

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: T346 **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。

对比分析了感应电机的转子槽口深度和槽配合对转子损耗的影响;文献[8]以定子槽口宽度、转子槽宽、转子槽口高、转子槽深作为设计变量,提出了一种基于电磁-结构耦合分析的异步电机外特性优化方法。上述研究均表明转子结构会对电机损耗特性产生重要影响,但对空载损耗与转子结构的关联性影响未作深入研究。

本文应用理论计算和有限元分析法研究不同转子槽型参数下感应电机的空载损耗变化规律,并结合试验进行验证。

1 理论计算

1.1 空载损耗

感应电机的空载损耗 p_0 主要由铁心损耗 p_v (包括磁滞损耗 p_h 和涡流损耗 p_e)、励磁损耗 p_{Cu1} 、机械损耗 p_{fw} 及附加损耗 p_e 组成^[6]:

$$p_0 = p_h + p_e + p_{Cu1} + p_{fw} + p_e = k_h f B_m^2 + k_e (f B_m)^2 + m I_{m0}^2 R_1 + 6.5 \cdot \left(\frac{3}{p}\right)^2 (D_2)^3 + k_e (f B_m)^{1.5} \quad (1)$$

式中: k_h 为磁滞损耗系数; k_e 为附加损耗系数; f 为电流频率; k_e 为涡流损耗系数,与单个硅钢片的厚度 d 、导电率 σ 有关, $k_e = \frac{\pi^2 \sigma d^2}{6}$; B_m 为磁通密度; m 为相数; I_{m0} 为空载励磁电流; R_1 为定子直流电阻; p 为极对数; D_2 为转子铁心外径。

由式(1)可以看出,通过设计较小的磁通密度和励磁电流可降低空载损耗。

1.2 励磁电流

磁路计算时根据磁路磁动势确定空载励磁电流的 I_{m0} :

$$I_{m0} = \frac{2pF_0}{0.9mNK_{dp1}} \quad (2)$$

式中: F_0 为每极励磁磁动势; N 为每相串联匝数; K_{dp1} 为定子基波绕组系数。

$$F_0 = F_\delta + F_t + F_j = F_\delta + (F_{t1} + F_{t2}) + (F_{j1} + F_{j2}) \quad (3)$$

式中: F_δ 为气隙磁压降, $F_\delta = \frac{K_\delta \Phi \delta}{\alpha_p' \tau l_{ef} \mu_0}$, K_δ 为气隙系数, Φ 为磁通量, δ 为气隙长度, α_p' 为极弧系数, τ 为极距, l_{ef} 为铁心轴向计算长度, μ_0 为空气磁导

率; F_t 为齿部磁压降, $F_t = H_t L_t$, H_t 为齿磁场强度, L_t 为齿磁路计算长度; F_j 为轭部磁压降, $F_j = H_j L_j$, H_j 为轭磁场强度, L_j 为轭磁路计算长度。

又有气隙系数 K_δ :

$$K_\delta = \frac{t(5\delta + b_0)}{t(5\delta + b_0) - b_0^2} \quad (4)$$

式中: t 为齿距; b_0 为槽口宽。

齿磁密 B_t 为

$$B_t = B_\delta l_{ef} t / K_{Fe} l_t' b_t \quad (5)$$

式中: B_δ 为气隙磁密; t 为齿距; K_{Fe} 为铁心叠压系数; l_t' 为铁心长度; b_t 为计算齿宽。

轭磁密 B_j 为

$$B_j = \Phi / 2K_{Fe} h_j' l_j \quad (6)$$

式中: h_j' 为轭部计算高度; l_j 为轭部轴向长度。

转子槽型结构如图1所示。

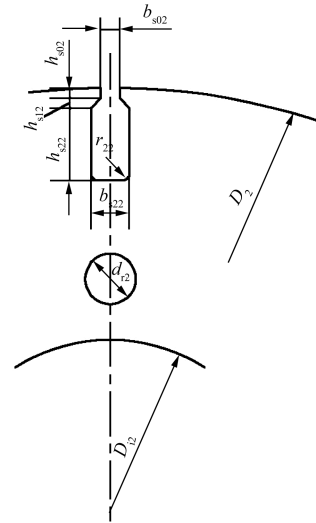


图1 转子槽型结构示意图

转子齿宽 b_{t2} 为

$$b_{t2} = \frac{\pi(D_2 - h_{s02} - h_{s12} - h_{s22})}{Z_2} - b_{s22} \quad (7)$$

转子齿磁路计算长度 L_{t2} 为

$$L_{t2} = h_{s02} + h_{s12} + h_{s22} \quad (8)$$

转子轭部计算高度 h_{j2}' 为

$$h_{j2}' = \frac{D_2 - D_{i2}}{2} - h_{s02} - h_{s12} - h_{s22} + \frac{r_{22}}{3} - \frac{2}{3}d_{v2} \quad (9)$$

