

转子槽口深度和槽配合对异步电机转子损耗的影响

李祥成, 王迎春, 黄新宇, 孙 强
(中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502)

摘 要: 为了分析转子槽口深度及定转子槽配合对三相变频调速异步电动机转子损耗的影响, 采用 ANSYS Maxwell 软件对 1 台空载损耗异常的 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机转子损耗进行详细分析。通过建立不同转子槽口深度和定转子槽配合的电机模型, 结合电机内谐波磁场的理论, 对比分析了不同槽口深度和定转子槽配合的电机模型转子铁心与转子导条中的损耗。根据仿真分析结果, 对该样机进行改进设计。样机试验结果表明仿真计算的正确性, 可为相关电机的设计提供参考。

关键词: 定转子槽配合; 少槽配合; 转子槽口深度; 谐波磁场; 二维有限元

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)11-0078-05

Influence of Rotor Slot Opening Depth and Slot Combination on Asynchronous Motor Rotor Loss

LI Xiangcheng, WANG Yingchun, HUANG Xinyu, SUN Qiang
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China)

Abstract: In order to analyze the influence of rotor slot opening depth and slot combination on the rotor loss of three-phase variable frequency asynchronous motor, ANSYS Maxwell was used to analyze the rotor loss of a 10-pole 1 100 kW three-phase variable frequency speed-variable induction motor with abnormal no-load loss. Motor models with different rotor slot opening depths and slot combinations were built. In combination with the theory of harmonic magnetic field in the motor, the losses of rotor cores and rotor bars of the motor models with different rotor slot opening depths and slot combinations were compared and analyzed. According to the results of simulation analysis, the prototype was improved. The results of the prototype test proved the correctness of the simulation calculation, which could provide reference for the design of the relevant motor.

Key words: slot combination of stator and rotor; less slot combination; rotor slot opening depth; harmonic magnetic field; two-dimensional finite element

0 引 言

异步电机的转子损耗包括转子基本铜耗、转子基本铁耗和附加损耗。附加损耗主要由气隙谐波磁通引起。这些谐波在转子铁心中产生高频谐波铁耗, 在笼型转子中产生高频谐波铜耗。转子铁心铁耗与谐波磁场的幅值与频率有关, 而幅值和频率与定转子槽配合及定、转子的槽数多少有关, 转子铁心表面铁耗损耗随转子槽数增加而增

加^[1]。转子铁心脉振损耗取决于谐波波长与对应的齿节距的比例, 而这一比例与定、转子槽数的相对值, 即槽配合有关^[1]。当定、转子槽数很接近时, 转子齿顶的宽度将接近定子齿谐波的波长, 故转子齿中由定子齿谐波磁通引起的脉振较小, 脉振损耗也较小^[2]。因此, 异步电机设计中一般都采用少槽和近槽配合。转子槽口深度对转子冲片的强度及笼型转子中高频谐波铜耗均有影响。气隙中的高次谐波在转子导条上产生高频谐波铜

作者简介: 李祥成(1986—), 男, 研究方向为特种电机设计。

王迎春(1986—), 女, 研究方向为电机测试。

黄新宇(1970—), 男, 研究方向为特种电机设计。

耗。由于集肤效应,转子导条上部谐波电流密度比导条下部大,高频谐波电流主要集中在转子导条靠近转子槽口位置。转子槽口深度越浅,气隙中的高次谐波在转子导条靠近转子槽口部位产生的高频谐波铜耗就越明显。

本文主要从分析定转子槽配合、转子槽口深度对电机气隙谐波磁场的影响角度出发,针对公司研制的 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机,通过对不同定转子槽配合、转子槽口深度的电机模型进行有限元分析,得到气隙谐波磁场以及转子导条中的谐波电流随定转子槽配合、转子槽口深度的变化情况,并计算了转子铁心高频铁耗与导条上的铜耗。根据仿真结果提出了针对故障电机的改进设计措施。改进后的型式试验结果表明,改进设计在样机中取得了良好效果。

