

飞轮储能关键技术及其应用

飞轮储能是一种研究价值高、应用前景广阔的新型储能技术，具有大储能、高效率、无污染、适用广、无噪声、长寿命、维护简单和可实现连续工作等优点，已受到科技界和企业界的密切关注，成为国际能源界研究的热点之一。对飞轮储能的原理、工作模式和主要关键技术进行了较全面的阐述，并对飞轮储能的应用领域及未来发展趋势进行了总结与展望。

陈广宇 张华东 于宝鑫 李佳骥 褚铁柱/国网冀北电力有限公司承德供电公司



陈广宇/工程师

关键词/Keywords

飞轮储能·
工作原理·
飞轮转子·
应用·

飞轮储能是可将电能、风能和太阳能等转化成飞轮的旋转动能加以储存的一种新型、高效的机械储能技术。飞轮储能的主要特点为：①储能密度高，功率密度大，因而在短时间内可以输出更大的能量，这非常有利于电磁炮的发射和电动汽车的快速启动；②能量转换效率高，一般可达85%~95%；③对温度不敏感，对环境友好；④使用寿命和储能密度不会因过充电或过放电而受到影响，只取决于飞轮电池中电子元器件的寿命，一般可达20年左右；⑤容易测量放电深度和剩余“电量”；⑥充电时间短，属于分钟级；⑦与某些其他装置组合使用时，其优势更加明显。在电动汽车、航空航天、电网调峰和不间断供电备用电源等诸多领域有着广泛的应用。无论和传统还是新兴的储能技术比较，飞轮储能技术都有自己的优势^[1-5]。

随着现代电动/发电机技术、电力电子技术、新材料技术、磁悬浮技术和控制技术的进一步发展，这一具有大储能、高效率、无污染、适用广、无噪声、长寿命、维护简单和可实现连续工

作等优点的新型储能技术必将在21世纪掀起一场绿色革命，为解决能源问题贡献力量^[6-9]。

飞轮储能的工作原理与工作模式

飞轮储能又称飞轮电池，是一种机—电能量转换与储存装置。电力电子变换装置从外部输入电能驱动电动机旋转，电动机带动飞轮旋转，飞轮储存动能（机械能），当外部负载需要能量时，用飞轮带动发电机旋转，将动能转化为电能，再通过电力电子变换装置变成负载所需要的各种频率、电压等级的电能，以满足不同的需求^[10-11]。图1为简易原理图。

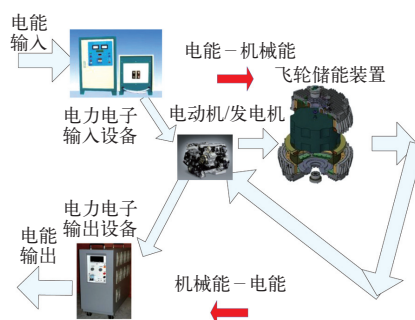


图1 飞轮储能简易原理图

由图1可知，飞轮储能总结起来有3种工作模式。

1) 飞轮“充电”模式。交流电源给飞轮控制器供电，电动机开始运转，吸收电能，使飞轮转子速度提升，直至达到额定转速时，电机作电动机用。

2) 飞轮“能量保持”模式：飞轮系统依靠最小的交流电输入，保持飞轮在最高工作转速运行，在整个“能量保持”过程中，电机作电动机用。

3) 飞轮“放电”模式。需要放电时,中断交流电源,飞轮给飞轮控制器供电,控制器提供不间断电源给负载,飞轮转速下降,直至下降到最低转速时由电动机控制器停止放电,电机作为发电机使用。

飞轮储能系统关键技术

1. 飞轮储能转子

飞轮储能系统的结构是积木式的结构,主要有以下5部分组成:飞轮转子、支撑轴承、能量转换系统、发电机/电动机和真空室。如图2所示。

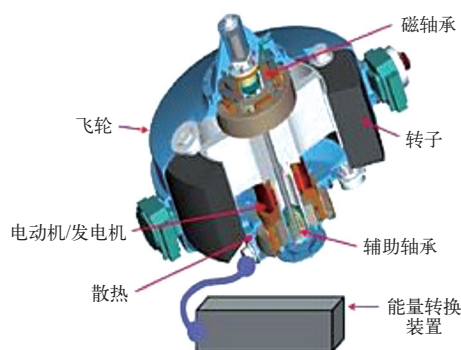


图2 飞轮储能系统结构简图

由图2可知,飞轮储能系统需要解决的关键技术就是围绕以上5大部分展开。近10年来,新型复合材料如高强度的碳素纤维技术的发展,使得飞轮能够储存大量的能量,给飞轮的应用带来了新的活力。由于飞轮转子的转速极高,选用高抗拉强度的飞轮材料是飞轮电池能够尽量储存较多能量的先决条件,其次是飞轮的结构设计。

