

ICS XX. XXX

N XX

团 体 标 准

T/ZSEIA XXXX-YYYY

电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元 通用技术条件

General technical requirements for power grade 5-DOF magnetic levitation
flywheel energy storage unit

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中关村智慧环境产业联盟 发布

目 次

前 言.....	2
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 规格.....	5
5 技术要求.....	5
5.1 环境条件.....	5
5.2 电气条件.....	5
5.3 性能测试要求.....	5
6 试验方法.....	6
6.1 飞轮转子探伤.....	6
6.2 力学性能检测.....	6
6.3 转速测试.....	6
6.4 功率测试.....	7
6.5 储能量计算.....	7
6.6 自由降速试验.....	7
6.7 失稳测试.....	8
6.8 耐电压测试.....	8
6.9 温升测试.....	8
6.10 密封性测试.....	8
7 检验规则.....	8
7.1 一般要求.....	错误！未定义书签。
7.2 出厂检验.....	9
7.3 型式试验.....	9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由中关村智慧环境产业联盟提出并归口。

本文件起草单位：华驰动能（北京）科技有限公司、北京华驰万汇科技中心、北京华驰纵横科技中心、国网蒙东电力综合能源服务公司、国网蒙东电力科学研究院、山东大学、内蒙古工业大学、集宁师范学院、安徽华驰动能科技有限公司、华北电力大学、东北大学。

本文件主要起草人：王志强、王方胜、齐四清、高春辉、徐衍亮、刘广忱、荆丽丽、苏森、彭龙、孟德超、韩坤、陈胜林、孙秋野、杨东升。

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。

电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元通过技术条件

1 范围

本文件规定了电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元的规格、技术要求、试验方法和检验规则等内容。本文件适用于电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元，额定功率不小于500kW且储能量不小于100 kWh。

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 228.1-2010 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 755-2019 旋转电机 定额和性能

GB 4793.1 测量、控制和实验室用电气设备的安全要求 第1部分：通用要求

JB/T 5000.15-2007 重型机械通用技术条件 第15部分：锻钢件无损探伤

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

飞轮储能 flywheel energy storage

一种把电能转化为旋转体的动能来存储的物理能量方式。

3.2

飞轮储能系统 flywheel energy storage system

以飞轮储能为储能载体，实现电能与动能双向转化的储能装置，包括飞轮储能单元、飞轮系统控制器、辅助设备、充/放电变流器、储能变流器和升压变压器（可选）组成的系统装置统称，组成框架如图1所示。

3.3

电力级五自由度磁悬浮飞轮储能系统 power grade five degrees of freedom (5-DOF) magnetic levitation flywheel energy storage system

应用于电力系统的五自由度磁悬浮飞轮储能系统，系统额定功率不小于500kW且储能量不小于100kWh。

3.4

飞轮系统控制器 flywheel system controller

飞轮系统控制器是指由若干电子电路器件组合，用于实现对飞轮储能系统的控制，保障被控设备安全、可靠地运行，其主要功能有：自动控制、保护、监视和测量，飞轮储能系统框图见图1。

