

多层磁障转子同步磁阻电机设计研究

夏晨曦¹, 冯焱径¹, 顾卫东²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘要: 针对复杂的多层磁障同步磁阻电机(SynRM), 在定、转子快速设计方面进行研究。以1台3 kW、4极电机为例, 对比不同绕组形式下 SynRM 的性能。为降低转矩脉动, 提出典型 C 型磁障转子的简化模型。研究各参数对电机输出转矩和转矩脉动的影响, 并借助多目标优化算法进一步优化磁障参数, 为同类电机的设计分析提供参考。

关键词: 同步磁阻电机(SynRM); 绕组; 多层磁障转子结构; 转矩脉动; 多目标优化

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)06-0063-06

doi: 10.12177/emca.2021.021

Research on Design of Synchronous Reluctance Motor with Multi-Layer Magnetic Barrier Rotor

XIA Chenxi¹, FENG Yaojing¹, GU Weidong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The fast design of the stator and rotor of the complex synchronous reluctance motor (SynRM) with multi-layer magnetic barrier is studied. Taking a 3 kW, 4-pole motor as an example, the performance of the SynRM with different winding forms is compared. In order to reduce the torque ripple, a simplified model of the typical C-type magnetic barrier rotor is proposed. The influences of various parameters on the motor output torque and torque ripple are studied, and the parameters of the magnetic barrier are further optimized with the help of multi-objective optimization algorithm, which provides a reference for the design and analysis of similar motors.

Key words: synchronous reluctance motor (SynRM); winding; multi-layer magnetic barrier rotor structure; torque ripple; multi-objective optimization

0 引言

同步磁阻电机(SynRM)利用磁路磁阻差产生电磁转矩,转子上没有永磁体和鼠笼。SynRM具有低成本、高可靠性和无转子铜耗等优势,成为异步电机的最佳替代品,拥有广阔的市场前景,引起了诸多学者关注。

SynRM 定子多采用分布式交流绕组^[1]。为了追求高功率密度,近年来集中绕组也开始应用

到 SynRM 中。由于转子结构非常复杂,国内外文献大多基于 U 型^[2]和 C 型^[3]磁障进行 SynRM 设计,借助多目标优化算法^[4],寻求兼顾高输出转矩和低转矩脉动的转子结构。但多层磁障结构导致待优化变量多、代理模型复杂,给电机优化带来了很大的困难。

本文以快速设计高性能 SynRM 为目的,以1台3 kW 电机为例,针对典型的 C 型磁障结构,对比不同绕组形式下的 SynRM 性能。通过约束电

收稿日期: 2021-01-20; 收到修改稿日期: 2021-03-31

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0606000)

作者简介: 夏晨曦(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电机本体设计。

机结构参数削弱齿槽效应,从而降低转矩脉动,简化转子模型。不仅为电机设计提供了便利,也减少了待优化的参数数量,提高了优化效率。研究了定子槽开口及转子参数对电机性能的影响,并借助遗传算法对电磁转矩和转矩脉动进行优化,对 SynRM 设计具有积极意义。

1 定子设计研究

SynRM 定子结构通常与异步电机类似,其铁心结构参数可根据已有的研究^[5]或经验公式^[6]计算选取。本文借助有限元仿真,分析了几种常见绕组形式下电机的性能,研究了定子槽口宽度对开槽效应的影响。SynRM 基本参数如表 1 所示。

表 1 SynRM 基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流母线电压/V	380	定子外径/mm	165
额定相电流/A	8	转子外径/mm	105
额定功率/kW	3	转子内径/mm	38
相数	3	气隙/mm	0.5
转速/(r·min ⁻¹)	1 500	铁心长度/mm	135

1.1 分数槽集中绕组形式

集中绕组线圈跨距为 1,绕组端部短,采用集中绕组的电机体积较小、铜耗低、效率高,因此集中绕组尤其适用于多极电机。借助有限元仿真,假设转子为如图 1 所示的无磁障实心结构,避免了转子磁障对定子磁场的影响。提取 6 槽 4 极结构 SynRM 的定子磁动势 f_s 并进行傅里叶分解,得到如图 2 所示的主要谐波成分,其中低次谐波占比超过 50%。

