

非晶合金电机空载铁耗研究

王凯东¹, 杨文龙²

(1. 沈阳工业大学 国家稀土永磁电机工程技术研究中心, 辽宁 沈阳 110870;

2. 国网辽宁省电力有限公司抚顺供电公司, 辽宁 抚顺 113008)

摘要: 为了体现非晶合金低损耗性能的优越性, 对 1 台 15 kW、1 000 Hz 电机进行空载铁耗仿真计算分析。电机定子铁心为非晶合金材料, 定子铁心采用浸漆、固化加工工艺。电机空载铁耗的计算主要包括非晶定子基本铁耗的分离以及空载杂散损耗的计算, 得出了非晶合金电机杂散损耗是基本铁耗的 6.03 倍; 并与定子为 50DW310 时进行对比, 得出空载运行时, 非晶合金空载铁耗约为硅钢片 50DW310 的 18.82%, 电机的效率可以提高 3.48 个百分点。

关键词: 非晶合金; 永磁电机; 空载铁耗; 效率

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)10-0089-04

Researches on No-Load Iron Loss of Amorphous Alloy Motor

WANG Kaidong¹, YANG Wenlong²

(1. National Engineering Research Center for Rare-Earth Permanent Magnetic Machines,
Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Fushun Power Supply Company, Liaoning Electric Power Co., Ltd., State Grid, Fushun 113008, China)

Abstract: In order to reflect the superiority of low-loss amorphous alloy, a 15 kW, 1 000 Hz motor was used to perform no-load iron losses simulation. The motor stator core was made from amorphous alloy, and treated with dipping coating and curing process. The motor no-load iron loss calculation includes the separation of basic iron loss of amorphous stator and the calculation of no-load stray losses. It was obtained that the amorphous alloy motor stray loss was 6.03 times of the basic iron loss. Comparison was made with the 50DW310 stator. Under no-load operation, the amorphous alloy no-load iron loss was about 18.82% of silicon steel 50DW310 no-load iron loss, and the motor efficiency could be increased by 3.48 percentage points.

Key words: amorphous alloy; permanent magnet electric machine; no-load iron loss; efficiency

0 引言

非晶材料是一种新型的双绿色软磁功能材料。非晶合金以每秒钟百万摄氏度的速度从热钢液直接冷却到非晶薄带成品, 省略了一般冷轧金属制造工艺中的许多中间工艺, 节约了大量的能源, 数据推算生产 1 kg 非晶合金比生产相同重量的冷轧硅钢片节约 1 L 石油^[1]。

铁基非晶合金带材的磁导率在工频下约为硅钢的 6 倍。非晶合金与传统的硅钢相比, 具有更高的电阻率和更薄的带材厚度, 所以用作铁心材

料时可以将铁耗降低 70%~90%。在电机的工作频率范围内, 铁基非晶合金的损耗可降低为硅钢的 1/3, 因此用非晶合金作电机铁心可显著提高电机效率^[2]。非晶合金带材加工成铁心后性能会变差, 发明一种高效廉价的铁心加工方法十分重要, 安泰科技股份有限公司提出了层间粘结、浸漆固化和机械固定 2 种加工工艺^[3-5]。目前国外最具代表性的非晶合金电机研发单位为日本的日立公司^[6-8]和美国的莱特公司^[9], 他们所开发的非晶电机均为轴向磁通永磁电机。轴向磁通电机定子铁心可采用非晶带材卷绕的方式, 加工工艺相

对简单,加工成定子铁心后,对铁心的性能影响较小。电机功率基本不受带材宽度限制。此外,日本东京理科大学 Akira Chiba 等^[10]设计了 1 台定、转子均为非晶合金的 2.4 kW、8 500 r/min 开关磁阻电机。波兰罗兹工业大学学者对径向非晶感应电机性能进行了研究^[11-12]。波兰有色金属研究所研究了非晶合金在高速永磁无刷直流电机中的应用^[13]。

本文主要对 1 台 15 kW、1 000 Hz 电主轴电机进行研究,电机定子采用非晶合金,对电机的空载基本铁耗进行分离,综合考虑交变和旋转磁场的影响,分析计算了电机定子的铁心损耗,总结了非晶合金铁耗修正系数,为行业内非晶合金永磁电机设计提供参考。

1 空载铁耗分析方法

永磁电机的空载铁耗主要由 4 部分原因引起:

(1) 由旋转磁化(电机铁心的轭部处于旋转磁化状态,而旋转磁化的损耗要高于交变磁化)、小磁滞回线和涡流反作用使磁场分布不均匀引起的铁耗增量;

(2) 非晶合金带材加工后,由于应力集中和其他加工因素导致铁耗增大;

(3) 磁场的空间谐波、定子铁心开槽引起的磁导谐波和变频器供电电流的时间谐波导致铁耗增大;

(4) 电机中的漏磁场在其他结构件中感生的涡流损耗。

根据谐波分析原理,电机中任意一点的磁通密度波形都可分解成一系列的谐波分量,任意磁场波形下产生的铁耗等于其基波和各次谐波分量产生的铁耗之和^[14]。对于 ν 次谐波的椭圆形旋转磁场,可将其分解成长轴磁通密度 $B_{\nu\max}$ 和短轴磁通密度 $B_{\nu\min}$ 这 2 个正交的交变磁场,椭圆形旋转磁场产生的损耗等效为 2 个正交的交变损耗^[15]。

