飞轮储能系统用集成式电动/发电机分析研究

尹建阁[1]，汤双清[1]，曾东[2]

（1.三峡大学机械与材料学院，湖北宜昌4430022；2.嘉兴电力局，浙江嘉兴314000）

摘要：飞轮储能系统中电能与机械能之间的转换（即能量的双向输送）是以电机及其控制为核心来实现的，因而集成式电动/发电机的选型研究，对储能系统的整体设计具有十分重要的意义。介绍了各类通用电机作为集成式电机的可行性及其局限性，以及在飞轮储能系统中极具应用前景的其他电机结构特点和研究状况。

由于飞轮储能系统具有储能密度高、瞬时功率大、充电时间较短、使用寿命长、不受充电次数限制、无污染等优点，该技术的研究应用在节能和环保方面，都具有十分重要的意义。

1飞轮储能技术原理

飞轮储能系统，主要由飞轮、集成式电动/发电机、非接触式轴承、真空容器以及电力电子变换装置等组成，工作原理示意图如图1。

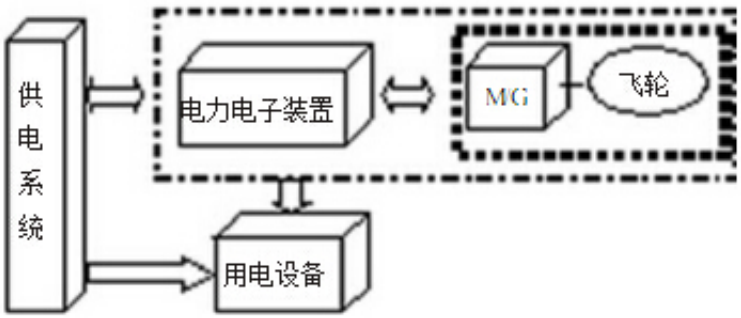


图1　飞轮储能系统工作原理示意图

系统储能时，电能通过电力电子装置变换后控制M/G工作于电动机状态，带动飞轮加速，电能转化为机械能储存下来；需要放能时，飞轮降速，M/G作为发电机，由飞轮带动其转动，将机械能转化为电能，经电力电子装置变换后，输送给用电设备或回馈给电网（即并网发电）。

2高速储能飞轮用电机性能要求

飞轮储能系统中，电能与机械能之间的转换，是以电机及其控制为核心来实现的。高速储能飞轮用的理想电机，应具有以下性能要求：

⑴能量转换可逆；

⑵输出功率大；

⑶转子能承受高转速，易于高速运行；

⑷空载损耗低；

⑸可靠性高；

⑹转换效率高；

⑺对轴承系统的运行具有很小的影响；

⑻能适应大范围的速度变化；

⑼低造价，并结构简单、运行可靠、易于维护等。目前，飞轮储能系统所采用的M/G有通用电机以及特殊结构的电机。

3通用电机

3.1异步电机

由于异步电机主要用于电动机，下面结合在飞轮储能系统中的应用，只介绍其发电运行模式的原理。有两种情况：

其一，接入电网。若把感应电机的定子接到电网，高速旋转的飞轮作为原动机拖动电机，使转子转速超过同步速度，电机将向电网送出有功功率，此时电机就成为发电机。

其二，单机运行。感应发电机也可以单独带负载运行。此时需要在定子端点并联一组对称的三相电容器，另外转子中要有一定的剩磁。在空载情况下，用高速旋转的飞轮带动转子旋转，使转子的剩磁磁场“切割”定子绕组，在定子绕组中感生剩磁电动势，并向并联电容送出容性电流；容性电流通过定子绕组后，将产生与剩磁方向一致的增磁性定子磁动势和磁场，使气隙磁场得到加强，最终也是获得足够高的电动势，输出足够高的电压，达到发电的目的。

与传统的直流电机相比，感应电机有许多优点，如高效率、高能量密度、加工制造工艺以及控制技术都十分成熟，但感应电机的缺点是极数少的感应电机用铜、铁量大，增加了电机的重量，高速时转子转差损耗大，不容忽略。

3.2同步电机

同步电机包括很多种，如普通同步电机(电励磁)、永磁同步电机(PMSM)、永磁无刷直流电机(BLDCM)，开关磁阻(SR)电机也是一种同步电机。与传统的电励磁电机相比，永磁类电机不需要励磁绕组和直流励磁电源，也就取消了容易出问题的集电环和电刷装置，成为无刷电机，因此结构简单，运行可靠，控制系统也较异步电机简单。

