

## 基于动态换向策略的开关磁阻电机控制方法

韩旭帅 田继萍 王雷 张可心 朱云雷

河北科技大学电气工程学院, 河北 石家庄 050018

**[摘要]** 同步磁阻电动机 (Synchronous Reluctance Motor, 简称 SynRM) 的定子一般和同步电机定子相同, 转子则采用多层空气磁障结构来获得较高的凸极率。为了进一步提升 SynRM 的性能, 许多研究者在转子结构设计上作出了重大成果。同步磁阻电机的优良设计关键点就是转子的优良设计, 转子磁障的数目、高度、角度、肋的宽度、气隙的宽度和角度位置等都会影响电机的性能。但是因为同步磁阻电机在转动中嵌入多级磁障, 增大了转子损耗, 也削弱了转动的结构刚度, 从而直接影响了电动机最大速度的提升, 严重影响了同步磁阻电机在高速领域中的广泛应用, 而庞大的设计参数又为电动机的优化设计工作增加了很多负担。影响了电机最高转速的提高, 限制了同步磁阻电机在高速领域中的应用, 众多的设计参数也给电机的优化设计工作带来了较大负担。开关磁阻电机转动一般使用几何凸极构造, 与同步磁阻电机转动是完全不同的类型, 其冲片制作的过程较为简单, 而且机械强度较高, 同时具有较高的可靠性。但是, 却面临转矩脉动大、振动大、噪声高、需要额外的功率变换电路等问题。所以保证电机拥有较低转矩脉动的同时确保转子足够的机械强度是目前亟待解决的问题。

**[关键词]** 同步开关; 磁阻电机; 转子优化设计

DOI: 10.33142/aem.v4i7.6409

中图分类号: TM352

文献标识码: A

## Control Method of Switched Reluctance Motor Based on Dynamic Commutation Strategy

HAN Xushuai, TIAN Jiping, WANG Lei, ZHANG Kexin, ZHU Yunlei

School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei, 050018, China

**Abstract:** The stator of synchronous reluctance motor (SynRM) is generally the same as that of synchronous motor, and the rotor adopts multi-layer air magnetic barrier structure to obtain high salient pole ratio. In order to further improve the performance of SynRM, many researchers have made significant achievements in rotor structure design. The key to the excellent design of synchronous reluctance motor is the excellent design of rotor. The number, height, angle, rib width, air gap width and angle position of rotor magnetic barrier will affect the performance of the motor. However, because the synchronous reluctance motor embeds multi-level magnetic barriers in the rotation, it increases the rotor loss and weakens the structural stiffness of the rotation, which directly affects the improvement of the maximum speed of the motor and seriously affects the wide application of the synchronous reluctance motor in the high-speed field, and the huge design parameters add a lot of burden to the optimal design of the motor. It affects the increase of the maximum speed of the motor and limits the application of synchronous reluctance motor in the high-speed field. Many design parameters also bring a great burden to the optimal design of the motor. Switched reluctance motor rotation generally uses geometric salient pole structure, which is completely different from synchronous reluctance motor rotation. Its punching process is relatively simple, with high mechanical strength and high reliability. However, it faces the problems of large torque ripple, large vibration, high noise and the need for additional power conversion circuit. Therefore, it is an urgent problem to ensure that the motor has low torque ripple and sufficient mechanical strength of the rotor.

**Keywords:** synchronous switch; reluctance motor; rotor optimization design

### 引言

轴向磁通开关磁阻电机 (以下简称 AFSRM) 结合了开关磁阻电机 (以下简称 SRM) 和轴向磁通电机的双重优点, 结构简单, 成本低廉, 适合工作环境恶劣、安装空间存在一定限制的场合。与径向磁通 SRM 相比, AFSRM 的转子结构较为特殊, 在设计 AFSRM 转子时, 既要保证其具有良好的电磁性能, 还要方便加工和制造。研究转子的构造对于改善电机的特性就变得尤为重要。

### 1 SRM 运行原理

SRM 系统一直遵守的“磁阻最小化基本原理”, 也是说转子的磁通路线一直顺着磁阻最小化方向而闭合, 但如果磁通没有顺着最小化方向, 就会由于磁场的扭曲而造成割向拉力, 因此它的结构原则是要求转子旋转时磁路的变