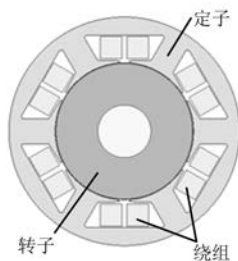


图 1 转子无磁障集中绕组模型

额定运行时集中绕组形式 SynRM 的转矩波形如图 3 所示。低基波绕组系数 (0.866) 和谐波

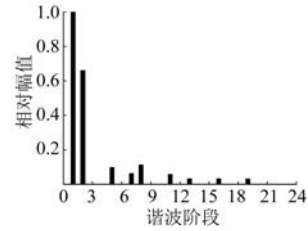


图 2 集中绕组定子磁动势谐波分析

漏感使电机 d 轴电感偏小,电机出力和功率因数偏低,丰富的奇数次谐波还会导致较大的转矩脉动。一般情况下,集中绕组并不是 SynRM 的最佳选择。

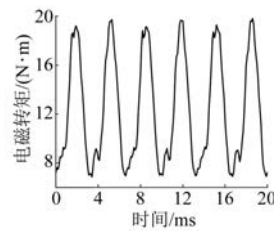


图 3 集中绕组方案下 SynRM 转矩波形

1.2 分布绕组形式

分布绕组可分为整数槽分布绕组和分数槽分布绕组,本文选用 36 槽 4 极和 18 槽 4 极(每极每相槽数分别为 3 和 1.5)2 种极槽配合进行对比,转子结构与上述集中绕组 SynRM 相同。2 种极槽配合下的定子磁动势谐波分析如图 4 所示。相同激励下整数槽分布绕组基波幅值高于分数槽分布绕组,可产生更大的电磁转矩。

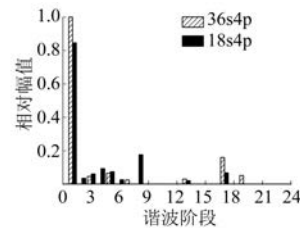


图 4 2 种分布绕组的定子磁动势谐波分析

分数槽分布绕组的三相合成磁动势中同时含有奇数和偶数次谐波,而整数槽分布绕组仅含有奇数次谐波,且两者主要谐波次数均为 $kn_s \pm 1$ ($k=1, 2, 3, \dots$), n_s 为每对极定子槽数。由于分数槽分布绕组 n_s 为奇数,对于常见的对称转子结构,仅偶数 k 值对应的谐波会导致转矩脉动,因此分

数槽分布绕组转矩脉动占比更小。2种分布绕组 SynRM 的转矩波形如图 5 所示。

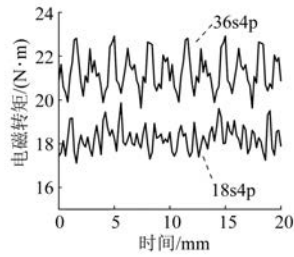


图 5 2种分布绕组 SynRM 转矩波形

对比可知,整数槽分布绕组方案下的电机转矩脉动高于分数槽分布绕组方案,但转矩脉动可通过优化转子结构等方式进一步抑制。因此,本文以输出转矩最大为前提,选择 36 槽 4 极的极槽配合,采用单层交叉分布绕组。

1.3 定子槽口宽度

为方便定子绕线,定子槽往往需要开设一定宽度的槽口。槽口宽度为 0(即定子不开槽)时对应的定子磁动势谐波分析如图 6 所示,与图 4 相比,仅存在少量的低次谐波,可见槽开口会增加 $kn_s \pm 1 (k=1, 2, 3, \dots)$ 阶谐波,加剧电机的转矩脉动。

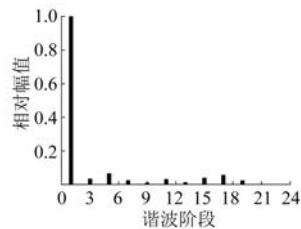


图 6 槽开口为 0 时定子磁动势谐波分析

若槽开口过小,会为磁路闭合提供通道,导致定子磁场漏磁增加,输出转矩降低。不同槽口宽度对电磁转矩的影响如图 7 所示。随着槽口宽度的增加,电磁转矩呈现先增大后减小的趋势。本

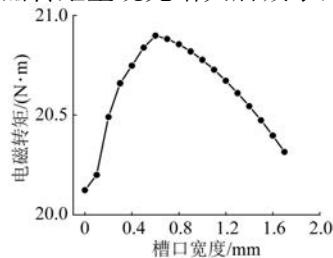


图 7 转矩与槽口宽度关系

文根据绕组线径选择槽口宽度为 1.2 mm。

2 转子结构设计研究

SynRM 的多层磁障转子结构复杂、参数繁多,为电机设计带来困难,且 SynRM 在追求更大电磁转矩的同时还要权衡转矩脉动大小^[7-8]。

2.1 磁障参数简化

定子磁动势 f_s 和转子磁动势 f_r 基波相互作用产生电磁转矩,相同阶次的定、转子磁动势谐波相互作用导致转矩脉动。本文通过研究每对极定子槽数 n_s 和转子虚拟磁障边端数 n_r 关系对定转子谐波阶次的影响来约束磁障参数^[9]。虚拟磁障边端数 n_r 可表示为