PMSM与普通同步电机工作原理相同，输入定子的是三相正弦波电流，所以谐波成分较少，可降低铁耗。与感应电机相比，PMSM不需要无功励磁电流，可以显著提高功率因数(可达到1甚至容性)，可以减少定子电流和定子电阻损耗，而且在稳定运行时，没有转子电阻损耗及其他相应的损耗，从而使其效率比同规格感应电动机提高2~8个百分点。

BLDCM结构特点突出，性能优越。首先，气隙磁场为梯形波，由于矩形波电流和矩形波磁场的相互作用，在电流和反电势同时达到峰值时，能产生很大的电磁转矩，且散热好，提高了负载密度和功率密度。

其次，普通直流电机的电刷和机械式换向器被逆变器和转子位置检测器代替。

再次，在原理和控制方式上，基本与直流电动机系统类似，所以比PMSM控制简单，且逆变器产生方波比正弦波容易，控制系统的成本会大大降低。

总的来说，永磁电机普遍具有体积小，质量轻，损耗少，效率低，形状和尺寸灵活等优点。但是永磁体的应用，存在失磁和退磁的可能，所以需要进行最大去磁工作点的校核计算，且不断开发高性价比的永磁材料。同时，永磁同步发电机制成后，气隙磁场调节困难，也限制了该电机的应用。当作为飞轮储能系统中的集成式电机，由于转速极高，空载时的铁耗是损耗的主要部分，需要重点分析。

3.3开关磁阻电机

开关磁阻(SR)电机为双凸极结构，基于磁阻最小原理工作。SR电机一般用作电动机，当由电动机状态转变为发电机状态时，需要激磁（与异步电机单机运行情况相同），最终可获得足够高的电动势，输出足够高的电压，达到发电的目的。因此，SR电机应该兼有电动和发电的特性。与各类同步电机以及异步电机相比，首先，SR电机转子无永磁体，不存在高温退磁现象，空载时也没有励磁磁场造成的铁磁损耗，提高了运行的可靠性及效率；其次，电机结构简单、坚固，制造成本低，可工作于极高转速。

在调速上，异步电动机要取得与直流电机相近的调速特性，需采用复杂的矢量控制系统，而开关磁阻电机通过调节开通度、关断度、电压和电流即可，控制简单灵活。一直以来，SR电机由于直、交轴电抗比值不能造的较大，所以性能比异步电机低劣，但是采取了特殊的转子结构——轴向叠片各向异性转子(ALA转子)，SR电机的性能得以提高，在飞轮储能系统中的应用研究也逐渐增多。

3.4通用电机小结

对于通用电机，飞轮储能系统工作在高速发电模式，从功率密度和效率来看，电机选择次序为：永磁电机、感应电机和磁阻电机；从转子机械特性来看，其次序需要颠倒过来，即：磁阻电机、感应电机和永磁电机[3]。在确定高速电机结构型式时，需要对其电磁和机械特性、控制方式和功率变换系统进行综合对比研究。

4其他电机

4.1单极电机

单极电机（同极电机或非周期电机），是感应子电机的一种，通常其转子没有绕组，只有若干作有规则分布的凸出部分，而其定子装有相互间作适当排列的主绕组和励磁绕组，也可用永久磁铁而不用励磁绕组。

单极式感应子电机特点是：一个铁芯下气隙磁场的极性相同，经过转子的磁通方向一定而不交变，因此转子上不产生涡流损耗；同时，转子上没有励磁绕组或永久磁铁等强度薄弱部件，可采用的实心转子，能承受高速旋转产生的离心力，实现高速旋转。与同型号的永磁电机相比较，其不足在于：磁路利用率较低，功率密度（功率/质量）不高；结构复杂，可靠性有所降低，且转子较长。

文献[4]给出一种针对飞轮储能用的同极电机（结构如图2），其中转子的各视图及由励磁绕组产生的磁通方向如图3。该电机励磁绕组固定在定子上，其轴线与转子轴线一致。采用这种结构，首先可省去滑环简化结构，其次转子可由高强度整钢做成，适于高速旋转，此外冷却简单，绕组的空间大大增加，可以有效提高磁通，使无槽定子成为可能。

