

笼条对磁阻转子电励磁同步电机性能影响^{*}

蒋晓东¹, 王秀平²

(1. 沈阳理工大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 沈阳工程学院 电力学院, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 针对磁阻转子定子电励磁无刷同步电机(SEEBSM)起动较慢、带负载能力不强等问题,研究了在磁阻转子内添加笼条结构对电磁性能和温度的影响。阐述了带有笼条的磁阻转子结构的工作原理以及运行方式。采用有限元方法分别研究了磁阻转子有、无笼条与不同笼条组合形式对转速的影响,以及笼条对带负载能力的影响。建立了三维稳态温度场物理模型,分别对磁阻转子有、无笼条结构下的稳态温升进行了仿真研究。研究表明,磁阻转子带笼条结构可以大幅度提高电机的起动性能和带负载能力,负载运行时主要结构的稳态温升虽明显增大,但仍满足绝缘等级要求。

关键词: 磁阻转子; 电励磁同步电机; 笼条; 电磁性能; 温度

中图分类号: TM352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2023)02-0007-06

doi: 10.12177/emca.2022.164

Effect of Cage Bar on Performance of Electrically Excited Synchronous Motor with Reluctance Rotor^{*}

JIANG Xiaodong¹, WANG Xiuping²

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

Abstract: In view of the problems of stator electrically excited brushless synchronous motor(SEEBSM) with reluctance rotor, such as slow starting and low load capacity, the effect of adding cage bars inside the reluctance rotor on the electromagnetic performance and temperature is studied. The working principle and operation mode of the reluctance rotor with cage bars are described. The effect of the reluctance rotor with and without cage bars and different combination forms of cage bars on the rotation speed, and the effect of cage bars on the load capacity are studied by finite element method respectively. The three-dimensional steady-state temperature field physical model is established, and the steady-state temperature rise of reluctance rotor with and without cage bars is simulated. The results show that the reluctance rotor with cage bars can greatly improve the starting performance and load capacity. Although the steady-state temperature rise of main structure increases significantly during load operation, it still meets the requirement of insulation class.

Key words: reluctance rotor; electrically excited synchronous motor; cage bar; electromagnetic performance; temperature

0 引 言

在工业生产中,永磁同步电机以其高效节能、

结构简单和动态响应快等优点得到了广泛的应用^[1-2]。然而在一些特殊环境,如高温、高盐度和高湿度的“三高”环境下,永磁体容易失磁,由此

收稿日期: 2022-09-15; 收到修改稿日期: 2022-11-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777127); 沈阳理工大学引进高层次人才科研支持计划资金资助项目(1010147000925)

作者简介: 蒋晓东(1987—),男,博士,副教授,研究方向为电机设计及其控制。

导致电机性能急剧下降,造成不可逆的损失^[3-5]。另外永磁材料作为国家重要战略资源,近几年其产量受到国家严格的控制,其价格不断上涨,永磁电机成本随之不断增加。因此,研发在特殊环境下能够替代永磁电机的新型电机成为时下迫切的需求^[6-8]。

电励磁同步电机因其效率较高、调节励磁方便等优点受到了广泛的关注^[9-11]。然而常规电励磁同步电机内部存在电刷和滑环装置,在运行过程中容易产生电火花。为了提高电励磁电机的可靠性,无刷电励磁电机将逐渐替代有刷电励磁电机成为未来的发展趋势。

针对无刷电励磁电机的研究已经取得了一定的进展。文献[12]提出了一种新型电励磁无刷同步电机,该电机取消了传统同步电机转子侧的电刷和滑环,而且不需要单独采用励磁机励磁,结构比较简单,通过仿真分析和试验研究,验证了所提新型无刷电励磁同步电机设计的合理性。文献[13]提出了一种新型无刷电励磁同步发电机方案,该发电机的优势是可以在宽转速范围内进行励磁调节,同时采用功率等级较低的整流器以及电压等级较低的功率器件降低整个系统的成本。文献[14]提出了一种磁阻转子定子电励磁无刷同步电机(SEEBSM),分析了其磁场调制机理,利用有限元方法得到了该电机在空载和负载运行时的电磁特性。

