



# 飞轮储能安全性浅析 及在新能源一次调频中的应用

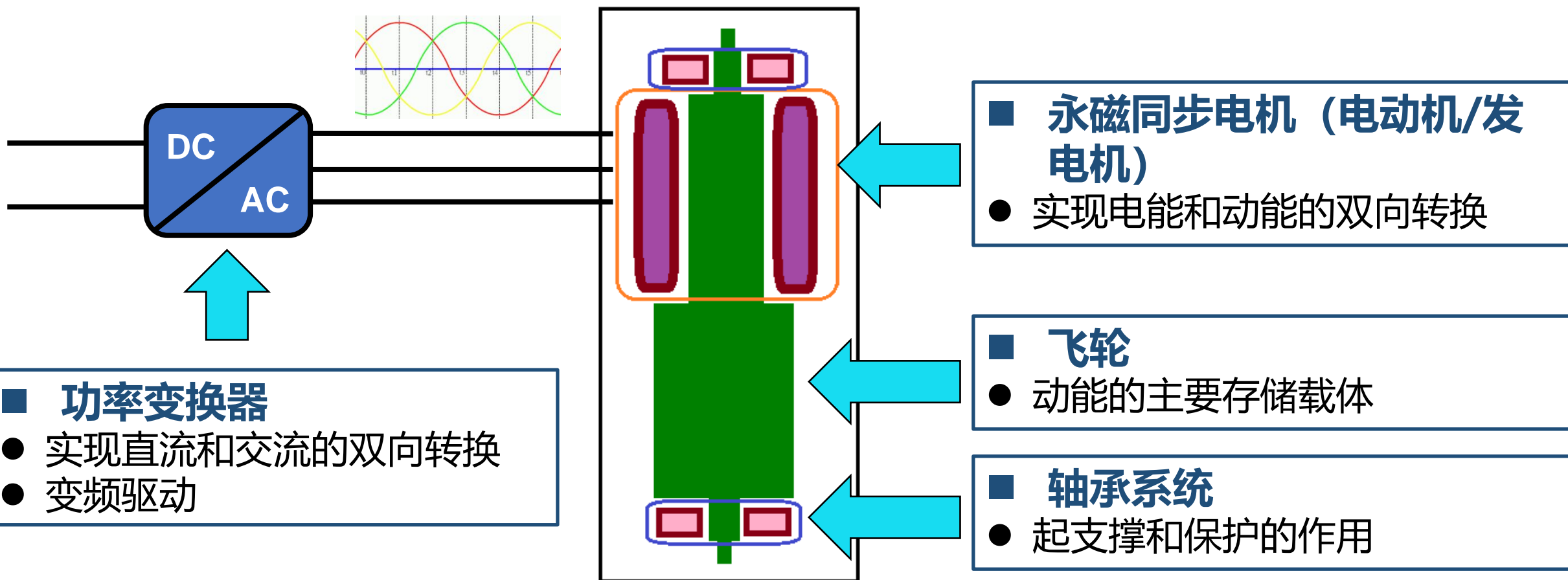
沈阳微控新能源技术有限公司 陈焯



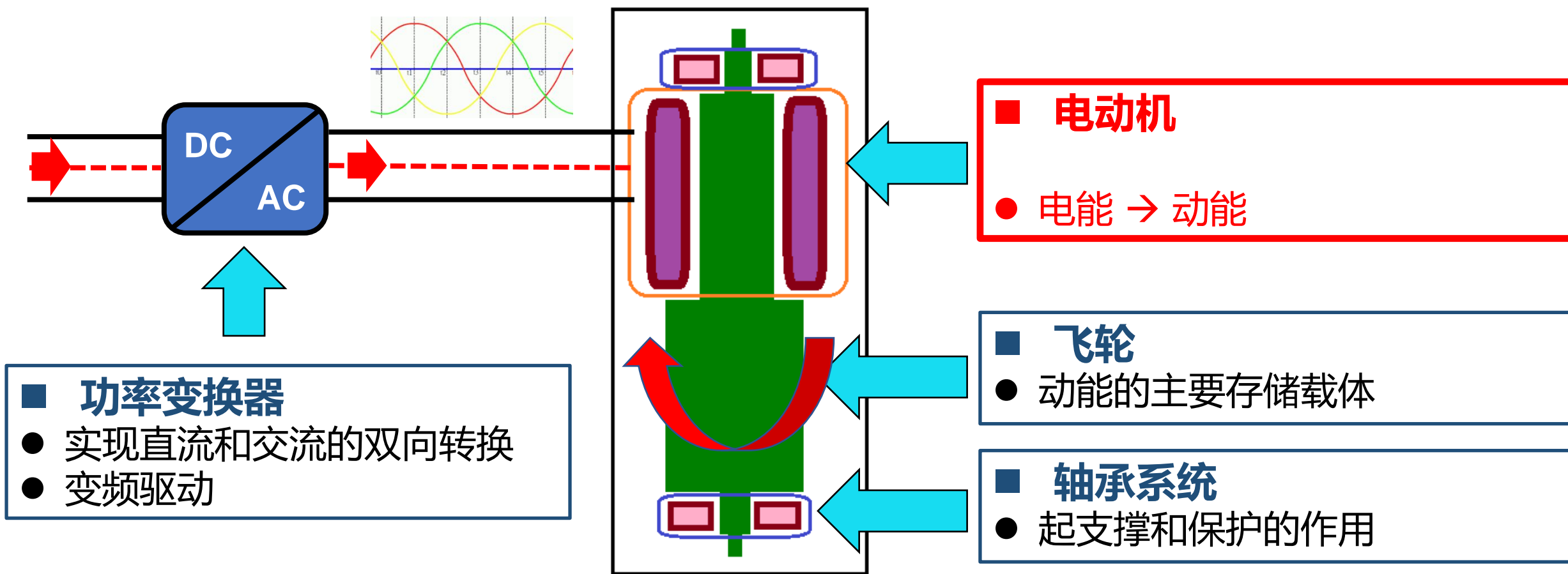
# 飞轮储能技术简介及安全性机理

---

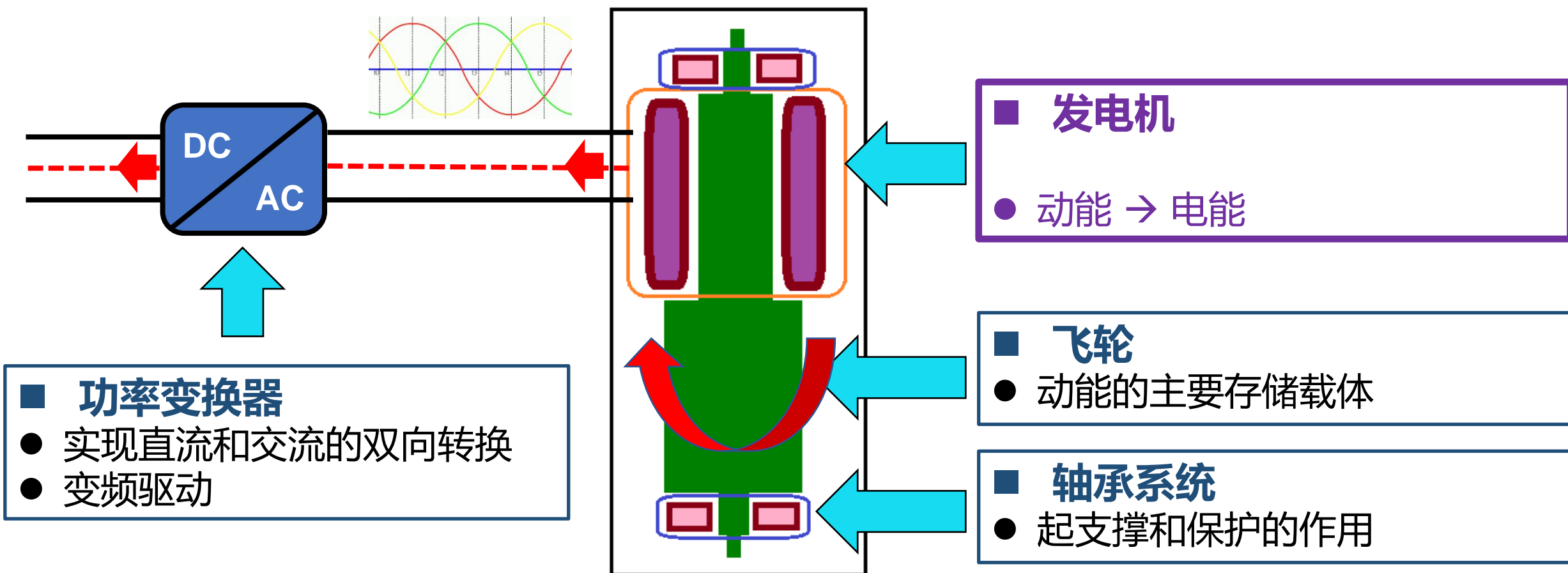
- **飞轮储能**是一种物理储能方式，利用高速旋转的飞轮将电能以动能形式储存。



- **充电原理：**电机工作在电动机状态，外部电能输入，驱动飞轮高速旋转，电能转换为动能储存



- **放电原理：**电机工作在发电机状态，利用飞轮高速旋转的惯性带动转子旋转，通过发电机将飞轮存储的动能转换成电能输出



- 飞轮储能公式:  $E = \frac{1}{2} J \omega^2$  , 储能量与飞轮的质量成正比, 与角速度 (转速) 的平方成正比
- 飞轮储能是一种多学科融合的综合性技术
- 安全性是飞轮储能技术的基础
- 大功率、高频次、长寿命是飞轮储能技术的优势
- 高速、低损耗是飞轮技术的发展方向



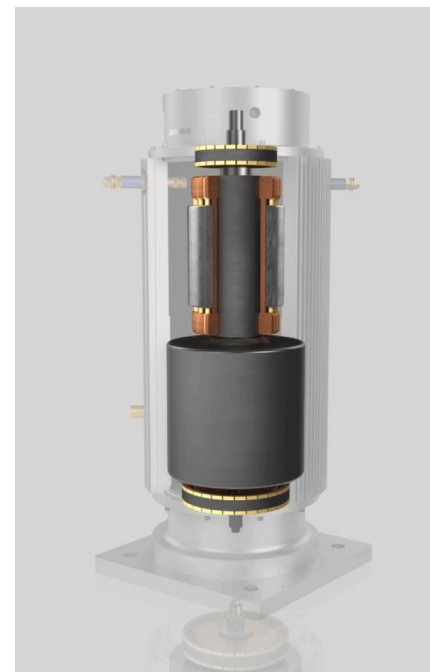
### 第一代

低速飞轮 (3000转/分钟左右), 机械轴承, 体积大, 损耗大



