

开关磁阻电机减振降噪技术研究

谭平¹, 瞿遂春^{1,2}, 马世伟¹

(1. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412008; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了开关磁阻电机减振降噪的主要控制方法, 分析了电机尺寸、定转子极数、定子凸极结构、相数结构和绕组连接方式对电机振动与噪声的影响, 为开关磁阻电机设计初期的结构选型提供参考。

关键词: SRM; 振动; 噪声

中图分类号: TM301.4+3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)03-0066-04

Study on Noise Reduction and Vibration Damping of Switched Reluctance Motor

Tan Ping¹, Qu Suichun^{1,2}, Ma Shiwei¹

(1. Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The main control methods of noise reduction and vibration damping of switch reluctance motors were introduced. The effects of the motor size, the stator and rotor poles, the salient pole of stator, phase structure and the winding connections on the noise and vibration of SRM were analyzed. The reference for structure options of the initial design of switched reluctance motors were provided.

Keywords: SRM; vibration; noise

0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 以结构简单坚固、成本低、容错能力强、低速性能好、调速范围宽、能四象限运行等优点, 成为交直流电机驱动系统及无刷驱动系统有力的竞争者。然而, SRM 的双凸极结构和电源供电的开关性, 使它较其它传统电机有较大的转矩脉动和噪声, 制约了 SR 电机的应用领域和发展速度^[1]。因此, SRM 转矩脉动及噪声抑制的研究一直得到人们的高度重视, 分析 SRM 的转矩脉动并提出有效减小转矩脉动的方法具有重要意义。

电磁噪声是 SR 电机噪声的主要组成部分, 当径向力和定子的固有频率一致时, 将会产生严重的噪声和振动, 影响定子固有频率的有电机本身相数、结构尺寸、所采用的控制策略和控制参数。转矩脉动对电机

运行时的振动和噪声有着较大影响, 转矩脉动的增加将不可避免地加大电机本体振动, 增加电机运行时的噪声, 限制了其在诸如伺服驱动等这类低速且要求平稳并有一定静态转矩保持能力场合下的应用^[2]。近年来, 国内外学者将多种控制策略引入转矩脉动的抑制研究中, 提出了多种抑制方案。目前 SRM 转矩脉动抑制的研究主要围绕电机设计和电机控制进行, 为减小转矩脉动、改善系统性能, 国内外学者对如何降低 SR 电机噪声和转矩脉动做了大量研究, 并取得了许多成果^[3-7]。但大多数研究集中在 SR 电机定子振动特性分析^[8]、噪声预估及有源降噪控制策略等方面, 对 SR 电机本体结构形式及其机械噪声的系统研究较少。本文介绍了常用的减振降噪控制措施和方法, 并从分析 SR 电机本体结构形式对电机噪声的影响入手, 对 SR 电机设计初期的结构选型提出一些意见。

收稿日期: 2009-12-10

通信作者: 谭平 (1985-), 女, 湖南株洲人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电机及其控制,

E-mail: 403913879@qq.com

1 减振降噪的常用控制方法

针对目前国内外学者已提出的多种减振降噪方案, 基于控制方式的不同, 列出了减振降噪的主要控制方法, 如图1所示。

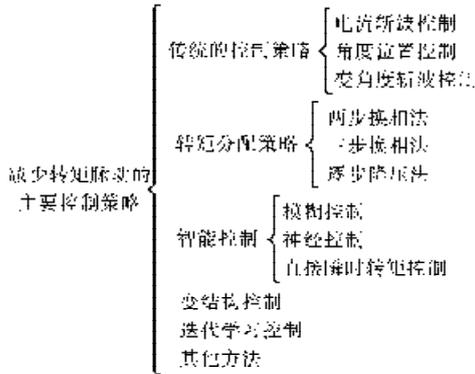


图1 减少转矩脉动的主要方法

Fig. 1 The main methods of reducing the torque ripple

在实际电机驱动装置中, 机械噪声在总体噪声中占相当的比重, 在某些工况下甚至超过电机本体的电磁噪声, 其影响必须加以考虑。下面是常用的减小机械噪声的措施和方法:

- 1) 加强电机定子的刚度;
- 2) 增加阻尼措施;
- 3) 防止共振;
- 4) 采用弹性连接;
- 5) 降低空气动力噪声;
- 6) 尽量将每相所有极绕组并联。

2 本体结构对 SRM 振动与噪声的影响

电机本体结构参数中对 SRM 振动与噪声有重要影响的是: 尺寸、定子凸极、相数结构和绕组连接方式等, 下面逐一进行阐述。

2.1 尺寸的选择

电机噪声对环境的影响和噪声的测量一般都与电机表面相距不远, 属于近场。电机产生的声波近似为柱面波, 其声强计算可以通过无穷大平面声波乘上相对声强系数得到。柱面声波的相对声强系数是在下述假定下得到的:

- 1) 忽略接线盒、底脚、端盖等结构的声辐射;
- 2) 电机外表面为圆柱形表面;
- 3) 电机表面声辐射相对声强系数可按无限长圆柱体来计算。

按假定, 柱面声波的声强问题可简化为二维问题。在极坐标系中, 二维声学波动方程为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial p}{\partial r} \right] - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} - k^2 p = 0 \quad (r \geq R_c, |Z| < \infty), \quad (1)$$

式中: p 为声压; $k = \omega/C$ (其中 C 为空气中的声速)。方程(1)的边界条件如下。

1) 已知电机表面任意点的径向振动位移为:

$$y(\varphi, t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n e^{j(n\omega t - n\varphi)} \quad (r = R_0), \quad (2)$$

式中: $\omega = 2\pi f - \frac{2\pi}{T}$; Y 为最大振幅。

2) 由牛顿定律, 质点的速度与声压的关系为:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\text{grad} p, \quad (3)$$

式中: ρ 为介质密度; grad 为梯度符号。

3) 在电机表面处($r = R_0$)应满足条件

$$v|_{r=R_0} = \frac{\partial y}{\partial t}. \quad (4)$$

由以上边界条件并接近场 p_v 共轭法进行计算, 可得电机表面振动所辐射的声功率为:

$$W = \frac{8\rho C L R_0 \pi^2 f_c^2 Y_n^2}{(kR_0) [J_n^2(kR_0) - N_n^2(kR_0)]}, \quad (5)$$

$$\text{声强为 } W = \frac{8\rho C L R_0 \pi^2 f_c^2 Y_n^2}{(kR_0) [J_n^2(kR_0) - N_n^2(kR_0)]}, \quad (6)$$

所以, 将电机作为无限长圆柱体处理时, 其相对声强系数为:

$$I_c = \frac{I_c}{I_c} = \frac{2}{\pi (kR_0) [J_n^2(kR_0) + N_n^2(kR_0)]}, \quad (7)$$

有了相对声强系数, 即可方便地求得 SR 电机电磁噪声辐射的声功率为:

$$W = 2\rho C \pi^2 f_c^2 Y_n^2 \cdot 2\pi R_c L \cdot \bar{I}_c. \quad (8)$$

研究表明^[1]: 直径大、长度短的电机比直径小、长度长的电机的相对声强系数小, 噪声辐射效率低; 但是直径大、长度短的电机比直径小、长度长的电机定子径向刚度小, 振动幅值大。综合考虑相对声强系数和振幅, 由于声功率与振幅的平方成正比, 而与相对声强系数的一次方成正比, 同时相对声强系数的变化范围有限^[1]。因此, 对于像 SR 电机这样定子振幅较大的电机而言, 振幅对电机噪声的影响占主导地位, 则可得结论: 直径大、长度短的 SR 电机比直径小、长度长的 SR 电机噪声大。

2.2 定转子

2.2.1 定转子极数

低阶次径向力波是引起电机电磁噪声的主要根源, 影响径向力的因素有: 开通角、关断角、转速、占空比、斩波频率等。低阶次径向力波作用于定子铁心和机座上, 使其随时间发生周期性的径向变形, 引起周围空气脉动而引起气载噪声, 径向力波的阶数越低, 铁心弯曲变形的相邻两支点间距离越远, 铁心刚

度相对较差，径向变形越大^[2]。从定量关系上来说，定子铁心的变形量约与力波阶数 n 的 4 次方成反比，与力波幅值成正比。径向力波的阶数 n 确定了电机径向振动的振型。

图 2 给出了中小型电机较重要的定子铁心变形形状（对应径向力波的阶数 $n=1,2,3,4$ ）。由图 2 可看出， $n = 1$ 时，定子铁心受到一个周期性变化的单边磁拉力作用； $n = 2$ 时，径向力波沿气隙使定子铁心产生椭圆形的周期变形； $n > 2$ 时，径向力波导致定子铁心产生多边形的周期变形。