本文在已有研究的基础上,进一步分析笼条对磁阻转子 SEEBSM 性能的影响。分别阐述了带笼条的磁阻转子结构、笼条排布方式以及运行原理,研究了转子添加笼条后对其电磁性能和温度的影响,包括转子有、无笼条与不同笼条组合形式对电机转速的影响,笼条对带负载能力的影响,以及笼条对电机负载稳定运行时温升的影响等。

1 结构及运行原理

SEEBSM 定子铁心可以直接采用感应电机定子结构,以降低定子冲片的设计难度以及加工成本。定子槽内嵌套有两种不同极数的绕组,即三相电枢绕组和单相励磁绕组,其中电枢绕组采用双层短距绕组,而励磁绕组则采用单层等跨距绕组。

当 SEEBSM 稳态运行时,电枢绕组和励磁绕

组会分别在气隙中产生一个圆形的旋转磁场和一个静止的恒定磁场。这两个磁场通过带笼条的磁阻转子进行调制,从而实现磁场之间的耦合,并最终在转子上输出稳定的电磁转矩。设电枢绕组极对数为 p_p ,励磁绕组极对数为 p_L ,该电机等效极对数 p 为 $p_p + p_L$,同步转速 n_1 可以表示为

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60f_1}{p_p + p_L} \quad (1)$$

式中: f_1 为电网供电频率。

带笼条的磁阻转子 SEEBSM 二维结构模型如图 1 所示,其中笼条包括公共笼条和短接笼条,排布方式如图 2 所示。SEEBSM 运行方式接线示意图如图 3 所示。

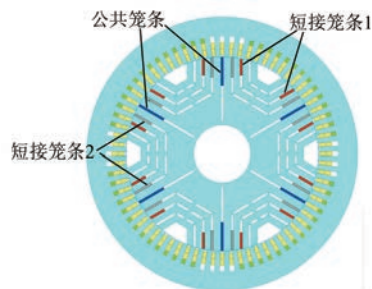


图1 SEEBSM 结构模型

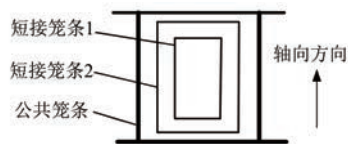


图2 笼条在转子中的排布方式

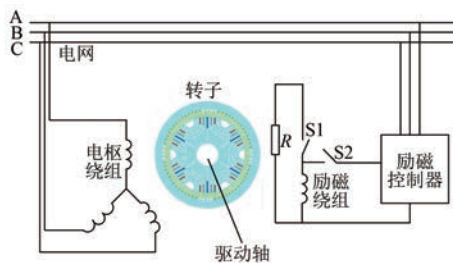


图3 SEEBSM 运行方式接线示意图

由图3可知,当S1开关闭合时,励磁绕组与起动电阻 R 连接,SEEBSM 起动。当转速稳定后,断开S1开关,闭合S2开关,由励磁控制器给励磁绕组提供直流电,SEEBSM 随后进入同步运行阶段,此时转速为同步转速。

2 笼条对 SEEBSM 电磁性能的影响

本文采用有限元方法对图 1 所示的带笼条磁阻转子 SEEBSM 的电磁性能进行仿真研究,主要参数如表 1 所示。有、无笼条结构下的磁阻转子 SEEBSM 异步起动过程中转速随时间的变化如图 4 所示。

表 1 主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子外径/mm	400	铁心长度/mm	225
定子内径/mm	285	同步转速/(r·min ⁻¹)	500
转子外径/mm	284	电枢绕组极数	8
转子内径/mm	85	励磁绕组极数	4
定子槽数	72	额定功率/kW	11

