.1 绝缘电阻

飞轮储能单元的绝缘电阻应满足下列要求:

- a) 发电/电动机导电部分对机壳之间的绝缘电阻不小于 10 M Ω ;
- b) 无电气连接的各电路之间的绝缘电阻不小于 10 M Ω 。

6.4.2.2 电气间隙和爬电距离

飞轮储能单元中各带电电路之间以及带电部件、导电部件、接地部件之间的电气间隙和爬电距离应符合 GB/T 7251.1—2023 的规定。

6.4.2.3 电磁兼容

飞轮储能单元的电磁兼容性应满足 GB/T 755 的规定。

6.5 通信功能

6.5.1 飞轮储能单元应具备与飞轮储能管理系统、飞轮储能变流器等设备信息交互的功能。

6.5.2 飞轮储能单元与飞轮储能管理系统可采用控制器局域网(CAN)、RS-485、RS-232、以太网等通信接口, 支持 CAN 2.0B、Modbus、DL/T 860(所有部分)通信协议, 宜采用双网冗余通信。

6.5.3 飞轮储能单元与飞轮储能变流器可采用 CAN、RS-485、RS-232、以太网等通信接口, 支持 CAN

2.0B、Modbus、DL/T 860(所有部分)通信协议,宜采用双网冗余通信。

6.6 设计寿命

飞轮本体设计寿命应不低于 20 年或以额定功率在工作转速区间内充放电循环 100 万次。

6.7 关键部件和辅助装置

6.7.1 机壳

6.7.1.1 强度

飞轮本体机壳的机械强度应满足下列要求:

- a) 机壳承受不低于 10 kPa 的压力,不产生明显的塑性变形;
- b) 非下沉式防护结构的飞轮本体,飞轮转子破损分离体不溢出机壳及飞轮储能单元附属其他防护结构。

6.7.1.2 密封性

飞轮本体机壳的密封性应满足下列要求之一:

- a) 保压方式下持续时间 10 min 后,压力变化不超过 100 Pa;
- b) 真空漏率不大于 $1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

6.7.2 发电/电动机

6.7.2.1 工频耐压

在正常环境气压下,发电/电动机带电主回路按其工作电压应承受表 5 规定的历时 1 min 的工频耐受电压试验,试验过程中应无绝缘击穿和闪络现象。

表 5 工频耐受电压等级

单位为伏

额定绝缘电压 U_i 额定工作电压交流均方根或直流	工频耐受电压
$U_i \leq 60$	1 000
$60 < U_i \leq 300$	2 000
$300 < U_i \leq 690$	2 500
$690 < U_i \leq 800$	3 000
$800 < U_i \leq 1\,500$	3 500

6.7.2.2 温度监测

发电/电动机温度监测应满足下列要求:

- a) 具备温度监测功能,设置温度传感器,监测电机定子温度;
- b) 直接参与结果计算的测温点采用双重或多重测点布置。

6.7.3 轴承

轴承应满足下列要求：

- a) 实现飞轮转子稳定旋转,并满足紧急停机过程中飞轮转子的支承要求；
- b) 轴承设置温度传感器；
- c) 用油脂润滑的机械轴承温度不高于润滑油脂的滴点,温升不高于 80 K。

6.7.4 真空装置

真空装置应满足下列要求：

- a) 具备真空度数值检测功能；
- b) 出现真空度异常等故障,输出报警信号。

6.7.5 冷却装置

冷却装置应满足下列要求：

- a) 具备保持飞轮本体不超过温度和温升限值的能力；
- b) 出现温度异常等故障,输出报警信号。

7 试验方法

7.1 试验条件

7.1.1 环境条件

除另有规定外,试验应在温度 5℃~40℃、相对湿度≤95%且无凝露、大气压为 86 kPa~106 kPa 的环境中进行。

7.1.2 机械安全条件

飞轮储能单元试验系统应满足下列机械安全条件：

- a) 试验的飞轮本体放在下沉式防护结构或在其周围增加设置防护罩/防护掩体；
- b) 对于试验中采用防护罩/防护掩体的情形,防护罩/防护掩体具备包容飞轮转子破裂后分离体溢出的能力。