### 第二代

中速飞轮 (4000-10000转/分钟左右), 磁力卸载机械轴承, 功耗大



### 第三代

高速飞轮 (30000转/分钟以上), 磁悬浮轴承, 损耗小, 使用寿命长

## □ 飞轮系统安全性分析

飞轮储能系统的优势之一是高安全性，但并不代表飞轮使用没有安全隐患。飞轮作为高速旋转体，解体/失稳带来的破坏性巨大，因此飞轮的应用安全最为重要的是从飞轮产品的设计、加工、检测、控制等各方面入手，确保飞轮在运行中不会发生上述问题。

## □ 飞轮解体的原因及飞轮使用寿命的计算方式

由于飞轮一直处于高速-低速变化的充放电循环之中，应力波动幅度大，在材料中会产生撕裂效应，从而产生裂纹扩展。当裂纹扩展到极值时，会使得飞轮产生破坏性损坏。损坏前飞轮充放电循环的次数，就是飞轮的疲劳寿命。

- 萌生寿命：假定材料没有缺陷，从产生裂纹到发展至破坏性裂纹所经历的应力循环次数。一般采用SN曲线计算。
- 残余寿命：假定在材料中存在一定尺寸缺陷（如气泡、裂纹）的情况下，基于给定的初始缺陷粒度、应力循环幅值和最大应力，计算初始缺陷发展至破坏性裂纹所经历的应力循环次数。

## □ 飞轮失稳

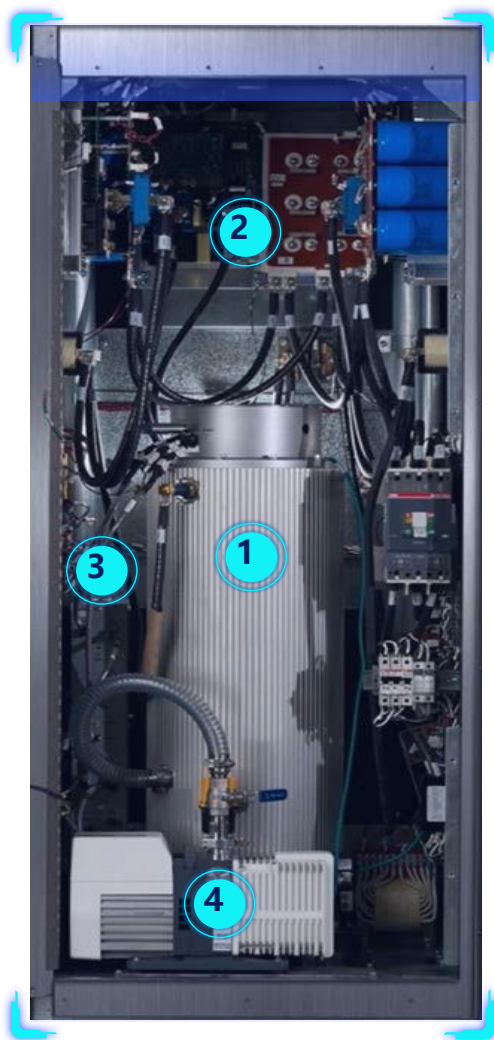
在飞轮转子旋转过程中，由飞轮的轴承体系为飞轮转子提供支撑，保障飞轮旋转的稳定性，并避免与真空室外壁等发生物理接触。需通过技术手段保障飞轮轴系的稳定性，并对可能产生的轴承失效进行防护。