定子铁心磁滞损耗为

$$P_h = \sum_{\nu=1} k_h \nu f (B_{\nu\max}^\alpha + B_{\nu\min}^\alpha) \quad (1)$$

经典涡流损耗为

$$P_e = \sum_{\nu=1} k_e \nu^2 f^2 (B_{\nu\max}^2 + B_{\nu\min}^2) \quad (2)$$

式中: k_h ——磁滞损耗系数;

f ——铁心磁密变化频率;

α ——磁滞损耗系数;

k_e ——涡流损耗系数。

利用时步有限元法进行磁场分析,可得定子铁心中各个单元磁通密度矢量在一个周期内的变化,由式(1)和式(2)可得第 j 个单元的单位质量铁心铁耗为

$$P_j = P_{hj} + P_{ej} \quad (3)$$

总铁心损耗等于各单元的铁耗之和,可由式(4)求得:

$$P_{Fe} = l \sum_{j=1} p_j \rho \Delta_j \quad (4)$$

式中: l ——铁心长;

p_j ——第 j 个单元的单位质量铁心损耗;

ρ ——铁心叠片密度;

Δ_j ——第 j 个单元的面积。

根据三维涡流场有限元分析方法,假设电机内电磁场是准静态场,忽略位移电流及定子电枢绕组电流不均匀效应,根据麦克斯韦电磁理论,建立电机三维瞬态电磁场模型,可得永磁体内涡流密度的表达式:

$$J_c = -\sigma \left(\nabla \phi + \frac{\partial A}{\partial t} \right) \quad (5)$$

式中: J ——电流密度;

σ ——电导率;

A 、 ϕ ——矢量磁位与标量磁位。

从而可得永磁体内涡流损耗为

$$W_{pm} = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{\Omega_{pm}} \sigma \left| \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right|^2 dv dt \quad (6)$$

式中: T ——计算时间;

v ——永磁体体积。

2 非晶合金电机空载铁耗计算

非晶合金带材的厚度极薄,仅为 0.025 mm。其铁耗模型的损耗系数不同于硅钢片,而且加工后非晶合金铁心的损耗系数会发生较大变化^[16]。为此,本文首先根据铁耗分离模型,运用最小二乘法对多个频率下非晶合金铁心的铁耗系数进行非线性拟合,如图 1 所示。

由非线性拟合分析结果得出相应的损耗系数:磁滞损耗系数 $k_h = 9.688 \times 10^{-3}$,涡流损耗系数 $k_e = 1.563 \times 10^{-5}$ 。

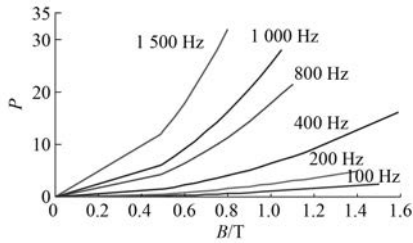


图1 非晶合金铁心损耗系数拟合

2.1 定转子铁心损耗

利用有限元方法对非晶合金电机铁心损耗进行了分析,如图2所示。

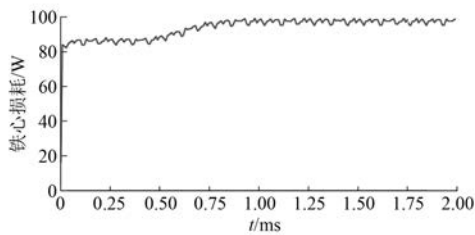


图2 空载定转子铁心损耗

由图2可得知,施加空载电流时产生的定转子铁心损耗为 97.67 W。该部分损耗主要包括:空载电流谐波引起的损耗增量、定子开槽引起气隙磁导不均匀所导致的损耗增量、永磁体磁场空间分布非正弦所引起的损耗增量及加工后引起的损耗增量。

2.2 永磁体涡流损耗

利用三维有限元方法对非晶合金电机的永磁体涡流损耗进行了分析,结果如图3所示。

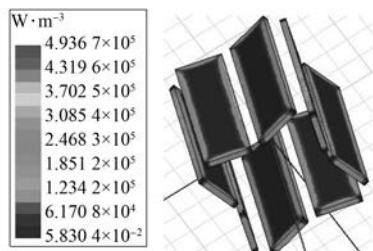


图3 永磁体涡流损耗

由图3可得知,施加空载电流时产生的永磁体涡流损耗为 8.84 W。该部分损耗主要包括:空载电流谐波引起的损耗增量、定子开槽引起气隙磁导不均匀所导致的损耗增量。

2.3 结构件中的涡流损耗

电机结构件中损耗属于空载杂散损耗的一部分,在硅钢电机中一般不予计算,而是将部分损耗放在了铁耗的修正系数中。本文为了研究非晶合金的修正系数,对电机临近结构件损耗进行了计算。电机结构件中产生的损耗主要由电机漏磁场引起,利用有限元方法对电机机壳、端盖、轴承、挡板进行计算,可得在结构件中损耗为 12.90 W。