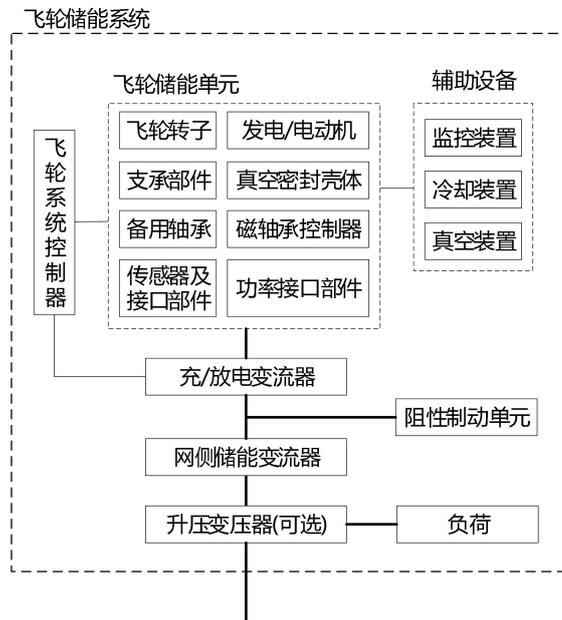


图 1 飞轮储能系统框图

3.5

充/放电变流器 charge/discharge converter

对飞轮电机运行进行功率、转速及直流母线电压控制，直接或间接实现（电源或负载）直流电能和飞轮交流电能双向传递的功率电子电力设备。

3.6

飞轮储能变流器 flywheel converter

实现飞轮储能系统直流母线与交流电网（和/或负荷）之间的双向能量传递的电子电力设备。

3.7

阻性制动单元 resistive braking unit

阻性制动单元是由功率电阻和功率开关（或电磁开关）组成。主要用于充/放电变流器控制飞轮储能单元，使飞轮转子快速制动，将旋转的动能所产生的电能转化为热能。

3.8

飞轮储能单元 flywheel energy storage unit

由飞轮转子、发电/电动机、支承部件、真空密封壳体、备用轴承、磁轴承控制器、传感器接口部件和功率接口部件等构成的储能单元装置。

3.9

电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元 power-grade five-degree-of-freedom maglev flywheel energy storage unit

应用于电力系统采用了五自由度磁悬浮轴承的飞轮储能单元，额定功率不小于500kW且储能量不小于100kWh。

3.10

飞轮转子 flywheel rotor

飞轮储能单元内部核心储能元件，是由高强度材料组成的大惯量旋转体。

3.11

发电/电动机 power generation/electric motors

发电/电动机是既可以作发电机使用，又可作为电动机使用的机电能量转换设备。

3.12

真空密封壳体 vacuum sealed housing

飞轮储能单元外部壳体，主要起到真空密封和支撑结构的作用。

3.13

支承部件 supporting components

支承部件主要支撑旋转的飞轮转子，包括永磁轴承、电磁轴承及其组合。

3.14

磁轴承控制器 magnetic bearing controller

磁轴承控制器是通过位移传感器获取转子的位移数据，采用控制算法进行数据处理，计算得到下一时刻的输出信息并将之输出到功率放大器中。功率放大器将控制电压信号转换为驱动电流输入电磁铁线圈，从而产生作用于转子的电磁力，使转子保持五自由度全悬浮状态。

3.15

备用轴承 spare bearings

备用轴承是为了避免飞轮转子在失稳后对设备造成的损坏，安装的保护轴承。这是一套额外的被动轴承，只有在非常极端的状况下才与之相接触。它应该有能力在一段时间内支承转子直至恢复正常运行状况或直至转子安全降速。

3.16

功率接口部件 power interface components

功率接口部件为电机与磁轴承的功率输入/输出接线端口。

3.17

传感器及接口部件 sensors and interface components

传感器及接口部件是包含转速、位移、温度和真空度等传感器及信号输出接线端口。

3.18

辅助设备 auxiliary equipment

为了维持飞轮储能单元内部温度及真空度要求所需的冷却装置、真空装置以及监控设备。

3.19

监控装置 monitoring device

对飞轮储能系统运行状态进行监测和控制的装置，以及用于监测飞轮储能单元温度、真空、振动等的仪器仪表。

3.20

冷却装置 cooling system

辅助设备中，用于飞轮储能单元中发电/电动部件冷却，包括冷却设备和冷却循环管路或风道。

3.21

真空装置 vacuum equipment

辅助设备中，为飞轮储能单元提供真空运行环境的组件及其连接管路。

3.22

额定转速 rated speed

由制造商对飞轮转子在规定运行条件下所指定的一个转速值。

3.23

储能量 store energy

在额定转速下，飞轮储能单元储存的动能。

3.24

额定功率 rated power

由制造商所指定的飞轮储能单元输入/输出功率。

3.25

自由降速 free spin-down

在充/放电变流器停止能量输入的状态下，飞轮储能单元由于自身损耗导致储能量损失，而使飞轮转子的转速降低。

3.26

放电深度 discharge depth

从额定转速开始以额定功率连续放出的最大电能与储能量的百分比。

4 规格

电力级五自由度磁悬浮飞轮储能单元的规格信息应采用易识别易读取的编码或文本形式标示于产品外观或铭牌，规格的标识见图2。



图 2 规格信息图

5 技术要求

5.1 环境条件

测试应在以下环境条件下进行:

- a) 环境温度: $-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$;
- b) 相对湿度: $\leq 90\%$;
- c) 海拔高度: $\leq 1000\text{m}$ 。