- 轴承类型：机械轴承、磁轴承、磁悬浮轴承
- 飞轮转子类型：合金钢、复合材料

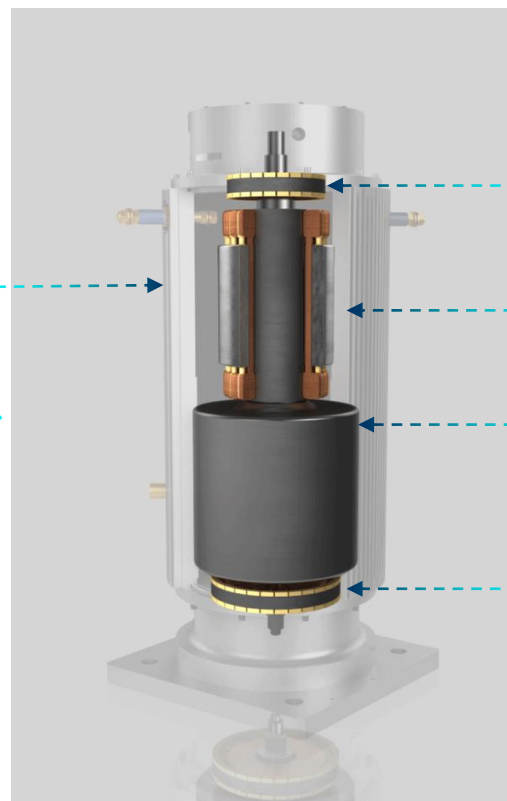
## □ 飞轮运行状态监控

飞轮系统在运行中，需通过各类传感器或控制单元对运行状态进行判断，在飞轮自身发生过流、过载、过压、欠压、超温、真空度缺失等故障时告警，或在必要时使飞轮退出工作。





真空腔



五自由度主动磁悬浮上轴承

高速永磁同步电机

航天级合金钢飞轮转子

五自由度主动磁悬浮下轴承

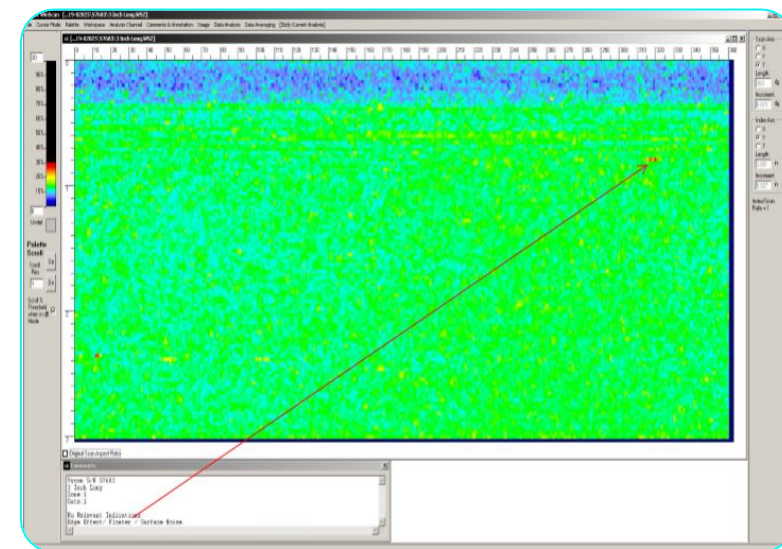
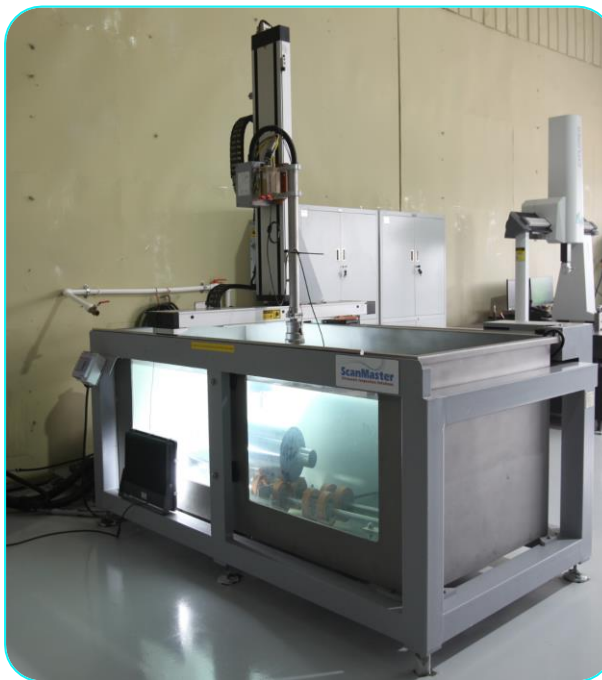
对于飞轮这类可靠性要求极高的产品，微控坚持以残余寿命作为飞轮使用寿命的计算依据。即假定所有飞轮中都存在检测手段无法侦测到的缺陷，并以此来计算产品的疲劳寿命。

## □ 飞轮安全性的基础-飞轮转子无损检测

要确保飞轮产品在使用过程中不出现解体的安全事故，最重要的是保证飞轮转子中不存在超过设计要求的缺陷（如裂纹、气泡）。减少缺陷的基础是飞轮钢材的冶炼，锻造和热处理，采取特殊的真空冶炼工艺和热处理虽然可以把材料缺陷降到最少，但细小缺陷依然有一定概率存在，需要通过飞轮转子无损检测（探伤）来探测可能存在的缺陷。

对于飞轮转子之类的圆柱体材质，大多使用超声波无损检测（UT）技术。

- 飞轮转子无损检测（探伤）是实现飞轮转子本体安全的唯一方式
- 必须以探伤设备最小检测精度为基准，采用残余寿命计算方法计算飞轮使用寿命
- 无损检测应考虑方法/设备、飞轮材质、飞轮的尺寸大小。



微控AAA级C型无损探伤超声波检测设备

百万次循环寿命不是飞轮设备的默认指标。材料100%没有缺陷的要求是不现实的，如果不对飞轮转子进行无损检测或无法对飞轮转子进行无损检测，残余寿命的计算缺乏最基本的参数，则只能以萌生寿命估算飞轮寿命，计算结果过于理想化，会为飞轮的安全运行埋下巨大隐患。

