

# 定子槽口宽度对同步电机永磁体涡流损耗影响

张承宁, 吴晓鹏, 董玉刚, 王芳

(北京理工大学 电动车辆国家工程实验室, 北京 100081)

**摘要:** 采用二维时步有限元法,系统地分析变频供电条件下高功率表贴式永磁同步电机定子槽口宽度对电机漏抗、功率因素、绕组电流、气隙磁密等参数的影响,从而确定永磁同步电机(PWM)波供电下槽口宽度对永磁体涡流损耗的影响。分析表明,定子槽口宽度由6.0 mm变为2.5 mm,电机漏抗增加,由高直流母线电压变频供电引起的电枢纹波电流得到较好抑制,高次谐波电流得到很好过滤,气隙磁密高次谐波幅值减小,永磁体涡流损耗减小可减小近40%。同时,对两台不同槽口宽度样机进行永磁体温升试验,验证了分析方法和计算结果的正确性。

**关键词:** 永磁体涡流损耗; 有限元法; 永磁同步电机; 变频供电

**中图分类号:** TM 351

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-0645(2013)12-1239-04

## Effect of Slot Opening on Eddy Current of Permanent Magnet in High Power Permanent Magnetic Synchronous Motor Driven by Inverter

ZHANG Cheng-ning, WU Xiao-peng, DONG Yu-gang, WANG Fang

(National Engineering Laboratory for Electric Vehicle, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The 2-D time-stepping finite element method is adopted to systematically analyze the effect of slot opening on motor parameters like electrical leakage reactance, power factor, winding current and air gap flux density of high power surface mount type PMSM which is driven by inverter. Thereby, the effect of slot opening on eddy current loss in permanent magnets is determined. Analysis shows that while the width of slot opening decreases, the leakage reactance increases. Thus the ripple current caused by PWM wave is effectively restrained and the higher harmonic current is effectively filtered. In consequence, the amplitude of the high order harmonic components of air-gap flux density reduces, leading to the decrease of eddy current loss in permanent magnets. Meanwhile, through the temperature-rise test of permanent magnets of two different PMSMs with different slot openings, the validity of this analysis method and results are proved.

**Key words:** eddy current loss in permanent magnet; finite element method(FEM); permanent magnetic synchronous motor; inverter driving

提高车用永磁同步电机单机容量及功率密度对简化电动汽车传动系统,提升车辆动力性能有着重要的意义。然而对200 kW表贴式永磁同步电机样机试验发现,PWM供电、高速即基波频率533 Hz条件下,即使轻负载断续运行20 min,电机发热仍

然严重,其中永磁体温升尤为剧烈,可由21℃上升至125℃。有研究者指出PWM供电下的定子谐波电流所引起的电枢反应使得转子损耗和永磁体涡流损耗成为威胁电机安全可靠运行的最大隐患<sup>[1]</sup>。因此,本文以减小永磁体涡流损耗为目标,通过二维时

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175040);广东省教育部产学研结合资助项目(2011A090200077)

作者简介: 张承宁(1963—),男,教授,博士生导师,E-mail:mrzhchn@bit.edu.cn.

通信作者: 吴晓鹏(1987—),男,博士生,E-mail:3120100189@bit.edu.cn.

步有限元法计算损耗值,分析定子槽口宽度对电机交直流电抗、气隙磁密、功率因素等的影响,明确其对电枢反应的减弱作用以及对电机产生的不良影响.

在分析永磁体涡流损耗方面,国内外学者做了较为深入的研究.谢菲尔德大学朱自强教授推导了分数槽无刷直流电机永磁体涡流损耗解析表达式<sup>[2-3]</sup>;徐向永等<sup>[4-5]</sup>则提出了PMSM永磁体涡流损耗解析表达式.随着损耗计算准确度的提高,损耗影响因素分析也越来越完善.Yamazaki等<sup>[6]</sup>指出,在高速运行下永磁体涡流损耗主要由载波频率所产生,载波频率越低,定子电流谐波成分越高,损耗越严重;通过增加气隙长度的方法来减小永磁体涡流损耗.然而,上述文献中都较少提及定子槽口宽度对永磁体涡流损耗的影响分析.在传统工频供电电机设计过程中,定子槽口宽度一般根据经验进行选择.槽口过窄导致绕组下线困难;而槽口宽度过宽将导致齿谐波增加,电机齿槽转矩增加,转矩脉动升高<sup>[7-8]</sup>.