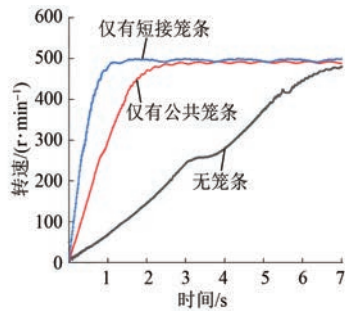


图 4 磁阻转子有、无笼条下转速随时间变化曲线

由图 4 可知,在磁阻转子中添加笼条后,转速随时间变化显著,说明笼条可以改善 SEEBSM 的起动性能,使该电机在较短时间内进入异步运行阶段。另外,短接笼条对磁阻转子 SEEBSM 起动性能的影响效果优于公共笼条。在保证公共笼条不变的前提下,短接笼条数量对 SEEBSM 转速的影响如图 5 所示。

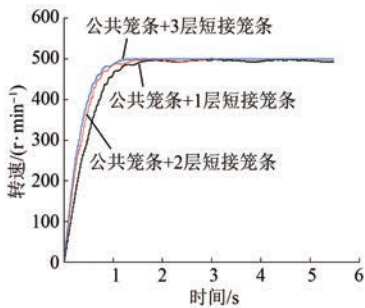


图 5 公共笼条+短接笼条不同组合下的转速变化曲线

由图 5 可知,短接笼条层数越多,SEEBSM 进

入异步运行阶段的时间越短。当短接笼条层数为 3 层时,稳定运行后的转速更接近同步运行转速,说明短接笼条的层数越多,SEEBSM 进入同步运行的能力越强。

当磁阻转子 SEEBSM 稳定运行于同步阶段后,分别给有笼条 SEEBSM 和无笼条 SEEBSM 加 50 N·m 负载,在保证给各自提供相同的励磁电源的情况下,转速随时间变化如图 6 所示。

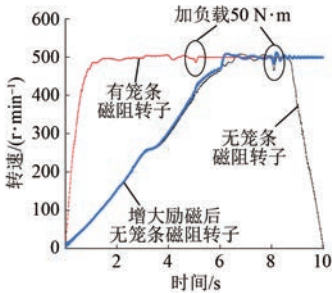


图 6 50 N·m 负载下笼条对转速变化影响对比

由图6可知,在相同励磁情况下,有笼条磁阻转子 SEEBSM 在 5 s 时刻加 50 N·m 负载后,转速可经过较短时间逐渐恢复到同步转速。无笼条磁阻转子 SEEBSM 在 8 s 时刻加 50 N·m 负载后,转速出现波动而后逐渐失步。当提高励磁电流后,无笼条磁阻转子 SEEBSM 在加 50 N·m 负载后,转速波动一段时间后逐渐稳定在同步转速。仿真结果说明笼条能够提高 SEEBSM 的带负载能力,或者说要保持相同的带负载能力,需要提供更大的励磁电流。

综合上述仿真结果可知,在磁阻转子中添加笼条可以明显改善 SEEBSM 的起动性能和带负载能力,这是因为将笼条与磁阻转子单独分析,SEEBSM 转子可以等效为“磁阻转子+笼型转子”形式。理想笼型转子等效气隙比磁导函数与理想磁阻转子等效气隙比磁导函数基本相同,说明两种结构类型的转子对定子绕组磁动势具有类似的调制作用。因此,在磁阻转子内添加笼条可认为是在磁阻转子调制能力的基础上,进一步增强了转子的调制能力,从而使电机电磁性能得到明显改善。

有笼条磁阻转子 SEEBSM 励磁绕组和电枢绕组电流随时间的变化如图 7 所示。由图 7 可知,在 5 s 时刻突加 50 N·m 负载,励磁绕组电流激增至 8.99 A,经过 0.4 s 后稳定在 5.41 A 左右。电