1 谐波磁场对转子损耗的影响

转子中的高频谐波铁耗和高频谐波铜耗主要是由定子磁势谐波磁场以及由定、转子开槽引起的气隙磁导齿谐波磁场感生的。定子绕组的磁势谐波分为相带谐波磁势及齿谐波磁势。当定子绕组每极每相槽数为整数时,磁势谐波中相带谐波极对数 ν 为^[3]

$$\nu = (6k_1 + 1)p, \quad k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \cdots \quad (1)$$
式中: p ——极对数。

定子绕组磁势谐波中齿谐波不随绕线排布而改变,其极对数 ν_1 为^[3]

$$\nu_1 = \left(k_1 \frac{Z_1}{p} + 1 \right) p, \quad k_1 = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \cdots \quad (2)$$
式中: Z_1 ——定子槽数。

对于本文研究的电机, $Z_1 = 90, p = 10$, 根据式(1)、式(2)可知,气隙谐波中主要成分是定子一阶相带谐波(−5、7 次)、二阶相带谐波(−11、13 次)、三阶相带谐波(−17、19 次)、定子一阶齿谐波(−17、19 次)、定子二阶齿谐波(−35、37 次)。在转子铁心中,各次谐波将在转子铁心表面及转子铁心齿部产生高频谐波铁耗。在转子导条中,反向旋转的 5 次谐波和正向旋转的 7 次谐波将感应出 6 倍于基波频率的转子电流,同理第 11 次谐波和第 13 次谐波感应出 12 倍于基波频率的转子电流,其他次数谐波感应出 18、24、30、36 倍基波频率的转子电流。本文研究的电机基波频率为

50 Hz,气隙谐波将在转子导条感应出 300、600、900 Hz 等频率的高频电流。高频情况下,转子导条内的集肤效应非常明显,在这些频率下,转子的实际交流电阻远远大于直流电阻。当各次谐波电流的幅值较大时,将产生较大的转子高频谐波铜耗。

2 工程实例分析

本文以公司研制的一台 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机为实例进行分析。该电机采用机座水冷方式,电机转子带离心风扇形成电机内部二次风路。内部循环风路和机座水冷的结构是为了增强低速大转矩工况下转子散热能力。样机基本参数如表 1 所示。

表 1 样机基本参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	1 100	定子内径/mm	680
额定电压/V	690	转子外径/mm	676
额定转速/(r·min ^{−1})	595	定子内径/mm	450
额定频率/Hz	50	定子槽数	90
极数	10	转子槽数	114
定子外径/mm	898	转子槽口深/mm	1.5

在样机试制过程中进行试验时发现电机空载电流和空载损耗明显大于计算值,电机负载效率偏低。负载试验过程中出现功率因数不断上升、效率不断下降的现象。空载特性试验数据如表 2 所示。

表 2 空载试验数据

电压/V	电流/A	功率因数	输入功率/kW
791	979	0.076	104.00
690	633	0.065	50.10
619	495	0.063	34.10
550	407	0.059	23.20
481	343	0.053	15.40
412	289	0.051	10.50
344	238	0.054	7.67
207	137	0.072	3.61
115	93	0.100	2.37

在满载 1 100 kW 温升试验进行至 90 min 时,电机出现焦糊味且冒烟,机组保护跳闸。经解体

查看,电机转子中段三分之一处定、转子相蹭,扫膛。解体后故障电机定子如图 1 所示。故障电机转子如图 2 所示。

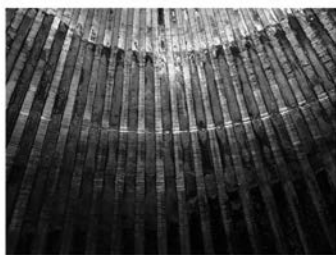


图 1 故障电机定子



图 2 故障电机转子

根据现场拆解报告及样机的型式试验数据,通过后续的试验和对比,排除转子冲片强度、电机冲片材质、铁心叠压工艺等的影响,最后将电机空载损耗异常原因集中在转子槽口深度和定转子槽配合上。