$$n_r = \frac{2\pi}{p\theta} \quad (1)$$

式中: p 为极对数; θ 为相邻两层磁障边端弧度。

最外层磁障在 q 轴方向上也按角度划分为 θ 的整数倍,从内到外第 i 层磁障宽度为 W_i , S_i 表示第 i 层导磁层厚度,如图 8 所示。

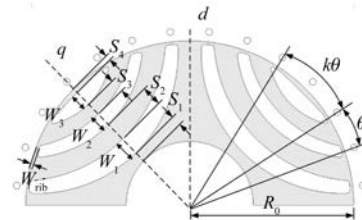


图 8 C 型 SynRM 转子结构

上文已验证在三相正弦激励下,定子开槽会导致 $kn_s \pm 1 (k=1, 2, 3, \dots)$ 阶次定子磁动势谐波。假设定子磁动势呈正弦,在转子磁障影响下也会呈现阶梯不连续性,产生 $kn_r \pm 1 (k=1, 2, 3, \dots)$ 阶转子磁动势谐波。定子磁动势中不存在 3 次谐波,由于转子的对称性转子磁动势不存在偶次谐波,以上谐波中相互作用的仅为 $6m \pm 1 (m=1, 2, 3, \dots)$ 次谐波,产生 $6m (m=1, 2, 3, \dots)$ 阶脉动转矩,当 $n_s = n_r$ 时产生最大转矩脉动如图 9 所示。可见避免相同阶的低次定、转子磁动势谐波可以有效抑制转矩脉动。

据此,可提出约束 n_s 和 n_r 的设计准则^[10]:对于每对极偶数槽的分布绕组, $n_s = n_r \pm 4$ 为最佳组合;对于每对极槽数为奇数的分布绕组, $n_s = n_r \pm 5$ 为最佳组合。 n_r 的确定不仅仅是对磁障端部位置

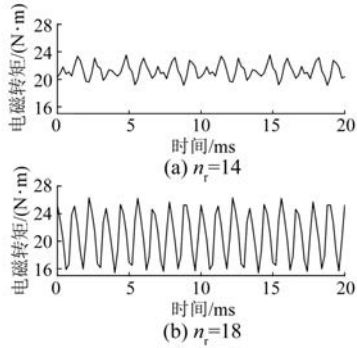


图9 不同虚拟磁障边端数下的转矩波形

的固定,也为磁障层数选择提供依据。本文的 $n_s = 18$,为在保证输出转矩的同时减少设计参数, n_r 取 14,则磁障层数 n 取 3。基于以上对磁障的约束,可减少 SynRM 的设计参数,为电机优化设计提供便利,提高设计效率。

2.2 磁障占比及磁障分布

磁障占比是影响电机性能的重要参数。对于常见的各层平行对称的多层磁障转子结构,结合图 8,磁障占比 k_b 、第 i 层磁障占总空气层比例 k_{bi} 可分别表示为

$$k_b = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n W_i + \sum_{i=1}^{n+1} S_i} \quad (2)$$

$$k_{bi} = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

对此许多学者已展开过研究^[11-14], k_b 过小时, q 轴磁阻小而 L_q 较大,凸极比和 d 、 q 轴电感差均较小; k_b 过大时,不仅 q 轴磁路饱和, d 轴磁路饱和程度也大大增加,同样导致较低的输出转矩和功率因数。图 10 为不同磁障占比下输出转矩的曲线。

从图 10 可以看出, k_b 取值在 0.2~0.6 之间时, SynRM 可以获得较好的输出性能。

此外,各层磁障宽度占总空气层比例也需要考虑。该电机模型选择 3 层磁障结构,最内层磁障占比为 k_{b1} ,第 2 层占比为 k_{b2} ,转子外半径为 R_o ,内半径 R_i ,可得到各层空气磁障宽度表达式:

$$\begin{cases} W_1 = k_{b1} \cdot k_b (R_o - R_i) \\ W_2 = k_{b2} \cdot k_b (R_o - R_i) \\ W_3 = (1 - k_{b1} - k_{b2}) \cdot k_b (R_o - R_i) \end{cases} \quad (4)$$