枢绕组电流在加负载前后幅值变化不显著,加负载后最终稳定在 12.7 A。电机起动及加载过程中转矩随时间的变化如图 8 所示。

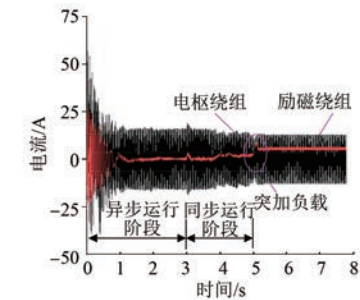


图 7 50 N·m 负载下绕组电流随时间变化曲线

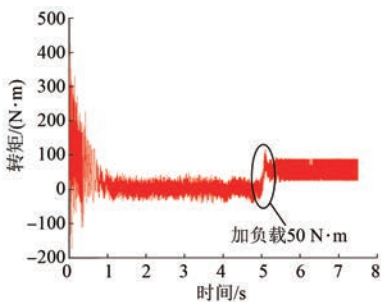


图8 50 N·m 负载下转矩随时间变化曲线

由图8可知,电机起动转矩较大,瞬时峰值达到 430 N·m,随着转速不断上升,转矩逐渐趋于平稳。在 5 s 时刻突加 50 N·m 负载,转矩瞬间增大,转速波动一段时间后,恢复同步转速,转矩最终稳定在 50 N·m 左右。负载稳定运行的磁场分布如图 9 所示。由图 9 可知,该电机负载稳定运行后磁力线为 6 极分布,与其等效极对数一致,且漏磁较少。另外磁密最大值为 1.8 T 左右,材料利用率较高。

3 笼条对 SEEBSM 温升的影响

为了研究笼条对磁阻转子 SEEBSM 稳定运行时温升的影响,采用有限元方法对该电机额定负载下稳定运行于同步转速时的温度场进行了仿真研究。由于电机结构周向对称,为了缩短仿真时间,建立 1/6 整机模型作为求解区域,如图 10 所示。其中图 10(a)为无笼条磁阻转子 SEEBSM 求解区域,图 10(b)为有笼条磁阻转子 SEEBSM 求解区域。为了计算方便,做如下假设:

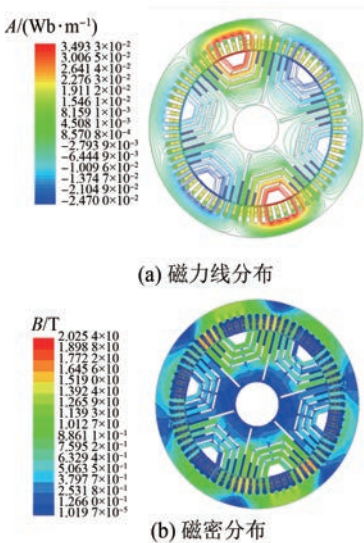


图 9 负载运行时 SEEBSM 磁场分布云图

- (1) 将定子槽内所有绝缘等效为一个绝缘实体结构,采用一个等效导热系数;
- (2) 电机浸渍漆填充均匀、定子绕组绝缘漆分布均匀、定子槽绝缘与定子铁心之间紧密接触无间隙;
- (3) 电枢绕组和励磁绕组端部伸出部分长度用等效直线的伸出长度表示;
- (4) 忽略对仿真结果影响不大却影响网格剖分精度的零部件,如螺栓、螺母、螺钉和垫圈等。

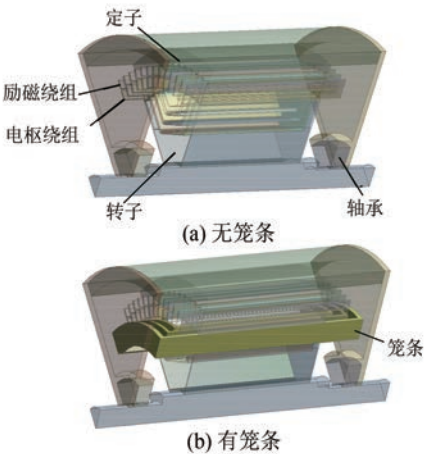


图 10 温度场求解模型

由于将定子槽内各种绝缘等效为一个绝缘实体,因此根据绝缘等级和试验得到的经验数据,确定等效绕组绝缘的导热系数^[15],SEEBSM 各结构导热系数如表 2 所示。