飞轮储能系统中最重要的环节即为飞轮转子,整个系统得以实现能量的转化就是依靠飞轮的旋转,似乎是系统的“体质”,影响着系统的寿命。

飞轮旋转时的动能 E 表示为

$$E = 1/2 J \omega^2 \quad (1)$$

式中, J 、 ω 分别为飞轮的转动惯量和转动角速度。

由此可见,提高飞轮的储能量有两个途径:一是增加飞轮转子转动惯量;二是提高飞轮转速。在这一领域中,需解决两方面问题:一方面就转子的材料选择;另一方面是转子的结构设计。

(1) 转子材料的选择

通过提高转速来增加动能,如果转速超过一定的值,飞轮将会因离心力而发生破坏,原因是受到制造飞轮所用材料强度的限制。储能计算公式为

$$e = 2.72 K_s \sigma / \rho \quad (2)$$

式中, e 为飞轮单位重量的储能, $W \cdot h/kg$; K_s 为飞轮形状系数; ρ 为材料的比重, kg/cm^3 ; σ 为材料的许用应力,MPa。

由式(2)可以计算出不同材料制造的飞轮的储能效率。图3为几种典型的飞轮材料,其单位重量储能的数值按大小排列成柱形图。

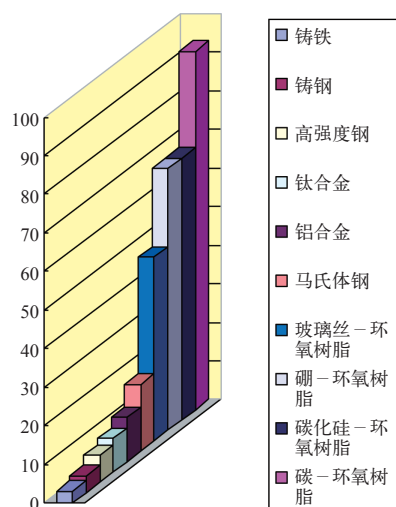


图3 各材料最大储能密度的立体柱形图

从图3可以看出,在设计飞轮的时候,要选用一些低密度、高强度的复合材料,如玻璃纤维、碳纤维或和环氧树脂的合成材料。材料的选择直接影响着飞轮储能系统的稳定性。图4为飞轮转子图片。

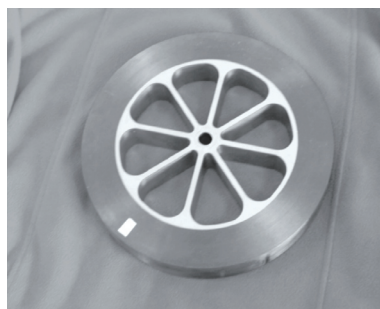


图4 复合材料飞轮转子

(2) 飞轮转子结构设计

飞轮转子最适合采用复合材料制造, 由于复合材料具有可设计性, 但缠绕加工工艺较复杂, 不易制作形状复杂的飞轮, 因此复合材料飞轮大多采用圆环形状还要精心设计飞轮的结构形状, 尽可能提高飞轮的形状系数。相对于单层的复合材料飞轮, 多层复合材料飞轮是由若干单层复合材料圆环组装而成, 各层径向厚度不大, 各层之间采用过盈装配或张力缠绕, 在层间产生预压力。多层飞轮高速运转时, 层间预压力逐渐减小, 在工作转速时, 层间仍保持有正压力, 不会松脱, 而各层由于径向厚度不大, 内部径向应力仍在允许范围以内, 因此多层转子结构可使飞轮线速度和储能密度得到提高。图5为多层结构的飞轮转子图。

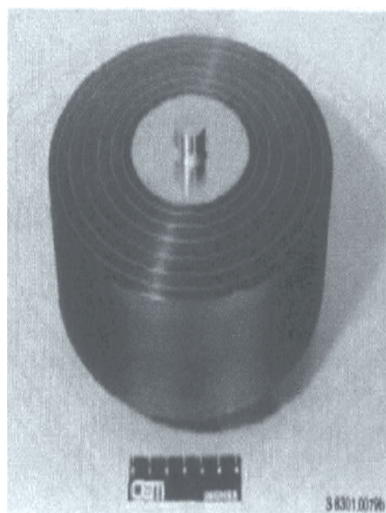


图5 复合材料飞轮

从现在的发展来看, 各国家还把飞轮形状做成了纺锤状、伞状、实心圆盘、带式变惯量和轮幅状等。并且都应用到了实际系统中, 并产生了预想的效果。

因此, 配备一个高效的功率电子变换装置, 使飞轮储能系统在储能时能与频率和电压基本恒定的电网相联; 在维持能量时, 保持系统的稳定运行及最小损耗; 在释放能量时, 能满足负载的频率和电压的要求。上述几环节协调一致、连续运行, 就可以完成电能的高效存储。