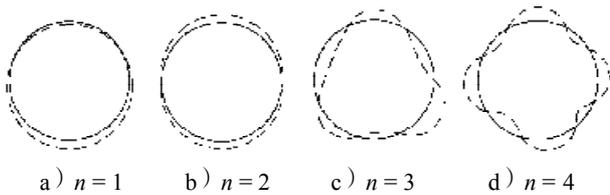


图 2 定子铁心变形形状

Fig. 2 The shape of stator core deformation

实验表明，对于相数一定的电机，定转子极数越多对降低振动与噪声越有利。但由于电感的存在，极数过多会影响电机高速运转时的出力，所以定、转子极数取 $N_s = 4m, N_r = 4(m-1)$ （其中 N_s 为定子极数， m 为相数， N_r 为转子极数）较好。因此，对于三相电机以选择 12/8 极、四相电机以选择 16/12 极为佳。

2.2.2 定子凸极结构

为了研究 SR 电机定子的凸极结构对固有频率的影响，根据样机参数（仅考虑机壳），建立了 2D-4 模型，如图 3 所示。

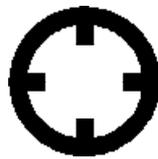


图 3 2D-4 模型

Fig. 3 2D-4 Model

利用 ANSYS 提供的智能网络划分，选用 PLANE82 单元类型模块进行仿真运算，得到定子凸极结构的 SR 电机振动频率的模态分布如图 4 所示。

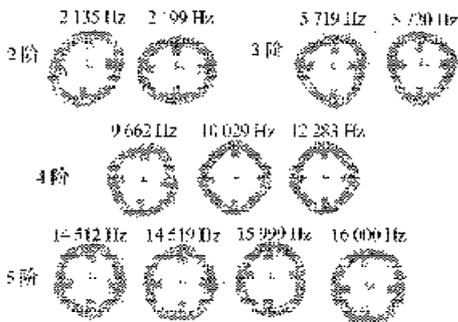


图 4 2D-4 模态

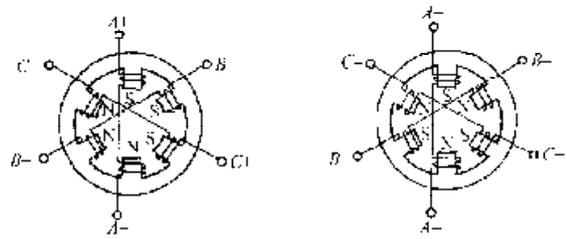
Fig. 4 2D-4 Modal

据图 4 所示对比结果可以看出：定子凸极的存在使得其圆周出现不对称结构，导致其在某阶振型中对称模态和不对称模态显著不同。

2.3 相数结构及绕组连接方式

相数是所有参数中最重要参数之一，它不仅对整个电机的成本和性能有重大影响，而且对噪声和振动的影响也是至关重要的。目前常用的有三相和四相 2 种结构，下面对这 2 种结构的电机运行时各相电流波形和大小的一致性作简要分析，以说明哪种相数结构和绕组连接方式的电机更适合采用。从对称性来讲，不管采用何种相数结构的电机，运行时各相电流波形大小一致是避免产生较大噪声振动的先决条件。当不考虑各相绕组互感的影响时，各相电流在相同的开通角和关断角之下，电流波形和大小是完全一致的。但是由于各相绕组存在互感，且各相绕组的互感电动势对绕组电流波形有影响，尤其在电流较大时，这种影响更加显著，所以必须充分考虑互感对电流波形和大小的影响。同时磁路的不一致性会形成单边磁拉力使噪声振动增大。

对三相 SR 电机来说，如图 5 中 a) 的接法存在着电流波形和大小不一致，同时磁路也不一致的现象，电机噪声大。而图 5 中 b) 的接法则电流波形和磁路均具有一致性，电机噪声有所改善。因此对于三相 SR 电机，采用极性分布为 NSNSNS 的绕组连接方式对降低电机噪声有帮助。



a) NNNSSS 连接法

b) NSNSNS 连接法

图 5 三相 SR 电机绕组连接方式

Fig. 5 Three-phase SR motor winding connections

对四相 SR 电机来讲，由图 6 中 a) 和 b) 为正串接法，从图中可看出，B 相和 C 相的磁通交链情况完全相同，它们受邻相互感电动势的影响完全一致，而 A 相和 D 相受邻相互感电动势的影响却不同。在电机运行时会出现中磁路和短磁路交替的现象，表现为磁路的不一致性，电机的噪声和振动较大。图 6 中 c) 为反向串联接法，从图中可看出，A、B、C、D 4 相受邻相互感电动势的影响完全一致，且磁路全部为短磁路，表现出一致性。对这种绕组反串接法，电机需 2 相导通而利用相间互感工作，性能分析比传统单相导通方式要复杂，同时它还表现出比传统单相导通方式略大的出力。因此，对四相 SR 电机采用极性分布为 NSNSNSNS 的绕组连接方式对改善电机噪声有帮助。