7.2 试验装置

试验设备、仪器应满足下列要求：

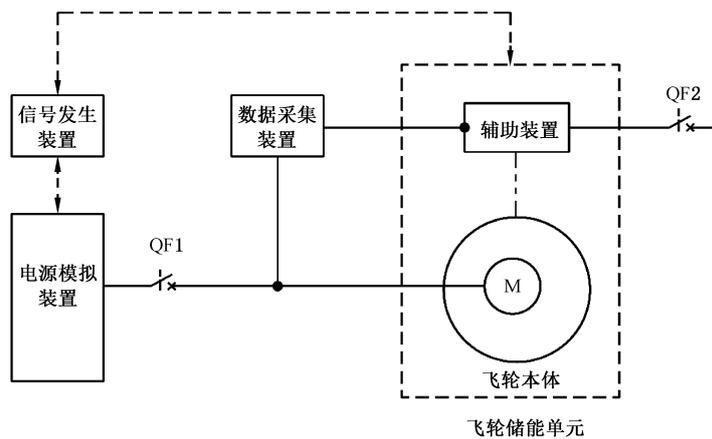
- a) 电压/电流传感器、温湿度计、声级计和数据采集装置等试验设备、仪器的精度等级至少满足表 6 的要求；
- b) 电压互感器符合 GB/T 20840.3 的要求,电流互感器符合 GB/T 20840.2 的要求；
- c) 传感器响应时间不大于 50 μs,带宽不小于 10 kHz；
- d) 数据采集装置的最高采样频率不小于 10 kHz,带宽不小于 10 kHz；
- e) 试验设备、仪器检验合格,在检定合格或校准后使用。

表 6 试验设备、仪器精度要求

序号	设备仪器	精度	备注
1	量具	±1 mm	测量外形尺寸
2	衡器	±1 kg	测量设备质量
3	电压传感器	0.2 级	满量程(F.S.)
4	电压互感器	0.2 级	满量程(F.S.)
5	电流传感器	0.2 级	满量程(F.S.)
6	电流互感器	0.2 级	满量程(F.S.)
7	兆欧表	±5%	满量程(F.S.)
8	耐压检测仪	±2%	满量程(F.S.)
9	温度计	±0.5 °C	—
10	湿度计	±3%	相对湿度
11	数据采集装置	精度等级 0.2 级； 采样频率：不小于 10 kHz； 电压电流采集精度：0.2%	测量电流、电压、功率、电能等
12	振动传感器	±5%	—
13	声级计	1 级	—
14	真空计	<1 Pa	—

7.3 试验电路

飞轮储能单元试验电路示意图见图 3。



标引符号说明：

QF1——飞轮本体电源开关；

QF2——飞轮储能单元辅助装置电源开关。

图 3 试验电路示意图

7.4 电源模拟装置

电源模拟装置应满足下列要求：

- a) 电能双向流动；
- b) 额定功率不小于试验飞轮储能单元额定功率的 1.2 倍；
- c) 在设定功率进行充放电操作；
- d) 具备飞轮储能单元制动保护功能；
- e) 电源模拟装置主要技术指标符合表 7 的要求。

表 7 电源模拟装置主要技术指标要求

参数类型	参数范围	精度
电压(U) V	—	采集精度±0.5%
电流(I) A	—	采集精度±0.5%
功率(P) W	—	控制精度±1% F.S.
温度(T) ℃	-20℃~40℃	±1℃

7.5 外观、尺寸和质量检查

飞轮储能单元的外观、尺寸和质量按照下列步骤进行检验。

- a) 观察飞轮储能单元的外观，记录检验结果，包括变形、剥落、锈蚀及裂痕等现象。
- b) 手动或借助工具检测固定螺栓有无松动，检测接线是否规范牢固。
- c) 检查铭牌、标志、标记完整清晰，文字和符号整齐、规范、正确。
- d) 测量飞轮储能本体外形最大尺寸，用量具测量 3 次并记录测量结果，计算 3 次测量结果的平均值，为外形尺寸测量值 L_m 。
- e) 测量飞轮储能本体的质量，用衡器测量 3 次并记录测量结果，计算 3 次测量结果的平均值，为质量测量值 m_m 。
- f) 按照公式(1)计算样机各维度的尺寸绝对偏差：

