

含径向通风道的永磁同步发电机电磁有限元分析

孔祥利

(西安辰安电气有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 在设计含径向通风道的电机时, 计算铁心的有效长度需考虑径向通风道对铁心长度的损失, 对于异步电机, 已经有成熟的数学方法, 但对于永磁同步发电机(PMSG), 目前没有成熟的数学方法计算径向通风道对铁心长度的损失。结合 ANSYS Maxwell 软件的二维静态求解器, 提出一种通过计算电机轴向气隙磁密分布的方法, 得出计算含径向通风道的 PMSG 有效铁心长度的方法。仿真数据与试验数据高度吻合, 证明了该方法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 径向通风道; 铁心有效长度; 有限元分析; 气隙磁密

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)07-0053-05

doi: 10.12177/emca.2021.058

Finite Element Analysis of Electromagnetic of PMSG with Radial Vent Duct

KONG Xiangli

(Xi'an Chen'an Electrical Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: During the process of designing motors with radial vent ducts, the influence of radial vent ducts on the loss of the iron core length should be considered when calculating the effective length of the iron core. Although there are mature mathematical methods for asynchronous motors, there is no mature mathematical method to calculate the loss width of vent ducts for permanent magnet synchronous generator (PMSG). Combined with the 2D magnetostatic solver of ANSYS Maxwell software, a method for calculating the flux density distribution of motor along the axial direction of gap is proposed. The effective iron core length of PMSG with radial vent duct is obtained, and the simulation data are highly consistent with the experimental data. The effectiveness of this method is proved.

Key words: permanent magnet synchronous generator (PMSG); radial vent duct; effective length of iron core; finite element analysis; air gap flux density

0 引言

随着能源问题的日益突出, 风能作为一种清洁、储量大的可再生能源得到了迅速发展。目前风电领域中应用最为广泛的风力发电机类型是双馈异步风力发电机, 但是复杂且高故障率的滑环系统限制了其发展。与其他类型的发电机相比, 永磁同步发电机(PMSG)具有体积小、质量轻、损耗小、效率高、结构简单、运行可靠等优点。

为了简化结构, 提高发电机的可靠性, 近年来 PMSG 在风力发电机中得到大力发展, 包括直驱

PMSG、中速 PMSG 及高速 PMSG。直驱 PMSG 及中速 PMSG 多采用水冷结构, 电机铁心由硅钢片整体堆叠形成, 而高速 PMSG 多采用空空冷却或空水冷却结构, 电机铁心由硅钢片堆叠成一小段后再整体堆叠在一起, 每一小段之间留有一定的间隙用来通风, 这个间隙称为径向通风道。

对于异步电机, 径向通风道对铁心有效长度的影响有较为成熟的计算方法, 由于 PMSG 的结构、磁场分布和磁场性质与异步电机相比有较大的变化, 因此径向通风道对 PMSG 等效铁心长度的影响没有成熟的计算方法, 给 PMSG 方案设计

收稿日期: 2022-05-19; 收到修改稿日期: 2022-06-20

作者简介: 孔祥利(1984—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为风力发电机设计技术。

带来了较大的困难,影响研发的成功率^[1-3]。

本文结合 Ansys Maxwell 有限元软件,找到一种含径向通风道的铁心长度损失在 PMSG 中的等效方法,为计算含径向通风道的 PMSG 有效铁心长度提供了一种新思路,并在所设计的 2.3 MW 永磁同步风力发电机上得到验证。