表 2 主要材料导热系数 $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$

部件	X 方向	Y 方向	Z 方向
铁心	39.00	39.00	4.43
绕组	385	385	385
空气	0.030 5	0.030 5	0.030 5
等效绕组绝缘	0.26	0.26	0.26
机壳	39.2	39.2	39.2
槽楔	0.2	0.2	0.2
轴承	60.5	60.5	60.5

另外,机壳表面对流散热系数 α_{fr} 为^[15]

$$\alpha_{fr} = 9.73 + 14V_x^{0.62} \tag{2}$$

式中: V_x 为平均风速。

损耗作为热源将直接影响电机的稳态温升,采用有限元方法分别对磁阻转子 SEEBSM 在有、无笼条下的损耗进行计算,结果如表 3 所示。其中,定、转子铁心损耗、定子槽内绕组损耗以及转子笼条铜耗均可通过有限元仿真得到。杂散损耗根据文献[16]近似按 2.9% 的额定功率选取。机械损耗为轴承摩擦损耗,可采用下式计算^[17]:

$$P_f = 0.15 \frac{F}{d} v \times 10^{-5} \tag{3}$$

式中: F 为轴承载荷; v 为滚动轴承滚珠中心圆周速度; d 为滚珠中心直径。

表 3 SEEBSM 损耗 W

参数名称	参数值
定子铁心损耗	166.30
转子铁心损耗	92.00
电枢绕组铜耗	715.80
励磁绕组铜耗	810.40
笼条铜耗	543.80
机械损耗	0.12
杂散损耗	319.00

两种磁阻转子 SEEBSM 主要结构稳态温度场分布如图 11 所示。另外,主要结构最高温升对比结果如表 4 所示,环境温度为 25 ℃。

由表 4 可知,带笼条后磁阻转子 SEEBSM 各主要结构温升均有不同程度的增大。其中定子最高温升增大了 31.5%,转子最高温升增大了 32.0%,电枢绕组和励磁绕组最高温升分别增大了 25.3% 和 19.5%。综上所述,在磁阻转子

SEEBSM 中添加笼条会导致电机主要结构温升明显增大,但是该电机采用 F 级绝缘等级,因此绝缘材料并不会因温升的增大而损坏。

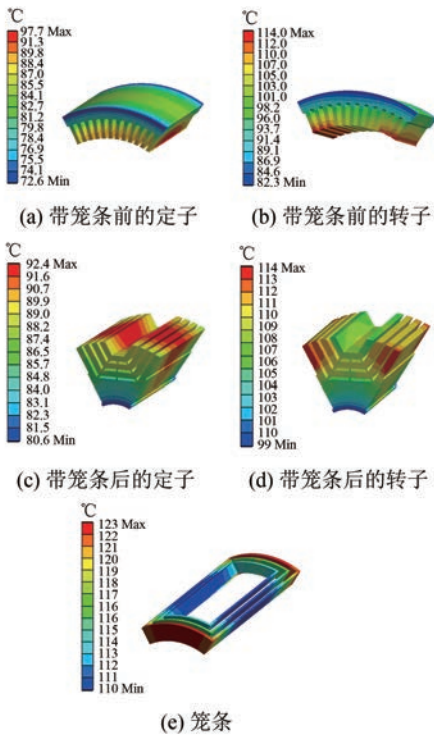


图 11 主要结构温度分布

表 4 各结构最高温升对比 ℃

结构	无笼条磁阻转子	有笼条磁阻转子
定子	67.7	89.0
转子	67.4	89.0
笼条	-	98
电枢绕组	75	94
励磁绕组	81.0	96.8

4 结 语

本文研究了笼条结构对磁阻转子 SEEBSM 电磁性能以及温度的影响。通过分析可知,在磁阻转子中添加笼条可以明显改善电机的起动性能,且短接笼条对起动性能的影响效果要优于公共笼条,短接笼条层数越多对电机牵入同步越有利。在磁阻转子中添加笼条可以提高 SEEBSM 的带负载能力,然而其会使该类电机负载稳定运行时主要结构的稳态温升增大 19.5%~32%。本文的研究成果可以提高磁阻转子 SEEBSM 的电磁性能,