$$L_r = |L_m - L_n| \dots\dots\dots (1)$$

式中：

L_r —— 尺寸绝对偏差；

L_m —— 尺寸测量值；

L_n —— 尺寸标称值。

- g) 按照公式(2)计算试验样机的质量相对偏差。

$$m_r = |m_m - m_n| / m_n \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

m_r —— 质量相对偏差；

m_m —— 质量测量值；

m_n —— 质量标称值。

7.6 机械性能试验

7.6.1 额定功率工作转速

飞轮储能单元的额定功率工作转速按照下列步骤进行试验：

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常；
- b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常；
- c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限；
- d) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上；
- e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定充电功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上；
- f) 利用数据采集装置记录飞轮储能单元工作转速上限实测值；
- g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定放电功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限,保持工作转速下限运行 2 min 以上；
- h) 利用数据采集装置记录飞轮储能单元工作转速下限实测值；
- i) 重复 e)~h)步骤两次,记录两次工作转速上限实测值和工作转速下限实测值,分别计算 3 次实测值平均值。

7.6.2 振动

飞轮储能单元的振动按照下列步骤进行试验：

- a) 在飞轮本体机壳上分别布置振动速度传感器,测量飞轮轴向和径向振动速度值；
- b) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常；
- c) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常；
- d) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限；
- e) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上；
- f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上；
- g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限,保持工作转速下限运行 2 min 以上；
- h) 利用数据采集装置记录飞轮本体运行过程中轴向和径向振动速度均方根值(或振动速度),取记录的最大值为振动速度限值。

7.6.3 噪声

飞轮储能单元的噪声试验按下列步骤进行：

- a) 测量背景噪声,背景噪声按 GB 12348—2008 中第 5 章进行修正；
- b) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常；
- c) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常；
- d) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限；

- e) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上；
- f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上；
- g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限,保持工作转速下限运行 2 min 以上；
- h) 在距飞轮储能单元前、后、左、右水平位置各 1 m 处,离地面高度 1 m~1.5 m 处,用声级计测量飞轮噪声(若飞轮储能单元放在下沉式防护结构中,测量离地面高度 1 m~1.5 m 处的噪声)；
- i) 重复 f)~h)过程两次,记录整个试验过程中声级计显示的最高 A 计权声压级为噪声值。

7.6.4 温升

飞轮储能单元的温升试验按照下列步骤进行：

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常；
- b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常；
- c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限；
- d) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上；
- e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上；
- f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限,保持工作转速下限运行 2 min 以上；
- g) 重复 e)~f)充放电循环步骤至发电/电动机处机壳表面温度检测点达到热平衡(单个充放电循环过程中最高温度的上升速率变化不超过 1 °C/h)；
- h) 利用数据采集装置记录各检测点的温度和环境温度,从第一个记录点开始,数据记录间隔以 1 ms 为步长、以 20 ms 为滑窗周期同步记录,记录总时长不低于 30 min。

7.7 电气性能试验

7.7.1 额定功率充放电试验

额定功率充放电试验按下列步骤进行。

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常。
- b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常。
- c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限。
- d) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上。
- e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上。
- f) 利用数据采集装置记录飞轮储能单元接收到充电指令时刻,以 1 ms 为步长、以 20 ms 为滑窗周期同步记录输入/出端口有功功率,为飞轮储能单元从工作转速下限到工作转速上限充电过程的充电能量。
- g) 记录飞轮储能单元充电功率持续稳定在规定的偏差内阶段的功率平均值为本次试验的充电功率。
- h) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限,保持工作转速下限运行 2 min 以上。

- i) 利用数据采集装置记录飞轮储能单元收到放电指令时刻,以 1 ms 为步长、以 20 ms 为滑窗周期同步记录输入/出端口有功功率,为飞轮储能单元从工作转速上限到工作转速下限降速过程的放电能量。
- j) 记录飞轮储能单元放电功率持续稳定在规定的偏差内阶段的功率平均值为本次试验的放电功率。
- k) 重复步骤 d)~j)两次;记录两次试验过程中的输入/出端口有功功率、充电功率持续稳定在规定的偏差内阶段的功率平均值、输入/出端口有功功率、放电功率持续稳定在规定的偏差内阶段的功率平均值,为两次试验的充电能量、充电功率、放电能量、放电功率。
- l) 取 3 次试验充电能量的最小值为飞轮储能单元额定充电能量 E_{rc} 。
- m) 取 3 次试验充电功率的最小值为飞轮储能单元额定充电功率 P_{rc} 。
- n) 取 3 次试验放电能量的最小值为飞轮储能单元额定放电能量 E_{rd} 。
- o) 取 3 次试验放电功率的最小值为飞轮储能单元额定放电功率 P_{rd} 。
- p) 按公式(3)计算飞轮储能单元额定功率充放电循环效率:

$$\eta = \frac{E_{rd}}{E_{rc}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