5.2 电气条件

测试场地电气安全应满足GB 4793.1的要求。

5.3 性能测试要求

5.3.1 飞轮转子检测

每台飞轮转子应进行无损探伤检测, 确保飞轮转子表面及内部无任何缺陷。每一批次制造的飞轮转子都应对飞轮转子材料取样, 并进行力学性能检测。材料的屈服强度至少为飞轮转子仿真计算出的最大应力值的1.3倍以上。

5.3.2 转速测试

飞轮储能单元测试转速应不小于额定转速。

5.3.3 功率测试

飞轮储能单元测试功率应不小于额定功率。

5.3.4 储能量

飞轮储能单元储能量应不小于额定储能量。

5.3.5 自由降速损耗

飞轮储能单元自由降速损耗均值应不大于额定功率的0.3%。

5.3.6 安全稳定性

当飞轮转子发生失稳状况时，应至少满足下列条件之一：

- a) 磁悬浮控制系统在 1min 内使之恢复正常状态，并且备用轴承应在飞轮转子恢复正常状态前，保证飞轮储能单元不发生损坏；
- b) 飞轮转子发生失稳状态后，备用轴承能够保证在 30min 内飞轮储能单元的安全运行。

5.3.7 绝缘耐压性

发电/电动机的耐电压测试应满足GB/T 755-2019中9.2的要求。

5.3.8 温升

飞轮储能单元的温升应满足GB/T 755-2019中8.10的要求。

5.3.9 密封性

飞轮储能单元工作时腔体内的真空度应不大于100Pa。

5.3.10 接地保护

飞轮储能单元应满足GB/T 755-2019中11.1的要求，接地电阻小于4Ω。

6 试验方法

6.1 飞轮转子探伤

按JB/T 5000.15-2007标准中的规定进行检测，应满足5.3.1规定的要求。

6.2 力学性能检测

按GB/T 228.1-2010标准中的规定进行检测，应满足5.3.1规定的要求。

6.3 转速测试

6.3.1 转速测试回路框图见图 3。

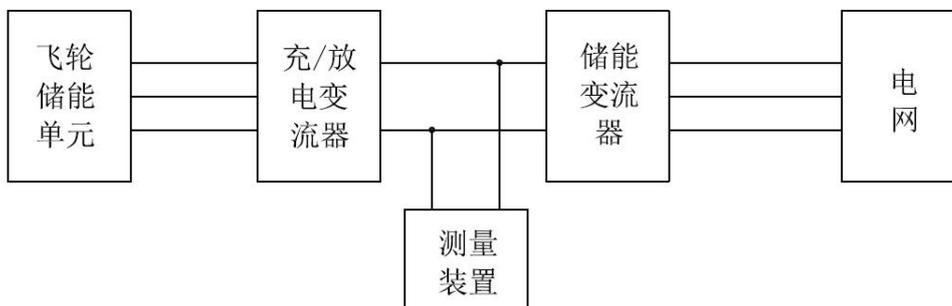


图 3 储能量测试回路框图

6.3.2 转速测试应按以下步骤进行：

- a) 按照图 2 连接测试回路；

- b) 控制飞轮储能单元的转速大于等于额定转速值，保持此转速连续平稳运行 10min 以上，测量并记录飞轮储能单元的转速值。
- c) 测试转速值应满足 5.3.2 的规定的要求。

6.4 功率测试

6.4.1 功率测试应按以下步骤进行：

- a) 按照图 2 连接测试回路；
- b) 控制飞轮储能单元以额定功率开始充电，直至到达额定转速；
- c) 控制飞轮储能单元以额定功率放电，直至到达放电深度，测量并记录飞轮储能单元的充电和放电功率值。
- d) 测试转速值应满足 5.3.3 规定的要求。

6.5 储能量计算

6.5.1 储能量测试应按以下步骤进行：

- a) 按照图 2 连接测试回路；
- b) 控制飞轮储能单元在额定转速下以额定功率开始放电，直至到达飞轮储能系统的放电深度，测量并记录飞轮储能单元的输出储能量 E_{out} 。
- c) 按式 (1) 计算飞轮储能单元的极转动惯量：

$$J = \frac{2E_{out}}{\omega^2(2n-n^2)} \dots\dots\dots(1)$$

式中：

- J ——飞轮转子的极转动惯量；
- E_{out} ——飞轮储能单元的测得输出能量；
- ω ——飞轮储能单元的额定转速
- n ——飞轮储能单元的放电深度。