- 飞轮转子的失稳预防及保护
  - 飞轮磁悬浮轴承设计
  - 飞轮轴系故障自诊断系统
  - 备用保护轴承及飞轮转子跌落试验
- 飞轮系统的运行控制
  - 飞轮系统的运行状态监控
  - 飞轮充放电循环计数及锁定
  - 飞轮自供电系统
- 飞轮产品的生产测试
  - 飞轮产品的加工生产
  - 飞轮产品的测试环境



飞轮转子金属热处理中心



微米级精密加工中心



磁悬浮飞轮超速试验环境



磁悬浮飞轮集成测试环境

## 1.4 应用案例-数据中心

### ■ 华为东莞数据中心项目

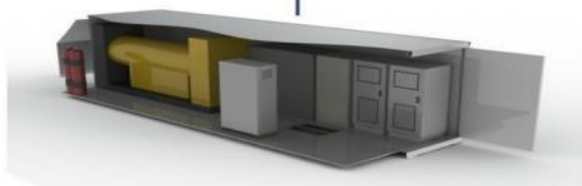
华为公司东莞松山湖数据中心配备了微控飞轮储能设备，用于华为总部数据中心不间断电源保障。



## 冬奥会飞轮UPS氢燃料应急电源车

- 项目概况：2020年微控与国网公司达成战略合作，在氢燃料应急电源车上部署XXT450型号飞轮产品，用于2022北京冬奥会赛事场馆电源应急保障。

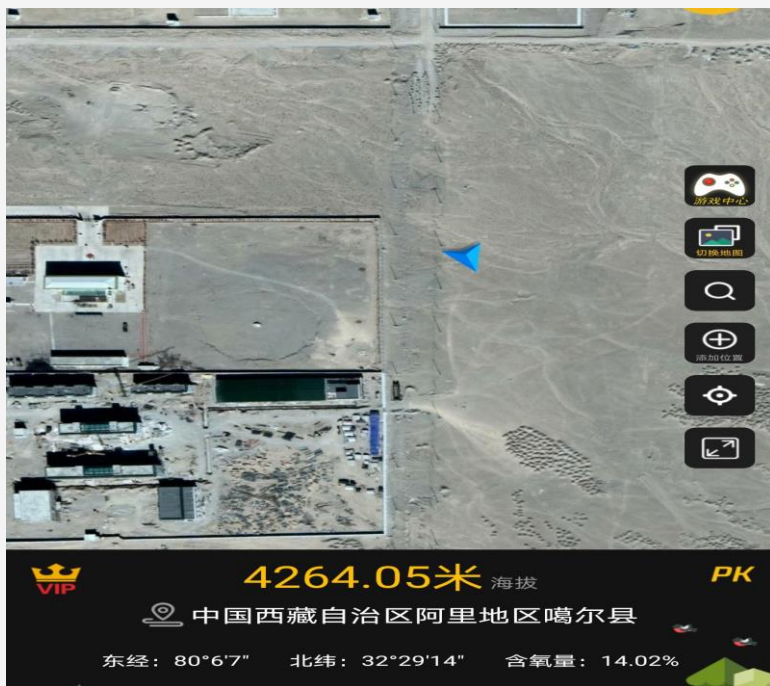
飞轮UPS不间断电源车组成



## 1.4 应用案例-国防

### □ 中印前线方舱医院关键电源保障

- 应用环境：海拔4500米
- 最低温度：-45°C
- 基本参数：
  - (1) 额定功率:360KW;
  - (2) 系统部署方式:集装箱式





龙源电力山西风电混合储能调频



大唐辽宁风储联合调频



三峡乌兰察布“源网荷储一体化”示范应用



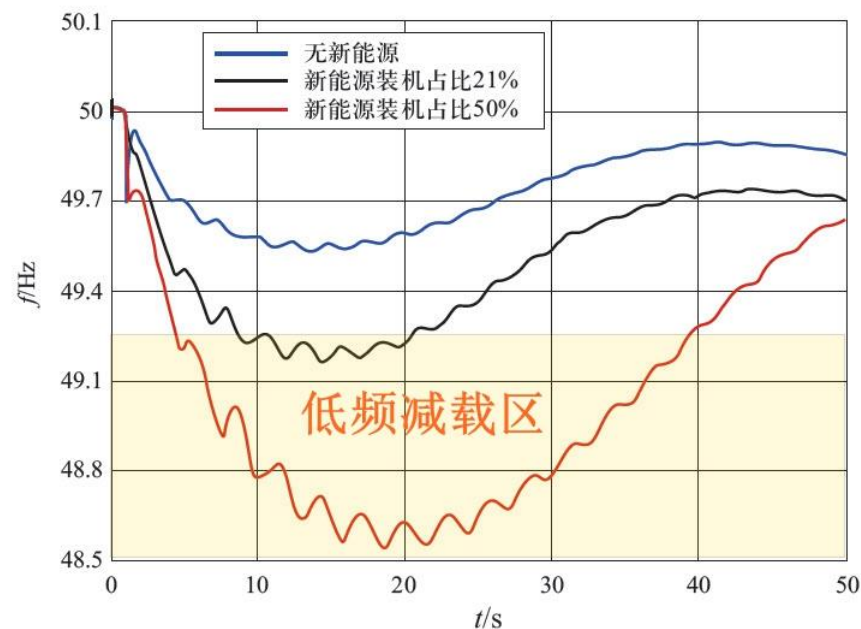
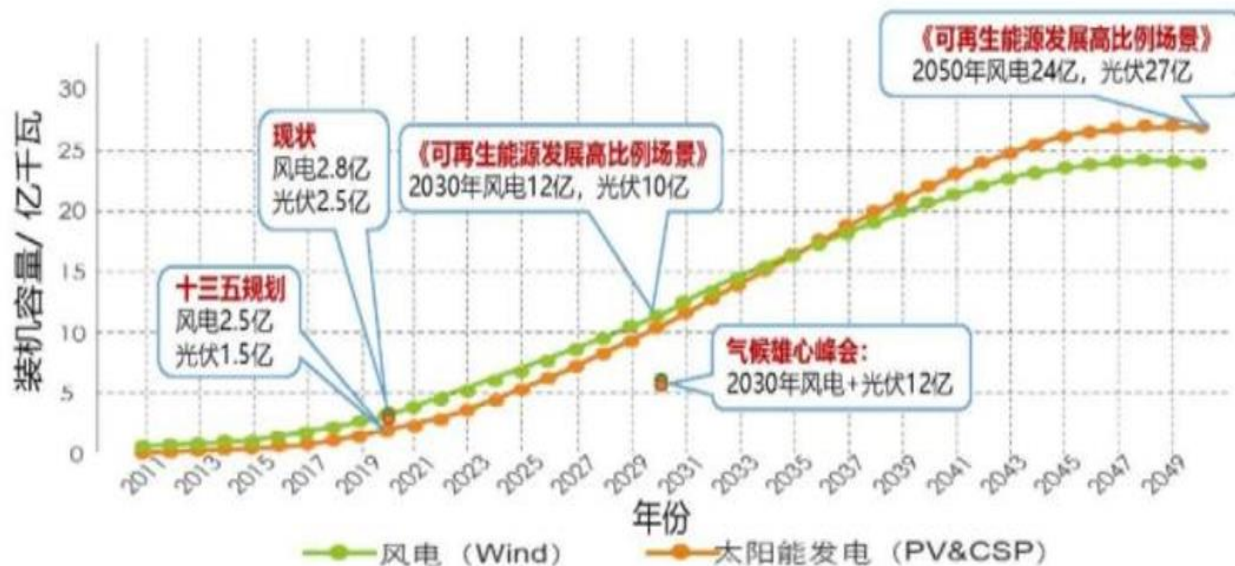