## 1 有限元模型

PMSM 永磁体的涡流场分析属于似稳电磁场分析问题,因此不考虑位移电流密度与传导电流密度的影响,不考虑电磁场变化所产生的磁场.采用二维有限元法,故忽略电机端部对涡流损耗的影响.

简化文献[9]推导应用矢量  $\mathbf{A}$  描述 PMSM 求解二维磁场的定解问题,得到 200 kW 电机模型二维磁场求解模型

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -J_s - J_m - J_e, \\ \mathbf{A}_z|_{L_1} = -\mathbf{A}_z|_{L_2}, \\ \mathbf{A}_z|_{S_1} = 0, \\ \mathbf{A}_z(x, y, \tau_0) = \mathbf{A}_{z_0}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mu$  为永磁体相对磁导率,200 kW 电机采用永磁体材料牌号为 YXG30,  $\mu = 1.03$ ;  $\mathbf{A}_z$  为矢量磁密  $z$  轴分量;  $J_s$  为定子绕组电流密度;  $J_m$  为永磁体等效电流密度;  $J_e$  为永磁体内的涡流密度;  $\tau_0$  为起始时刻;  $S_1$  和  $S_2$  分别为 1/6 模型定子外侧界面;  $L_1$  和  $L_2$  分别为 1/6 模型两侧界面.

为准确计算出电机内的磁场的谐波特性,必须要把一个电周期内的离散点设置得足够多.以一个正弦波用 10 个离散点描述,那么时间步长为

$$\Delta t = 1/(10f), \quad (2)$$

式中  $f$  为谐波频率.

在 1 个电机周期内应用时步有限元法,可得每一时步永磁体涡流密度为

$$J_{t_n} = -\sigma(A_n - A_{n-1})/\Delta t, \quad (3)$$

式中  $\sigma$  为永磁体电导率.

一个周期内永磁体的平均涡流密度为

$$J = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |J_{t_n}|. \quad (4)$$

永磁体内涡流损耗密度为

$$p_e = J^2/\sigma. \quad (5)$$

永磁体内涡流损耗为

$$P_E = \int_V p_e dV. \quad (6)$$

式中:  $N$  为时步有限元求解步数;  $V_e$  为永磁体体积.

## 2 槽口宽度对电机参数影响

定子槽口宽度设定分别为 2.5, 4.0, 6.0 mm; 直流母线  $U_d = 700$  V, 调制比  $M = 0.49$ , 转速  $n = 4300$  r/min, 载波频率  $f_c = 5$  kHz, 电机保持轻负载. 重点分析各槽口尺寸下绕组电流波形及谐波含量, 电机漏抗  $L_m$ , 绕组电流有效值  $I_{rms}$ , 绕组电流基波有效值  $I_{fund,rms}$ , 功率因素  $\cos \varphi$ , 以及气隙磁密的变化.  $\cos \varphi$  通过基波电压与基波电流相位计算得到.

图 1 为槽口宽度 2.5, 6.0 mm 时, A 相绕组电流谐波成分图. 可以看出, 由于采用 PWM 供电, 高直流母线电压导致绕组电流中纹波电流大, 高次谐波成分高. 傅里叶分析结果表明, 绕组电流中 45, 47 次谐波含量最高, 其次为 21 和 25 次谐波. 而槽口宽度的减小, 可使此 4 次谐波幅值都有所减小, 对其他各次谐波影响较小; 45 次谐波幅值由 55 A 减小为 45 A, 21 次谐波则由 47 A 减小为 40 A.

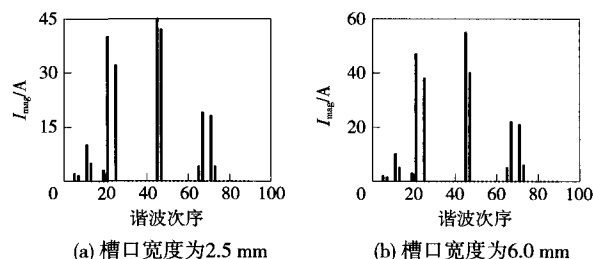


图 1 不同槽口宽度时 A 相绕组电流谐波成分  
Fig. 1 Harmonic component of winding current of phase A under different slot openings

各槽口宽度下  $L_m$ ,  $I_{rms}$ ,  $I_{fund\_rms}$ ,  $\cos \varphi$  数值如表 1 所示.