- η —— 额定功率充放电循环效率;
- E_{rd} —— 额定功率放电能量,单位为千瓦时(kW·h);
- E_{rc} —— 额定功率充电能量,单位为千瓦时(kW·h)。

7.7.2 自放电率试验



自放电率试验按下列步骤进行。

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常。
- b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常。
- c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限。
- d) 飞轮储能单元保持工作转速下限恒转速持续运行 2 min 以上。
- e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,然后保持工作转速上限恒转速运行 2 min 以上。
- f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达停机指令,断开 QF1,飞轮储能单元自由降速。
- g) 利用数据采集装置记录飞轮储能单元从工作转速上限 ω_{max} 自由降速 30 s 后的速度为 ω_{min} 。
- h) 按公式(4)计算飞轮储能单元自放电率:

$$A_s = \frac{\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

- A_s —— 飞轮储能单元 30 s 自放电率;
- ω_{max} —— 工作转速上限,单位为转每分(r/min);
- ω_{min} —— 降速 30 s 后的工作转速,单位为转每分(r/min)。

7.7.3 过载试验

7.7.3.1 额定放电持续时间大于 15 min 的飞轮储能单元,过载试验按下列步骤进行:

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常;
 - b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常;
 - c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限;
 - d) 飞轮储能单元按工作转速下限恒转速持续运行 2 min 以上;
 - e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达 110%额定功率充电指令,飞轮储能单元恒功率持续充电 10 min 及以上;
 - f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达 110%额定功率放电指令,飞轮储能单元恒功率持续放电 10 min 及以上;
 - g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达停机指令;
 - h) 充放电过程中,利用数据采集装置,以 1 ms 为步长、以 20 ms 为滑窗周期同步记录飞轮本体输入/出端口有功功率有效值;
 - i) 检查电源模拟装置、飞轮储能单元过载运行信息、报警和保护信息,设备无异常、无故障。
- 7.7.3.2 额定放电持续时间不大于 15 min 的飞轮储能单元,过载试验按下列步骤进行:
- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常;
 - b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常;
 - c) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速升速至工作转速下限;
 - d) 飞轮储能单元按工作转速下限恒转速持续运行 2 min 以上;
 - e) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达 110%额定功率充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至工作转速上限,保持工作转速上限运行 2 min 以上;
 - f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达 110%额定功率放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速上限降速至工作转速下限;
 - g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达停机指令;
 - h) 充放电过程中,利用数据采集装置,以 1 ms 为步长、以 20 ms 为滑窗周期同步记录飞轮储能单元输入/出端口有功功率有效值;记录飞轮储能单元从工作转速下限到工作转速上限充电过程的充电能量 E_{rc} 、飞轮储能单元从工作转速上限到工作转速下限放电过程的放电能量 E_{rd} ;
 - i) 检查电源模拟装置、飞轮储能单元过载运行信息、报警和保护信息;
 - j) 设备无异常、无故障,且飞轮储能单元从工作转速下限到工作转速上限充电过程的充电能量 E_{rc} 不低于标称的放电能量,或者飞轮储能单元从工作转速上限到工作转速下限放电过程的放电能量 E_{rd} 不低于标称的放电能量。

7.8 安全性能试验

7.8.1 机械安全

飞轮储能单元的机械安全按照下列步骤进行试验:

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合开关 QF2,观察辅助系统启动正常;
- b) 闭合开关 QF1,观察电源模拟装置和数据采集装置监测功能正常;
- c) 通过电源模拟装置设置飞轮储能单元超速保护限值;
- d) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元下达启动指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元转速上升至工作转速下限;