2. 飞轮储能的轴承支承系统

轴承的摩擦会消耗飞轮所储存的能量, 缩短储能时间, 降低储能效率, 因此消除轴承的摩擦损耗是实现高效飞轮储能的关键。目前飞轮储能系统可供选择的磁悬浮轴承有以下5种。

1) 机械磁轴承。机械轴承主要有滚动轴承、滑动轴承、陶瓷轴承和挤压油膜阻尼轴承等, 其中滚动轴承和滑动轴承常用作飞轮系统的保护轴承, 陶瓷轴承和挤压油膜阻尼轴承在特定的飞轮系统中获得应用。

2) 被动磁轴承。随着永磁材料的快速发展, 永磁轴承的承载力迅速增加, 且具有能耗低、无须电源和结构简单等优点。但是只用永磁轴承不可能实现稳定悬浮, 需要至少在一个方向上引入外力(电磁力、机械力等)。

3) 主动磁轴承。主动磁轴承又称为电磁轴承, 其通过控制电磁线圈中的电流大小产生电磁力, 对轴承的位置进行主动控制, 具有阻尼和刚度可调的优点。

4) 超导磁轴承。当外部磁场(磁体)接近超导体时, 在超导体内部感应电流, 感应电流产生的磁场与外部磁场方向相反, 大小相同, 这相当于在超导体背后出现了外部磁场的镜像磁场。由此, 产生超导体和磁体之间的电磁斥力, 使超导体或永久磁体稳定在悬浮状态。

5) 混合磁轴承。①永磁轴承与机械轴承的混合; ②电磁轴承与机械轴承的混合; ③永磁轴承与电磁轴承的混合; ④永磁轴承与超导体的混合。

3. 能量转换环节

飞轮储能系统的能量转换环节主要完成从电能转化为机械能, 再从机械能转化为电能的过程。

1) 电能转化为机械能。此时是对飞轮储能系统输入能量的过程, 电力电子转换器对充电电流进行调整, 将电网的交流电转换成直流电, 驱动发电/电动机, 使飞轮的转速增加, 并确保飞轮运转的平稳、安全和可靠。此时, 电动机升速。可以采用两种变频控制方式: 恒转矩控制和恒功率控制。

2) 以动能形式存储电能。飞轮达到一定转速

后转入低压模式，此过程飞轮高速旋转，储存动能，电力电子装置提供低压来抵消电动机损耗维持飞轮的转速。

3) 机械能转化为电能。高速旋转的飞轮通过高速发电机将飞轮动能转换成电能，此过程中，电机作为发电机运行，电机的输出电压与频率随转速变化而不断变化，但是一段时间后，飞轮不断减速，造成输出电压降低。为确保输出电压平稳，需要升压电路将电压升高。

4. 电动机/发电机

飞轮储能系统选择电机时要考虑以下几方面因素。①经济方面的考虑：选择能满足要求的最低价格的电机即可；②使用寿命长：由于所设计的飞轮储能系统要求长时间的储能运行，要求电机的空载损耗极低，所以电机必须满足这一要求；③能量转换效率高，调速范围大；④飞轮储能过程中要求系统有尽可能快的储能速度，要求电机作为电动机使用时有较大的转矩和输出功率。

5. 真空室

真空室是飞轮储能系统工作的辅助系统，保护系统不受外界干扰，也不会影响外界环境。精简概括起来有以下两点作用。

1) 提供真空环境，以降低风损。英国研究工作者发现，氦气环境有利于减小风损，提高真空度虽能降低风损，但因为稀薄气体环境散热功能减弱，转子温升较高。

2) 屏蔽事故。在高速转动形成的内部应力作用下引起的转子破裂将裂变成威胁力巨大的炮弹，穿透包围它的容器，危及人身和设备的安全。但如果材料、结构和真空室选择得好，则会大大降低转子失效时造成的破坏。

飞轮储能的应用领域

1. 在电动汽车领域的应用

电动汽车作为一种无污染、低噪声的车辆具有十分广阔的发展前景。目前电动汽车电池的主要缺点是：①一次充电行驶里程短，上坡性能差；②充电时间长，使用不便；③成本高，价格昂贵。这些因素使电动汽车无法与燃油汽车相抗

