

飞轮储能系统永磁同步电动发电机设计及仿真研究

于雅莉

哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

DOI:10.61369/EPTSM.2025120002

摘 要 : 为有效地解决目前的能源问题, 应该在开发可再生资源及新型能源基础上, 引入新技术来提高能源利用率, 这也是目前此领域的研究热点。飞轮储能具有使用寿命长、储能密度大、功率密度高、充放电次数没有限制、储能成本低、环境友好等方面优势, 目前在储能受到广泛关注。本文具体分析了这种储能系统对发电机的要求, 设计飞轮储能用永磁同步电动发电机。仿真分析储能飞轮系统转子固有频率和振型, 仿真计算永磁同步电机的电磁振动, 得到激振力各阶谐波, 分析了其空载激振力波的主要组成分量, 有助于今后分析定、转子结构参数对电机激振力波的影响, 进一步优化电机结构和电磁参数。以提升储能飞轮系统整体性能。

关 键 词 : 飞轮储能; 电动发电机; 永磁同步电机; 激振力波; 电磁振动

Design and Simulation of the Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Energy Storage Systems

Yu Yali

College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001

Abstract : At present, to face the energy crisis not only to develop renewable resources such as wind and solar energy and new energy sources, but also to save energy and improve energy efficiency. Flywheel energy storage has the advantages of long service life, high energy storage density, high power density, unlimited charge and discharge times, low energy storage cost, and no damage to the environment. Therefore, flywheel energy storage is a new type of storage technology with broad application prospects. According the requirements of the motor/generators in the flywheel energy storage system are reviewed, the PMSM/generator for flywheel energy storage has been designed. The simulation analysis of the natural frequency and vibration modes of the rotor in the energy storage flywheel system was conducted. The electromagnetic vibration of the PMSM was simulated to obtain the harmonic components of the excitation force. The main components of the no-load excitation force wave were analyzed, which can be used for future studies on the influence of stator and rotor structural parameters on the motor's excitation force wave. This will further optimize the motor structure and electromagnetic parameters to enhance the overall performance of the energy storage flywheel system.

Keywords : flywheel energy storage; motor/generator; PMSM; electromagnetic force; electromagnetic vibration

引言

目前各国为有效地解决能源问题, 开始大力发展可再生资源及新型能源, 且引入各种新技术来有效提高能源利用率^[1]。此外很多国家还制定了相关政策来促进新型能源技术的开发利用, 并取得一系列重要进展。能量存储是有效利用能源的重要手段, 对提高能源利用率, 发挥其价值也有重要意义^[2]。目前储能方式有很多种, 其中典型的包括抽水蓄能、蓄电池、飞轮储能等, 其各有一定优缺点和适用范围。飞轮储能的优势在于成本低, 寿命长、储能密度大, 环境友好, 因而表现出广阔的应用前景, 也是未来此领域的重点研究方向^[3-6]。

飞轮储能主要是将电能以机械能方式存储起来, 其中最关键的部件为电动发电机, 其可实现这两种能量的相互转换。为更好的满足实际应用性能要求, 其采用的电动发电机应尽可能满足如下需求: 可逆性, 速度调节范围大; 转换效率高, 且转子的机械性能好, 可承受高转速载荷, 环境适应性高, 调速性能好; 转子损耗低, 输出功率大^[2]; 使用寿命长, 可在复杂恶劣环境下长时间可靠运行; 造价低, 电机结构简单、方便使用和维护, 较大温度区间内都可良好运行^[7]。

一台永磁电机质量可通过多种指标进行评价, 其中最重要的就是振动指标, 振动容易引起噪声, 此外也可通过振动信号来判断电机结构是否出现显著的变化, 进而预测其使用寿命。因此很有必要对这种部件的振动特性进行深入研究, 这对制定应对策略来改善其性能、延长使用寿命具有重要意义。

一、储能飞轮用永磁同步电机设计

以10kWh飞轮储能单机系统为对象，根据相关资料可知其关键参数主要如下：最大储能10kWh，放电深度为0.75，转速8000-16000rpm，转子转动惯量是25.7kgm²。

为设计符合上述要求的发电机，应该在理论分析基础上结合设计经验，确定出飞轮与电机的参数传递关系。由于这种关系主要和转动惯量有关，因而需要先建立能量与角速度的关系式。根据相关物理学知识可知，瞬时角速度与能量存在如下关系：

