

飞轮储能技术在电力系统中的应用和推广

文/国网厦门供电公司 李 然

为满足电网负荷调峰要求，电力系统每年要新增大量投资用于电网和电源后备容量建设，但利用率却非常低。若转而采用大容量储能技术参与电网调峰，不仅投资会大大减少，而且由于储能设施占地少，无排放，其节地、节能及减排的效果是其他调峰目

前常见储能技术包括：

(1) 化学储能

目前市面常见的各类电池，包括液体电池、干电池等（如钠硫电池、液流电池、铅酸电池、镍镉电池、锂离子电池和铁锂电池）。

(2) 电磁储能

1) 超级电容器。

2) 超导电磁储能。

(3) 物理储能

1) 势能储存：抽水蓄能、弹性储能等。

2) 动能储存：飞轮惯性储能。

3) 压缩气体储能：钢罐、废弃矿井及洞穴。

4) 热能介质储能：热力网、热泵技术。

目前，高温超导电磁储能技术还在研发阶段，而技术进步最快的是化学储能，其中钠硫、液流及锂离子电池技术在安全性、能量转换效率和经济性等方面取得重大突破，产业化应用的条件日趋成熟。物理储能中技术最成熟、应用最普遍的是抽水蓄能，主要用于电力系统的消峰填谷、紧急事故备用等；压缩空气技术已成熟，由于受地形、地质条件制约，至今仍在试验阶段，大规

模推广尚需时日；而飞轮蓄能的特点是寿命长、无污染，动态特性好，转化效率高，适用于电网调频和电能质量保障，但超大容量的飞轮尚在研发阶段，离商业化应用还有很大距离。

随着超导技术的发展和高强度复合材料的出现，以及电力电子技术的新进展，大容量飞轮储能技术开发已日渐成熟。从技术角度看，飞轮储能装置作为一种重要的补充调频手段分散接入电网是可行的，在平滑新能源发电出力、调节电网电压波动方面具有一定应用前景。

飞轮储能技术国内外研究现状

美国、德国、日本等发达国家对飞轮储能技术的开发和应用比较多。日本制造出在世界上容量最大的变频调速飞轮蓄能发电系统（容量26.5 MV·A，电压1100 V），美国已研究出用于电力调峰的电磁悬浮飞轮系统（24 kW·h、输出恒压110~240 V），欧洲的法国国家科研中心、德国的物理高技术研究所、意大利的SISE均正开展高温超导磁悬浮轴承的飞轮储能系统研究。

我国的飞轮储能研究始于20世纪80年代，研发单位包括中科院电工所、清华大学工程物理系、华北

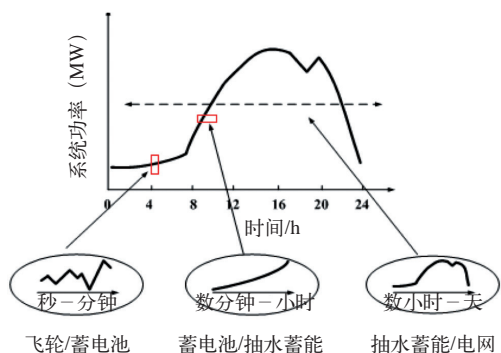


图1 不同时间尺度上的调峰控制装置

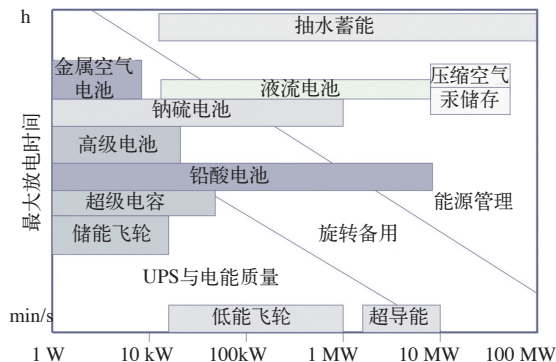


图2 各种储能装置储能容量对比

电力大学、北京航空航天大学、中国科大等，主要集中在小容量储能系列（300~500 W·h），目前还停留在实验室研究阶段，工程实践比较少，与国外技术水平差距在10年以上。

飞轮储能主要技术特点及大容量开发面临的技术难题

旋转时的飞轮是纯粹的机械运动，飞轮转动时动能与飞轮的转动惯量成正比。飞轮在转动时的动能为

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

$$J = kMR^2 \quad (2)$$

式中， J 为飞轮的转动惯量， ω 为飞轮旋转的角速度，而飞轮的转动惯

量 J 又正比于飞轮直径 R 的2次方和飞轮的质量 M 。

因此，为提高飞轮储能容量，需增加飞轮转动惯量和旋转速度，但过于庞大、沉重的飞轮在高速旋转时，会受到极大的离心力作用，往往超过飞轮材料的极限强度，存在安全隐患。因此，国内外飞轮储能技术研发主要着力于提高能量密度的复合材料和超导磁悬浮技术，其中超导磁悬浮是降低损耗的主要方法，而复合材料能够提高储能密度，降低系统体积和重量。