3 仿真分析

为了分析 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机空载损耗异常的原因,从定转子槽配合及转子槽口深度对三相变频调速异步电动机转子损耗的影响出发,对 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机槽配合为 90/114 时,转子槽口深度 H_{r0} 在 1.5~3.5 mm、每隔 0.5 mm 取一个值进行建模,其他参数保持不变。对槽配合为 90/80、转子槽口深度 H_{r0} 为 3.5 mm 的电机进行建模,建模时槽配合 90/80 与 90/114 转子槽深相同,转子部分有效铜面积相同。总共建立了 6 个模型,对 6 个模型分别进行空载气隙磁密、转子电流、转子铜耗、转子铁耗等分析。

图 3 给出的是电机槽配合为 90/114 时电机的 1/2 模型图。转子槽口深度的变化如图 4 所示。

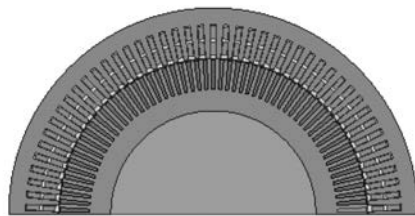


图 3 电机模型图

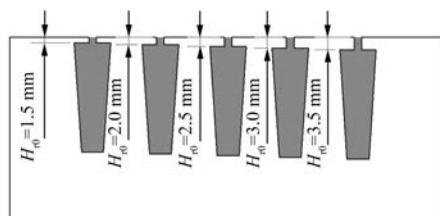


图 4 改变槽口深度示意图

3.1 气隙磁密分析

对电机进行空载分析,并在定、转子气隙中间位置作辅助线,利用辅助线可以获得空载时径向气隙磁密的分布曲线,如图 5 所示。图 5 中径向气隙磁密的分布曲线为槽配合 90/114,转子槽口深为 1.5 mm 时的情况。对径向气隙磁密作傅里叶分解可以得到气隙磁密中的各次谐波分量,如图 6 所示。气隙磁密谐波中主要成分为 5、7、11、13、17、19、35、37 等次谐波。

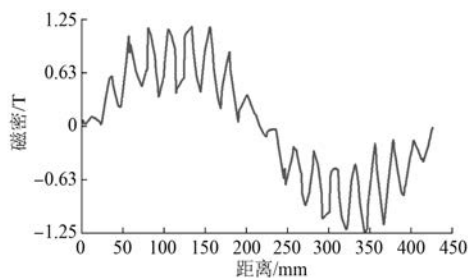


图 5 空载时径向气隙磁密

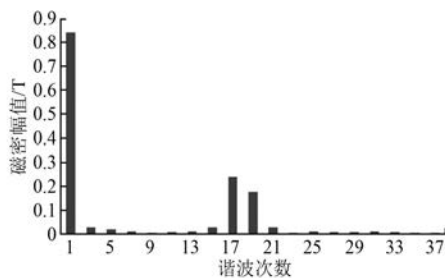


图 6 气隙磁密各次谐波

3.2 转子电流分析

对转子导条空载电流进行分析,稳态后空载转子电流如图 7 所示。图 7 为槽配合 90/114,转子槽口深 1.5 mm 时,转子导条空载电流的情况。

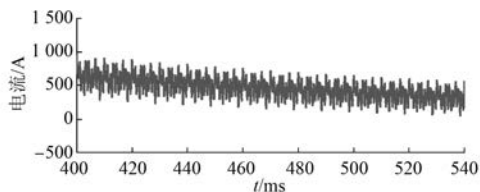


图 7 转子导条空载电流

对转子导条中的电流作傅里叶分解可得基波电流和各次谐波电流如图 8 所示。由图 8 可看出,转子电流谐波主要为 6、12、18、36 次谐波电流。

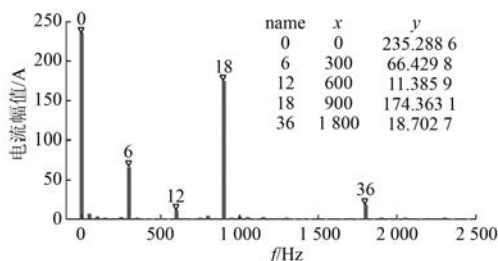


图 8 转子电流各次谐波幅值

3.3 转子损耗分析

对槽配合为 90/114,转子槽口深度 H_{r0} 为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mm 的 5 个电机模型进行空载损耗分析,空载工况下转子导条损耗如图 9 所示。由图 9 可知槽口深度 H_{r0} 为 1.5、2.0、2.5、3.0、3.5 mm 时转子导条铜耗分别为 28.39、18.56、11.29、3.96、3.68 kW。随着转子槽口深度增大,转子导条铜耗逐渐减小。转子槽口深度增加时减小的这部分转子损耗主要是转子导条上的谐波铜耗。