衡，因此电池技术成为电动汽车的关键。目前，飞轮储能系统可以单独或与其他动力装置一起混合用于电动汽车上，极大地改善汽车的动力性和经济性以及汽车尾气的排放。单独使用目前是在简单轻载的小电动汽车，混合使用目前是在低成本、效率高的混合电动汽车，传统的燃油汽车与飞轮储能结合可产生很好的效果。

1) 电动汽车可以实现零排放，在某些对空气质量要求严格的地方，完全由飞轮储能驱动汽车。

2) 车内的音响、空调器和动力转向等汽车电器附件，借助原动机输出的动力直接带动，飞轮储能即可节省一部分电能。

3) 如果使汽车原动机尽可能工作在最佳工作点上，在汽车减速时，飞轮储能回收制动能量，可使混和动力电动汽车成为较低排放的节能汽车。

图6为应用到日本的一款小型汽车上的飞轮转子。



图6 电动汽车中飞轮储能系统转子

2. 飞轮储能系统可用于电网调峰与分布式发电

在电网负荷处于低谷时，机组作为电动机拖动飞轮，把电能转换为动能，在用电高峰时，飞轮拖动机组作为发电机把动能转化为电能。飞轮储能技术被认为是近期最有希望和最有竞争力的新型调峰技术。归结为以下四点：

1) 发电厂应用大规模飞轮储能系统后，低谷负荷情况下，可以起动储能装置进行储能，机组可以运行在比较经济的出力区间，从而获得较高的经济效益。

2) 电网企业和终端的用电用户凭借储能系统可以通过夜间储电、日间放电，从峰谷电价差中优化资源配置，获得大量经济效益。

3) 在一些特殊情况下,如太阳能发电的夜晚及风力发电无风时,储能装置能够起到过渡的作用,持续向用户供电。

4) 电网发生故障和检修的部分情况下,用户可以通过飞轮储能系统保证供电,用户用电的安全性大大提高,停电次数(时间)和停电损失大幅减少,经济效应和社会效应明显。

3. 飞轮储能技术可用于航空航天领域

目前航天器蓄电池的能量密度低、使用寿命有限、工作性能不稳定以及电量不确定,飞轮储能系统不仅可以取代蓄电池作为航天器储能装置,还可以利用储能飞轮产生的动量矩对航天器姿态进行有效控制。这种独特的双重功能对于提高宇宙飞船、空间站、人造卫星和运载火箭等诸多航天器的性能有显著意义。

Fare公司、马里兰大学及NASA刘易斯研究中心一道共同开发了空心飞轮系统,将马里兰大学500 W·h的空心飞轮系统按比例缩小成50 W·h的空心飞轮系统。该系统用于近距离地球轨道(LEO)卫星和地球同步轨道(GEO)卫星的动力装置,取代了原先的化学电池。同时结合飞轮储能和卫星的姿态控制,使其优势更加明显。

4. 国际空间站

目前,国际太空站是利用太阳能电池作为其动力来源。但是,当太空站转到背对着太阳的一面时,太阳能电池吸收不到太阳光,便不能工作。由于太空站每90 min环绕地球一圈,当太空站转到背对着太阳的一面时,便要依靠太空站上的化学电池提供能源。然而一般的化学电池会慢慢地损耗,因此,科学家要定期更换太空站上的电池。而飞轮储能系统的应用,可以持续地储存和供应能源,美国专家估计这一技术将会为太空总署节省超过两亿美元的电池开支。

5. 不间断电源(UPS)

不间断供应电源有着强大的应用市场。除目前通用的UPS外,飞轮电池作为一支新生的力量已经逐步参与到UPS市场中。

6. 储存自然能源

太阳能、潮汐、地热和风能等新能源是可再

生洁净能源,但其能量随季节和时刻变化,而且变化频率快、幅度大,通常是随机的。在这些能源系统中,应用飞轮储能则非常适宜,充分发挥了飞轮系统响应速度快的优点,使新能源发电系统平稳发电,使能源得到充分利用。

7. 在电热化学炮、电磁炮上应用

飞轮储能系统在电磁炮应用中具有明显优势,有一种8级逐级驱动的线性感应线圈发射炮,能将3 kg的炮弹以2 km/s的速度发射。电热化学炮要求在1~5 ms内将脉动动力传到枪炮后膛,而由飞轮储能装置构成的脉冲盘交流发电机(PDA)就能适应这种要求。

作为一种新兴的储能方式,飞轮储能的优点已被人们广泛认同,其非常符合未来储能技术的发展方向。现在,最可能出现的是手机电池。此外,飞轮储能系统还可以在医疗、军事、安全、通信、电信和核聚变试验等很多领域发挥作用。