为后续样机的研制提供支撑。

【参考文献】

- [1] 王宇,张成糕,郝雯娟. 永磁电机及其驱动系统容错技术综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1): 351.
- [2] LIU C, XU Y, ZOU J, et al. Permanent magnet shape optimization method for PMSM air gap flux density harmonics reduction[J]. CES Transactions on Electrical Machines and System,2021,5(4): 284.
- [3] 张志艳,秦鹏,徐金涛,等. 永磁同步电动机失磁故障电磁参数分析[J]. 微特电机,2018,46(8): 31.
- [4] MAHMOUDITABAR F, VAHEDI A, TAKORABET N. Design and analysis of interior permanent magnet motor for electric vehicle application considering irreversible demagnetization[J]. IEEE Transactions on Industry Application,2022,58(1): 284.
- [5] 上官璇峰,周敬乐,蒋思远. 双转子双鼠笼永磁感应电机起动过程中永磁体退磁研究[J]. 电机与控制学报,2019,23(12): 126.
- [6] 阚超豪,鲍习昌,王雪帆,等. 无刷双馈电机的研究现状与最新进展[J]. 中国电机工程学报,2018,38(13): 3939.
- [7] ZHANG F G, YU S Y, WANG H, et al. Overview of research and development status of brushless doubly-fed machine system[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering,2016, 2(2): 1.
- [8] 孙玉坤,袁野,黄永红,等. 磁悬浮开关磁阻电机及其关键技术发展综述[J]. 电工技术学报,2015,30(22): 1.
- [9] 付兴贺,江政龙,吕鸿飞,等. 电励磁同步电机无刷励磁与转矩密度提升技术发展综述[J]. 电工技术学报,2022,37(7): 1689.
- [10] 付兴贺,江政龙,陈锐. 电励磁凸极同步电机磁阻转矩及其利用率提升方法研究[J]. 微特电机,2021,49(11): 1.
- [11] 尹星,钟再敏,周永华,等. 基于磁共能重构的电励磁同步电机分布参数建模方法[J]. 微特电机,2019,47(12): 8.
- [12] 胡堃,邓先明,何凤有. 新结构无刷电励磁同步电机设计与分析[J]. 电机与控制学报,2014,18(1): 86.
- [13] 孙立志,高小龙,姚飞,等. 基于开放绕组的新型无刷谐波励磁同步发电机[J]. 电工技术学报,2015,30(18): 96.
- [14] 蒋晓东,石征锦. 磁阻转子定子电励磁无刷同步电机电磁特性分析[J]. 微特电机,2022,50(7): 14.
- [15] 黄国治,傅丰礼. Y2 系列三相异步电动机技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [16] 张圭年,冯雍明. 电机杂散损耗的确定[J]. 中小型电机技术情报,1980(2): 49.
- [17] 魏永田,孟大伟,温嘉斌. 电机内热交换[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

(上接第6页)

- [7] DINAROVICH K R, RUSTEMOVICH U R, RAMILEVICH F D, et al. The stator slot manufacturing technology influence on the submersible thyatron motors output parameters [C] // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), 2019.
- [8] 李永奎. 潜油螺杆泵直驱永磁同步电机的设计与温度场分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [9] 冉晓贺. 潜油永磁电机三维温度场及转轴动力学特性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [10] 刘铁法. 极高温潜油感应电机电磁设计及温升研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [12] 徐永明,孟大伟,沙亮. 潜油电机设计方法研究及验证[J]. 电机与控制学报,2012,16(7): 72.