对槽配合为 90/114 和 90/80,转子槽口深度

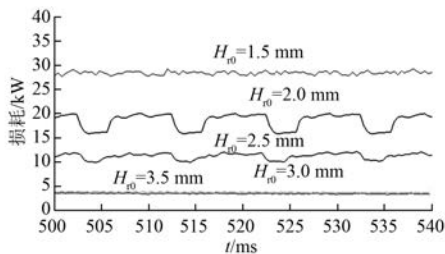


图 9 不同槽口深度转子导条中的损耗

H_{r0} 为 3.5 mm 的转子导条损耗、转子铁耗、总损耗进行对比,如图 10 和图 11 所示。由图 10 可知,槽配合为 90/80 的电机模型转子导条铜耗小于槽配合为 90/114 的槽配合,转子铁耗差异不大。由图 11 可知,槽配合由 90/114 变为 90/80 后,转子空载损耗由 4.64 kW 降低至 2.80 kW。

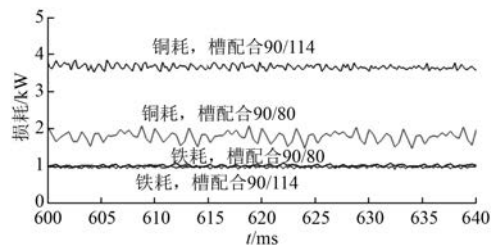


图 10 不同槽配合转子铜耗和铁耗

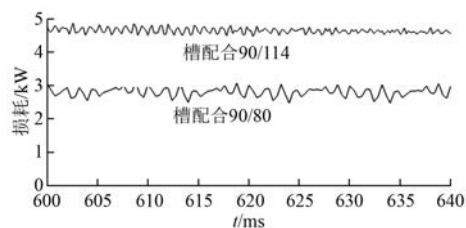


图 11 不同槽配合转子总损耗

对比槽配合为 90/114、转子槽口深度 H_{r0} 为 1.5 mm 的电机模型与槽配合为 90/80、转子槽口深度 H_{r0} 为 3.5 mm 的电机模型,转子总损耗如图 12 所示。由图 12 可知,槽配合为 90/80,转子槽口深度 H_{r0} 为 3.5 mm 的电机空载转子总损耗为 2.80 kW,槽配合为 90/114,转子槽口深度 H_{r0} 为 1.5 mm 的电机空载转子损耗为 29.12 kW,空载转子损耗降低了 26.32 kW。

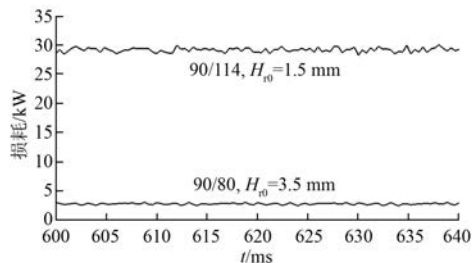


图 12 不同槽配合和转子槽口深度总损耗

4 样机改进设计及试验

根据有限元仿真分析结果,对故障的 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机进行改进设

计。在新电机的设计中,主要采取措施来降低转子中的高频谐波电流损耗。具体改进措施为:槽配合由 90/114 改成 90/80;转子槽口深度由 1.5 mm 改成 3.5 mm。

改进后的样机进行空载试验和负载试验。电机温升试验持续时间 6 h,热稳定后定子绕组温升 66 K,电机其他性能参数均满足技术协议要求。改进后空载试验数据如表 3 所示。