化要尽可能的大, 在切向拉力的作用下就会产生不同大小的电磁转矩。三相 12/8 开关磁阻电机的构造及其主要工作机理如图 1 所显示, 其中  $V_{dc}$  为电源电压,  $S_1$ 、 $S_2$  为主要开关管,  $D_1$ 、 $D_2$  为续流二极管, 当给的 A 相电流受到激发后, 就会引起磁力线出现扭转的情况, 扭转所引起的切向电磁拉力使得定子偏转, 在 A 相定子极  $A_1$ 、 $A_3$  与定子极轴线  $11'$  角的重合区域上, 在这种地方 A 相的磁阻值很小, 若继续对 A 相施加激发是不能使其持续偏转的, 所以就必须关闭 A 相的开关电源管, 并导通 B 相开关电源管。如果按次序地对 A-B-C-A 相绕组一次接通, 则定子就会顺着逆时针指针的方位持续偏转, 如将接通次序反过来, 则定子也会顺时针偏转。由此, 即可得知 SRM 的自旋次序与磁场方向没关系, 而只是与相绕组通电的次序一致有关<sup>[1]</sup>。

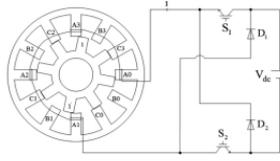


图1 三相12/8 SRM基本结构及工作原理图(A相)

## 2 性能比较

Ld/Lq 在同步磁阻电机的优化中,合理设计磁障数目、宽度以及磁障厚度等可以优化电机磁路,增加 d 轴电感或者降低 q 轴电感以达到提高凸极比的目的。但由于多层磁障所构成的磁路要调整的技术参数很多,因此实现起来比较复杂。由于开关磁阻电机的几何凸极结构,取消了 SynRM 中 q 轴方向的磁障结构部分,不仅减少了优化参数,并且通过大幅度降低 q 轴电感的方式增大了电机的凸极率。根据电机的电磁转矩同步开关磁阻电机的电磁转矩与 d 轴和 q 轴的电感差值成正比,即电机的凸极比越高,相同定子电流条件下的输出转矩越大<sup>[2]</sup>。为进行比较同时开关磁阻电机与相同磁阻电机的特性,对一个与同时开关磁阻电机定子结构相似的三磁障相同磁阻电机进行了模拟试验。图2显示了同步开关磁阻电机与同步磁阻电机 d、q 轴标么化电感随电流变化的曲面图。从图2可以看出,相较于同步开关磁阻电机,同步磁阻电机的电感受电流影响更大,电感容易产生磁饱和现象,电流较小时电机的凸极比仅为2左右。随着电流的增加,同步磁阻电机的凸极比整体呈现增加趋势,而同步开关磁阻电机在额定工况下的凸极比可以达到6左右<sup>[3]</sup>。

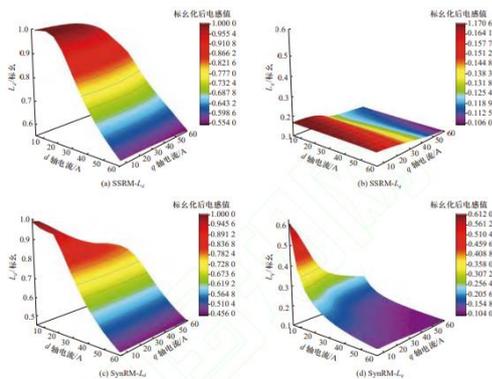


图2 SSRM和SynRM电感变化

## 3 电流斩波控制原理

在 SRM 工作过程中,输出电压波形的具体形状、输出电压峰值的产生时间以及峰值出现的具体位置,都会影响电机的工作特性。传统电压斩波控制系统下的电压瞬时波形如图3所显示,在绕组的导通区域,绕组输出电流由电流滞环控制器进行斩波抑制。然后,通过合理的设定滞环控制器的参数,能够达到将绕组电流 ik 控制在参考电流 iref 附近波动效果,这样就能得到趋近于平顶电流波形。图1中 0 是不对齐位置<sup>[4]</sup>。1 是定子齿和转子齿刚开始重合的位置,2 是定子齿和转子齿完全重合的开始位置。

相绕组的开通角和关断角分别用 on 和 off 表示。电流斩波控制中通常将一个开关管参与斩波的方式称为软斩波,软斩波使绕组退磁的方法是自然续流,软斩波电流的变化速率较为缓慢,不易造成转矩频繁的波动,图3为 SRM 在电动状态下采用电流软斩波控制的示意图。参考电流 iref 是经由速度环产生的,将参考电流与绕组电流 ik 进行比较后送入滞环控制器,这就是开关管导通的基本原理。当电机中的某一相绕组开始导通后,该相的下开关管就会闭合,而该相的上开关管就会参与到斩波过程中。绕组电流 ik 从零开始逐渐的上升,当瞬时电流值达到滞环的上限值 ih 时,上开关管停止斩波,此时电流 ik 自然续流;当绕组电流 ik 瞬时值达到滞环控制器参数的下限值 il 时,上开关管闭合进行斩波,绕组电流 ik 开始重新上升。在电机的绕组导通范围内,但因为上开关管的重复开通和关断就会造成绕组输出电流在参考电流附近上下变化。本文选择的功率变换器是不对称半桥结构的功率电路<sup>[5]</sup>。根据其基本的运行原理,就可以定义一相绕组中励磁、续流和退磁三种开关状态分别为“1”、“0”和“-1”。当发生电流软斩波时,在绕组导通区间内电路主要工作在“1”和“0”状态。