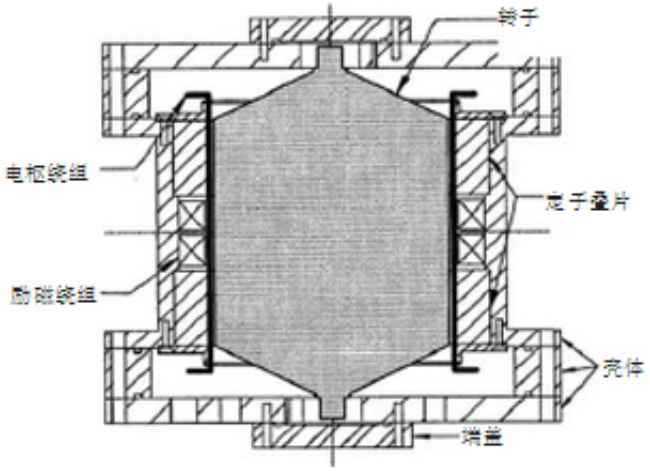


图 2　应用实心转子式单极电机飞轮储能系统示意图

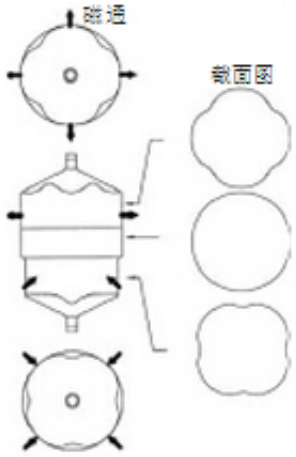
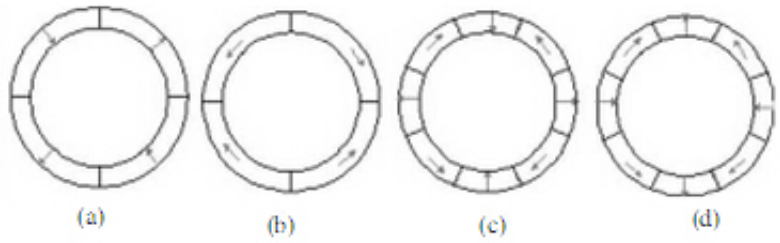


图3　单极电机转子磁通路径示意图

无槽好处在于，不仅不存在齿槽效应（谐波）在转子上引起的一系列损耗，使同步单极式电机更加适合设计高速实心转子，而且消除了定子齿的饱和问题，允许较高的气隙磁通密度。文献[5]在文献[4]的基础上设计的储能500kJ转速范围50k～100kr/min的飞轮储能系统用电机，转子既用于电动/发电，又充当储能飞轮，从而降低了系统的复杂度。定子腔体同时起到真空腔和爆裂保护装置的作用。整体结构可靠，用料成本低，制造简单，功率和储能密度也能满足电力质量、UPS以及电动车的应用。

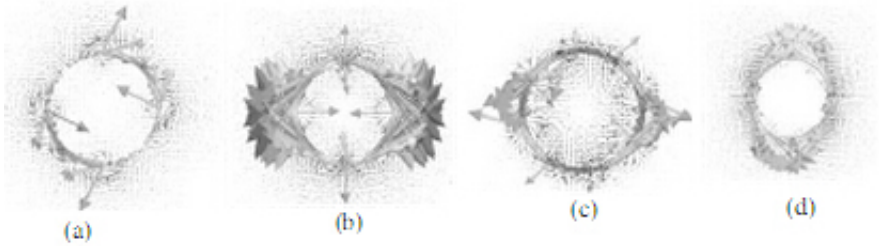
4.2Halbach电机

Halbach电机是一种磁体特殊构型的永磁电机。通常的永磁电机设计，永磁体多采用径向(垂直)或切向(水平)阵列结构。以4极为例，其示意图分别如图4中(a)和(b)所示。而Halbach阵列是将径向与切向阵列结合在一起的一种新型磁性结构，如图4中(c)(d)所示。图5是分别应用Maxwell软件仿真出的、对应永磁体阵列结构的磁通密度矢量图。可以看出，径向与切向永磁体阵列的合成(Halbach阵列)，使一边的磁场增强，而另一边的磁场减弱（如图5中(c)(d)所示）。