1. 飞轮转子设计问题

材料选择与形状设计是飞轮转子设计的关键，其加工精度达到

表1 国外飞轮储能装置研究现状

年份	研发机构	基本参数	技术特点	作用
不详	日本四国综合研究所	8 MW·h, 储能\放电各4 h, 待机16 h	高温超导磁悬浮立式轴承, 储能效率84%	平滑负荷
不详	日本原子力研究所	215 WM/8GJ	输出电压18 kV、电流6 896 A, 储能效率85%	UPS
不详	美国Vista公司	277 kW·h	引入风力发电系统	全程调峰
1991	美国马里兰大学	24 kW·h 转速11 610~46 345 r/min	电磁悬浮轴承, 恒压110 V/240 V, 效率81%	电力调峰
1996	德国	5 MW/100 MW·h 转速2 250~4 500 r/min	超导磁悬浮轴承, 效率96%	储能电站
2004	巴西	额定转速30 000 r/min	超导与永磁悬浮轴承	电压补偿

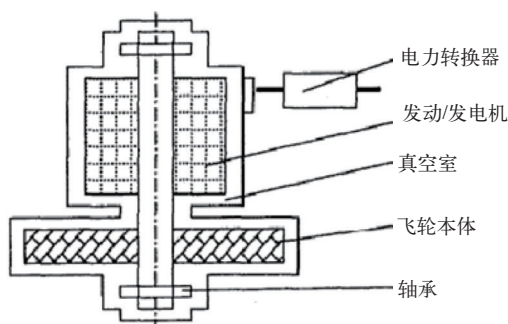


图3 飞轮储能装置基本结构

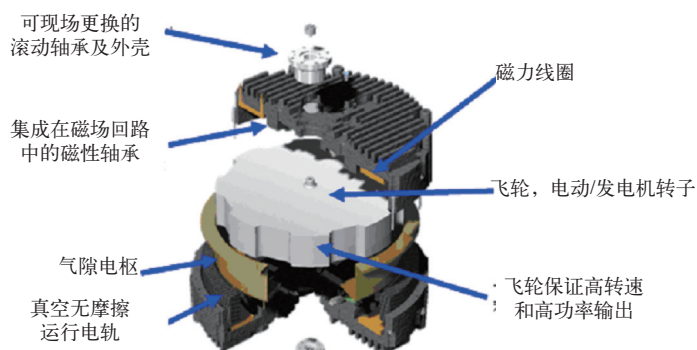


图4 磁悬浮飞轮储能设备示意图

了钟表级别。①飞轮材料选择：高强度纤维复合材料（如：碳纤维）将被应用于制造飞轮，它不仅密度小、强度高（比钢材强度还要高），而且资源丰富，用它们制作的飞轮最大可达旋转7.8万r/min而不会碎裂，更为可贵的是，一旦纤维材料在高速旋转下破坏，会变成“棉花糖”样的絮状绒毛。②飞轮形状设计：可采用薄壁圆环飞轮，将飞轮的大部分重量集中到飞轮的外缘，而且，飞轮轮体外部的材料是碳纤维，内部则大部分中空。正是这种减少飞轮轮体重量的方法让飞轮能以极高的速度旋转。只有将几何形状和材料性能结合起来才能使飞轮性能得到提高。

2. 低功耗设计问题

为了减少损耗、延长使用寿命，超高速飞轮的轴承多采用非机械接触式，即磁悬浮轴承支承方式。其特点是非接触无磨损，无需润滑介质，能在高温或极低温（-253℃~450℃）等特殊环境下工作。为了减少飞轮室内空气阻力损耗，现代高速飞轮储能器是在高度密封的真空环境中运转的。

3. 飞轮高速旋转的安全问题

当飞轮的转速达到6万r/min时，飞轮外缘的转速是2 000 km/h（即1 200 mile/h），差不多是音速的2倍。在这种转速下，即便是碳纤维材料都将在空气的阻力下变成块块碎片；因此，碳纤维飞轮只能在真空环境中才能达到6 000 r/min的转速。这就要求飞轮装置将外部空气环境的机械能传输到内部真空飞轮室里的飞轮上，目前这一技术还很难实现。目前解决方案是在飞轮储能装置上安装一个旋转密封圈，允许微量空气进入，但配备一个小型真空泵，当飞轮室里的杂质

达到危险程度时，真空泵就会将杂质吸出。

飞轮储能技术在电力系统方面的应用前景

相对化学电池，飞轮储能装置具有寿命长、充放电次数多、环保无污染等优点，例如国外飞轮产品寿命已达到15年、10万次以上，而化学电池一般只有几千次充放电寿命，往往几年就需要更换。飞轮储能缺点是：能量密度不够高、自放电率高，如停止充电，能量在几到几十个小时内就会自行耗尽，例如几万转高速飞轮系统损耗在1 00 W左右，1 kW·h的系统只能维持10 h的自放电。因此，飞轮储能最适合高功率、短时放电或频繁充放电的储能需求，非常适用于电网调频和电能质量保障方面，在电力行业、新能源汽车及军工企业具有广阔的应用前景。

