

DOI: 10.7652/xjtuxb201312017

矢量控制下永磁同步电机的损耗分析

丁树业¹, 刘书齐¹, 毕刘新², 冯海军², 李跃龙¹

(1. 哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 150080, 哈尔滨; 2. 中国船舶重工集团公司第 704 研究所, 200031, 上海)

摘要: 为了精确计算电机损耗,以一台永磁电机为例,采用矢量控制原理及有限元分析方法,建立了永磁电机二维模型。对该电机模型定子侧进行区域划分,并对不同工况进行有限元仿真计算,详细分析电机在不同工况下的各区域损耗,对损耗曲线产生波动的原因进行深入分析,并选取 A 相电流进行了仿真计算与实验结果的对比验证。结果表明:电机铁耗主要分布在定子侧,满载时定子铁耗占总铁耗的 98.3%,半载时占总铁耗的 98.5%;转子铁耗主要为涡流损耗,满载时转子上的涡流损耗占转子总铁耗的 97.5%,半载时占转子总铁耗的 97.6%;涡流损耗主要分布在永磁体上和转子上,其中永磁体上的涡流损耗大于转子上的涡流损耗,满载时永磁体上的涡流损耗占总涡流损耗的 89.3%,半载时占总涡流损耗的 89.4%;随着负载的降低,定子铁耗占总损耗的比例逐渐增加。计算结果与实测值相吻合,误差满足工程实际要求,验证了该研究方法及其结果的正确性。

关键词: 矢量控制;永磁同步电机;有限元仿真;损耗;磁密

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)12-0095-07

Loss Analysis for Permanent Magnet Synchronous Motor under Vector Control

DING Shuye¹, LIU Shuqi¹, BI Liuxin², FENG Haijun², LI Yuelong¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. 704 Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Shanghai 200031, China)

Abstract: To accurately evaluate motor losses, a 2D model of permanent magnet motor is established with finite element method following vector control principle. The stator of the motor model is divided along radial and simulated under different loads. The losses in different domains and the wave of loss curves are discussed in detail. Then a simulated phase current is compared with the measured phase current. The results show that motor iron loss appears mainly in the stator, the stator iron loss gets to 98.3% of total iron losses under full load, and 98.5% of total iron losses under half load. Eddy current loss appears mainly in the permanent magnet and rotor, rotor eddy current loss gets to 97.5% of total rotor iron losses under full load, and 97.6% of total rotor iron losses under half load; permanent magnet eddy current loss is greater than rotor eddy current loss, permanent magnet eddy current loss gets to 89.3% of total eddy current losses under full load, and 89.4% of total eddy current losses under half load. The proportion of stator iron loss in total motor losses gradually increases with the reduced load. The simulation results agree with the measured ones, and the error falls bellow the engineering requirement.

Keywords: vector control; permanent magnet synchronous motor; finite element simulation; loss; flux density

目前,船用电力推进系统可采用电励磁同步电机、永磁电机、先进感应电机、高温超导电机和单极电机等^[1]。由于永磁电机具有体积小、效率高、可靠性强以及很高的转矩与惯量比等优点^[2],成为最佳的选配产品,对于可靠性要求高并且体积小型的船舶而言,永磁电机优势更为显著^[3]。

由于船用电机的供电系统不同于以往使用的直接电网供电系统,为了达到更高的效率和转矩,船用永磁同步电机供电时常配有控制系统。产生于20世纪70年代的矢量控制理论正是一种高性能的交流电机控制技术,后被广泛应用于永磁同步电机中^[4]。矢量控制方式可以通过跟踪给定电流,达到对电机转矩和转速控制的目的,从而实现低转速时转矩输出最大化^[5]。 d 轴电枢电流 $i_d=0$ 的控制方式是矢量控制中操作较为简便的一种,在电机仿真中广为应用。

