

ICS 29.240.01

CCS F 20/29

# 团 体 标 准

T/CIECCPA 020—2023

## 一次调频用飞轮储能系统接入技术规范

Technical specification for access to Flywheel energy storage system  
for primary frequency modulation

2023 - 04 - 26 发布

2023 - 04 - 27 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

CLECCPA

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 测试条件..... 3

    4.1 测试环境..... 3

    4.2 电气条件..... 3

    4.3 安装要求..... 3

    4.4 安全防护..... 3

5 技术要求..... 3

    5.1 功率..... 3

    5.2 支撑时间..... 4

    5.3 响应时间..... 4

    5.4 转换时间..... 4

    5.5 调节时间..... 4

    5.6 功率控制精度..... 4

    5.7 充放电循环效率..... 4

    5.8 待机损耗..... 4

    5.9 连续工作时间测试..... 4

    5.10 一次调频技术规定..... 4

    5.11 三相电压不平衡度..... 4

    5.12 谐波..... 4

    5.13 直流分量..... 4

    5.14 故障穿越..... 4

6 试验方法..... 5

    6.1 单循环测试..... 5

6.2 待机损耗测试.....	7
6.3 连续工作测试.....	8
6.4 一次调频试验.....	8
6.4.1 试验工况.....	8
6.4.2 试验项目.....	9
6.4.3 数据记录.....	9
6.4.4 复核试验.....	9
6.5 三相电压不平衡度测试.....	9
6.6 谐波.....	9
6.7 直流分量.....	9
6.8 故障穿越.....	9
图 1 飞轮储能系统示意图.....	5
图 2 飞轮储能系统单循环测试功率曲线.....	6
图 3 飞轮储能系统连续工作测试功率曲线.....	8

## 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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口管理。

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。

本文件主要起草单位：华驰动能（北京）科技有限公司、国家电投集团科学技术研究院有限公司、天津飞旋科技股份有限公司、湖南中车尚驱电气有限公司、中国电力科学研究院有限公司、国网宁夏电力有限公司电力科学研究院、国网内蒙古东部电力综合能源服务有限公司。

本文件主要起草人：王志强、苏森、白宁、杨晶、沙宏磊、魏庆、晏才松、曾纯、彭龙、韩坤、孙册、邓向辉、李文锋、艾东平、于大海、李旭涛、任勇、王方胜、孙振江。

本文件为首次发布。

CLECCPA

# 一次调频用飞轮储能系统接入技术规范

## 1 范围

本标准规定了一次调频用飞轮储能系统的测试条件、技术要求、试验方法等内容。

本标准适用于额定功率1MW及以上、支撑时间不低于2min的用于电力系统电源一次调频辅助设备的飞轮储能系统，其他容量和支撑时间的一次调频辅助用飞轮储能系统可参照执行。飞轮储能系统可用于独立一次调频和其他储能的联合一次调频。

注：电力系统电源包括：火电、水电、核电、风电、光热、光伏等各类发电厂，以及抽水蓄能等储能电站。

## 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 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

GB/T 12325 电能质量 供电电压偏差

GB/T 12326 电能质量 电压波动和闪变

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 24337 电能质量 公用电网间谐波

GB/T 36547 电化学储能系统接入电网技术规定

GB/T 36548 电化学储能系统接入电网测试规范

GB/T 40595 并网电源一次调频技术规定及试验导则

T\_ZSA 123 磁悬浮飞轮储能本体技术规范

T\_ZSA 124 磁悬浮飞轮储能系统技术规范

## 3 术语和定义

### 3.1

**飞轮储能** flywheel energy storage

飞轮储能是指利用电动机带动飞轮高速旋转，在需要的时候再用飞轮带动发电机发电的物理储能方式。

[来源:T\_ZSA 123—2022,3.1]

### 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、飞轮储能系统控制器、充/放电变流器、储能变流器和制动电阻（可选）组成的系统装置统称。飞轮储能系统可以由满足一次调频要求的单个或多个阵列的储能装置组成。

[来源:T\_ZSA 124—2022,3.1]

