

定子鼠笼式智能多相电机绕组交流损耗研究^{*}

赵子健, 黄礼坤, 江景成, 施振川, 解伟

(中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362000)

摘要: 针对定子鼠笼式智能多相电机定子绕组受到高频电流引起涡流效应、趋肤效应和邻近效应的问题, 重点分析了不同因素对交流损耗的影响。采用有限元软件, 建立定子鼠笼式电机模型, 分析了绕组上的趋肤效应与邻近效应, 探究定子槽型尺寸、导条槽内位置以及导条截面积对于绕组交流损耗的影响规律, 对比研究不同极对数、不同材料下的交流损耗情况。研究结果表明: 改变定子槽型尺寸、导条截面积以及绕组材料等可以明显降低定子绕组的交流损耗。

关键词: 多相电机; 定子鼠笼; 交流损耗; 趋肤效应; 邻近效应

中图分类号: TM 303.1 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0046-05

doi: 10.12177/emca.2020.108

Research on Winding AC Loss of Intelligent Stator Cage Drive Multiphase Motor^{*}

ZHAO Zijian, HUANG Likun, JIANG Jingcheng, SHI Zhenchuan, XIE Wei

(Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000, China)

Abstract: The high-frequency AC current in the winding of intelligent stator cage multiphase motor leads to the eddy current, proximity effect and skin effect. The influence of different factors on the AC loss is investigated. A finite element software is used to establish the model of the motor and analyze the proximity effect and skin effect of the winding. The influences of the slot size, conductor position and cross-sectional area on the AC loss are investigated. The AC loss of different pole pairs and materials is studied. The obtained results show that the AC loss can be reduced by changing the slot size, conductor cross-sectional area and winding material.

Key words: multiphase motor; stator cage; AC loss; skin effect; proximity effect

0 引言

当前新能源电动汽车采用的电机系统中, 永磁同步电机占比达到 81.5%, 交流异步电机和其他类型电机占比为 18.5%^[1-2]。为了实现高功率密度, 大部分汽车制造商采用分布式绕组, 存在端部绕组过长、成本高、发热严重、转矩脉动大及冗余度低等问题^[3-4]。鉴于此, 德国 Dajaku 等^[5-7]教授提出了一种定子鼠笼式电机, 用铝铸鼠笼式绕

组代替分布式铜线绕组, 通过控制绕组上电流的相位数, 实现电机极对数切换, 使其拥有宽广高效的运行区间。

交变电流在高频磁场下引起的趋肤效应和邻近效应会增加电机绕组的额外损耗^[8], 尤其高速、高功率密度多相电机的绕组处于交变磁场中, 受到趋肤、邻近效应更加明显。

本文主要对鼠笼式定子结构电机在高频电流下绕组上产生的交流损耗进行研究。利用

收稿日期: 2020-06-12; 收到修改稿日期: 2020-07-20

^{*} 基金项目: 中科院“百人计划”C 类项目(2017-123)

作者简介: 赵子健(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多相电机设计。

解伟(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为电动汽车主驱系统、工业伺服系统等。

ANSYS Maxwell 有限元分析软件建立定子鼠笼式多相电机的模型,对比研究不同定子槽型尺寸、导条尺寸、极对数和绕组材质对定子绕组交流损耗的影响。

1 交流损耗分析与模型建立

定子鼠笼式电机采用特殊的定子鼠笼式结构,定子结构如图 1 所示。

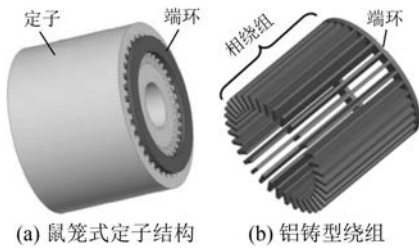


图 1 定子鼠笼式电机定子结构

定子鼠笼式电机交流损耗包括绕组在磁场中产生的涡流损耗、邻近效应和趋肤效应增加的邻近损耗和趋肤损耗^[9]、绕组电流产生的铜耗(即直流损耗)。

$$P_{ac} = P_{ec} + P_{dc} + P_{sk} + P_{pr} \quad (1)$$

式中; P_{ac} 为交流损耗; P_{ec} 为涡流损耗; P_{dc} 为直流损耗; P_{sk} 为趋肤损耗; P_{pr} 为邻近损耗。

1.1 涡流损耗分析

假设电机槽内的磁场均平行于槽底,忽略导体本身涡流对槽内磁场的影响,则槽内导体的涡流损耗^[10-11]为

$$P_{ec} = \frac{\omega^2 B^2 D^2 l S}{32 \rho_c} \quad (2)$$

式中; ω 为角频率; B 为磁通密度; D 为电枢的直径; l 为导体长度; S 为导体截面积; ρ_c 为导体的电阻率。

定子槽结构模型如图 2 所示。对于矩形槽,根据安倍环路定理可得导体在槽内位置磁通密度:

$$B = \frac{\mu_0 n I h_0}{bh} \quad (3)$$

式中; μ_0 为铁心磁导率; n 为导体数; I 为电流峰值; h_0 为导条中心与槽口之间距离; b 为槽宽; h 为槽深。

根据式(2)和式(3)可以推导出导体的涡流

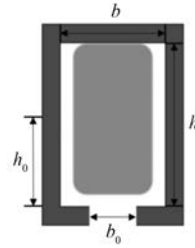


图 2 定子槽结构模型

损耗:

$$P_{ec} = \frac{\pi \omega^2 l D^2 \mu_0^2 n^2 I^2 h_0^2 S}{32 \rho_c b^2 h^2} \quad (4)$$

直流损耗即电流流过导体时产生的铜耗,其计算式为

$$P_{dc} = I^2 \frac{\rho_c L}{S} \quad (5)$$

由式(1)、式(4)、式(5)可得定子绕组的交流损耗为

$$P_{ac} = \frac{\pi \omega^2 l D^2 \mu_0^2 n^2 I^2 h_0^2}{32 \rho_c b^2 h^2} + I^2 \frac{\rho_c L}{S} + P_{sk} + P_{pr} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,影响电机绕组的因素包括槽口尺寸、导条在槽内位置、截面积等,计算槽内磁通密度是在假设磁场平行于槽底和忽略导体本身产生涡流的情况下,实际其对交流损耗的影响需结合仿真分析。

1.2 趋肤效应与邻近效应

趋肤、邻近效应造成的额外损耗受到绕组尺寸、材质和极对数等因素影响,难以用数学公式准确表达,故采用有限元手段进行分析。定子鼠笼式电机二维仿真模型如图 3 所示。模型参数如表 1 所示。



图 3 定子鼠笼式电机二维仿真模型

电机绕组通入电流时,交变电流产生的变化磁场会使绕组产生感应电流,趋肤效应会导致绕

表 1 定子鼠笼式电机模型参数

参数名称	参数值
轴向长度/mm	185.1
定子外径/mm	228
转子外径/mm	170
定子槽数	42
转子槽数	54
电流相数	42 相
绕组材料	纯铝
最高转速/(r·min ⁻¹)	20 000

组表面的电流密度更大;同时邻近导体产生的磁场会相互影响,邻近效应改变绕组内的电流密度^[12-13]。

在绕组导条上通入频率 200 Hz 的 42 相对称电流,其中 6 相电流波形如图 4 所示。不同时刻的电流密度可以反映导条内电流的变化,如图 5 所示。

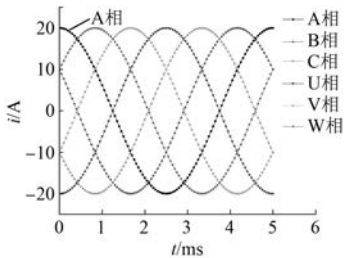


图 4 6 相电流波形

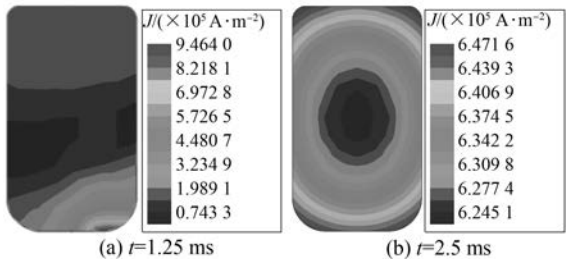


图 5 不同时刻 A 相的电流密度

根据图 4 的电流波形,当时间 t 为 1.25 ms, A 相电流为 0 A,图 5(a)反映了由于邻近效应的存在,A 相导条受到邻近相位电流和转子感应电流的影响,导体中仍然会有涡流存在。当 t 为 2.5 ms 时,A 相电流为 20 A,从图 5(b)可知,此时导条电流密度主要受到趋肤效应的影响,越靠近导体外表面,电流密度越大。