- a) 按式 (2) 计算飞轮储能单元的储能量

$$E = \frac{1}{2}J\omega^2 \dots\dots\dots(2)$$

式中：

- E ——飞轮储能单元的储能量；
 - J ——飞轮转子的极转动惯量；
 - ω ——飞轮转子的额定转速。
- 计算出的储能量 E 应满足 5.3.4 的规定的要求。

6.6 自由降速试验

6.6.1 自由降速测试应按以下步骤进行：

- a) 按照图 2 连接测试回路；
- b) 控制飞轮储能单元在额定转速下关闭充/放电变流器，让飞轮储能单元自由降速直至到达额定转速的 20%，测量并记录飞轮储能单元的转速值，测量记录频率 $\geq 1\text{Hz}$ ；
- c) 按式 (3) 计算飞轮储能单元的每个采样时刻的自由损耗功率：

$$P_t = \frac{J(\omega_{t-1}^2 - \omega_t^2)}{2\Delta t} \dots\dots\dots(3)$$

式中：

P_t ——在t时刻飞轮储能单元的自由损耗功率；

J ——飞轮转子的极转动惯量；

ω_t ——在t时刻飞轮转子的转速。

ω_{t-1} ——在t-1时刻飞轮转子的转速。

Δt ——转速采样时间间隔。

- d) 计算出所有时刻自由损耗功率的平均值；
- e) 计算出的自由损耗功率平均值应满足 5.3.5 的规定的要求。

6.7 失稳测试

6.7.1 失稳测试应按以下步骤进行：

- a) 试验准备：
 - 失稳测试试验应在拥有充分安全防护措施的试验地坑中进行；
 - 测试人员与测试设备应绝对隔离，防止任何可能出现的意外状况所带来的损害；
 - 应有充分的预备方案，当时失稳测试试验失败时，能立即安全的终止试验，确保人员与设备的安全。
- b) 按照图 1 连接测试回路；
- c) 控制飞轮储能单元达到额定转速；
- d) 通过磁轴承控制器断开磁轴承线圈供电，人为导致飞轮转子出现失稳状态后，恢复磁轴承线圈供电，测量并记录飞轮储能单元的失稳时间，直到飞轮转子恢复正常运行状态；
- e) 如果失稳时间超过 5.3.7 规定的要求，应立即启动预案终止试验；
- f) 失稳测试应满足 5.3.7 的规定的要求。

6.8 耐电压测试

耐电压测试应按照GB/T 755-2019中9.2的测试方法进行。

6.9 温升测试

温升测试应按照 GB/T 755-2019 中 8 的测试方法进行。

6.10 密封性测试

在6.3的测试过程中，测量并记录飞轮储能单元的真空度，真空度应满足5.3.9的规定的要求。

7 检验规则

7.1 出厂检验

7.1.1 每台产品均应进行出厂检验，经过检验合格后方可出厂，并具有证明合格的产品出厂证明书。

7.1.2 出厂检验项目见表 1。

表 1 检验项目

序号	试验项目	型式试验	出厂试验	测试方法
1	飞轮转子探伤	√	√	6.1
2	力学性能检测	√	√	6.2
3	转速测试	√	√	6.3

表 1（续）

4	功率测试	√	√	6.4
5	储能量计算	√		6.5
6	自由降速试验	√		6.6
7	失稳测试	√		6.7
8	耐电压测试		√	6.8
9	温升测试	√		6.9
10	密封性测试	√	√	6.10

7.2 型式试验

7.2.1 在下列情况下，产品应进行型式检验：

- a) 新设计的产品（包括转厂生产），在定型鉴定前应进行型式检验；
- b) 连续生产的产品，每四年应进行一次型式检验；
- c) 正式投产后，当设计，制造工艺或主要元器件有较大改变，可能影响产品性能时，应进行型式检验；
- d) 停产一年以上又重新生产时，应进行型式检验。

7.2.2 型式检验项目见表 1。

7.2.3 型式检验应在出厂检验合格的产品中任意抽取一台作为检验样品。

7.2.4 产品型式检验不合格，该产品应停止生产，直至查明并消除不合格的原因，再次型式检验合格后方能恢复生产。