损耗是电机运行中必不可少的一部分,损耗的大小直接影响电机发热而造成电机的使用寿命降低^[6]。矢量控制可以减小电机的损耗,合理选取参数,可以达到电机损耗最小化。文献[7]阐述了矢量控制原理及各个参数的计算过程,并对所阐述内容进行了相应的仿真计算;文献[8]研究了正弦波驱动和方波驱动两种方式下的电机损耗,并验证了最优超前角控制和 $i_d=0$ 矢量控制时电机损耗最小;文献[9]揭示了空间齿谐波磁场对转子损耗的重要性,提出了谐波损耗的概念,并在不同运行状况下对电机定、转子铜耗、铁耗及涡流损耗做了详细的分析;文献[10]提出了将定、转子区域化的概念,并计算了各区域的损耗和磁密,更具体地分析了电机各部分的变化规律,为降低电机损耗提供了依据;文献[11]分析了电机不同位置处的径向磁密和切向磁密,同时将电机损耗分为交变损耗和旋转损耗,还对转矩和转速对电机损耗的影响做了对比研究;文献[12]阐述了矢量控制和电机损耗的关系,说明电机损耗随 i_d 而变化,当 i_d 达到某一特定值时会产生最小电机损耗。上述文献都仅从某一角度对电机损耗进行分析,很少有同时兼顾矢量控制和电机损耗区域化的文献,而对电机损耗曲线波动变化的分析更少。

本文以一台永磁电机为例,基于矢量控制原理及有限元分析方法,在参考文献[13-17]的基础上,建立了永磁电机二维模型,并对该电机模型定子侧进行区域划分,通过 $i_d=0$ 的矢量控制方法计算出所需的各种参数,使电机在 $i_d=0$ 的控制下对不同工况进行有限元仿真,详细分析电机在不同工况下

的各区域损耗,并对损耗曲线产生波动的原因进行深入分析,最后将计算结果与实验结果进行对比,从而验证计算结果及分析理论的正确性。

1 矢量控制原理

矢量控制实际上是对电动机定子电流矢量相位和幅值进行控制。当其他参数确定后,电动机的转矩就取决于定子空间电流。定子空间电流可分为交轴电流和直轴电流,而特定的转速和转矩对应着特定的交、直轴电流,因此通过控制交、直轴电流便可以实现对电动机转矩和转速的控制,从而达到在某一电流时转矩最优而损耗最小的目的。

电动机电磁矢量的控制方法多种多样,可根据电机的不同用途做出选择。电磁矢量控制方法有 $i_d=0$ 控制、 $\cos\varphi=1$ 控制、恒磁链控制以及最大转矩/电流控制等。当然不同的电磁矢量控制方法有各自的优点与缺点,这需要在实际的工程应用中根据具体情况进行选择。本文选择操作控制较为简单的 $i_d=0$ 控制方式进行工程模拟仿真^[13]。

2 永磁同步电机的有限元仿真

2.1 数学描述

2.1.1 边界条件的建立 在进行有限元仿真计算时,为了限定唯一的数值解需要对电机模型进行边界条件设定^[15],具体设定内容如下:

(1)电磁场满足麦克斯韦方程;

(2)采用矢量磁位 A 分析电机磁场时, A 仅有 A_z 分量;

(3)在求解域或计算模型的边线上要施加矢量磁位边界条件, z 方向的矢量磁位边界条件为 $A_z=C_{\text{const}}$,当 C_{const} 等于0时,描述的是磁力线平行于给定的边线;

(4)为了减少计算数据,在仅对电机的一个极或一对极进行仿真计算时,需要对电机模型施加主从边界条件,当电机模型为一个极时 $A_M=-A_S$,电机模型为一对极时 $A_M=A_S$ 。

根据以上边界条件设定要求,列出电机模型为一个极时的边界条件模型矢量如图1所示。由图1可知,电机模型为一个极时的边界条件数学方程组如下

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) &= -J_z \\ A_z \Big|_{\widehat{BC}} &= 0 \\ A_z \Big|_{\overline{AB}} &= -A_z \Big|_{\overline{AC}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: μ 为材料的磁导率; A_e 为轴向磁位矢量。

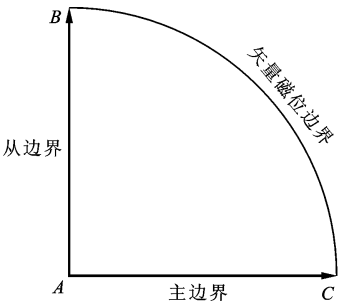


图 1 边界条件模型矢量图

2.1.2 基于时步有限元的铁耗计算方程 文献[14]提出的常系数三项式模型是目前发展较为成熟、应用较为广泛的一种铁耗计算模型

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_a = k_h f B^2 + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \tag{2}$$