### 3.3

#### 飞轮储能系统控制器 flywheel energy storage system controller

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。

[来源:T\_ZSA 124—2022,3.2]

### 3.4

#### 额定转速 Rated speed

在安全稳定运行状态下，飞轮储能系统设定的最高转速。

### 3.5

#### 工作转速区间 Working speed range

飞轮储能系统满足稳定工作状态的最小转速至额定转速的转速区间。

### 3.6

#### 待机状态 ready mode

飞轮储能系统正常稳定运行在工作转速区间的某一转速，收到控制指令即可与电网进行能量交换的状态。

### 3.7

#### 充电过程 charging process

飞轮储能系统作为电力负荷，从外接电源吸收能量，以电动机方式运行且转速逐渐升高，将电能转化为动能储存在飞轮储能单元内的过程。

[来源:T\_ZSA 124—2022,3.3]

### 3.8

#### 放电过程 discharge process

飞轮储能系统作为电源以发电机方式运行且转速下降，将存储的动能以电能的方式释放出来，通过充/放电变流器和/或储能变流器输出到电网或负载的过程。

[来源:T\_ZSA 124—2022,3.4]

### 3.9

#### 充放电循环效率 Charge and discharge cycle efficiency

在交流网侧计量，飞轮储能系统额定功率放电时输出能量与同循环过程中额定功率充电时输入能量的比值，用百分数表示。

### 3.10

#### 支撑时间 support time

在不超额定转速的状态下，飞轮储能系统以额定功率持续充电（或放电）的最长时间。

### 3.11

#### 响应时间 response time

待机状态下，飞轮储能系统自收到控制信号起，从待机状态转换成充电/放电状态，直到充电/放电功率首次达到额定功率90%的时间。

### 3.12

#### 调节时间 settling time

飞轮储能系统从待机状态转换成充电/放电状态，从充电/放电功率首次达到额定功率起，直到功率偏差最终控制在额定功率的 $\pm 2\%$ 以内的时间。



### 3.13

#### 转换时间 transfer time

飞轮储能系统充电/放电状态下,自收到控制信号起,从充电/放电状态转换成放电/充电状态,直到放电/充电功率首次达到额定功率90%的时间。

### 3.14

#### 一次调频 primary frequency control;PFC

当电力系统频率偏离目标频率时,电源通过控制系统的自动反应,调整有功出力减少频率偏差的控制功能。

[来源:GB 40595—2021,3.1]

## 4 测试条件

### 4.1 测试环境

测试应在以下环境条件下进行:

- a) 环境温度:  $-40^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ ;
- b) 相对湿度:  $\leq 90\%$ ;
- c) 海拔高度:  $\leq 2000\text{m}$ 。

### 4.2 电气条件

测试场地电气安全应满足 GB 4793.1-2007 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。

### 4.3 安装要求

测试飞轮本体安装应符合以下要求:

- a) 飞轮本体安装使用地点无强烈振动和冲击,无强电磁干扰,外磁场感应强度均不得超过  $0.5\text{mT}$ ;
- b) 飞轮本体安装垂直倾斜度不超过  $1.5^{\circ}$ ;
- c) 飞轮本体使用地点不得有爆炸危险介质,周围介质不含有腐蚀金属和破坏绝缘的有害气体及导电介质,不允许有霉菌存在。

### 4.4 安全防护

测试前应满足以下安全防护要求:

- a) 飞轮本体应安装在拥有充分安全防护措施的试验地坑中,地坑应具备抗冲击能力的密闭盖板;
- b) 测试系统应配备监测装置,监测项目包含转速、温度、真空度、电流、电压等,且运行正常,测试开始前监测数据都应在安全合理范围内;
- c) 飞轮本体应完全固定,且测试线路连接无误;
- d) 测试回路中应配备制动电阻,且功率不小于额定功率的  $1/2$ ;
- e) 测试人员应与飞轮本体绝对隔离,且不在同一水平高度,以防止任何可能出现的意外发生。