- e) 飞轮储能单元保持工作转速下限持续运行 2 min 以上；
- f) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元按设定功率下达充电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从工作转速下限升速至表 4 对应的超速转速值,达到超速值时保持 2 min；
- g) 通过信号发生装置向电源模拟装置和飞轮储能单元按设定功率下达放电指令,电源模拟装置控制飞轮储能单元从超速转速值降速至工作转速下限；
- h) 检查设备有无异常或故障信息。

7.8.2 绝缘电阻

在飞轮储能单元静止、冷态下,电源输入端子与保护接地导线间按表 5 施加电压,用兆欧表测量绝缘电阻值,并在指针达到稳定后读取数据。

7.8.3 电气间隙和爬电距离

按照 GB/T 7251.1—2023 中附录 F 规定的试验方法测量电气间隙和爬电距离。

7.8.4 电磁兼容

按照 GB/T 755 中规定的试验方法测试。

7.9 通信功能

通信功能按照下列步骤试验：

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合 QF2,确认辅助装置启动正常；
- b) 闭合 QF1,通过信号发生装置向电源模拟装置下达启动指令；
- c) 检查电源模拟装置和数据采集装置显示的飞轮转速、发电/电动机各测试点温度、轴承各测试点温度、机壳振动、机壳内真空度、磁轴承状态信号等运行信息；
- d) 通过信号发生装置向电源模拟装置下达设定功率控制指令低速运行；
- e) 检查电源模拟装置和数据采集装置采集的飞轮转速、发电/电动机各测试点温度、轴承各测试点温度、机壳振动、机壳内真空度、磁轴承状态信号等运行信息。

7.10 关键部件试验

7.10.1 机壳强度和密封性

机壳强度和密封性试验按照下列步骤进行：

- a) 在正常静止条件下,将机壳内部密封；
- b) 将飞轮本体与真空装置连接,并完成抽真空；
- c) 当内部压力的标准差与平均值的比值 $\leq 30\%$ 时,持续 10 min 后停止；
- d) 通过数据采集装置,记录真空度变化；
- e) 观察壳体有无明显的塑性变形。

7.10.2 发电/电动机

7.10.2.1 工频耐压

在正常环境气压下,发电/电动机处于静止状态,用工频耐压试验装置,在绕组和机壳之间施加表 5 规定的试验电压 1 min,观察无闪络和击穿。

7.10.2.2 温度监测

通过 7.6.4 升温试验,验证温度监测功能。

7.10.3 轴承

飞轮本体轴承试验按照下列步骤进行:

- a) 按 7.8.1 进行超速试验,通过数据采集装置观察飞轮运行状态和轴承温度;
- b) 按 7.6.4 进行温升试验,通过数据采集装置观察轴承温度,并与润滑油脂的滴点对比。

7.10.4 真空装置

真空装置试验按照下列步骤进行:

- a) 按图 3 连接试验电路,闭合 QF2,启动真空装置,对飞轮储能单元抽真空;
- b) 观察数据采集装置显示的真空度值是否正常;
- c) 通过信号发生装置调节飞轮储能单元真空度保护限值至低于当前运行真空值,数据采集装置能接收到警告信号;
- d) 恢复飞轮储能单元真空度保护限值至正常值,启动真空装置,能正常运行。

7.10.5 冷却装置

冷却装置试验按照下列步骤进行:

- a) 按 7.6.4 进行温升试验;
- b) 当发电/电动机处机壳表面温度检测点达到热平衡(单个充放电循环过程中最高温度的上升速率变化不超过 1 °C/h),利用数据采集装置记录各检测点的温度和环境温度;
- c) 检查冷却系统运行状态,对比 6.2.4 温升限值要求;
- d) 通过信号发生装置停止冷却系统工作,数据采集装置能接收到警告信号;
- e) 恢复冷却系统正常工作,启动飞轮储能单元,能正常运行。

8 检验规则

8.1 一般要求

检验分为型式检验、出厂检验两类,检验分类和检验项目应满足表 8 的要求。

表 8 检验分类和检验项目

序号	试验项目		技术要求 章条号	试验方法 章条号	试验类型	
					型式试验	出厂试验
1	外观、尺寸和 质量	外观	6.1.1	7.5	√	√
2		尺寸和重量	6.1.2	7.5	√	√
3	机械性能	额定功率工作转速	6.2.1	7.6.1	√	√
4		振动	6.2.2	7.6.2	√	—
5		噪声	6.2.3	7.6.3	√	—
6		温升	6.2.4	7.6.4	√	—