式中: P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; P_a 为附加损耗; k_h 、 k_e 和 k_a 为相应的损耗系数, k_h 和 k_a 可通过硅钢片实测损耗数据拟合求得, $k_e = \pi^2 \gamma d^2 / 6 \rho$; d 为硅钢片厚度,单位 m; γ 为电导率,单位 S/m; ρ 为铁磁材料密度,单位 kg/m^3 。

由式(2)可知,磁滞损耗和涡流损耗与磁密的平方成正比,附加损耗与磁密的 1.5 次方成正比,可见损耗变化是由磁密变化所决定的。

2.2 基本假设

为了合理简化求解,本文给出了一系列基本假设,具体内容如下:

- (1)电机磁场沿轴向无变化,端部效应以常值电感计入,将真实的三维电机内电磁场问题简化为二维电磁场问题;
- (2)电机定子径向分块对电机损耗及磁场变化无影响;
- (3)对电机定子槽口、磁极冲片等部分的圆角、倒角等细微之处作近似处理;
- (4)电机外部磁场所占分量很小,可忽略不计;
- (5)铁心冲片各向同性,磁化曲线是单值的;
- (6)忽略电导率和磁导率的温度效应;
- (7)忽略斜槽对电机性能的影响。

2.3 有限元仿真模型

由于所分析电机为四极结构,而电机的磁场呈周期性变化,因此我们仅选取电机的 1/4 模型进行分析,以减少其工作量和求解规模。采用有限元分析软件建立电机 1/4 模型并对其进行网格剖分,如图 2 所示。

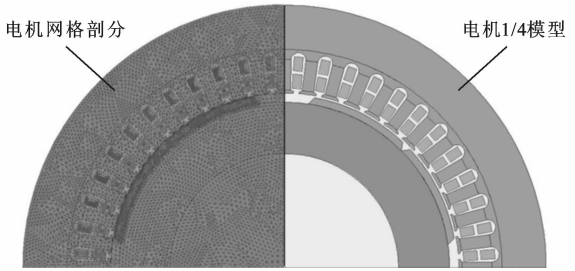


图 2 电机模型及网格剖分示意图

本文电机定转子采用 DR510-50 硅钢片^[16],永磁体材料为 N35UH。

为了对电机各部分的损耗进行对比分析,需要对电机定子铁心进行区域划分,其中定子铁心分为齿顶、齿身、齿轭交界处以及轭部 4 个区域,定子区域划分如图 3 所示。

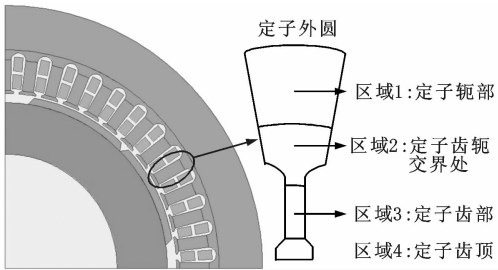


图 3 定子环形区域划分图

经计算得到 $i_d = 0$ 矢量控制时的激励电压与功角,带入有限元软件中进行仿真,得到磁力线分布如图 4 所示。由图 4 可知,该电机磁力线呈四极分布,电机各部分漏磁较少,磁力线分布符合仿真计算要求,可进一步对电机所需数据进行求解。在定子 4 个区域分别选取 4 条路径,这 4 条路径要尽量选取为所分析区域的中间位置,并对这些路径上的磁密进行计算分析,以便证实电机各部分损耗计算的准确性。

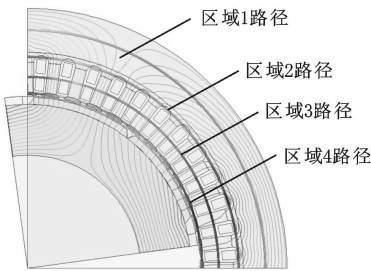


图 4 磁力线分布图

2.4 电机损耗数值计算及分析

2.4.1 定子不同区域铁耗分析 通过有限元软件进行仿真计算,得到电机各部分损耗曲线。由于在

启动过程中电机损耗曲线波动较大^[17],但在 0.4 s 后电机运行状态达到稳定,因此本文只对 0.4 s 后电机运行状态稳定时的各部分损耗进行分析。提取电机定子轭部损耗-时间曲线,如图 5 所示。