Part 2

## 飞轮技术在新能源一次调频的应用

---

- 在中央财经委第九次会议上，习近平总书记强调构建以新能源为主体的新型电力系统
- 新型电力系统系统面临的两个主要问题：**新能源消纳受限**以及**安全稳定运行风险增大**。
- 安全稳定运行风险主要表现在电网调节能力及抗干扰能力不断下降。
- 在新能源占比21%工况下，考虑4%的严重缺额场景，若新能源不具备调频能力可能导致低频减载动作，严重威胁电网安全稳定运行。



- ✓ 2018年10月，国家能源局发布的《电力系统网源协调技术规范》(DL/T 1870-2018)6.3.4 条提出“风电场、光伏电站应具备一次调频能力，并网运行时一次调频功能始终投入并确保正常运行”的要求。
- ✓ 2020年7月，《电力系统安全稳定导则》GB/38755-2019实施，要求新能源电源均应具备一次调频、快速调压、调峰能力，新能源场站应提高调节能力，必要时应配置燃气电站、储能电站等灵活调节资源。在新能源并网发电比重较高的地区，新能源场站应提供必要惯量与短路容量支撑。
- ✓ 2021年12月21日，国家能源局发布《并网主体并网运行管理规定》、《电力系统辅助服务管理办法》。两个文件中明确将一次调频、转动惯量单独列出，通过义务提供、固定补偿、市场化方式等补偿机制，成为新能源场站并网**义务项**或**收益项**，有望解决一次调频、转动惯量等成本疏导问题。
- ✓ 《并网电源一次调频技术规定及试验导则》GBT 40595-2021 已发布，2022年5月1日正式实施。

ICS 29.240  
F 24  
备案号：64507-2018

**DL**

中华人民共和国电力行业标准

DL/T 1870—2018

ICS 29.020  
F 21

**GB**

电力系

中华人民共和国国家标准

Power grid and po

ICS 29.020  
CCS F 21

**GB**

中华人民共和国国家标准

GB/T 40595—2021

电力系统安全

Code on security and stabilit

成品：210\*297  
版心：166\*238  
字数：45\*43 行  
天 35 地 24 订 24 切 20  
插图：2 张

2018-06-06 发布

并网电源一次调频技术规定及试验导则

Guide for technology and test on primary frequency control of  
grid-connected power resource

2019-12-31 发布

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会

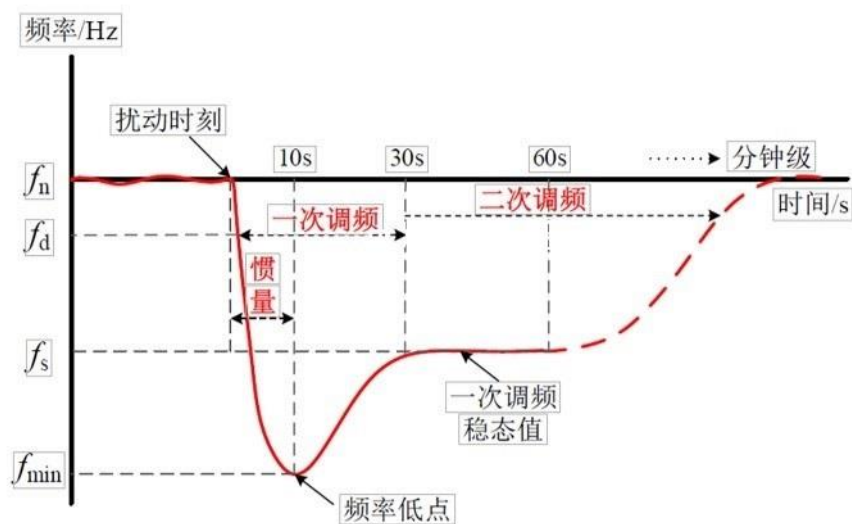
2021-10-11 发布

2022-05-01 实施

国家市场监督管理总局 发布  
国家标准化管理委员会



- 大型风电机组通过变流器控制，其风电机组转子转速与电网频率解耦，不具备同步发电机组的频率响应能力。
- 风电机组通过转子转速控制可提供一定的调频能力，但其能力运行状态直接相关，易造成系统频率的二次波动。
- 风电机组桨距角控制通过降低风力机的风能捕获效率，使机组工作在减载运行状态，以预留为应对系统频率波动而提供短期功率支持的备用容量。因涉及机械变桨动作，响应速度较慢而无法在一次调频要求，且长期的减载运行会使风电场站经济效益受到较大影响。



常规电力系统典型频率调节过程示意图

是否限电	年损失电量 /万kWh	损失电量占年发电量比例/%	电价/元	年经济损失 /万元
不限电	4643	18.57	0.54	2500
限电 50%	2940	11.76	0.54	1600

100MW风电场采用预留备用模式的风电机组运行经济性分析

## ■ GB/T 40595—2021 《并网电源一次调频技术规定及试验导则》

### 8 新能源场站一次调频技术规定

#### 8.1 一次调频死区

新能源场站一次调频死区应满足下列规定：

- a) 风电场一次调频的死区应设置在  $\pm 0.03 \text{ Hz} \sim \pm 0.1 \text{ Hz}$  范围内, 根据电网需要确定;
- b) 光伏电站一次调频的死区应设置在  $\pm 0.02 \text{ Hz} \sim \pm 0.06 \text{ Hz}$  范围内, 根据电网需要确定。

#### 8.2 一次调频限幅

频率阶跃扰动试验中, 新能源场站一次调频功率变化幅度应满足下列规定:

- a) 当系统频率低于额定频率时, 新能源场站应根据一次调频曲线增加有功功率输出, 一次调频功率变化幅度限制设置应不小于 6% 运行功率;
- b) 当系统频率高于额定频率时, 新能源场站应根据一次调频曲线减少有功输出, 一次调频功率变化幅度限制应不小于 10% 运行功率。

#### 8.3 一次调频调差率

新能源场站一次调频调差率应为 2%~10%, 根据电网需求确定。

#### 8.4 一次调频动态性能

风电场频率阶跃扰动试验中, 一次调频动态性能应满足下列规定:

- a) 一次调频有功功率的滞后时间应不大于 2 s;
- b) 一次调频有功功率上升时间应不大于 9 s;
- c) 一次调频有功功率调节时间应不大于 15 s;
- d) 一次调频达到稳定时的有功功率调节偏差不得超过  $\pm 1\%$  额定有功功率。