转子轭磁路计算长度 L_{j2} 为

$$L_{j2} = \frac{\pi(D_{i2} + h_{j2}')}{2p} \times \frac{1}{2} \quad (10)$$

式中: D_2 为转子外径; D_{i2} 为转子内径; h_{s02} 为转子槽口高; h_{s12} 为转子槽肩高; h_{s22} 为转子槽深; r_{22} 为槽圆角; d_{v2} 为转子的轴向通风孔直径; b_{s22} 为转子槽宽。

由式(3)~式(10)可知,励磁电流、磁密与转子槽型参数有明显关联。其中,转子槽口宽通过与气隙系数的关联关系,影响气隙磁压降,进而影响励磁电流。励磁电流随转子槽口宽的增加而增大;转子槽深、槽宽通过与磁密和磁路长度的关联关系,影响转子的齿部及轭部磁压降,进而影响励磁电流。具体影响程度因槽深和槽宽二者在关系式中的占比不同而呈现出不同的趋势,并在某个取值点达到平衡状态。

1.3 槽漏抗

转子槽型参数变化会影响转子漏抗,因感应电机的气隙 δ 较小,齿顶漏抗可忽略不计,则感应电机的转子漏抗 $X_{\sigma 2}$ 主要是槽漏抗:

$$X_{\sigma 2}=4 \pi f \mu_0 \frac{N^2}{pq} l_{ef} \lambda_{s 2} \quad (11)$$

式中: $\lambda_{s 2}=\frac{h_{s 22}}{3 b_{s 22}}+\frac{h_{s 12}}{b_{s 22}}+\frac{h_{s 02}}{b_{s 02}}+0.785^{[5]}$ 。

由式(11)可得,转子槽型会影响转子漏抗,深窄形槽的转子漏抗增加明显。

对于变频感应电机,设计较大的漏抗,增加感抗,可抑制谐波可削弱空载时铁心中的附加(或杂散)损耗^[5]。

2 转子槽型参数影响分析

采用 ANSYS 电磁软件建立某型号 320 kW 感应电机模型,保持定子槽型、槽配合、气隙、匝数等基本参数不变,在不同转子槽型、转子槽口下,采用 RMxp rt 路算和 MAXWELL 2D 场算方法对电机考核点的电磁场分布及空载损耗影响进行分析。图 2 为电机的仿真模型。

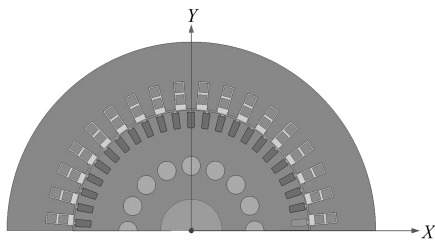


图 2 仿真模型

2.1 转子槽型

为保证电机特性不变,在转子槽截面积保持不变(槽深 $h_{s22} \times$ 槽宽 b_{s22} = 定值)的前提下,转子槽型由宽浅到窄深,计算不同槽深、槽宽下的空载电流及空载损耗。仿真计算结果如表 1 所示。

从图 3~图 4 可以看出(图 4 中取点均位于 $\frac{1}{3} h_{s22}$ 处),励磁电流和转子齿磁密均随着槽型变深窄整体呈下降趋势,对应空载损耗减小。

表 1 不同转子槽型 RMxp rt 计算结果

参数名称	槽型尺寸 $h_{s22} \times b_{s22} / (\text{mm} \times \text{mm})$		
	19.10×8.85	23.09×7.35	26.10×6.53
转子漏抗/ Ω	0.74	0.86	0.96
励磁电流/A	71.6	65.05	62.8
铁耗/kW	3.26	3.29	3.3
风摩耗/kW	0.9	0.9	0.9
总损耗/kW	11.28	10.9	10.8

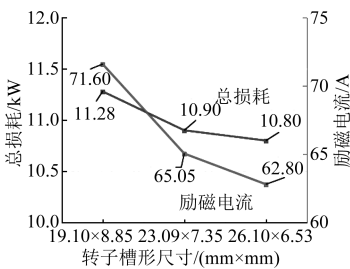


图 3 转子槽型尺寸对磁路的影响

选择转子深窄槽型需综合考虑电机在高速段的运行特性是否变差(电抗大、功率因数降低、过载能力小),另外,因过深窄槽导致的转子机械强度降低问题,也是电磁设计时需考虑的一个重要因素。

2.2 转子槽口形式

保持转子槽型不变,改变转子槽口形式(槽口宽、槽口高),计算不同槽口宽 b_{s02} 和槽口高 h_{s02} 下的励磁电流及空载损耗。仿真计算结果如表 2 所示。