$E = \frac{1}{2}J\omega_x^2$ ，其中， E 为能量， ω_x 为瞬时角速度。由于这种系统的最大储能 E_{max} 为10kWh，转动惯量 $J = 25.7\text{kgm}^2$ ，由此可得飞轮最高角速度 ω_{max} 为：1675.5rad/s。设定飞轮最低转速为8000rpm，则放电深度 λ 的计算如下： $\lambda = 1 - \frac{\omega_{min}^2}{\omega_{max}^2} = 1 - \frac{n_{min}^2}{n_{max}^2} = 0.75$ 。其中， ω_{max} 是飞轮最大角速度， n_{min} 是飞轮最低角速度， n_{max} 是飞轮最大转速， ω_{min} 是飞轮最低转速。

飞轮储存能量总量 ΔE 与角速度的关系为： $\Delta E = \frac{1}{2}J\omega_{max}^2 - \frac{1}{2}J\omega_{min}^2 = 7.5\text{kWh}$ 。用放电深度表示的形式为： $\Delta E = \frac{1}{2}\lambda \cdot J \cdot \omega_{max}^2$ 。设发电机及变换电路效率 η_g 为0.9，则飞轮转子有效储能 E_{out} 可以表示为： $E_{out} = \Delta E \cdot \eta_g = 6.75\text{kWh}$ 。

(一) 电动状态指标解析

电动状态输出功率 $P_{m2} = 130\text{kW}$ ，假定系统上升期间功率保持130kW，这样就可确定出能量与充电时间正相关。对应的关系可表示为： $E_{m2} = P_{m2} \cdot t_{m2}$ ，代入数据计算出储能为10.4kWh $> E_{max} = 10.8\text{kWh}$ 。根据此结果可判断出，电动机转轴输出的机械能大于最大储能，可满足飞轮指标要求。设电动机效率 η_m 为0.93，则其输出 P_{m1} 为140kW。额定电压为 U_{rate} 为： $U_{rate} = \frac{P_{m1}}{\sqrt{3} \times I_{rate}} = 700\text{V}$ ，根据这些参数对驱动器容量进行合理选择。在选择时需要确保过压、过流值至少达到额定值的1.1倍，这样才可以满足工作性能要求。

(二) 发电状态指标解析

放电时间 $t_g = 180\text{s}$ ，假定下降期间保持恒功率，发电机输出 P_{g2} 为135kW，输入 P_{g1} 为50kW，代入相关数据计算出，其输入能量 E_{g1} 为： $E_{g1} = P_{g1} \cdot t_g = 7.5\text{kWh} \leq \Delta E$ 。这也反映出，输入能量 E_{g1} 略低于对应的储存总能量 ΔE ，因而飞轮性能指标都满足。

上述核算假定系统整个运行中都保持功率不变，不过实际情况下，对应的电流和转速等参数都存在一定的波动性，因而上述理想的假定条件并不成立。在转速由0增加到峰值期间，驱动器最大电流为250A，实际启动时需要适当的降低电流，从而满足安全性相关要求。此外还需要给储能系统设计余量，将最高转速设定为： $n_{max} = 16000\text{rpm}$ ($\omega_{max} = 1675.5\text{rad/s}$)， $n_{min} = 8000\text{rpm}$ ($\omega_{min} = 837.8\text{rad/s}$)；电动发电机的功率保守定为： $P_{m2} = 150\text{kW}$ 。

二、飞轮储能系统转子动力学分析

根据数学和物理学相关知识可知，n自由度运动方程的状态空间可描述为：

$$\begin{bmatrix} C + \Omega G & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \text{ 设 } z = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}, \text{ 则}$$

简化为： $A\dot{z} + Bz = 0$

分析以上的方程可知，其中的系数A和B均取决于转速 Ω ，这样求解转子系统固有频率的问题可转变为求解 $K\bar{Z} = \lambda M\bar{Z}$ 的特征值，而其振型则可通过求解特征向量确定出。前一个问题采用Wilson- θ 法进行求解^[8]。主要研究无阻尼状态下结构的振动特性以及与此相关的影响因素，然后详细讨论陀螺效应对转子系统涡动的影响，代入数据进行计算后，确定出转子系统的特征值，其虚部对应于系统的固有频率。