光伏电站频率阶跃扰动试验中, 一次调频动态性能应满足下列规定:

- a) 一次调频有功功率的滞后时间应不大于 1 s;
- b) 一次调频有功功率上升时间应不大于 5 s;
- c) 一次调频有功功率调节时间应不大于 15 s;
- d) 一次调频达到稳定时的有功功率调节偏差不得超过  $\pm 1\%$  额定有功功率。

### 13 新能源场站一次调频试验

#### 13.1 试验工况

13.1.1 试验负荷工况应至少包括新能源场站低负荷及高负荷运行区间的两个工况。低负荷工况选择 20%~50% 额定有功功率之间, 高负荷工况选择 65%~100% 额定有功功率之间。

13.1.2 对 100% 额定有功功率工况有特定要求的, 应开展 100% 额定有功功率工况下的一次调频试验。

#### 13.2 试验项目

##### 13.2.1 一次调频死区测试

通过连续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。

##### 13.2.2 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  $\pm 0.5 \text{ Hz}$ , 频差应持续保持至一次调频功率达到理论计算值后 20 s。

### □ 充放电频次高

根据冀北电科院对华北电网的分析，以某35 kV母线为例，2018年9月10日15:00到9月11日15:00该地区电网正常运行工况下频率波动范围在 $\pm 0.04$  Hz以内，频率日越过调频死区的总次数为1670次，其中越上限720次，越下限950次。