## 5 技术要求

### 5.1 功率

飞轮储能系统测试功率应不小于额定功率。

## 5.2 支撑时间

飞轮储能系统的支撑时间应不小于 2min。

## 5.3 响应时间

飞轮储能系统的响应时间应不大于 100ms。

## 5.4 转换时间

飞轮储能系统的转换时间应不大于 200ms。

## 5.5 调节时间

飞轮储能系统的调节时间应不大于 100ms。

## 5.6 功率控制精度

飞轮储能系统的控制精度误差应不超过 $\pm 1\%$ 。

## 5.7 充放电循环效率

飞轮储能系统额定功率能量转换效率应不低于 85%。

## 5.8 待机损耗

飞轮储能系统在额定转速的待机损耗应不大于额定功率的 5%。

## 5.9 连续工作时间测试

飞轮储能系统应至少连续运行 168 小时，且额定功率充放电次数不低于 1680 次。

## 5.10 一次调频技术规定

基于飞轮储能系统的并网电源一次调频技术应满足 GB/T 40595-2021 中 5-9 的要求。

## 5.11 三相电压不平衡度

飞轮储能系统接入公共连接点的电压不平衡度应满足 GB/T 15543 的要求，电压偏差应满足 GB/T 12325 的要求，电压波动和闪变值应满足 GB/T 12326 的要求。