目前，超导技术和高强度材料为飞轮储能技术发展提供了支撑，目前主要通过飞轮储能阵列式分布形成大容量的储能电站，已在UPS不间断电源、新能源发电冲击负荷调峰等方面得到一定应用。

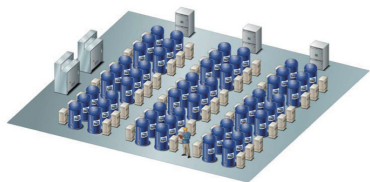


图5 飞轮储能装置组成的储能阵列

一是用于高品质不间断电源(UPS)。

与化学电池不同，飞轮储能发电车能及时提供不间断供电，在常规电源失电时实现快速切换、无缝对接。以不间断供电备用电源为突破点，飞轮储能设备从2000年开始实现商业示范应用。有数据统计，95%以上的停电都由分秒级的电能质量较差导致，电压突变还会影响高精密度产品生产。目前，国际市场上已经在用的基于飞轮储能的UPS

有3 000~4 000套系统，欧洲Urenc Power公司生产的飞轮UPS电源，储能量达到18 MJ。同时，我国已投入飞轮储能发电车参与电网保电工作，上海世博会、广州亚运会及第6届海峡论坛大会期间均出现飞轮储能应急电源车，单车最大容量达1 000 kW·A、工作转速7 700 r/min。

二是用于可再生能源并网的冲击负荷调峰。

与UPS电源只有几百千瓦到几兆瓦的容量相比，新能源发电的容量大、规模大，百兆瓦级别的风电场需配备供电容量20%~50%的飞轮储能，可实现对并网新能源机组输出有功功率和无功功率的快速、综合补偿，从而提高含并网机组的电网的电能质量。目前德国、美国及日本等都在研制容量更大、功率更高的飞轮系统。例如：美国马里兰州大学已于1991年发明了用于电力调峰的24 kW·h电磁悬浮飞轮系统，Beacon Power公司在纽约州承建了一座20 MW的飞轮储能调频电厂，用来配合当地风场建设；德国在1996年着手研究储能5 MW·h的超导磁悬浮储能飞轮电站，电站由10个飞轮模块组成，能源效率96%，琵乐公司(Piller)的飞轮储能具备在15 s内提供1.65 MW电力的能力。

三是用于新能源汽车制动能量回收利用。

随着飞轮储能技术的发展及其控制技术的成熟，飞轮电池在混合动力汽车“再生制动”(Regenerative Braking)系统中具有很好的应用前景。相对锂电池，飞轮储能更适合吸收汽车大力制动下短时间内释放的巨大能量，例如2009年威廉姆车队在其F1赛车上安装了动能回收系统(KERS)，加速过程可作为辅助动力释放利用。

飞轮技术与油电混合动力技术对比：①油电混合动力汽车的电

池、电动机和复杂的控制系统的价格十分昂贵，而一套飞轮储能系统只要1 500欧元就能生产出来，与油电汽车相关部件比起来，价格要低很多。②油电混合动力汽车的“再生制动”系统在机械能和电能的转换过程中，只有35%的能量能够被重新利用。利用飞轮装置70%的能量能够被重新利用。因此，飞轮储能混合动力技术将取代油电混合动力，将成为环保汽车的主流生产技术。

表2 飞轮储能与蓄电池在混合动力汽车应用比较

项目	化学蓄电池	飞轮储能
储能容量	中	高
循环寿命	几百次	几百万次
使用寿命	2~8年	>20年
放电深度	有限制	基本无限制
维护时间	<6个月	>10年
环境污染	污染环境	无污染
储能密度	10~20 W·h/kg	>20 W·h/kg
安全系数	易引发爆炸燃烧	密封罐较安全

此外，飞轮储能技术在国防工业、航天航空等领域也有一定应用，例如：采用飞轮储能系统进行航天器姿态调整，在新一代航空母舰推广使用电磁弹射器技术等，在此不再阐述。

结束语

本文分析概括了化学储能、电磁储能及物理储能各自技术特点，重点阐述了飞轮储能装置基本工作原理和实际应用中所面临的技术难题和解决方案，并对飞轮储能技术在电力行业、新能源汽车及航母电磁弹射器等方面应用进行了展望。

随着超导技术的发展和高强度复合材料的出现以及电力电子技术的新进展，大规模开发飞轮储能技术已经成为可能。从经济和技术角度看，飞轮储能机组作为一种重要的调峰手段分散接入电网是可行的。今后的发展方向及研究热点：①超大储能量、大功率飞轮的研制；②进一步降低储能飞轮系统的功耗；③系统的安全性、可靠性分析；④强力充放电系统的稳定性。EA