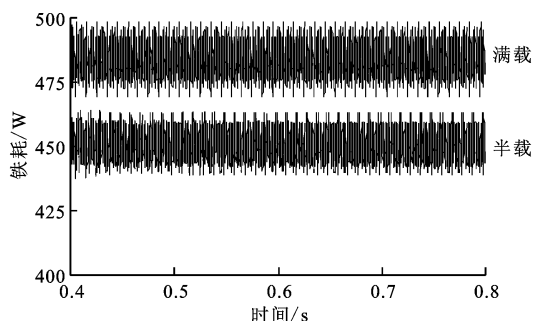


图 5 不同工况下定子轭部铁耗-时间曲线

由图 5 可知,在电机运行状态稳定时,满载时电机定子轭部铁耗为 482.22 W,半载时电机定子轭部铁耗为 449.09 W,虽然此时电机处于稳定运行状态。但铁耗曲线仍有微小的波动,由于电机铁耗为磁滞损耗与涡流损耗之和,由式(2)可知,电机定子铁耗应该与磁密的平方成正比,因此需要验证电机铁耗与磁密的关系,进而找出产生电机铁耗波动的原因。在以往的磁密分析中,通常只会对一条路径上的磁密-圆周位置曲线或者某一点的磁密-时间曲线进行计算分析,很少对路径上的磁密-时间曲线进行分析。本文得到的损耗曲线基本都是损耗-时间曲线,因此只有提取路径上的磁密-时间曲线才能更充分地说明电机铁耗随磁密的变化关系。本文提出一种新的提取路径上磁密-时间曲线的方法,经验证该方法与以往对磁密进行面域积分求取平均磁密的方法所得结果相同,因此该方法具有准确性。

本文以电机定子轭部为例做详细证明,验证电机铁耗与磁密的变化关系。依据数值计算及仿真分析,在满载及半载两种工况下,分别提取 0.4~0.8 s 间的一簇定子轭部(区域 1 路径)磁密-圆周位置曲线,如图 6 及图 7 所示。

由图 6 和图 7 对比可知:

(1)在不同工况下,电机轭部磁密曲线均呈正弦趋势变化;

(2)在磁场中,由于磁密曲线不单由一条基波曲线组成,而是由基波曲线和大量其他次谐波曲线共同合成,因此磁密曲线峰值处会出现较大波动;

(3)由磁密曲线与图 4 中选取的路径相比可知,4 个极所在位置处磁密波动最大;

(4)由于在不同工况下,磁密曲线的变化规律一

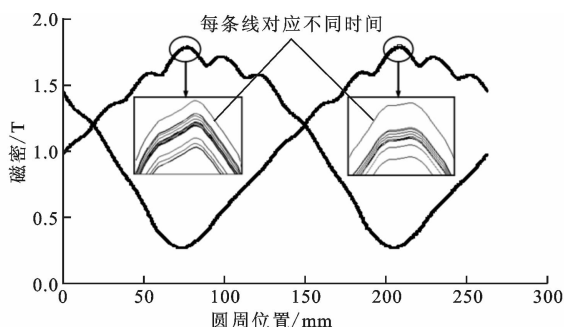


图 6 满载时 0.4~0.8 s 间的定子轭部磁密-圆周位置曲线

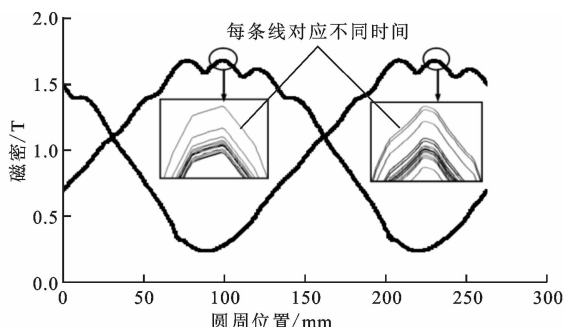


图 7 半载时 0.4~0.8 s 间的定子轭部磁密-圆周位置曲线

致、幅值变化微小,因此可知负载变化对磁密曲线的影响很小。

为了研究由于磁密变化而引起的铁耗波动,现分别对满载及半载两种工况下的一簇磁密-圆周位置曲线提取不同时间上的磁密平均值,然后画出定子轭部不同工况下平均磁密-时间的曲线,如图 8 所示。