## 5.12 谐波

飞轮储能系统接入公共连接点的谐波电压应满足 GB/T 14549 的要求。

飞轮储能系统接入公共连接点的间谐波电压应满足 GB/T 24337 的要求。

## 5.13 直流分量

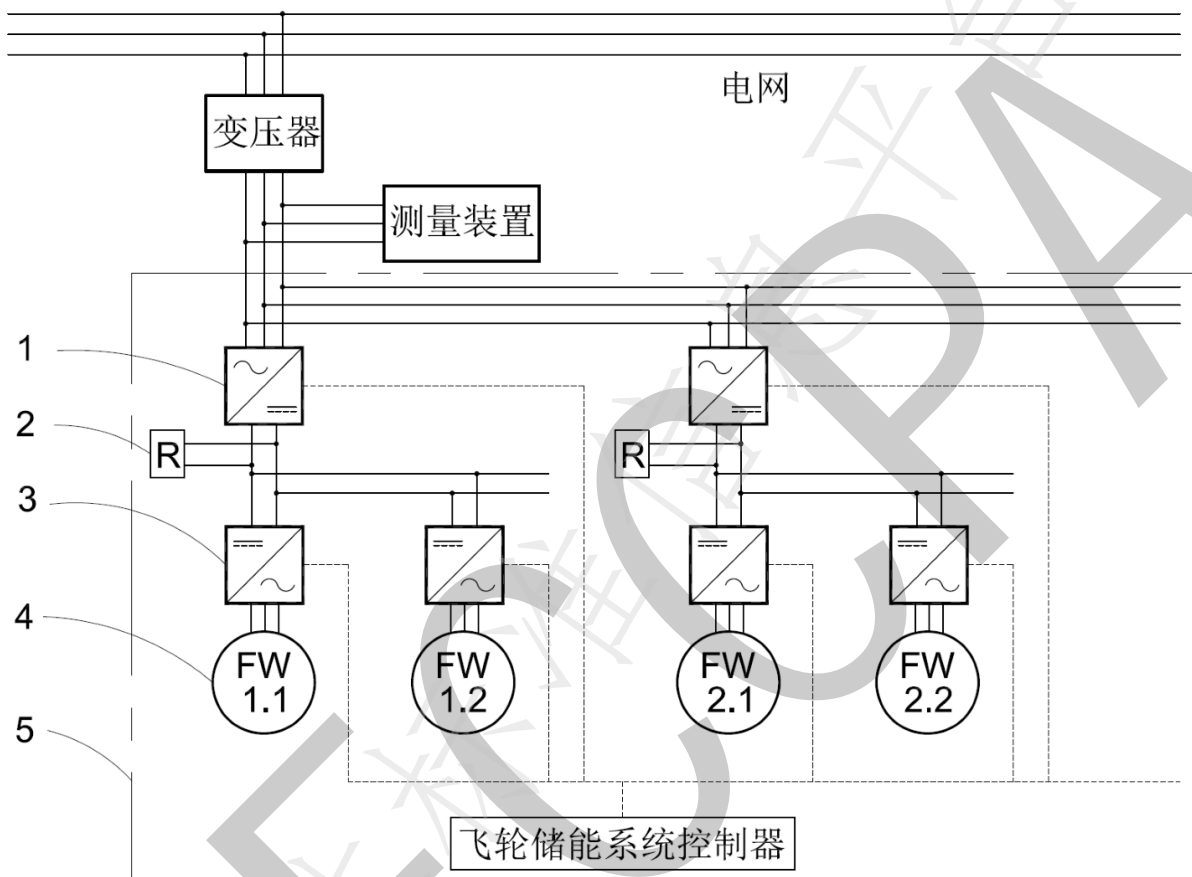
飞轮储能系统接入公共连接点的直流电流分量不应超过其交流额定值的 0.5%。

## 5.14 故障穿越

飞轮储能系统故障穿越能力应符合 GB/T 36547-2018 中 7.2 的规定。

## 6 试验方法

### 6.1 单循环测试



1.储能变流器；2.刹车电阻；3.充/放电变流器；4.飞轮储能单元；5.飞轮储能系统。

图 1 飞轮储能系统示意图

测试应按以下步骤进行：

- 飞轮储能系统按照图 A 连接测试回路，测试装置连接在交流侧；
- 控制飞轮储能系统到达额定功率工作转速区间内的最低转速；
- 按图 B 中  $S_{in}1$  信号指令控制飞轮储能系统，首先按  $S_{in}1+$  控制指令进行额定功率充电，直至到达额定转速后切换到  $S_{in}1-$  控制指令进行额定功率放电，直至到达额定功率工作转速区间内的最低转速后再次切换到  $S_{in}1+$  控制指令进行额定功率充电，直至充电功率稳定后；切换到  $S_{in}10$  控制指令进行零功率控制，直至功率稳定后，再次切换到  $S_{in}1-$  控制指令进行额定功率放电，直至放电功率稳定后，切换到  $S_{in}10$  控制指令进行零功率控制。
- 通过测量装置记录整个过程的控制指令曲线和功率曲线数据，如图 B 所示，记录第一次充电过程输入能量  $E_{in}$  和第一次放电过程输出能量  $E_{out}$ ；
- 分别测试数据中提取并计算得出以下测试结果：
  - 额定充电功率  $P_{in}$  和额定放电功率  $P_{out}$ ；
  - 充电响应时间  $t_u$ ：测试中从第一次接收到  $S_{in}1+$  控制指令开始，直到充电功率首次达到额定功率 90% 的时间；

- 3) 放电响应时间 $t_d$ : 测试中从第二次接收到Sinal-控制指令开始,直到放电功率首次达到额定功率90%的时间;