通过对非晶合金电机不同部分空载时的损耗进行分析,可得非晶合金电机各部分空载损耗,如表1所示。

表1 非晶合金电机各部分空载损耗 W

损耗位置	定子铁心	转子铁心	永磁体	结构件
损耗	97.67	1.58	8.84	12.90

从表1计算结果可看出,空载时非晶合金电机的总损耗为 120.99 W,而电机的基本铁耗为 20.05 W。非晶定子铁心采用浸漆、固化加工工艺时,空载电机损耗为非晶合金基本铁耗的 6.03 倍。在用非晶合金带材进行铁耗计算时,铁耗的修正系数不同于硅钢片的修正系数,并且非晶合金的铁耗修正系数要比硅钢片大得多。

为了体现非晶合金电机性能的优越性,在相同情况下,将非晶合金定子铁心换成硅钢片 50DW310,对非晶电机与定子为硅钢片 50DW310 电机空载铁耗进行仿真对比。非晶合金电机与硅钢电机空载损耗比较如表2所示。

表2 非晶合金电机与硅钢电机空载损耗比较 W

项目	非晶	硅钢 50W310
铁心损耗	97.67	619.62
基本铁耗	20.05	522.75
加工后铁耗增量	62.79	-
转子涡流损耗	8.84	8.84
永磁体涡流损耗	1.58	1.58
临近结构件损耗	12.90	12.90
总损耗	120.99	642.94

由表2计算结果可得,在额定转速 30 000 r/min、1 000 Hz 情况下,空载运行时,不考虑 50DW310 加工的影响,非晶合金电机空载铁耗约为硅钢片 50DW310 定子电机空载铁耗的

18.82%。通过运用非晶合金代替硅钢片可以明显降低电机的铁耗,电机的效率可以提高 3.48 个百分点,效率提升效果明显。

3 结 语

通过对非晶合金电机和硅钢片电机空载铁耗的仿真计算,得到非晶合金电机的空载铁耗为电机基本铁耗的 6.03 倍,非晶合金电机铁耗的修正系数已不同于硅钢电机;在相同情况下,对非晶电机与硅钢电机进行仿真分析,得到空载时定子为非晶合金时铁耗约为硅钢片 50W310 的 18.82%,电机的效率可以提高 3.48 个百分点,说明通过运用非晶合金代替硅钢片可明显降低电机的铁耗。

【参 考 文 献】

- [1] 张广强,周少雄,王立军,等.非晶电机的优势及其研究进展[J].微特电机,2011,39(3): 73-75.
- [2] 王立军,张广强,李山红,等.铁基非晶合金应用于电机铁心的优势及前景[J].金属功能材料,2010,17(5): 58-62.
- [3] 卢志超,李山红,李德仁,等.一种用于高速电机的非晶合金定子铁心的制备方法:CN200810007282 [P].2008-10-15.
- [4] 张广强,周少雄,李山红,等.一种电机用非晶合金铁心的制备及其磁性性能研究[J].微特电机,2011(12): 68-70.
- [5] 王立军,张广强,李山红,等.一种电机用非晶合金定子铁心的制造方法:CN201110093769.9 [P].2011-04-14.
- [6] WANG Z N, ENOMOTO Y J, ITO M, et al. Development of a permanent magnet motor utilizing amorphous wound cores [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2010, 46(2): 570-573.
- [7] WANG Z N, MASAKI R, MORINAGA S, et al. Development of an axial gap motor with amorphous metal cores [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1293-1299.
- [8] WANG Z, ENOMOTO Y, SOUMA K, et al. Development of a high speed motor using amorphous metal cores [C] // 8th International Conference on Power Electronics, The Shilla Jeju Korea, 2011: 1940-1945.
- [9] HIRZEL A D. Synchronous design frequency as a free variable in permanent magnet brushless motors in effort to achieve optimal torque density [C] // Proceeding of International Conference on Electrical Machines and System, Seoul Korea, 2007: 983-988.
- [10] CHIBA A, HAYASHI H, NAKAMURA A, et al. Test results of an SRM made from a layered block of heat-treated amorphous alloys [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(3): 699-706.
- [11] DEMS M. The highly efficient three-phase small induction motors with stator cores made from amorphous iron [J]. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2004, 23(3): 625-632.
- [12] DEMS M. Performance characteristics of a high-speed energy-saving induction motor with an amorphous stator core [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 3046-3055.
- [13] KOLANO R. Amorphous soft magnetic materials for the stator of a novel high-speed PMBLDC motor [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2013, 49(4): 1367-1371.
- [14] ZHU J G, RAMSDEN V S. Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1998, 34(7): 2234-2242.
- [15] STUMBERGER B, HAMLER A, GORICAN V, et al. Accuracy of iron loss estimation in induction motors by using different iron loss models [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2003, 24(7): 272-276.
- [16] 朱龙飞,朱建国,佟文明,等.轴向磁通非晶合金永磁电机空载损耗解析计算方法[J].中国电机工程学报,2017,37(3): 923-930.

收稿日期: 2018-05-31