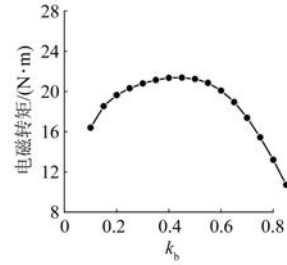


图 10 电磁转矩与 k_b 关系曲线

式中: k_{b1} 、 k_{b2} 均为 0~1 之间的实数,且 $k_{b1} + k_{b2} < 1$ 。

图 11 为磁障占比 $k_b = 0.55$ 时,不同 k_{bi} 组合对电磁转矩的影响。通过离散的有限元参数化结果可以大致确定合适的各层磁障占比范围,但无法选取最优的 k_{bi} 组合。 k_b 值的变化也会对 k_{bi} 的选择产生影响,同时还要考虑电机转矩脉动。下文将通过优化算法解决此问题。

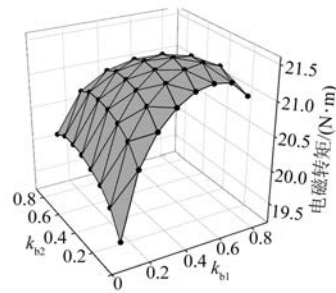


图 11 电磁转矩与 k_{bi} 关系

2.3 磁肋宽度

磁肋为 q 轴电流分量提供磁路^[15]。为保证各导磁层磁动势分布规律,不设置 q 轴径向磁肋,仅存在周向磁肋。周向磁肋宽度 W_{rib} 的增加会导致 q 轴电感增大,使电机凸极比减小,功率因数降低。而磁肋太窄会影响转子机械强度,降低运行可靠性。同时,研究发现磁肋宽度为 0 或者接近 0 时, L_d 反而会降低。电磁转矩与 W_{rib} 取值大小的关系曲线如图 12 所示,可以看出,电磁转矩随 W_{rib} 的增加先增大后减小,但变化范围不大。因此,均衡电机转矩、功率因数和机械强度等因素,不一定要追求最小的 W_{rib} 值,在本文选取 $W_{rib} = 0.8 \text{ mm}$ 。

3 多目标优化

针对存在多个优化目标且目标之间没有确切

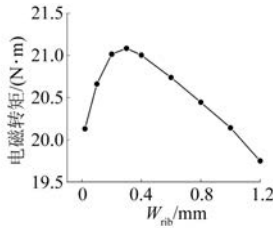


图 12 转矩与磁肋宽度关系

函数关系,可能存在冲突或者制约的工程问题,多目标优化是一类常见的优化方法。多目标优化结果是非劣解组成的解集,即 Pareto 前沿。由于优化目标和待优化变量之间没有已知的明确联系,通过建立回归模型,并评估模型的准确性,从而建立目标和变量的函数关系。本文以输出电磁转矩 T_e 和转矩脉动占比 T_{ripple}/T_e 为 2 个优化目标,对转子磁障占比进行优化。优化函数的公式可表示为

$$\min F = (-T_e, T_{ripple}/T_e) \quad (5)$$

转子模型简化后的约束条件为

$$\begin{cases} 0.3 < k_b < 0.6 \\ 0 < k_{b1} < 1 \\ 0 < k_{b2} < 1 \\ k_{b1} + k_{b2} < 1 \end{cases} \quad (6)$$

采用遗传算法得到的 Pareto 前沿曲线如图 13 所示。

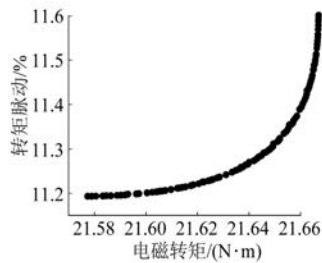


图 13 多目标优化 Pareto 前沿

根据 Pareto 前沿,以转矩最大为前提选取一组非劣解如表 2 所示。

表 2 参数优化结果

参数名称	初始值	算法优化值
k_b	0.55	0.422 5
k_{b1}	0.33	0.500 3
k_{b2}	0.33	0.341 7

由以上参数集合确定优化后的 SynRM 模型及额定电流激励下转矩波形分别如图 14 和图 15 所示。

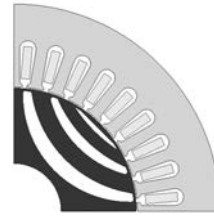


图 14 优化后 SynRM 模型

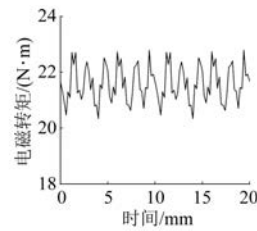


图 15 优化后 SynRM 转矩波形

经分析计算,所设计电机转矩脉动为 10% 左右,额定运行效率 90.8%,远高于同规格异步电机,达到 IE4 国际电机能效标准。SynRM 功率因数较异步电机偏低,该电机凸极比达 6,功率因数为 0.78 左右。