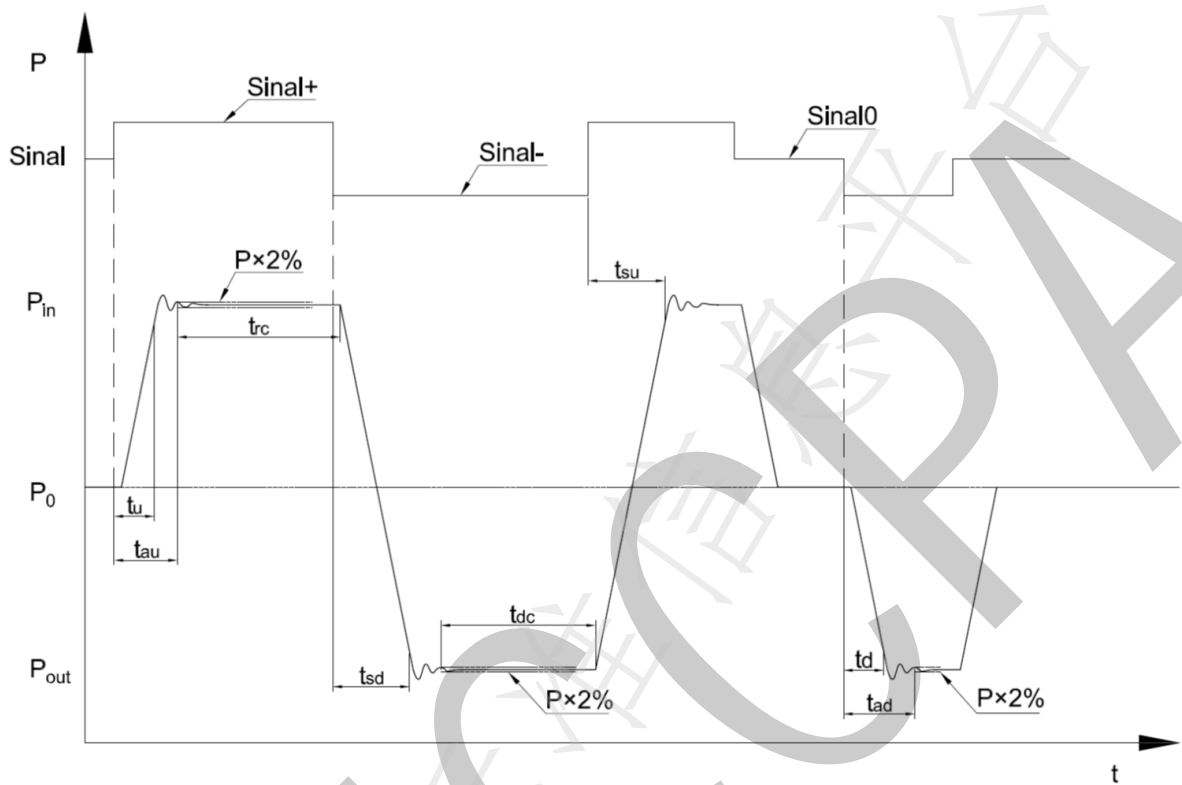


图 2 飞轮储能系统单循环测试功率曲线

图中:

- Sinal — 控制指令;
- Sinal+ — 额定功率充电控制指令;
- Sinal- — 额定功率放电控制指令;
- Sinal0 — 零功率控制指令;
- P — 额定功率;
- $P_{in}$  — 额定充电功率;
- $P_{out}$  — 额定放电功率;
- $P_0$  — 零功率;
- $t_{rc}$  — 充电支撑时间;
- $t_{dc}$  — 放电支撑时间;
- $t_u$  — 充电响应时间;
- $t_d$  — 放电响应时间;
- $t_{au}$  — 充电调节时间;
- $t_{ad}$  — 放电调节时间;
- $t_{sd}$  — 充电到放电转换时间;
- $t_{su}$  — 放电到充电转换时间;

- 4) 充电调节时间 $t_{au}$ : 测试中从第一次接收到Sinal+控制指令开始,直到充电功率首次达到额定功率且功率偏差稳定在额定功率的 $\pm 2\%$ 以内的起始时刻的时间;

- 5) 放电调节时间 $t_{ad}$ : 测试中从第二次接收到Sinal-控制指令开始, 直到放电功率首次达到额定功率且功率偏差稳定在额定功率的 $\pm 2\%$ 以内的起始时刻的时间;
- 6) 充电支撑时间 $t_{rc}$ : 测试中从第一次以额定功率稳定(控制在 $\pm 2\%$ 以内)充电开始, 直到额定功率充电终止的时间;
- 7) 放电支撑时间 $t_{dc}$ : 测试中从第一次以额定功率稳定(控制在 $\pm 2\%$ 以内)放电开始, 直到额定功率放电终止的时间;
- 8) 充电到放电转换时间 $t_{sd}$ : 测试中从第一次接收到Sinal-控制指令开始, 直到放电功率首次达到额定功率90%的时间;
- 9) 放电到充电转换时间 $t_{su}$ : 测试中从第二次接收到Sinal+控制指令开始, 直到充电功率首次达到额定功率90%的时间;
- 10) 额定功率充电控制精度 $\Delta P_{in}$ 按公式(1)计算:

$$\Delta P_{in} = \max\left(\frac{|P_{inset} - P_{inmax}|}{P_{inset}}, \frac{|P_{inset} - P_{inmin}|}{P_{inset}}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$\Delta P_{in}$  —— 额定功率充电控制精度;