1 径向通风道在电机设计中的等效

在电机方案计算和仿真时,当铁心中有径向通风道时,需考虑径向通风道对铁心长度的损失,即需将实际铁心长度等效至无径向通风道时的铁心长度。在铁心长度等效前后,电机的计算电压不变:

$$E = 4.44fNk_w\phi K_\phi \quad (1)$$

式中: E 为电机电压; f 为电机频率; N 为绕组每相串联匝数; k_w 为绕组系数; ϕ 为每极气隙磁通量; K_ϕ 为气隙磁场的波形系数。

且满足:

$$\phi = B_\delta L_{ef} \tau \quad (2)$$

式中: B_δ 为气隙磁密的最大值; L_{ef} 为铁心有效长度; τ 为极距。

根据式(1)可知,等效前后的每极气隙磁通量相等。因此,考虑径向通风道损失的电机铁心长度等效前、后满足关系式:

$$B_\delta L_{ef} = B'_\delta L_1 \quad (3)$$

式中: B'_δ 为等效前的气隙磁密最大值; L_1 为电机实际铁心长度。

在异步电机中,当定、转子径向通风道宽度相同且对齐时,电机铁心有效长度为^[4]

$$L_{ef} = L_1 - N_v \frac{2b_v^2}{5\delta + 2b_v^2} \quad (4)$$

式中: N_v 为定、转子径向通风道数量; b_v 为定、转子径向通风道宽度; δ 为气隙长度。

对于永磁体励磁的电机,在电机数学建模时,气隙磁密沿轴向的分布默认是均匀的,而实际情况是受径向通风道边缘漏磁的影响,气隙磁密沿轴向不均匀分布。为解决此问题,关键在于求取带径向通风道及无径向通风道的气隙磁密沿轴向的分布,通过比较两者的关系,即可根据式(3)求得铁心有效长度。由于电机进行二维有限元仿真时未能考虑端部效应,在建立电机无径向通风道的轴向二维模型时,需将轴向长度设定为不影响

气隙磁密时的长度,并且应该取轴向气隙磁密的最大值。根据以上分析,可以得出电机有效长度的计算式:

$$L_{ef} = \frac{B_{av}}{B_{max}} L_1 \quad (5)$$

式中: B_{av} 为含径向通风道的气隙磁密沿轴向的平均值; B_{max} 为无径向通风道轴向无限长模型中气隙磁密沿轴向的最大值。

2 PMSG 有限元分析

2.3 MW PMSG 为西安辰安电气有限公司批量生产的永磁同步风力发电机,该发电机的基本参数如表 1 所示。

表 1 2.3 MW PMSG 基本参数

参数名称	参数值
发电机功率/kW	2 300
定子电压/V	690
电机极对数	3
电机转速/(r·min ⁻¹)	1 194
电机定子槽数	72
电机绕组匝数	3
绕组并联支路数	6
定子斜槽数	1
铁心长度/mm	865.5
定子每段铁心长度/mm	41.5
定子通风道宽度/mm	10
定子通风道数量	16
转子每段铁心长度/mm	45
转子通风道宽度/mm	5
转子通风道数量	16
永磁体牌号	38UH

2.1 电机铁心有效长度分析

在 ANSYS Maxwell 2D 中以转子磁极中心线沿轴向的剖面建模,只需建立磁钢及导磁部件^[1]。建立发电机含径向通风道的轴向模型时,因 PMSG 轴向与中心线对称,只需建立 1/2 模型,具体如图 1 所示。在模型中, X 轴所在位置($Y=0$)为转子铁心内径沿轴向的分布,为自然边界条件; Y 轴所在位置($X=0$)为电机铁心轴向中心线,为对称边界;因计算结果与实际结果等效,模型 Y 轴

最大处为定子铁心外径沿轴向的分布,为自然边界,求解域边界为 Balloon 边界,永磁体充磁方向及性能参数与实际电机相同^[5]。在静磁场求解器中求得电机磁场磁力线在轴向的分布如图 2 所示,气隙磁密沿轴向的数值曲线如图 3 所示。图 2 和图 3 表明,当 PMSG 含有径向通风道时,由于受通风道端部漏磁的影响,每一段中的气隙磁密中间大两端小,靠近端部的气隙较中间段的小。