2 交流损耗的影响因素研究

根据前文分析可知,绕组交流损耗主要受定子槽尺寸、槽内磁场强度等因素影响,因此重点探究定子槽尺寸、导条槽内位置、导条截面积、极对数、绕组材质对交流损耗影响规律。

2.1 定子槽尺寸对交流损耗的影响

根据式(3)可知,定子槽尺寸会影响槽内的磁场密度,从而影响导条上产生的交流损耗。在电流大小一定时,高频情况下导条内交流损耗与直流损耗比值 P_{ac}/P_{dc} 可以准确地反映定子槽尺寸对交流损耗的影响。向绕组通入有效值为 50 A 的多相电流,得到不同槽深、槽口宽度下绕组的交直流损耗比,如图 6 和图 7 所示。

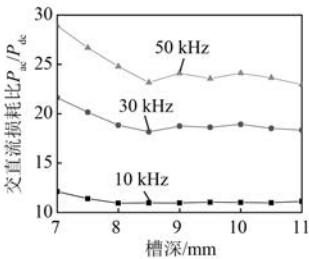


图 6 槽深对交直流损耗比的影响

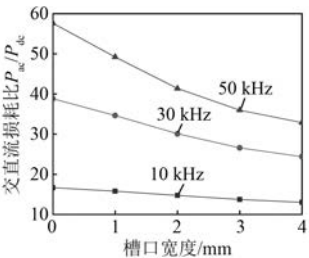


图 7 槽口宽度对交直流损耗比的影响

由图 6 可知,随着槽深的增加,交直流损耗比呈下降趋势,当槽深大于 8.5 mm 时,交直流损耗比波动较小,受到槽深的影响较小。由图 7 可知,当槽口宽度增加时,不同频率下的交直流损耗比不断降低,主要因为槽口宽度的增加使槽口处磁场密度降低,导致损耗下降。

对比图 6、图 7 可知,交直流损耗比受到槽口宽度的影响比槽深更显著。因此,可以通过适当增加槽口高度和槽深降低多相电机导条绕组交流损耗。

2.2 导条槽内位置对于交流损耗的影响

当定子导条处于槽内不同位置时,产生的涡流大小不一样,导致交流损耗存在差异。图 8 为在槽深 h 为 11 mm 时导条中心与槽口之间距离 h_0 对交直流损耗比的影响。

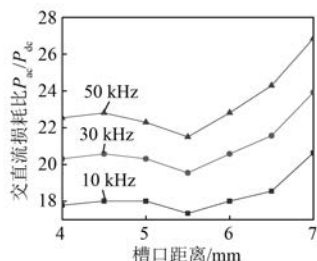


图 8 导条槽内位置对交直流损耗比的影响

由图 8 可得,随着导条中心与槽口之间距离的增加,交直流损耗比先增加后下降再上升,当槽口距离为 5.5 mm 时,交直流损耗比最小。对比式(6)发现交流损耗并没有随着距离的增加而增加,主要是因为磁场在槽内的实际分布使导条处于中间位置涡流效应最小,均匀放置导体可以降低损耗,也利于绕组的散热。

2.3 导条截面积对于交流损耗的影响

根据式(2)可知,绕组涡流损耗和直流损耗受导体截面积影响,对绕组受磁场、趋肤、邻近效应影响在内的总涡流损耗仿真,以及直流损耗的计算,可得到在频率 f 为 10 kHz 时不同截面积下导体产生的损耗,如图 9 所示。

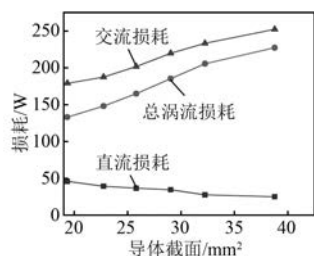


图 9 导体截面积对电机损耗的影响

由图 9 可知,绕组上的直流损耗随着截面积的增大而降低,总涡流损耗随其增大而增大,主要原因是截面的增大使导条外表面趋肤效应更加显著。因此,在通入高频电流时,绕组内交流损耗主要是由涡流损耗引起,适当降低导体截面可以降低交流损耗,但在电机设计过程中也应考虑导条

上直流损耗引起的发热问题,综合选择合适的导条尺寸。

2.4 不同极对数对于交流损耗的影响

定子鼠笼式多相电机可以通过改变定子绕组的电流相位实现极对数切换,不同极对数会影响定子槽内的磁场分布及导体受到趋肤、邻近效应影响的程度,进而改变绕组上的交流损耗。图 10 所示为电机在不同极对数下的磁场分布情况。图 11 所示为不同极对数对交直流损耗比的影响。