$P_{inset}$  —— 设定额定充电功率值, 单位为(W);

$P_{inmax}$  —— 实际测试中第一次达到设定额定充电功率后, 从第10秒到第50秒的功率最大值, 单位为(W);

$P_{inmin}$  —— 实际测试中第一次达到设定额定充电功率后, 从第10秒到第50秒的功率最小值, 单位为(W);

- 11) 额定功率放电控制精度 $\Delta P_{out}$ 按公式(2)计算:

$$\Delta P_{out} = \max\left(\frac{|P_{outset} - P_{outmax}|}{P_{outset}}, \frac{|P_{outset} - P_{outmin}|}{P_{outset}}\right) \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$\Delta P_{out}$  —— 额定功率放电控制精度;

$P_{outset}$  —— 设定额定放电功率值, 单位为(W);

$P_{outmax}$  —— 实际测试中第一次达到设定额定放电功率后, 从第10秒到第50秒的功率最大值, 单位为(W);

$P_{outmin}$  —— 实际测试中第一次达到设定额定放电功率后, 从第10秒到第50秒的功率最小值, 单位为(W);

- 12) 额定功率充放电转换效率 $\eta$ 按公式(3)计算:

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中:

$\eta$  —— 额定功率充放电转换效率;

$E_{in}$  —— 测试中第一次充电过程输入能量, 单位为(W·h);

$E_{out}$  —— 测试中第一次放电过程输出能量, 单位为(W·h);

- f) 重复 b)~e)三次, 取 3 次测试结果的平均值;
- g) 所有测试项结果应满足 5.1-5.7 规定的要求。

## 6.2 待机损耗测试

待机损耗测试应按以下步骤进行测试:

- a) 飞轮储能系统按照图 A 连接测试回路;

- b) 控制飞轮储能系统稳定在额定转速，保持此状态连续平稳运行 10min 以上，通过测量装置记录下实时的飞轮系统输入有功功率值；
- c) 计算出实时的飞轮系统输入有功功率的平均值，结果应满足 5.8 规定的要求。