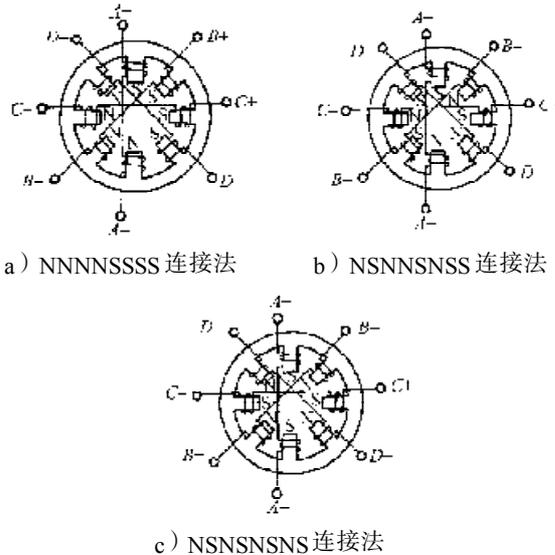


图6 四相SR电机绕组连接方式

Fig. 6 Four-phase SR motor winding connections

综上所述,从改善电机噪声的角度,所有SR电机均宜采用沿定子圆周N,S极性交替的绕组连接方式。当SR电机为奇数相时,绕组为正串接法;而当SR电机为偶数相时,绕组为反串接法。

2.4 绕组工艺和散热筋结构

不同绕组工艺和散热筋结构条件下的固有频率也不同:

1) 散热筋结构对振动系统高阶固有频率的计算精度有较大影响,模态分析时应予以考虑。

2) 传统轴向散热筋结构会降低振动系统的高阶固有频率,而对低阶固有频率影响不大。

3) 绕组加固工艺对于提高低阶固有频率有较大作用,但是对提高高阶固有频率的作用很小。

4) 周向散热筋结构相对于传统的轴向散热筋结构,对提高高阶固有频率效果非常显著,而对提高低阶固有频率的效果一般。

5) 同时采用绕组加固工艺和周向散热筋结构,对系统各阶固有频率都有较大幅值的提高。

开关磁阻电机定子振动的策振力是磁拉力,其频率与电机转速成正比。电机定子固有频率的提高,使得能形成共振的策振力频率提高,进而共振点的电机转速提高,拓宽了电机的速度范围,降低了因共振引起的振动噪声。所以采用绕组加固工艺和周向散热筋结构对于降低开关磁阻电机的噪声水平有较大益处。

3 结语

目前,各种控制理论在减小SRM转矩脉动方面已

经取得了丰硕的成果,但还远未到完善的程度。由本文分析可以看出,尺寸、定子凸极、相数结构和绕组连接方式等参数的影响是不可忽略的,那么就如何选择合适的电机本体参数使得产生的噪声与振动更小,将是值得进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
Wang Honghua. SMR Speed Control Technologies[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] 陈永校, 诸自强, 应善成. 电机噪声的分析与控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
Chen Yongxiao, Zhu Ziqiang, Ying Shancheng. Motor Noise Analysis and Control[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1987.
- [3] Choi Changhwan, Kim Seungho, Kim Yongdae, et al. A New Torque Control Method of A Switched Reluctance Motor Using A Torque-Sharing Function[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(5): 3288-3290.
- [4] 黄建中, 蒋全, 周鄂. 减小开关磁阻电机转矩脉动的控制策略研究[J]. 微特电机, 1996(6): 6-9.
Huang Jianzhong, Jiang Quan, Zhou E. Research on Control Strategy to Minimize Torque Ripple of A Switched Reluctance Motor[J]. Small & Special Electrical Machines, 1996(6): 6-9.
- [5] Yusuf Ozoglu, Muhammet Garipb, Erkan Mesec. New Pole Tip Shapes Mitigating Torque Ripple in Short Pitched and Fully Pitched Switched Reluctance Motors[J]. Electric Power Systems Research, 2005 (74): 95-103.
- [6] Peter Omand Rasmussen, Jens H. Andreasen, Joseph Michael Pijanowski. Structural Stator Spacers 2A Solution for Noise Reduction of Switched Reluctance Motors[J]. IEEE Transaction on Industry Applications, 2004, 40(2): 574-581.
- [7] Sahoo S K, Panda S K, Xu J X. Iterative Learning-Based High Performance Current Controller for Switched Reluctance Motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(3): 491-498.
- [8] 吴建华. 基于物理模型开关磁阻电机定子模态和固有频率的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 109-114.
Wu Jianhua. Study on the Stator Mode Shapes and Natural Frequencies of Switched Reluctance Motor Based on Real Structural Model[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2004, 24(8): 109-114.

(责任编辑: 李玉珍)