### □ 响应速度快

自系统频率超出死区开始，响应时间风电不大于2s，光伏不大于1s，惯量响应不超过500ms。

### □ 持续时间短

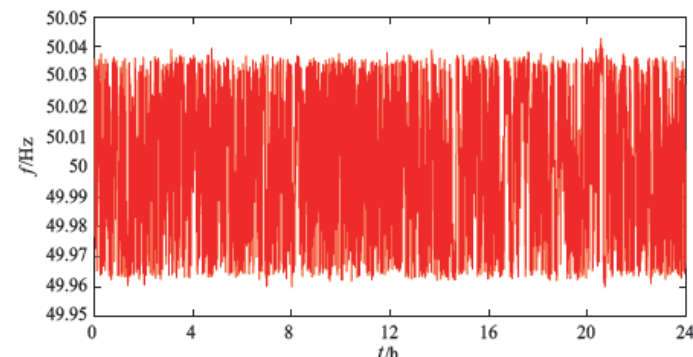
《并网电源一次调频技术规定及试验导则》要求单次调频时间20秒。

### □ 安全性高、可靠性强

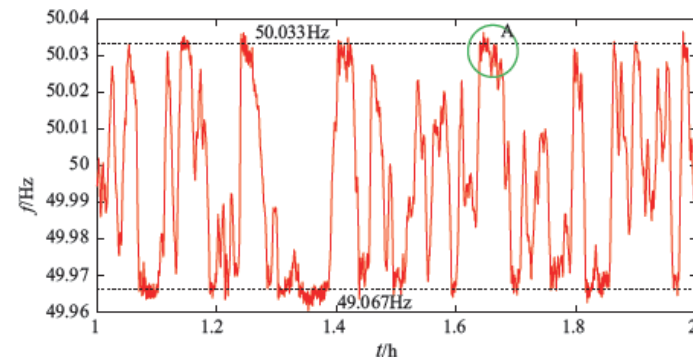
满足部署地区季节温差大的需求，储能系统安全可靠。

### □ 使用寿命长

使用寿命与新能源场站运营周期匹配，避免重复性投资。



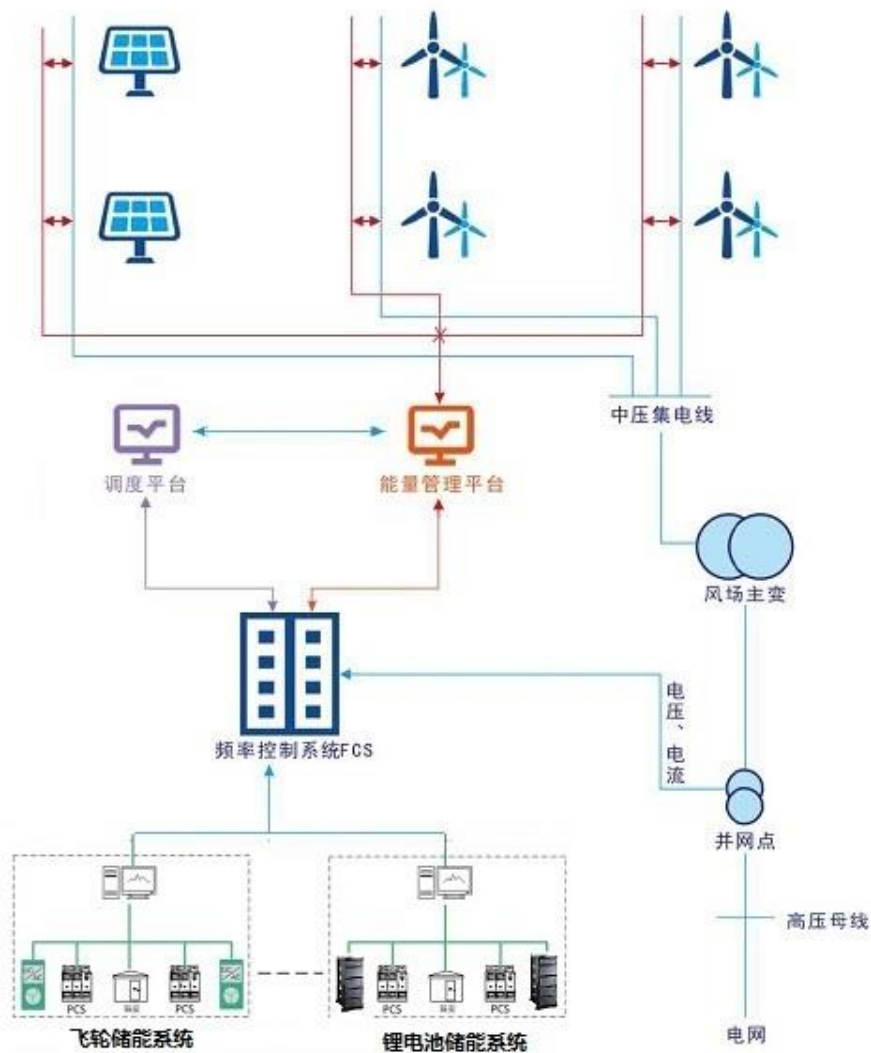
(a) 24 h电网频率曲线



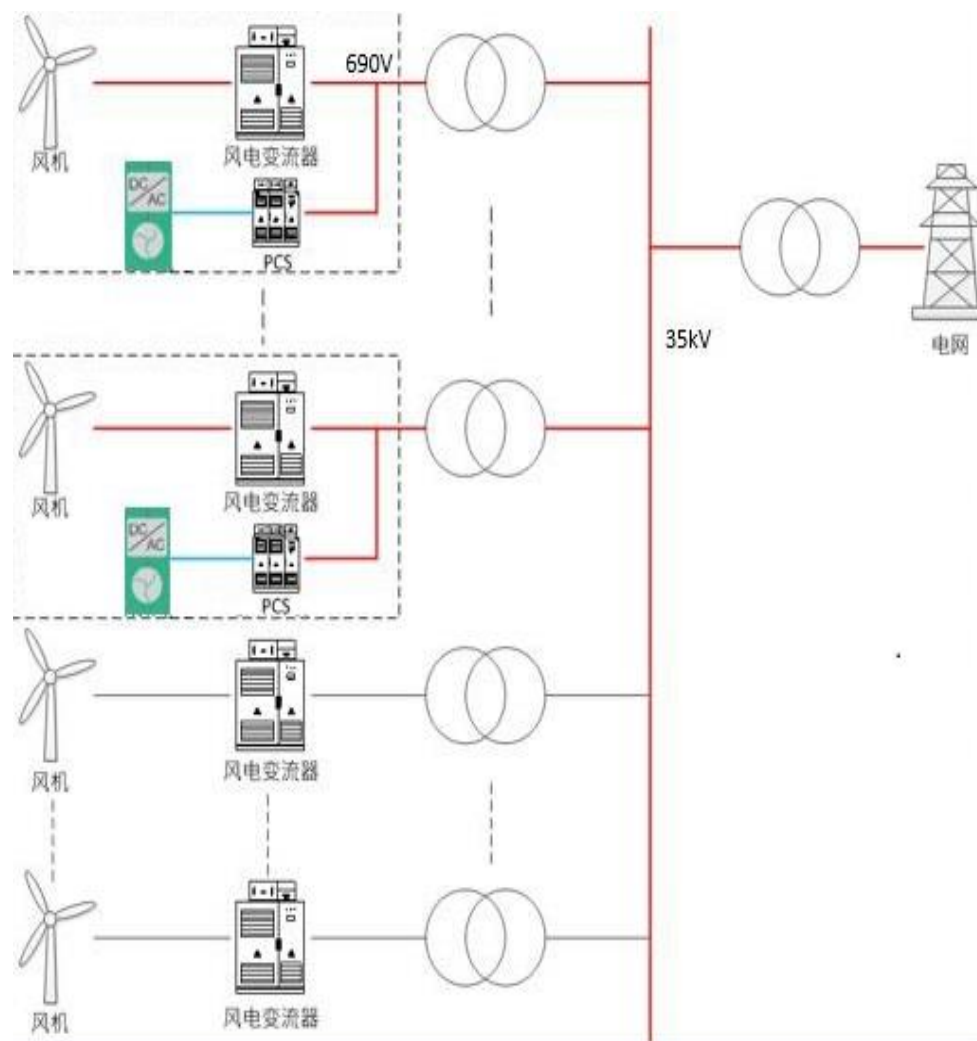
(b) 1 h电网频率曲线

图1 某35 kV母线频率曲线

风电场参与电网一次调频最优方案选择与风储协调控制策略研究  
- 国网冀北电力有限公司电力科学研究院 刘辉



集中式部署



分布式部署



## 2.5 微控磁悬浮飞轮产品风电一次调频应用案例

- 项目名称：国家电网公司《规模化风电机组调频性能关键技术与应用项目》科技项目
- 牵头方：国网山西省电力公司电力科学研究院
- 部署地点：国家能源集团山西龙源风力发电有限公司右玉老干山风电场
- 全国首个完成35KV并网试验的兆瓦级飞轮储能系统
- 全国首个飞轮+锂电池混合储能示范项目



### 应用证明

项目名称	飞轮储能设备在新能源一次调频系统的应用
应用单位	国网山西省电力公司电力科学研究院
通讯地址	山西省太原市迎泽区青年路6号
成果应用起止时间	2020年6月至2020年7月

应用情况  
及社会效益

我司在进行国家电网公司“规模化风场调频关键技术研究以及工程应用”科技示范期间，开展了飞轮储能与锂电池储能联合参与风场一次调频协调优化控制策略的研究，并应用沈阳微控新能源技术有限公司 1MW 磁悬浮飞轮储能设备，在国家能源集团山西龙源风力发电有限公司右玉老干山风电场进行了并网试验。并网试验表明沈阳微控新能源技术有限公司的飞轮储能系统技术指标可满足《电力系统源协调技术规范》(DL/T1870-2018)中“新能源一次调频技术指标”相关要求。