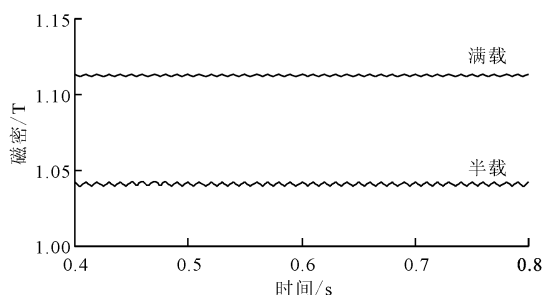


图 8 不同工况下定子轭部平均磁密-时间的曲线

由图 5 和图 8 对比可知,在电机达到稳定运行状态时,定子轭部铁耗的波动趋势与定子轭部平均磁密波动趋势相一致,因此证明了电机铁耗与磁密虽然不是呈线性关系,但电机铁耗确实随磁密的变化而变化,铁耗曲线的波动是由磁密曲线的波动产生的。

由于已对电机定子部分进行径向分块,因此得到定子铁心不同区域铁耗分布如表 1 所示。

表 1 定子铁心不同区域铁耗分布表

区域	满载		半载	
	铁耗/W	比例/%	铁耗/W	比例/%
定子轭部	482.22	65.1	449.09	65.3
定子齿轭 交界处	72.11	9.7	68.97	10.0
定子齿部	154.39	20.8	141.76	20.6
定子齿顶	32.76	4.4	28.30	4.1
定子总铁耗	741.48		688.12	

由表 1 可知,由于电机铁耗为不变损耗,因此电机定子总铁耗受负载变化的影响较小。为形象地说明不同工况下电机定子铁心各个区域的铁耗分布情况,现给出满载及半载两种工况下定子铁心各个区域的铁耗分布情况,如图 9 和图 10 所示。

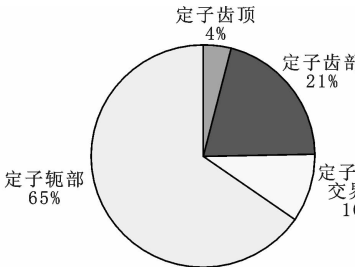


图 9 满载时不同区域定子铁耗分布情况

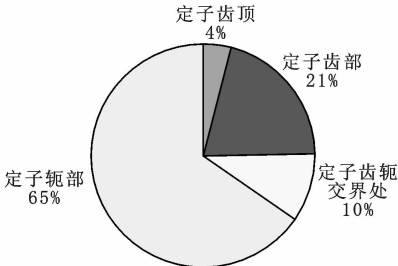


图 10 半载时不同区域定子铁耗分布情况

2.4.2 电机总损耗分析 根据以上铁耗的计算分析结果及有限元计算原理,进一步对电机在不同工况下其他部分的损耗进行仿真计算,计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知满载及半载两种工况下电机各部分的损耗数据,其中风摩损耗认为是定值 500 W,杂散损耗按总输入功率的 2%计。转子铁耗为转子磁滞损耗与转子涡流损耗之和,满载时转子铁耗为 13.13 W,半载时转子铁耗为 10.45 W。为形象地说明不同工况下电机总损耗的分布情况及各部分损耗随负载变化的规律,现给出满载及半载两种工况

下电机各部分损耗的分布情况,如图 11 和图 12 所示。

表 2 不同工况下的损耗数据

参数	满载	半载
输入功率/W	55 261.28	26 213.13
定子铁耗/W	741.48	688.12
定子铜耗/W	793.60	200.40
转子磁滞损耗/W	0.33	0.25
转子涡流损耗/W	12.80	10.20
永磁体涡流损耗/W	106.50	86.40
风摩损耗/W	500.00	500.00
杂散损耗/W	1 105.23	524.26
总损耗/W	3 259.94	2 009.63
效率/%	94.1	92.3

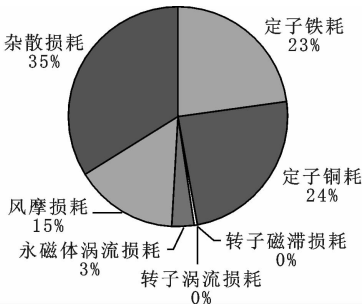


图 11 满载时电机损耗分布情况

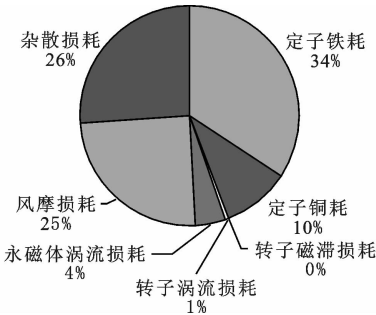


图 12 半载时电机损耗分布情况

2.5 实验数据对比

为了验证仿真结果的准确性及研究方法的合理性,现选取 A 相电流仿真结果与实验结果进行对比分析,实验装置见图 13。

由图 14~图 17 对比可知,在满载及半载两种工况下,A 相电流的仿真波形与实验波形形状相似,周期相同,并且均含有一定量的谐波。为进一步证明仿真的准确性,现提取满载及半载两种工况下 A 相仿真电流与实验电流的有效值进行对比,对比结