在不转动条件下，固有频率是成组出现的，分析可知其原因主要是，转子在X、Y方向非耦合，对应的惯性和刚度保持一致。但系统在运行过程中，随着转速的提高，达到3000rpm条件下，会产生很明显的陀螺效应，在此因素影响下系统的固有频率每对分开了。因系统阻尼为零，这样此时的特征值的实部为零。图1对这种分叉现象进行明确的显示：一个随转速的提高而不断增加，其中随转速的提高而提高为正向涡动，即陀螺效应提高了系统的刚度；反之对于反向涡动，陀螺效应降低了系统的刚度。

在上述计算基础上确定出的特征向量即为转子振型。在本次求解时，为方便处理而将模态振型的阶数设为前6阶，然后代入数据进行计算就确定出转子的各阶振型，对所得结果进行可视化处理如图2。分析此图可发现，其中第一、四阶是锥形涡动，第二、三阶是平行涡动，其余的两个为复合振型。

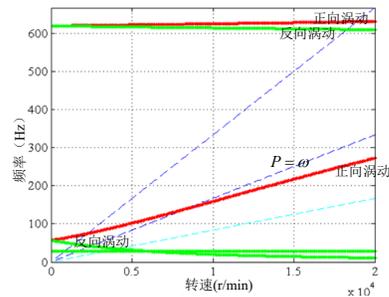


图1 轴承无阻尼时转子系统的固有频率图

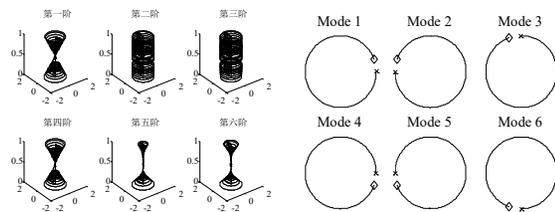


图2 轴承无阻尼时转子系统振型图

图3 转子系统振型轴向往图

具体分析图2可发现，每个节点的轴心轨迹为圆周，在此运动过程中振型是沿着转轴不断的变化。飞轮节点轨迹的轴向往图见图三，分析此图可发现其中模态1、3和5是反向涡动；其余三个为正向涡动。

三、振动分析

飞轮储能系统结构复杂，为确保其可长期有效运行，需要确保其中的电机性能达到较高水平，特别是需要功率质量比较高。不过这也增加电机的电流、磁密度，同时减小其体积。不过根据大量的经验可知，电机功率增加过程中，对应的振动和噪声也显著增加。根据相关资料可知，目前我国用电机的振动与噪声控制水平还不高，和实际的飞轮系统需求相比，存在较大差距。随着科技的

进步和生活质量的不断提高，未来需要电机的振动与噪声都被有效地控制，这也是此领域的主要发展趋势之一。相关理论和实验研究发现，电机的噪音主要包括三类，其中电磁噪声是主要成分，因而也是需要重点控制的。磁场谐波含量小，阶数高，其频率和定子的固有频率差异很明显。电磁振动主要和电磁激振力波有关，因而在解决这类噪音时需要重点考虑到与此相关的振动波。

电磁振动计算时可选择的方法主要包括解析法和有限元法，其各有一定适用范围，目前有限元法的应用范围更广。电磁振动的产生原因为电机气隙磁场作用于电机铁心后形成激振，解析法在求解过程中需要分析定转子磁动势和气隙磁导，以及对应的激振力波。而有限元法主要是利用计算机工具来求解，需要考虑到齿槽的结构参数。以一台4极36槽永磁同步电机为例，电机基本参数如表1所示：

表1 电机参数表

功率 (kW)	150	槽口宽度 (mm)	6
转速 (rpm)	16000	转子内径 (mm)	50
定子外径 (mm)	400	极弧系数	0.82
定子内径 (mm)	280	剩磁密度 (T)	1.23
转子外径 (mm)	273	极对数	2
气隙长度 (mm)	3.5	定子槽数	36
永磁体厚度 (mm)	7	轴向长度 (mm)	79
轴径 (mm)	50		

图4为有限元方法计算得到的电机径向气隙磁通密度。图5为电机径向气隙磁通密度FFT分解后的结果。具体数值如表2所示，由快速傅立叶分解确定出，基波幅值最大，约为0.89T，其中还有奇次谐波（表中只列出35次谐波结果），其中次数为3次，9次，7次，19次谐波幅值相对较大。