表 1 不同槽口宽度下电机主要参数

Tab. 1 Parameters under different slot openings

槽口宽度/mm	$L_m/\mu\text{H}$	$I_{rms}/\text{A}$	$I_{fund\_rms}/\text{A}$	$\cos \varphi$
2.5	0.071 043	69.60	21.4	0.141
4.0	0.066 029	76.20	22.2	0.144
6.0	0.061 604	83.71	23.2	0.148

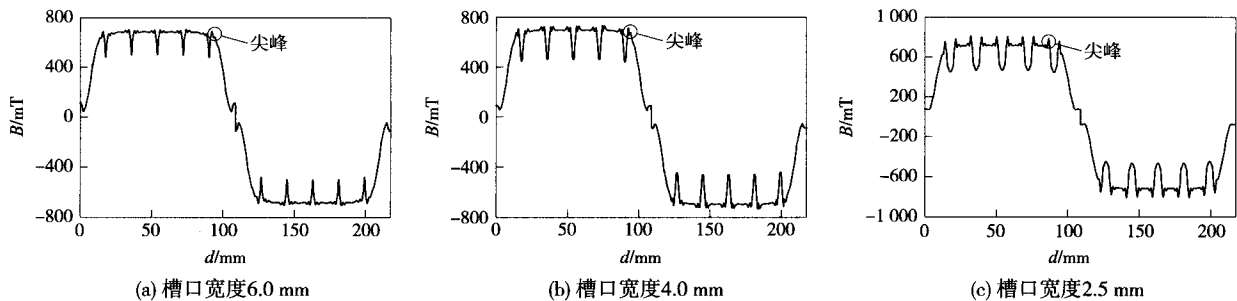


图 2 不同槽口宽度下的一对极下气隙磁密

Fig. 2 Two poles air-gap flux density when slot openings are different

容易看出,由于定子开槽及 PWM 供电的影响,槽口边缘位置气隙磁密突变严重,有明显的尖峰,而随着槽口宽度的增加,尖峰将减小. 傅里叶分析结果如表 2 所示. 可以看出,槽口宽度的大小对低次谐波影响不大,而随着槽口的减小,13,23,25 次谐波明显减小.

表 2 气隙磁密傅里叶分析结果

Tab. 2 FFT on air-gap flux density

谐波次数	不同槽口宽度各次谐波分量幅值/mT		
	6.0 mm	4.0 mm	2.5 mm
1	826.23	828.65	829.28
13	93.28	62.80	44.29
15	34.12	26.86	21.51
23	56.48	33.66	15.73
25	56.62	36.81	16.97

造成上述原因在于槽口减小,电机漏抗增加,从而对 PWM 波引起的高次绕组谐波起到了较好的滤波作用,使得高次谐波电流引起电枢反应减弱,槽口边缘的突变相应减小.

### 3 永磁体损耗计算结果

通过有限元法求解计算,得到相同运行条件下,不同定子槽口宽度下,永磁体涡流损耗随着槽口宽度的减小,永磁体涡流损耗明显减小,4 300 r/min 时,由最大 6.0 mm 时的 4.9 kW 减小到 2.5 mm 时的 3.1 kW,增幅达到 36.7%. 然而,以减小槽口宽

随着槽口宽度的减小,电机的漏抗增大,  $I_{fund\_rms}$  变化不大,而  $I_{rms}$  明显减小,  $\cos \varphi$  也相应减小. 说明电机漏抗的增加,对绕组电流纹波电流起到了一定抑制作用,对绕组电流高次谐波分量起到了较好的滤波作用,其代价是使得电机功率因素下降,输出功率减小. 槽口宽度分别为 2.5, 4.0, 6.0 mm 时,一对极下气隙磁密分别如图 2 所示.

度的方式减小永磁体涡流损耗代价是电机功率因素下降,相同输入电压下,无功功率增加,无法输出相同功率. 然而,由于使用 PWM 变频供电,可以通过提高调制比,以提高输入电压的方式补偿功率因素下降的影响,保证功率输出;此外,无功功率部分可被逆变器吸收. 因此,在高功率电动汽车用永磁同步电机设计过程中,可以选择尽可能小的槽口开度或选用磁性槽楔以避免永磁体发热严重,保证电机正常运行.

### 4 试验验证

课题组在原来槽口宽度为 6.0 mm 的 200 kW 电机的基础上,结合上述分析结果,又试制了一台槽口宽度为 2.5 mm 的样机,并对两台电机进行永磁体温升试验. 试验方法如下:电机控制器参数与仿真一致,电机 4 300 r/min 轻负载运行,每运行 3 min,控制器断开,使电机自然降速到 2 500 r/min 及 2 000 r/min 时测量空载反电势,断续运行 20 min 后停机,通过永磁体材料温度特性,求取电机永磁体温升值. 同时,在电机运行过程中,分别测量电机电流值,基波电流及调制比. 结果如表 3 所示.