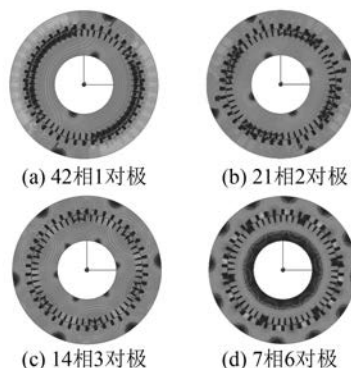


图 10 不同极对数下磁场分布图

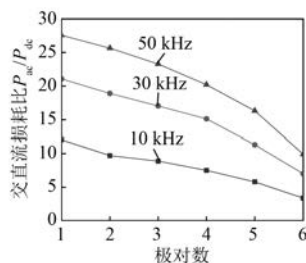


图 11 极对数对交直流损耗比的影响

由图 11 可知,随着极对数的增加,绕组上产生的交流损耗会降低,原因是低极对数对应的高相位数导致相邻导条受到的邻近效应更明显,增加了绕组的交流损耗。因此,当电机进行极对数切换时,应综合考虑绕组上交流损耗对于电机整体效率的影响。

2.5 绕组材质对于交流损耗的影响

不同材质的绕组会对导体内涡流及电流密度分布产生影响,电机绕组常用的 2 种材料是铜和铝,定子鼠笼式电机定子采用的是笼式铸造结构。图 12 所示为铝铸绕组与铜铸绕组的交流损耗的对比分析。

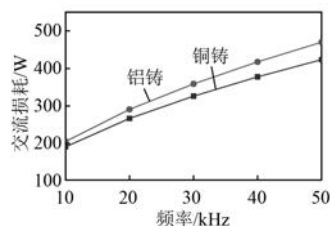


图 12 绕组材料与交直流损耗比的关系

由图 12 可以看出,随着频率的增加,铜铸绕组产生的交流损耗会略低于铝铸绕组,是因为铜的电阻率更低,导条内产生的直流损耗和涡流效应更小,导致总的交流损耗小于铝铸型绕组。但铝铸绕组具有低生产工艺难度、低成本等优点,绕组材质的选择应结合电机应用需求。

3 结 语

本文重点研究定子鼠笼式电机定子导条受到高频交变电流引起的涡流效应、邻近效应和趋肤效应的影响产生的交流损耗,得出如下结论:

(1) 定子槽尺寸影响槽内磁通大小,绕组上的交流损耗会随着槽深和槽口宽度的增加而降低。

(2) 当导条处于槽内中心位置时,交流损耗最小。随着导体截面的增加,直流损耗降低,总涡流损耗上升,交流损耗受趋肤效应的影响更显著。

(3) 极对数越高时,电机相数越低,导条上涡流效应下降,导致产生的交流损耗越低。铜铸绕组在降低交流损耗方面略有优势。

(4) 绕组交流损耗影响因素的分析可为定子鼠笼式电机高功率密度设计提供参考,并完善了多相电机拓扑设计机理。

【参考文献】

[1] 胡勇,刘和平,邓晗,等. 48 V i-BSG 混合动力汽车电机设计与测试验证[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 97.

[2] 李超. 电动汽车电机驱动系统的现状与趋势浅谈[J]. 内燃机与配件, 2020(6): 96.

[3] 李勇,郑琦,郑瑜. 九相感应电机与三相感应电机的性能比较[J]. 机电工程, 2011, 28(10): 1273.

[4] DESAI M P. Stator for a multiphase electric motor, method for producing a coil winding, and electric motor for a handheld tool; U. S. Patent 10,601,265 [P]. 2020-03-24.

[5] DAJAKU G, BACHHEIBL F, PATZAK A, et al. Intelligent stator cage winding for automotive traction electric machines [C] // 28th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS28—2015), 2015.

[6] DAJAKU G, GERLING D. Low costs and high efficiency asynchronous machine with stator cage winding [C] // 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014.

[7] BAUMGARDT A, BACHHEIBL F, PATZAK A, et al. 48 V traction; Innovative drive topology and battery [C] // 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2016.

[8] 张炳义,刘云飞,冯桂宏,等. 高速永磁电机扁铜线绕组交流铜耗研究[J]. 机电工程, 2017, 34(9): 1032.

[9] IWASAKI S, DEODHAR R P, LIU Y, et al. Influence of PWM on the proximity loss in permanent-magnet brushless AC machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1359.

[10] 邹继斌,江善林,梁维燕. 考虑邻近效应的高速永磁无刷电机交流损耗[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(5): 49.

[11] BRAILSFORD F. Soft Ferrites-Properties and applications [J]. Electronics and Power, 1970, 16(5): 198.

[12] 黄娜,杜光辉,宋晓茹. 高速永磁同步电动机绕组交流损耗计算[J]. 电子世界, 2019(6): 80.

[13] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.