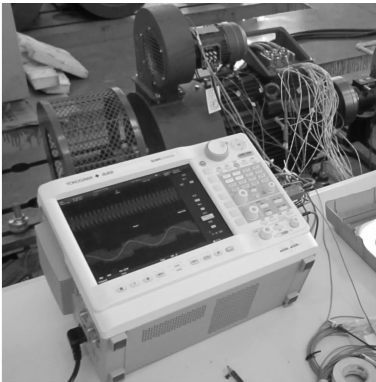


图 13 实验装置图

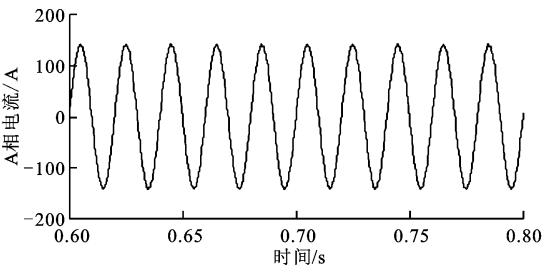


图 14 满载时 A 相仿真电流

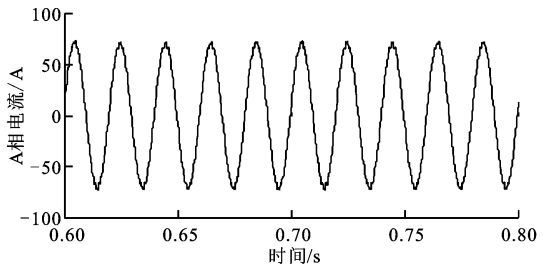


图 15 半载时 A 相仿真电流

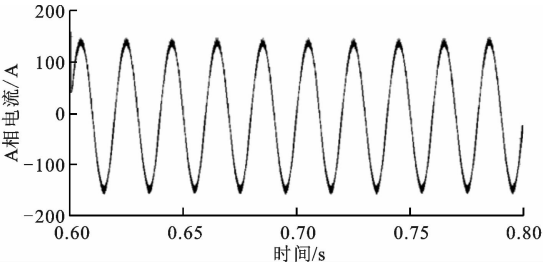


图 16 满载时 A 相实验电流

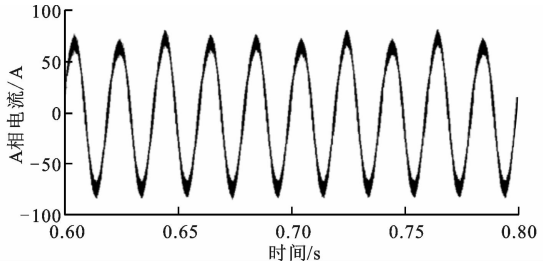


图 17 半载时 A 相实验电流

果如表 3 所示。

表 3 仿真结果与实验结果的对比

参数	满载		半载	
	仿真	实验	仿真	实验
A 相电流/A	99.59	102.73	50.13	51.78
误差/%	3.1		3.2	

由表 3 可知,在满载及半载两种工况下 A 相电流的误差分别为 3.1% 和 3.2%,仿真结果与实验结果吻合,因此仿真结果准确合理。

3 结 论

(1)电机铁耗主要分布在定子侧,转子铁耗很小,满载时定子铁耗占总铁耗的 98.3%,半载时定子铁耗占总铁耗的 98.5%。

(2)定子各区域铁耗比例的大小要由所分区域大小决定,但电机定子各区域大小固定后,各区域在不同工况下的铁耗比例基本不变,按本文所分区域计算定子铁耗分布由大到小依次为定子轭部占 65%、定子齿部占 21%、定子齿轭交界处占 10%、定子齿顶占 4%。