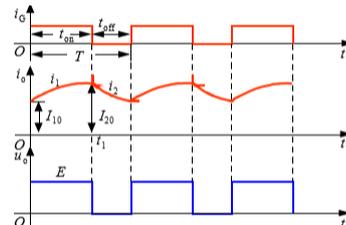


图3 斩波控制下瞬时相电流波形

## 4 永磁体厚度参数优化

在满足电机实际装配工艺基础上,选择在定子齿距离气隙 0.5mm 处放置永磁体,且永磁体厚度的研究范围在 0.5mm 内,这样就可以对转矩的特性进行动态分析。当加入永磁体后,平均转矩和转矩脉动开始发生明显变化,但不会随着永磁体厚度增加而线性变化,当永磁体厚度在 1~4mm 时,电磁转矩和转矩脉动变化增幅越来越平缓,当永磁体厚度在 4~5mm 时,平均转矩和转矩脉动均不再有明显变化,故选择 4mm 永磁体放置在定子块两侧,电磁平均转矩提高了 34.2%,转矩脉动下降了 19.3%。这是因为永磁体对电感变化率影响很大,以 B 相为例分析永磁体对电磁转矩的影响,将转矩变化过程分成四个阶段<sup>[6]</sup>。在  $\theta_{on} - \theta_m$  间,A 相电流迅速减小,B 相电流虽迅速增加,由于定转子处于完全不对称位置附近,不同永磁体厚度下的电感和电感变化率都很小且几何重合,故两相合成转矩先减小后增加,在  $T_a$  处,两相合成转矩达到最小。在  $\theta_m - \theta_{off}$  间,B 相电流不再变化,定转子开始重合,电感值发生了明显变化,随着永磁体越厚其电感变化率越大,在  $\theta_{tb}$  前,因电感变化率达到了最大值,故瞬时转矩达到峰值,永磁体厚度越厚,最大电感变化率就越大,其瞬时转矩峰值就越大,在  $\theta_{tb}$  后,电感变化率变小,且永磁体越厚,电感变化率减小的幅度就越小,瞬时转矩开始下降,

在  $\theta$  off 处, B 相电流截止, 电磁转矩开始迅速减小<sup>[7]</sup>。

### 5 电机优化参数

通常将转子凸极与定子内表面之间的最小空气隙称为第一气隙, 第一气隙越小, 电机凸极率越高, 但第一气隙过小会给加工带来极大的困难并且电机运行过程中也容易发生扫膛现象。第二气隙是指定子内表面到转子槽底之间的距离。理论情况下, 第二气隙越大则 q 轴的电感越小, 凸极比就越大。但是第二气隙还受到转子轭厚与转轴直径的影响, 该参数过大会导致转子轭厚较小, 使轭部磁密过大。本设计中转子顶部采用不在轴心的圆弧, 通过在转子齿尖角部分增加气隙宽度来减轻局部磁饱和现象造成的转矩脉动影响。转子凸极两侧与定子内表面之间的距离称为最大不均匀度, 气隙磁场会由于定子的齿槽效应和绕组的布置而包含空间谐波。当转子顶部尖角接近定子齿时引起的局部磁饱和现象, 在转子旋转过程中周期性变化, 加剧了气隙磁场的畸变, 为了减小这个影响提出了转子非均匀气隙结构<sup>[8]</sup>。

### 6 多目标粒子群算法

OptiSLang 是用来实现多学科设计、随机计算、以及稳健和可靠性优化设计的专门研究软件。这种方法是非常简单的, 并且实践性很强, 只要根据说明书操作正常运行就能够得到结论。集成的多目标粒子群算法有着如下几个突出的优势: (1) 非支配排序法的使用, 使得计算的复杂性明显降低。

(2) 采用压缩个体距离对个体加以排列, 不仅能够保持集群中粒子数量的多样化, 而且保证了 Pareto 前沿的分布均匀性。(3) 在粒子群算法的基础上引用了进化计算中的变异算子, 不但增强了计算的搜索性能, 而且可以避免局部问题最优求解。具体的计算过程如下所示: (1) 初始化 (2) 选取适当的粒子形成新的族群 (3) 开始族群移动 (4) 变异 (5) 评估适应度值 (6) 更换最优秀颗粒, 并加入存档。