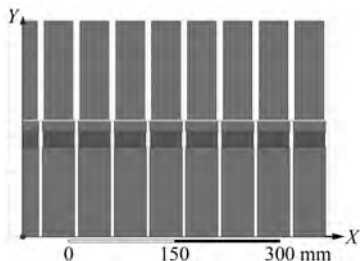


图 1 PMSG 轴向有限元模型

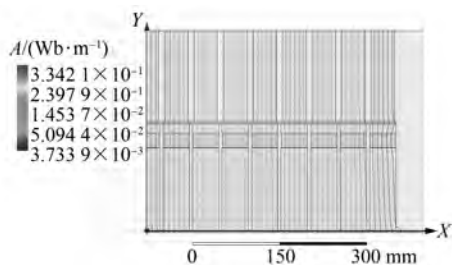


图 2 PMSG 轴向磁力线分布

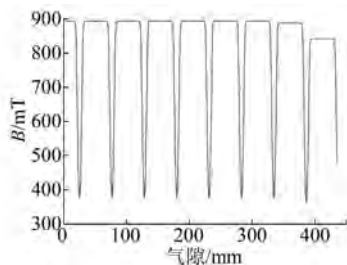


图 3 PMSG 轴向气隙磁密曲线

为了消除端部漏磁对轴向磁密的影响,已知模型长度为 40 000 mm 时的轴向磁密最大值与模型长度为 20 000 mm 时轴向磁密最大值的 1.000 17 倍,本文以模型长度 40 000 mm 等效电机无径向通风道轴向无限长模型(模型如图 4 所示),在静磁场求解器中求得 PMSG 磁场磁力线在轴向的分布如图 5 所示,气隙磁密沿轴向的数

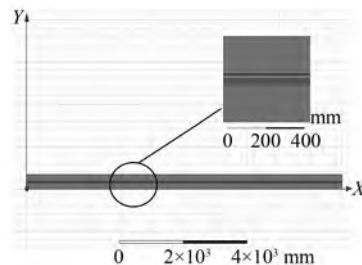


图 4 PMSG 轴向无限长模型

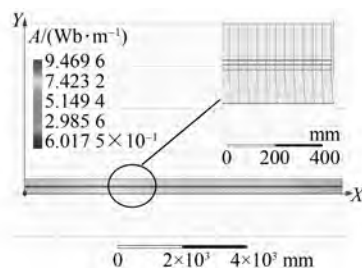


图 5 PMSG 轴向无限长时磁力线分布

值曲线如图 6 所示。

图 5 和图 6 表明,在 PMSG 轴向无限长模型中,气隙磁密仅在端部有减小的趋势,中间部分的气隙磁密相对稳定。图 3 表明 2.3 MW PMSG 含径向通风道时轴向气隙磁密平均值为 0.819 2 T。图 6 表明 2.3 MW PMSG 无径向通风道轴向无限长模型时气隙磁密最大值为 0.951 6 T。由式(5)求得 2.3 MW PMSG 有效铁心长度为 745.9 mm。

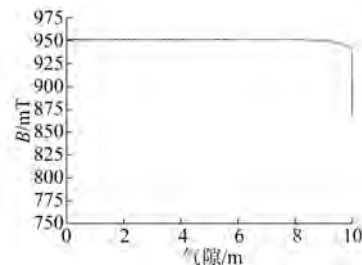


图 6 PMSG 轴向无限长时气隙磁密曲线

2.2 电机有限元仿真

在 Maxwell 中建立图 7 所示的电机有限元模型,将前文得出的铁心有效长度输入到有限元分析中,对该 PMSG 进行空载及负载计算^[4]。计算结果如图 8~图 10 所示,其中空载计算时,设定磁钢温度为 20 ℃,磁钢参数为剩磁密度 $B_r = 1.238$ T,矫顽力 $H_{cb} = 960.6$ kA/m。负载计算时,