6.3 连续工作测试

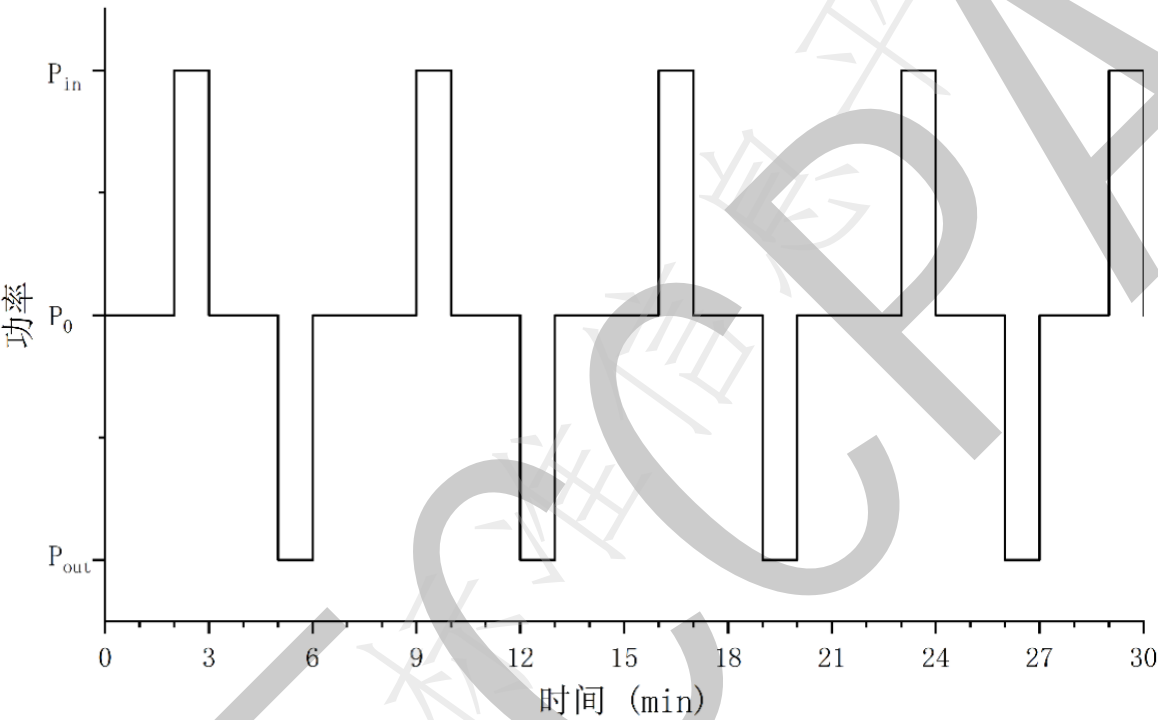


图 3 飞轮储能系统连续工作测试功率曲线

图中：

- $P_{in}$  —— 额定充电功率
- $P_{out}$  —— 额定放电功率
- $P_0$  —— 零功率

连续工作时间测试应按以下步骤进行：

- a) 飞轮储能系统按照图 A 连接测试回路；
- b) 控制飞轮储能系统到达额定功率工作转速区间内的最低转速；
- c) 控制飞轮储能系统以额定功率充电一分钟-维持两分钟-额定功率放电一分钟-维持两分钟的循环方式连续运行，功率曲线图 C 所示；
- d) 在整个运行过程中，需实时监测记录：运行转速、电机温度、磁轴承温度、真空度。记录间隔应不超 2s；
- e) 连续工作测试时间与充放电次数应满足 5.9 规定的要求，且飞轮储能系统在整个测试过程中运行稳定无任何异常。

6.4 一次调频试验

6.4.1 试验工况

一次调频试验应选择充电状态下的高负荷和低负荷工况，以及放电状态下的高负荷和低负荷工况。

#### 6.4.2 试验项目

##### 6.4.2.1 一次调频死区测试

通过连线改变模拟的机组频差（转速）信号测试一次调频死区，直至有功功率开始规律性调节。

##### 6.4.2.2 一次调频动态性能测试

通过频差（转速）阶跃试验得到一次调频滞后时间、上升时间、调节时间。

每个工况阶跃试验至少包含 $\pm 0.05\text{Hz}$ 、 $\pm 0.15\text{Hz}$ 、 $\pm 0.2\text{Hz}$ 的有效频差阶跃，最大有效频差宜不超过 $\pm 0.25\text{Hz}$ ，频差应持续保持至一次调频功率达到理论计算值后 30 s。

##### 6.4.2.3 一次调频限幅测试

设置有一次调频限幅的，应测试充电状态下的高负荷和低负荷工况，以及放电状态下的高负荷和低负荷工况下的最大调节幅度。

#### 6.4.3 数据记录

6.4.3.1 应采用连续录波方式记录频率（转速）偏差、一次调频调节量输出、电气功率等信号。

6.4.3.2 测试信号的输出扫描周期应不大于 50 ms。

#### 6.4.4 复核试验

6.4.4.1 试验项目应包括：死区测试、一次调频动态性能测试、一次调频限幅测试。

6.4.4.2 试验应包括低负荷及高负荷运行区间的两个工况。

6.4.4.3 复核试验应满足 5.10 规定。

#### 6.5 三相电压不平衡度测试

磁悬浮飞轮储能系统在充电和放电状态下分别测试，并按照 GB/T 15543 的相关规定进行系统的三相电压不平衡度测试。

#### 6.6 谐波

磁悬浮飞轮储能系统在充电和放电状态下分别测试，并按照 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。

#### 6.7 直流分量

磁悬浮飞轮储能系统接入公共连接点的直流电流分量应纳按 GB/T 36548-2018 中 7.6.3 的规定进行测试。

#### 6.8 故障穿越

磁悬浮飞轮储能系统故障穿越能力应按 GB/T 36548-2018 中 7.4 及 7.5 的规定进行测试。