### 7 传统 SRM 在船舶电力推进应用中存在的问题

尽管 SRM 有许多的好处, 可是该电动机在船舶电气推进系统中的推广应用还面临着许多的问题: (1) SRM 使用的是定子、转子双凸极结构, 转矩的输出只能与电感的变化率相关, 而与输出电流的方向没有关联, 产生的转矩只能在电子感应增加的范围内产生。电动机在一次完全的工作循环中绕组最多有半个周期是导通的, 这就会造成电动机绕组效率很低, 这也会影响 SRM 的传递能力。(2) 对大功率的电动机来说通常必须设计较大的电子传感器, 绕组换流一般是产生在大电子传感区域的周围。长期在大电感的情况下, 功率开关管的多次闭合也就提高了其出现问题的几率, 而随着电机输出功率的日益增加, 该问题也将变得越来越十分突出。(3) 由于 SRM 主要工作于单脉冲电源方式中, 这也使得工作过程中瞬时转矩脉动较大, 在转速很小的时候, 电动机的步进状况特别突出, 但是电机本身的非线性, 抑制转矩脉动就变得较为困难。(4) 虽然从实质上来讲 SRM 属于单励电动机, 不过由于绕组输出电压中的一部分会形成励磁损耗, 因此励磁损耗不但影响电能效率, 而且还会提高电动机组和功率转换器之间的总容量。随着人们对稀土等农用永磁体材料的深入研究与发展的深化, 将推出永久电磁铁的新型开关磁阻电机, 而这个型式的电动机将在保持传统 SRM 优势的同时, 又可以

解决换流速度相对缓慢、能源使用率相对较低等弊端, 因此电动机的转矩密度也将会提高。

### 8 结论

首先, 本文剖析了 SRM 中引起转矩脉动的具体因素, 从而达到了减少转矩脉动并提高平均扭矩的目的, 从而给出方案一, 也就是通过在定、转子的齿上依次开槽, 并且通过使用控制变量法筛选最优的预测参数, 使用有限元分析法分析了电压转矩特性, 从而检验了定、转子开槽的有效性。然后, 因为协同优化了所有的进行沟通参数, 从而给出了方案二, 就是通过多学科的优选工具进行优化, 为了对打开的槽式参数进行全局优选并采用了多目标粒子群的优质算法, 从而得出了 Pareto 的最优解集。最后, 通过 TOPSIS 法客观地评判了 Pareto 最优预测解集各个解的优劣程度, 并在最后筛选出了全局最优预测解。从有限元的模拟结果中我们能够知道, 相比于方案一, 方案二可以减小 SRM 的扭矩及脉动系数。而通过检验方法一选取的最优参数, 对于强相互耦合机械构件会产生局部最优求解的情形, 而全局优选计算则能够很好地解决这一情形。

### 9 结语

永磁式开关磁阻电动机不但保持了传统开关磁阻电动机的双凸极构造和集成绕组的特殊外形, 该电动机在既具备了传统开关磁阻电动机固有优点的前提下, 还同时具备了永磁式电机高转矩密度和高工作效能的优势。在具备了上述许多优势的同时, 扭矩脉动过大、振动噪音等问题也仍然存在, 这将是制约其发展趋势的主要因素。但随着人们对开关磁阻电机转矩脉动控制, 以及无位置传感器技术等方面的研究成果不断进展, 这些缺点在一定程度上得到了改善。基于新型永磁式开关磁阻电机为核心的电力推进系统也取得了空前的进展, 该技术在多个行业中都有着很广泛的应用前景。

### 【参考文献】

[1] 刁统山, 张迎春, 严志国, 等. 开关磁阻电机驱动系统综合实验设计[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 63-66.  
[2] 李华柏, 莫坚, 李建忠. 基于自抗扰控制技术开关磁阻电机转矩脉动抑制研究[J]. 微电机, 2020, 53(12): 45-49.  
[3] 郝雯娟, 王宇. 一种磁悬浮直线开关磁阻电机悬浮模块设计与分析[J]. 微电机, 2020, 53(12): 5-21.  
[4] 纪晨焯, 严紫光. 基于模糊角度 TSF 的开关磁阻电机自抗扰系统[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(12): 110-114.  
[5] 李争, 王鑫, 张丽平, 等. 双定子开关磁阻电机的磁场分析及转矩计算[J]. 电气传动, 2020, 50(12): 111-117.  
[6] 吕新明, 王黎. 开关磁阻电机变开通角控制系统研究[J]. 电动工具, 2020(6): 4-15.  
[7] 裴意. 单绕组 12/8 极宽转子齿结构无轴承开关磁阻电机发电运行控制策略[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2020.  
[8] 郝振洋, 缪伟, 曹鑫, 等. 适用于锥形无轴承开关磁阻电机转矩和轴向力的两种不同的分工控制方法(英文) 2020, 37(6): 848-857.

作者简介: 韩旭帅(1997.1-)男, 汉族, 硕士研究生, 主要研究方向开关磁阻电机转矩脉动的抑制。