径向气隙磁通密度波形中的谐波量少，幅值低，则认为电机的质量越高。为有效地减小电机振动，可控制其中谐波次数不变，降低正弦性畸变率，以及对应的谐波幅值。

应用气隙磁密的谐波畸变率计算公式，将表3中数值高于0.02T的谐波磁密参与计算，得到谐波畸变率为21.95%。

$$B_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{35} B_{rn}^2}}{B_{r1}} \times 100\% = \sqrt{\sum_{n=3}^{35} \left(\frac{B_{rn}}{B_{r1}}\right)^2} \times 100\%$$

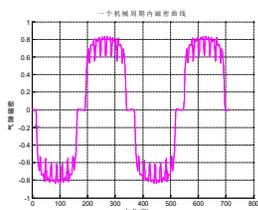


图4 径向气隙磁通密度

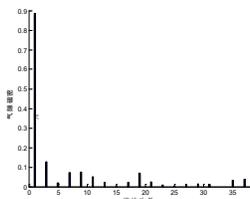


图5 径向气隙磁通密度 FFT分解

参考文献

- [1] 于雅莉. 储能飞轮动发一体机电磁关键问题及温度场的研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- [2] 杨志轶. 飞轮电池储能关键技术研究 [D]. 合肥工业大学, 2002.
- [3] 汤平华. 磁悬浮飞轮储能电机及其驱动系统控制研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] 韩邦成. 单轴飞轮储能/姿态控制系统的仿真及其实验研究 [D]. 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2004.
- [5] 汤双清. 飞轮电池磁悬浮支承系统理论及应用研究 [D]. 华中科技大学, 2004.
- [6] 刘治华. 双功能飞轮控制方法的研究 [D]. 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2006.
- [7] A.S.Nagorny, N.V.Dravid, R.H.Jansen, et al. Design Aspects of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator for Flywheel Applications, Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference, 2005:635-641P
- [8] 刘静娜. 飞轮储能系统电磁轴承—转子动力学特性研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2014

表2 径向气隙磁通密度 FFT分解结果

谐波次数	磁密幅值 T	谐波次数	磁密幅值 T	谐波次数	磁密幅值 T
1	0.8852	13	0.0235	25	0.0037
3	0.1274	15	0.0040	27	0.0116
5	0.0209	17	0.0222	29	0.0139
7	0.0720	19	0.0701	31	0.0120
9	0.0743	21	0.0258	33	0.0025
11	0.0511	23	0.0103	35	0.0336

切向气隙磁通密度幅值较低，所以一般情况下，可以忽略切向气隙磁通密度对电磁力的作用。图8为某时刻空载激振力波的波形图，图9为激振力波的快速傅立叶变换，其各阶谐波的幅值如表3所示，从表中可以看出，有限元计算结果与理论分析相一致，激振力波谐波主要分量为4次，8次，12次，……。

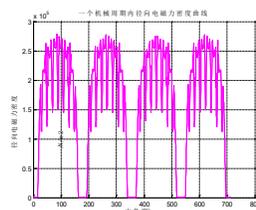


图6 单位面积的电磁力曲线图

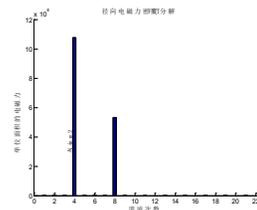


图7 单位面积的电磁力 FFT分解

表3 单位面积电磁力幅值 FFT分解结果

谐波次数	力密度幅值 *1.0e+005	谐波次数	力密度幅值 *1.0e+005	谐波次数	力密度幅值 *1.0e+005
1	0.0009	8	0.5306	15	0.0009
2	0.0003	9	0.0008	16	0.0350
3	0.0009	10	0.0008	17	0.0008
4	1.0752	11	0.0008	18	0.0010
5	0.0016	12	0.2445	19	0.0013
6	0.0013	13	0.0010	20	0.0810
7	0.0003	14	0.0010	21	0.0012

四、结论

为满足储能飞轮系统对电动发电机的要求，设计永磁同步电动机，建立飞轮储能系统的参数传递关系。仿真分析储能飞轮系统转子固有频率和振型，仿真计算永磁同步电机的电磁振动，得到激振力各阶谐波，有助于今后分析定、转子结构参数对电机激振力波的影响，进一步优化电机结构和电磁参数。以提升储能飞轮系统整体性能。