表 3 改进后空载试验数据

电压/V	电流/A	功率因数	输入功率/kW
791	878	0.044	56.2
690	566	0.029	21.2
619	452	0.026	13.5
550	376	0.027	10.2
481	324	0.028	7.8
412	276	0.031	6.2
344	232	0.034	4.8
207	139	0.056	2.8
115	78	0.110	1.7

如图 13 所示,对比改进前后空载曲线,空载损耗明显降低。对比表 2 和表 3 可知,在额定电压 690 V、额定频率 50 Hz 条件下,改进后空载损耗较改进前降低了 28.9 kW。有限元仿真结果中,改进后空载损耗降低 26.32 kW。两者相比较,数值比较接近,而造成仿真与试验误差的因素可能是电机试验供电电源存在时间谐波以及电机定转子存在偏心等。

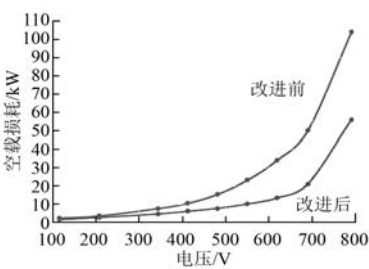


图 13 改进前后空载损耗曲线

5 结 语

本文通过 ANSYS Maxwell 二维有限元软件仿真计算了 10 极、1 100 kW 三相变频调速异步电动机空载气隙磁密、空载转子电流,并对空载气隙磁密、空载转子电流进行傅里叶分解,分析了空载工况不同转子槽深度、槽配合转子导条铜耗数据,得到转子槽口深度与空载转子铜耗之间的变化关系。样机的改进试验结果验证了仿真分析的正确性。本文的研究对于电机设计以及工程应用中考虑转子槽口深度及槽配合对转子损耗的影响具有一定的参考意义。

【参 考 文 献】

[1] 刘徽,胡虔生,濮开贵.异步电机基于谐波磁场影响的槽配合综述[J].微特电机,1994(5): 12-16.

[2] 程雪玲,吴泰,马砚芳.定子槽配合对高压异步电动机温升的影响[J].防爆电机,2013(4): 14-18.

[3] 鲍晓华,梁娜,方勇,等.定子槽开口对感应电机转子涡流损耗的影响[J].电机与控制学报,2015,19(11): 18-24.

收稿日期: 2018-05-22

(上接第 44 页)

[3] 李周清.外转子永磁轮毂电机的设计研究[J].机电工程技术,2012,41(3): 1-6.

[4] 雷良育,胡烨,宋志强,等.电动汽车用外转子轮毂电机的设计研究[J].微电机,2016,49(10): 6-10,50.

[5] 杨养户.电动汽车轮毂电机技术[J].汽车维修,2012(4): 44-47.

[6] 郭建龙,陈世元,韦立学.电动车用双凸轮式永磁轮毂电机电磁设计[J].微电机,2008,41(7): 12-15.

[7] 余海阔,陈世元.电励磁双凸极轮毂电机空载性能的有限元分析[J].微电机,2011,44(6): 23-25.

[8] 罗玲,梅康元.永磁无刷轮毂电机分数槽绕组的设计与分析[J].微电机,2011,44(5): 17-20.

[9] 宫海龙,柴凤,程树康.内置式低速大转矩永磁轮毂电机的设计研究[J].微电机,2010,43(2): 1-4.

[10] 陈冬雪,宗长富,何磊,等.轮毂电机的转矩脉动抑制方法研究[J].科学技术与工程,2012,12(8): 1811-1815.

[11] 明巧红,徐康聪.轮毂电机系统及其驱动技术分析[J].上海汽车,2016(3): 6-10.

[12] 姜卫东,廖玉茗,王培侠,等.减小无刷直流电机换相转矩波动和换相时间的协调控制方法[J].中国电机工程学报,2017,37(7): 2120-2130.

[13] BERTOLUZZO M, BUJA G, KESHRI R K, et al. Sinusoidal versus square-wave current supply of PM brushless DC drives: a convenience analysis [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(12): 7339-7349.

收稿日期: 2018-05-31