(3)转子铁耗主要为涡流损耗,满载时转子上的涡流损耗占转子总铁耗的 97.5%,半载时转子上的涡流损耗占转子总铁耗的 97.6%。

(4)涡流损耗主要分布在永磁体上和转子上,其中永磁体上的涡流损耗大于转子上的涡流损耗,满载时永磁体上的涡流损耗占总涡流损耗的 89.3%,半载时永磁体上的涡流损耗占总涡流损耗的 89.4%。

(5)随着负载的降低,定子铁耗占总损耗的比例逐渐增加,满载时定子铁耗占总损耗的 22.7%,半载时定子铁耗占总损耗的 34.2%。

(6)计算结果与实测值相吻合,误差满足工程实际要求,验证了本文分析结果及研究方法的正确性。

参考文献:

[1] 寿海明,冀路明,马守军. 现代船用推进电机技术研究 [J]. 船电技术, 2007(1): 36-39.
SHOU Haiming, JI Luming, MA Shoujun. Research on modern marine propulsion motor technology [J]. Marine Electric & Electric Technology, 2007(1): 36-39.

[2] 王鑫,李伟力,程树康. 永磁同步电动机发展展望 [J]. 微电机, 2007, 40(5): 69-72.

- WANG Xin, LI Weili, CHENG Shukang. Development and prospect of permanent magnet synchronous motor [J]. Micromotors Servo Technique, 2007, 40(5): 69-72.
- [3] 鑫存海, 李亚旭. 国外船用永磁电动机的研制及其应用前景 [J]. 船电技术, 2000(4): 1-6.
- XIN Cunhai, LI Yaxu. Development and application of foreign marine permanent magnet motor [J]. Marine Electric & Electric Technology, 2000(4): 1-6.
- [4] 任俊杰, 刘彦呈, 赵友涛, 等. 船用大功率永磁电机矢量控制方案的比较 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(5): 32-37.
- REN Junjie, LIU Yancheng, ZHAO Youtao, et al. Research on the different vector control schemes with larger power marine PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(5): 32-37.
- [5] 丁文, 高琳, 梁得亮, 等. 永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真 [J]. 微电机, 2010, 43(12): 66-71.
- DING Wen, GAO Lin, LIANG Deliang, et al. Modeling and simulation of vector control system for permanent magnet synchronous motors [J]. Micromotors Servo Technique, 2010, 43(12): 66-71.
- [6] 丁树业, 孙兆琼, 苗立杰, 等. 永磁风力发电机流体流动及传热性能数值研究 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16(8): 74-80.
- DING Shuye, SUN Zhaoqiong, MIAO Lijie, et al. Numerical investigation of fluid flow and heat transfer performance for permanent magnet wind generator [J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(8): 74-80.
- [7] 邹慧. 永磁同步电动机矢量控制仿真研究 [J]. 四川电力技术, 2010, 33(1): 12-15.
- ZOU Hui. Simulation research on vector control of permanent magnet synchronous motor [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2010, 33(1): 12-15.
- [8] 邹继斌, 李建军, 徐永向, 等. 驱动方式对永磁无刷直流电机损耗的影响 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 43-47.
- ZOU Jibin, LI Jianjun, XU Yongxiang, et al. Influences of drive strategies on the loss of permanent magnet brushless direct current motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 43-47.
- [9] 胡笏, 罗应立, 李志强, 等. 永磁电动机不同运行条件下的损耗研究 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 11-16.
- HU Jia, LUO Yingli, LI Zhiqiang, et al. Investigation of losses in the permanent magnet synchronous motor under different operation conditions [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 11-16.
- [10] 赵海森, 罗应立, 刘晓芳, 等. 异步电机空载铁耗分布的时步有限元分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 99-106.
- ZHAO Haisen, LUO Yingli, LIU Xiaofang, et al. Analysis on no-load iron losses distribution of asynchronous motors with time-stepping finite element method [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 99-106.
- [11] LI Liyi, HUANG Xuzhen, KAO Baoquan, et al. Research of core loss of permanent magnet synchronous motor (PMSM) in AC servo system [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 602-607.
- [12] MADEMLIS C, MARGARIS N. Loss minimization in vector-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(6): 1344-1347.
- [13] 唐任远. 现代永磁电机 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 248-254.
- [14] BERTOTTI G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 621-630.
- [15] 赵博, 张洪亮. Ansoft 12 在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 51-52.
- [16] 王秀和. 永磁电机 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2011: 319-320.
- [17] 唐任远. 特种电机原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 33-38.

(编辑 杜秀杰)