由表 3 可以看出,算法优化后的结果与有限元仿真结果基本吻合,且优化方案比初始方案的电磁转矩和转矩脉动均有较大改善,验证了多目标算法在电机优化设计中的可行性。

综合以上数据,尽管 SynRM 存在功率因数偏低的固有缺陷,但效率高于异步电机,仍能在相同激励下产生更大的输出转矩。SynRM 转子不存在损耗,电机温升低,允许适当增大定子电流输出更高功率。可见高效低成本 SynRM 足以替代异步电机应用于工业生产。

表 3 SynRM 转子结构优化结果

参数名称	初始值	算法优化值	有限元仿真结果
W_1/mm	5.500	6.341	6.341
W_2/mm	5.500	4.330	4.330
W_3/mm	5.500	2.003	2.003
电磁转矩/(N·m)	20.074	21.667	21.589
转矩脉动/%	15.5	11.6	11.3

4 结 语

本文开展了多层磁障转子 SynRM 的研究, 对此类电机的设计方法进行了分析和总结, 具体如下:

(1) 对比了不同绕组形式对电机性能的影响。集中绕组会产生大量谐波, 一般不适用于 SynRM; 整数槽分布绕组能提供较大的输出转矩。

(2) 以降低转矩脉动为前提, 根据极槽配合对磁障层数和磁障端部进行约束, 将多结构参数的复杂转子简化, 为电机方案设计提供了便利。

(3) 探究了定子槽开口宽度以及磁障参数简化后各转子结构参数对电机性能的影响, 对 SynRM 设计规律进行补充。

(4) 借助遗传算法进行多目标优化, 与有限元仿真对比, 验证了在此类电机设计中算法优化的可行性, 完成了电机的高效设计。

【参考文献】

- [1] VARTANIAN R, TOLYAT H A. Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM) with an induction motor with identical NEMA frame stators [C] // 2009 Electric Ship Technologies Symposium, 2009: 107.
- [2] MOGHADDAM R R, MAGNUSSEN F, SADARANGANI C. Novel rotor design optimization of synchronous reluctance machine for high torque density [C] // IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2012: 891.
- [3] VAGATI A, BOAZZO B, GUGLIELMI P, et al. Ferrite assisted synchronous reluctance machines: a general approach [C] // 2012 International Conference on Electrical Machines, 2012: 1315.
- [4] 董砚, 颜冬, 荆锴, 等. 磁障渐变同步磁阻电机低转矩脉动转子优化设计 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 21.
- [5] 沈建新, 蔡顺, 郝鹤, 等. 同步磁阻电机分析与设计 (连载之五) 定子铁心的优化设计 [J]. 微电机, 2016, 49(12): 80.
- [6] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [7] 马洪波. 低转矩脉动同步磁阻电机设计及多目标优化 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [8] 王凯, 李红梅, 姚宏洋. 低转矩脉动同步磁阻电机设计与优化 [J]. 微特电机, 2017, 45(1): 1.
- [9] BOAZZO B, VAGATI A, PELLEGRINO G, et al. Multipolar ferrite-assisted synchronous reluctance machines: a general design approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(2): 832.
- [10] HAN S H, JAHNS T M, SOONG W L. Torque ripple reduction in interior permanent magnet synchronous machines using the principle of mutual harmonics exclusion [C] // Industry Applications Conference, 2007: 558.
- [11] 张志耿, 汤宁平, 许共龙. 新型同步磁阻电机的转子结构设计与其特性分析 [J]. 电机与控制应用, 2016, 43(1): 42.
- [12] 吴汉光, 林秋华, 游琳娟. 同步磁阻电动机研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 94.
- [13] 姚丙雷, 王鸿鹄. 同步磁阻电机性能分析与研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(11): 61.
- [14] 陈兰, 王真, 徐谦, 等. 同步磁阻电动机设计分析 [J]. 微特电机, 2012, 40(2): 34.
- [15] 蔡顺. 同步磁阻电机性能分析与结构优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

[主要栏目]

- 控制与应用技术
- 研究与设计
- 故障诊断与保护
- 新能源发电与局域电网
- 新能源汽车技术
- 发电机组及其控制
- 测试技术与测控系统
- 材料与工艺
- 电机生产及质量管理
- 电力电子变流器技术
- 智能制造
- 节能应用
- 实用技术成果