对于牌号为 YXG30 永磁体,反电势每减低 3%,温度升高 100%. 计算可得,槽口宽度为 6.0 mm PMSM,断续运行 20 min,永磁温升 104 °C. 而对于 2.5 mm PMSM,永磁体温升则为 92 °C. 两

次试验定子温度差别不大,温升分别为 28.1℃和 26.2℃. 证明减小槽口宽度可以抑制永磁体发热.

表 3 槽口宽度为 6.0, 2.5 mm 时永磁体温升试验数据  
Tab. 3 Data of temperature-rise test when slot opening is 6.0, 2.5 mm

槽宽/mm	t/min	反电势/V		定子温度/℃
		2 500	2 000	
6.0	0	288	231	21.0
	6	284	228	35.7
	12	282	226	47.6
	20	279	223	59.1
2.5	0	288	231	22.0
	6	285	230	34.9
	12	283	227	47.0
	20	280	225	58.2

同时对试验数据与仿真数据进行比较,6.0 mm PMSM 实际绕组电流值与仿真电流值分别为 80.0 A 及 83.7 A,2.5 mm PMSM 实际绕组电流值与仿真电流值分别为 72.0 A 及 69.6 A,实际绕组电流值与仿真电流值接近,证明了有限元仿真方法的有效性和正确性.

## 5 结束语

由于槽口宽度减小,电机漏抗增加,PWM 波引起的高次绕组谐波电流被较好过滤,使得气隙磁密高次谐波分量幅值明显减小,最终永磁体涡流损耗减小. 虽然电机漏抗的增加会导致功率因素下降,但是 PWM 供电方式使得功率因素下降的部分可以通过提高输入电压补偿,因此为减小永磁体发热,电动汽车用永磁同步电机设计时可定子槽口宽度尽可能小或者使用磁性槽楔. 然而,槽口宽度的改变不仅影响绕组漏磁,其等效气隙宽度也会随之改变,交直轴反应电抗同样随之改变,从而影响电机的齿槽转矩及转矩特性等,对于此方面的研究将进一步深入并完善.

### 参考文献:

[1] 沈启平. 车用高功率密度永磁同步电机的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2012.  
Shen Qiping. Study on high power density permanent magnetsynchronous motor for electric vehicles application [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012. (in Chinese)

[2] Ishak D, Zhu Z Q, Howe D. Eddy-current loss in the rotor magnets of permanent-magnet brushless machines having a fractional number of slots per pole[J]. IEEE Trans Magn, 2005,41(9):2462-2469.  
[3] Kawase Y, Ota T, Fukunaga H. 3-D Eddy current analysis in permanent magnet of interior permanent motors[J]. IEEE Trans Magn 2000, 36(4):1863-1866.  
[4] 徐向永,胡建辉,邹继斌. 表贴式永磁同步电机电机转子涡流损耗解析计算[J]. 电机与控制学报,2009,13(1):63-66.  
Xu Xiangyong, Hu Jianghui, Zou Jibin. Analytical calculation of rotor eddy current losses of surface-mounted PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2009,13(1):63-66. (in Chinese)  
[5] Takahashi I, Koganezawa T, Su G J. A super higher speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1994, 30(3):683-690.  
[6] Yamazaki K, Shina M, Kanou Y, et al. Effect of eddy current loss reduction by segment of magnets in synchronous motors; difference between interior and surface type[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009,45(10):4756-4759.  
[7] Zhu Z Q, Schofield N K, Howe D. Analytical prediction of rotor eddy current loss in Brushless machines equipped with surface-mounted permanent [C] // Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS' 2001. Shenyang, China; [s. n.], 2001:806-809.  
[8] 杨玉波,王秀和,朱常青. 电枢槽口宽度对内置式永磁同步电机齿槽转矩的影响[J]. 电机与控制学报,2011,15(7):21-25.  
Yang Yubo, Wang Xiuhe, Zhu Changqing. Effect of slot opening on the cogging torque of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2011,15(7):21-25. (in Chinese)  
[9] 张洪亮. 永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.  
Zhang Hongliang. Iron losses and transient temperature field of permanent magnetic synchronous motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)

(责任编辑:孙竹凤)