表 8 检验分类和检验项目（续）

序号	试验项目	技术要求 章条号	试验方法 章条号	试验类型		
				型式试验	出厂试验	
7	电气性能	额定充电功率	6.3.1	7.7.1	√	√
8		额定放电功率	6.3.2	7.7.1	√	√
9		额定充电能量	6.3.3	7.7.1	√	—
10		额定放电能量	6.3.4	7.7.1	√	—
11		充放电循环效率	6.3.5	7.7.1	√	—
12		自放电率	6.3.6	7.7.2	√	—
13		过载能力	6.3.7	7.7.3	√	—
14	安全性能	机械安全	6.4.1	7.8.1	√	—
15		绝缘电阻	6.4.2.1	7.8.2	√	—
16		电气间隙和爬电距离	6.4.2.2	7.8.3	√	—
17		电磁兼容	6.4.2.3	7.8.4	√	—
18	通信功能	通信功能	6.5	7.9	√	√
19	关键部件和 辅助装置	机壳强度和密封性	6.7.1	7.10.1	√	√
20		发电/电动机工频耐压	6.7.2.1	7.10.2.1	√	—
21		发电/电动机温度监测	6.7.2.2	7.10.2.2	√	—
22		轴承	6.7.3	7.10.3	√	—
23		真空装置	6.7.4	7.10.4	√	√
24		冷却装置	6.7.5	7.10.5	√	—

注：“√”——需要做的试验项目；“—”——不需要做的试验项目。

8.2 出厂检验

每台飞轮储能单元均应进行出厂检验，经过检验合格后方可出厂，并出具证明合格的产品出厂证明书。

8.3 型式检验

8.3.1 需进行型式检验的情形

有下列情形之一应进行型式检验：

- 新飞轮储能单元投产（包括转厂生产）；
- 连续生产的飞轮储能单元，每四年进行一次型式试验；
- 正式投产后，当设计、制造工艺或主要元器件有较大改变，可能影响飞轮储能单元性能时；
- 停产超过一年后复产。

8.3.2 型式试验样品选取

型式试验应在出厂检验合格的飞轮储能单元中随机选取一台作为检验样品。

8.3.3 判定规则

型式检验中,试验样品进行的检验项目全部满足要求,判定为型式检验合格;试验样品的任一检验项目不满足要求,判定为型式检验不合格。

9 标志、包装、运输和贮存

9.1 标志

9.1.1 每套飞轮储能应有铭牌并安装在明显位置,铭牌上应标有下列内容:

- a) 产品名称;
- b) 型号;
- c) 编码;
- d) 技术参数:企业根据系统实际应用情况而定;
- e) 外形尺寸(mm);
- f) 质量(kg);
- g) 出厂编号;
- h) 制造年月;
- i) 制造单位名称或标识。

9.1.2 飞轮储能单元在有特殊属性的位置应有下列标志:

- a) 警示标识;
- b) 高压电、防触电标识;
- c) 重心、向上、小心轻放标志。

9.2 包装

飞轮储能单元包装应满足下列要求:

- a) 图示标志和警示标志符合 GB/T 191 的要求;
- b) 包装内含产品清单、产品说明书、产品合格证、出厂检验报告等随行文件;
- c) 运输包装件符合 GB/T 4857(所有部分)、GB/T 5398 及 GB/T 16471 的要求。

9.3 运输

飞轮储能单元运输过程应满足下列要求:

- a) 飞轮储能单元运输过程轻搬轻放,严防摔掷、翻滚、重压;
- b) 飞轮储能单元运输过程防止剧烈振动、倒置、冲击、日晒雨淋等。

9.4 贮存

飞轮储能单元贮存应满足下列要求:

- a) 飞轮储能单元在贮存期间,应放在空气流通,温度在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +55\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度不大于 90%,无腐蚀性和爆炸气体的仓库内;
- b) 飞轮储能单元在贮存期间不应淋雨、暴晒、凝露和霜冻;
- c) 飞轮储能单元运到工地后,应按厂家规定贮存,长期存放时按产品技术条件维护。