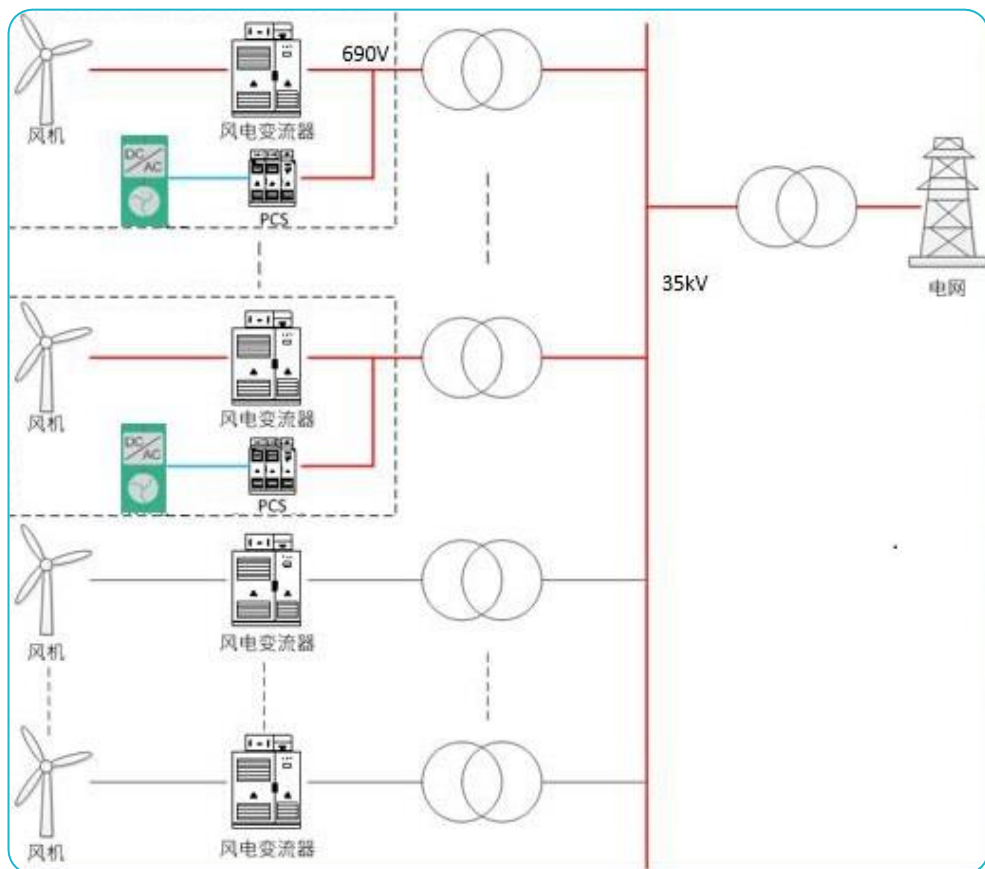
声明

我单位保证上述提供的应用情况真实无误。

应用单位：(公章)  
2020年7月14日

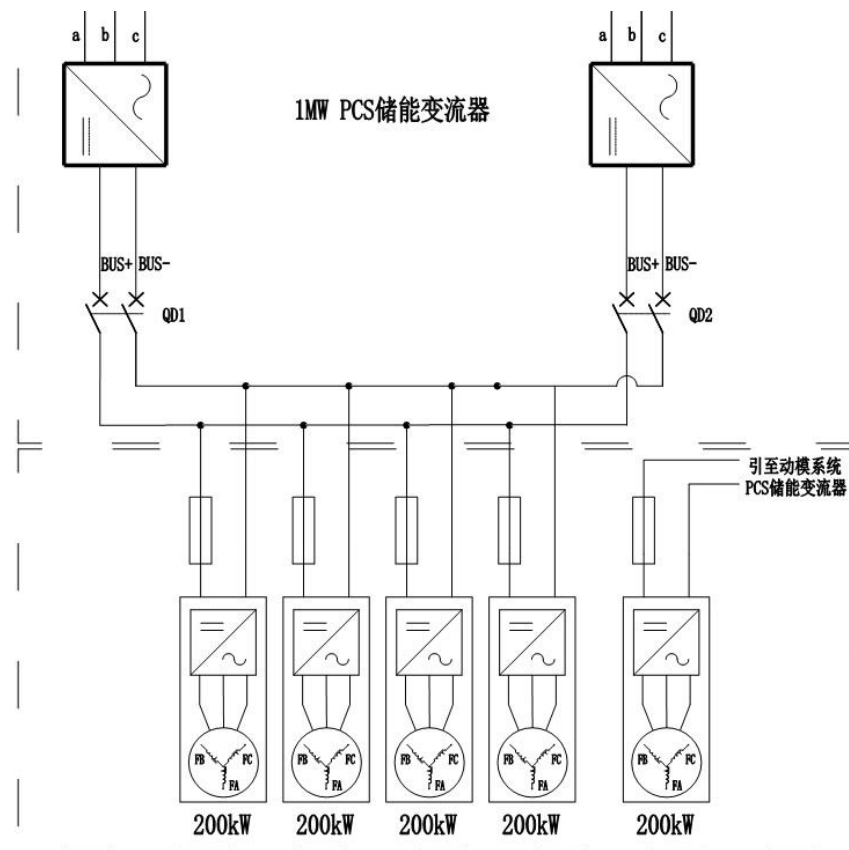


- ❑ 项目名称：风机一次调频及虚拟惯量响应示范项目
- ❑ 部署地点：辽宁大唐国际阜新风电有限责任公司阜新查台风电场
- ❑ 全国首个/唯一利用磁悬浮飞轮系统-风机协同实现单风机参与电网一次调频及虚拟惯量响应



## 2.6 微控磁悬浮飞轮产品风电一次调频应用案例

- 三峡集团乌兰察布“源网荷储一体化”关键技术研究  
与示范应用项目
- 部署规模1MW，由5台200kW高速磁悬浮储能飞  
轮及配套设备构成1MW/4.1kWh集装箱式飞轮储  
能系统，2021年12月完成现场部署实施



## 飞轮储能调频技术入选国家能源局2021年能源领域首台（套）重大技术装备项目

国家能源局

National Energy Administration

请输入关键字

🔍

首页
信息公开
领导活动
新闻中心
能源要闻
在线办事

您当前位置: [首页](#) > [正文](#)

### 国家能源局综合司关于2021年度能源领域首台（套）重大技术装备项目的公示

发布时间: 2021-12-22      来源: 国家能源局      大 中 小

为持续推进能源领域首台（套）重大技术装备示范应用，加快能源重大技术装备创新，切实保障关键技术装备产业链供应链安全，我局组织了2021年度能源领域首台（套）重大技术装备申报及评定工作。

根据《国家能源局关于促进能源领域首台（套）重大技术装备示范应用的通知》（国能发科技〔2018〕49号）、《能源领域首台（套）重大技术装备评定和评价办法（试行）》（国能发科技〔2019〕89号）等有关要求，经组织专家评审和复核，我局拟将“300MW级变速抽水蓄能机组成套设备”等76项技术装备列入2021年度能源领域首台（套）重大技术装备项目清单（具体名单见附件），现予以公示。

公示期间，任何单位或个人可对公示内容提出书面异议。异议材料应注明真实姓名和联系方式，提出异议的单位或个人应对异议材料的真实性和可靠性负责。对匿名或无具体事实依据的异议，以及涉及自身利益的不正当要求，不予受理。

公示时间：2021年12月22日至28日

电话：010-81929235

邮箱：nea\_kj@163.com

[附件：2021年度能源领域首台（套）重大技术装备项目名单（公示稿）](#)

国家能源局综合司

2021年12月21日

编号	技术装备（项目）名称	研制单位	依托工程或意向工程
20	先进压缩空气储能系统	中国科学院工程热物理研究所、中储国能（北京）技术有限公司	山东肥城先进压缩空气储能调峰电站、基于百兆瓦压缩空气储能系统的综合能源应用示范项目
21	适用于新能源电站惯量和调频支撑的兆瓦级飞轮储能系统	沈阳微控新能源技术有限公司、中国长江三峡集团有限公司	山西右玉老千山风电场一次调频示范项目、三峡新能源乌兰察布新型储能技术验证平台
22	适用于光热与储热系统的大功率熔盐吸热器与熔盐蒸汽发生系统	杭州锅炉集团有限公司	青海中控太阳能发电有限公司德令哈熔盐塔式50MW光热发电项目

沈阳微控新能源技术有限公司

## 微控，飞轮储能行业龙头



2017年通过收购美国VYCON公司，实现核心技术引进吸收再创新

国家高新技术企业，总部位于中德（沈阳）高端装备制造产业园

已取得专利44项（发明专利26项），掌握完整的磁悬浮飞轮技术体系

承担多个省部级项目，入选能源局/工信部等推荐技术目录或示范工程

建有全国唯一量产储能飞轮生产线，年产能1000台套

产品全球部署规模近3000台，行业涵盖电力、数据中心、交通运输等



# 开放共享 合作共赢



微控微信服务号



微控微信订阅号