(a)径向阵列结构；(b)切向阵列结构；(c)Halbach 阵列结构 - 外转子；(d)Halbach 阵列结构- 内转子

图 4　各种磁体阵列结构示意图



(a)径向阵列结构；(b)切向阵列结构；(c)Halbach 阵列结构 - 外转子；(d)Halbach 阵列结构 - 内转子

图 5　各种阵列结构磁体磁通密度矢量图

气隙磁通的增加，将意味着电磁转矩的增大和电机出力的提高。

如保持电机出力不变，则可减小电枢电流和绕组电阻损耗，从而提高电机效率。转子轭部磁通的减少，首先可相应减小转子轭部的厚度，有利于提高功率密度[7]；其次将使得转子轭部内由于电磁感应效应而产生的电涡流减小，从而使得电机的铁耗大大降低。如果磁场减小的一边减小得足够多的话，有形成单边磁场的趋势。这就为电机实现无铁芯化提供了有利条件。常规磁体结构的永磁电机，由于铁芯的存在，空载损耗很高，空载和负载运行时的不平衡磁拉力，对磁轴承系统的承载力和刚度提出了很高的要求，去掉铁芯后能够克服上述缺陷，但气隙磁通密度很低，又无法满足功率和转矩要求。Halbach永磁电机很好的解决了这一矛盾，从而使电机具备体积小、重量轻、损耗低、功率密度高等优点。此外，气隙磁场正弦分布程度较高，谐波含量小，使得定子不需要斜槽即可降低铁耗，非常适合电机高速运行。Halbach电机的这些特点特别适合应用于高速飞轮储能系统中。

4.3盘式电机

盘式电机又称轴向磁场电机（AFEM），一般具有轴向尺寸短、重量轻、体积小、结构紧凑等特点。尤其盘式永磁同步电机由于采用永久磁钢激磁，转子无损耗，电机运行效率高，由于定、转子对等排列，定子绕组具有良好的散热条件，可获得很高的功率密度。

此外，这种电机还具有优越的动态性能以及多气隙组合式结构，是现代高性能伺服电机和大力矩直接驱动电机的发展趋势，在高速飞轮储能系统中该电机也具有应用前景。

S.Nagaya等指出，与RFEM相比，AFEM轴向和径向负载较小，可有效降低常规电机的轴振动，所以能运行于高速且轴承的尺寸也较小，并在此比较基础上，设计并制造了转速为1万r/min时，输出功率为17kW的飞轮储能用集成式盘式电动/发电机，其盘式（单定子单转子）无槽电动/发电机如图6所示，电动、发电效率均可达95%以上。

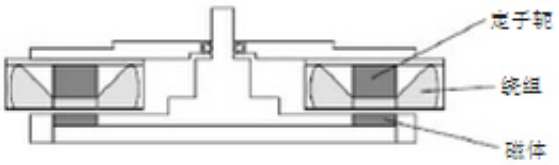


图 6　无槽盘式电机示意图

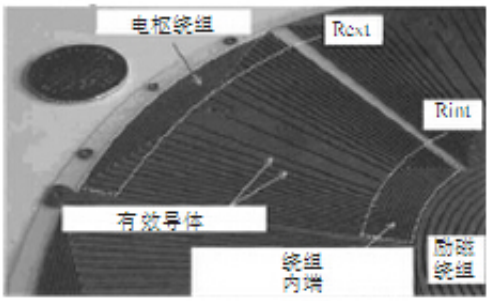


图 7　励磁及电枢印刷电路绕组示意图(单面)

4.4其他电机小结

这里列举了三种特殊的电机结构形式，在通用电机设计的基础上，可单独采用也可交叉应用，例如永磁类电机可以考虑Halbach阵列及盘式无铁心结构，单极电机也可采用盘式结构等。此外，还有一些特殊的电机结构型式，如印刷电路绕组电机，这是一种专为飞轮储能系统设计的电机，励磁绕组与电枢绕组由双面印刷电路构成，处于轴向单极磁通中，如图7所示。该类电机的优势不言而喻，但其容量及制造工艺有待进一步研究发展。

5结束语

电机的发展有近200年的历史，种类繁多，结构不断创新，性能不断提高，特别是新材料、新工艺以及新控制技术的出现，原本有限制的电机其应用领域也重新得以拓展。因此，作为飞轮储能系统能量转换的关键部分，集成式电机的选择余地非常广，并且根据储能目标的不同，飞轮外形的变化及其与电机的联接方式、集成方式的不同，电机的选择或新结构的设计都将受到影响。此外，还要考虑飞轮储能的独特性，综合考虑不同部件间的动力耦合、电磁耦合、机电耦合等，从而选择性能优良且控制、制造成本较为经济的集成式电机方案。

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/91354.html