研究发展趋势

磁轴承在飞轮储能中的应用发展研究趋势将主要集中在以下几个方面。

1) 微型磁轴承。采用结构简单且控制可靠的微型磁轴承在生命科学领域有着极其重要的作用,因此如何进一步减少磁轴承的体积,且不失去其可靠稳定性是磁轴承下一步发展的难题。

2) 无传感器磁轴承。传统的磁轴承系统需要配有传感器来检测信号,传感器的存在增大了轴承的轴向尺寸,降低了系统的动态性能,并且具有成本高、可靠性低的缺点。而自检测磁轴承,省去了位移传感器,通过采样电流、电压信号间接获取转子的位移信号,因此不仅可以简化磁轴承的结构,还可以显著降低磁轴承系统的制造成本,在工业上具有很广阔的应用前景。

3) 基于整机的参数设计。除了要满足磁轴承自身以及转子系统满足相应的机械要求外,从系统的全局角度考虑磁轴承的稳定性、可靠性和经济性而进行基于整机的优化设计是以后发展的必然趋势,目的是为磁轴承实现产品化创造一个更广阔的应用前景。

4) 采用高性能的控制器。为了使系统实现更高的性能要求,控制环节在磁轴承系统中扮演的角色尤为重要。为了有利于磁轴承实现标准化、系列化和商品化,这就要求磁轴承的硬件系统趋于结构化、模块化。其中,功率放大器作为硬件设计中一个重要的环节,越来越趋向于采用效率高的开关功放等来取代连续功放。控制器方面,要求实现数字化、集成化和计算机化。而软件方面,相应发展的软件越来越多地采用基于现代控制理论来达到各种控制算法,如滑模控制、非线性模糊控制、自适应控制、H控制和 μ 控制等。

5) 降低磁轴承的成本。如何进一步降低磁轴承的成本,让磁轴承进入人们的日常生活中一直是研究人员的目标。

结束语

首先从飞轮储能的优势引入主题,然后介绍了其工作原理与工作模式,重点对5大关键技术、飞轮储能的应用领域及未来发展趋势进行了介绍。在未来几十年,作为新一代储能装置,现代飞轮储能技术将以其具有大储能、高效率、无污染、适用广、无噪声、长寿命、维护简单和可实现连续工作等显著的性能优势,逐步取代传统储能技术。

参考文献

[1] Werfel F N, Floegel, Delor U, et al. A compact HTS 5 kW·h/250 kW flywheel energy storage system [J]. IEEE Transactions on Applied Supercond, 2007, 17 (2): 2138-2141.

[2] Guerrero M A, Romero E, Barrero F, et al. Overview of medium scale energy storage systems [J]. Record of CPE 2009 6th International Conference-Workshop, Compatibility and Power Electronics,

2009: 93-100.

[3] 李文超, 沈祖培. 复合材料飞轮结构与储能密度 [J]. 太阳能学报, 2001, 22 (1): 96-101.

[4] Wang S Y, Wang J S, Deng C Y, et al. An update high-temperature superconducting maglev measurement system [J]. IEEE Transactions on Applied Supercond, 2007, 17 (2): 2067-2070.

[5] 王健, 戴兴建, 李奕良. 飞轮储能系统轴承技术研究新进展 [J]. 机械工程师, 2008 (4): 71-73.

[6] 蒙永民, 李铁才, 荀尚峰. 飞轮储能分布式电能控制技术放电部分的仿真研究 [J]. 电网技术, 2008, 32 (24): 60-64.

[7] 戴兴建, 唐长亮, 张凯. 先进飞轮储能电源工程应用研究进展 [J]. 电源技术, 2009, 33 (11): 1026-1028.

[8] Davies T S, Jeffersona C M, Magerb. Use of flywheel storage for wind diesel systems [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 27 (1): 157-165.

[9] Hans J Bornemann. Conceptual system design of a 5 MW·h/100 MW superconducting flywheel energy storage plant for power utility applications [J]. IEEE Transactions on Applied Supercond, 1997, 7 (2): 398-401.

[10] Fang J R, Lin L Z, Yan L G, et al. A new flywheel energy storage system using hybrid superconducting magnetic bearings [J]. IEEE Transactions on Applied Supercond, 2003, 11 (1): 1657-1660.

[11] Budi Rachmanto, Kenzo Nonami, Kenta Kuriyama. Attitude control of flywheel with two-axis gimbal and nonlinear input shaping [C]. Record of 11th International Symposium on Magnetic Bearings, Nara, Japan, 2008: 243-249.

(收稿日期: 2015-08-15) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告