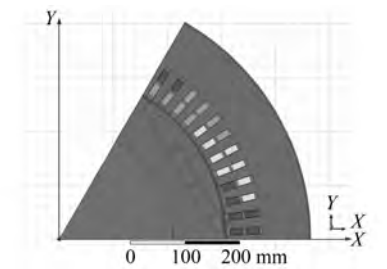


图7 电机1/4有限元模型

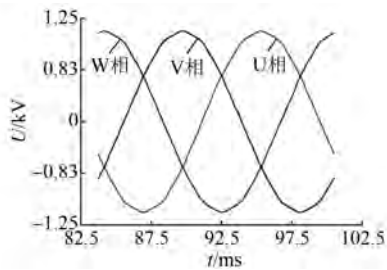


图8 冷态空载反电动势

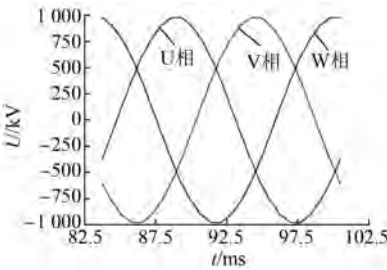


图9 负载端部电压

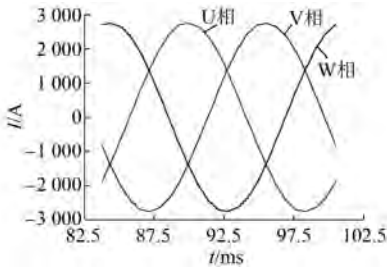


图10 负载电流

根据温度场的计算结果,磁钢温度为70℃,磁钢参数为 $B_r=1.185\text{ T}$, $H_{cb}=909.6\text{ kA/m}$ 。

根据有限元仿真结果,该PMSG在额定转速1 194 r/min时的冷态空载反电动势为770.4 V,磁钢温度70℃时,在额定工作点的定子电流为1 943.5 A。

2.3 试验结果

该2.3 MW PMSG在试验平台进行型式试验,

试验平台如图11所示。试验时环境温度22℃,由于空载试验时发电机绕组电流为0,可以认为此时的环境温度即为磁钢温度,与假设条件相当,冷态空载电压试验结果如图12所示;温升稳定时绕组温度99.8℃,与温升仿真结果相差10℃,可以认为磁钢此时温度为80℃,与仿真假设条件相差10℃,温升稳定时PMSG的负载结果如图13所示。



图11 PMSG试验平台

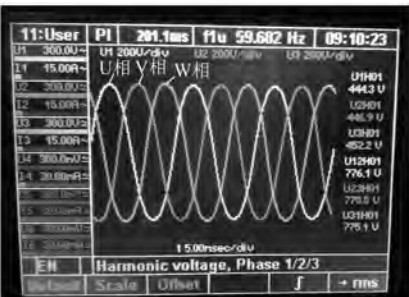


图12 冷态空载反电动势试验结果



图13 负载结果

2.4 结果对比

将仿真结果与试验结果进行整理,如表2所示。对比可以看出,在空载工况下,永磁体在仿真模型中的温度与试验时的温度基本一致,冷态空载反电动势的仿真结果与试验结果高度吻合,在

表 2 仿真结果与试验结果

参数名称	仿真结果	试验结果	仿真误差/%
冷态空载反电动势/V	770.4	775.6	0.67
负载电流/A	1 943.5	1 965.4	1.11

负载工况,由于永磁体沿电机轴向温度分布不均匀,且仿真模型中永磁体的温度比试验时的温度低,仿真结果的负载电流比试验的负载电流小,但误差仅在 1.11% 左右,亦能满足工程设计需要。以上结果证明了该铁心有效长度方法的有效性。

3 结 语

对于含径向通风道的 PMSG,本文根据电机有效长模型中磁通量与实际模型中磁通量一致的原则,提出通过有限元仿真软件计算电机轴向气

隙磁密的平均值与电机无限长模型轴向气隙磁密的最大值以计算永磁电机铁心有效长的方法,最后通过与一台 2.3 MW PMSG 的试验结果对比,证明了该方法的有效性。

【参 考 文 献】

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 成本权,黄守道,高剑,等. 永磁同步电动机电磁参数的有限元分析[J]. 微特电机,2009,37(6):6.
- [4] 黄国治,傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [5] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部

扫码关注

《电机与控制应用》

微信公众号