表 2 不同转子槽口尺寸 RMxp rt 计算结果

参数名称	槽口宽 b_{s02} / mm			槽口高 h_{s02} / mm		
	2.30	4.50	8.00	1.60	2.30	4.50
转子漏抗/ Ω	0.895	0.740	0.664	0.700	0.740	0.890
励磁电流/A	69.08	71.60	78.65	70.80	71.60	74.50
铁耗/kW	3.27	3.26	3.23	3.26	3.26	3.25
风摩耗/kW	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
总损耗/kW	11.13	11.28	11.71	11.23	11.28	11.46

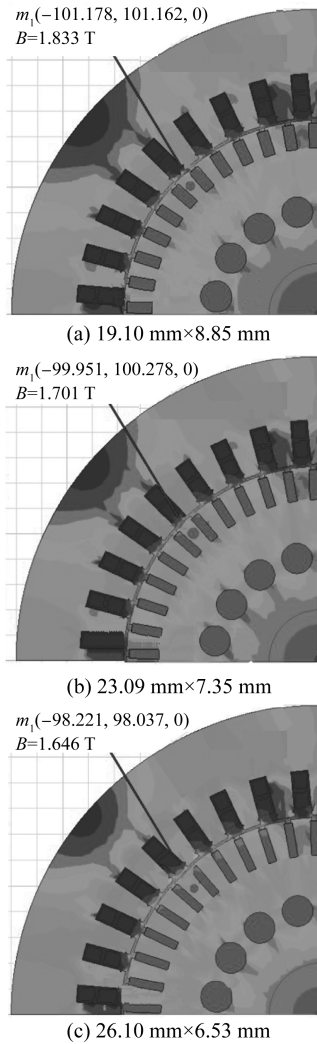


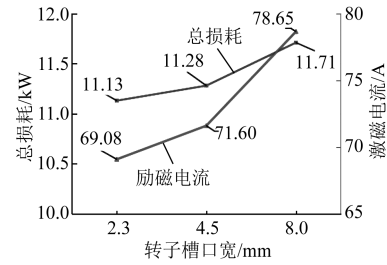
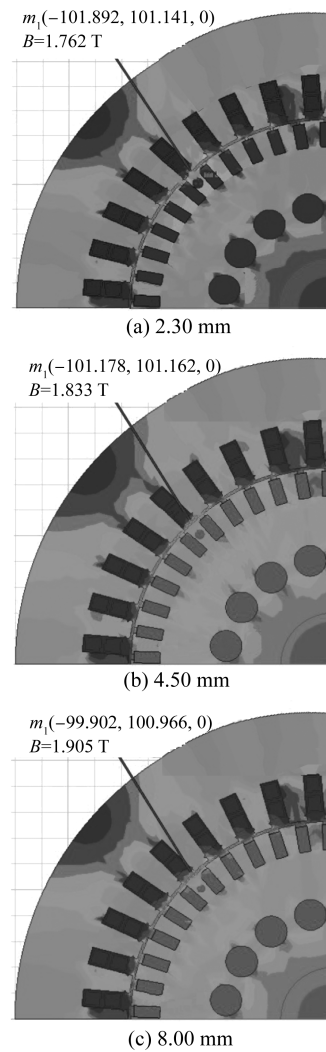
图4 转子槽型尺寸对磁场的影响

由表2可知,槽口高对励磁电流和总损耗的影响较小,故本文不考虑将槽口高度 h_{s02} 作为变量进行分析。

图5和图6为转子槽口宽 b_{s02} 对磁路和磁场的影响。从图5和图6可以看出(图6中取点位均位于 $\frac{1}{3} h_{s22}$ 处),励磁电流和转子齿磁密均随着转子槽口宽减小呈下降趋势,对应空载损耗减小。

根据上述参数计算分析结果,采用综合优化方案(转子槽型 $h_{s22} \times b_{s22}$ 为 23.09 mm $\times$ 7.35 mm,槽口宽 b_{s02} 为 2.30 mm)与原方案对比,结果如表3所示。

图7为采用综合优化方案后对磁场的影

图5 转子槽口宽 b_{s02} 对磁路的影响图6 转子槽口宽 b_{s02} 对磁场的影响

响,从表3及图7可以看出,对比优化前,励磁电流下降了 9.08 A;转子齿磁密由 1.833 T 下降到 1.693 T,下降了 0.140 T;齿部和轭部各部位磁密分布得到改善;对应空载损耗降低了 0.5 kW。

表 3 综合优化方案和原方案的 RMxpirt 计算结果

参数名称	原方案	综合优化方案
转子漏抗/ Ω	0.74	1.02
励磁电流/A	71.60	62.52
铁耗/kW	3.26	3.30
风摩耗/kW	0.9	0.9
总损耗/kW	11.28	10.78

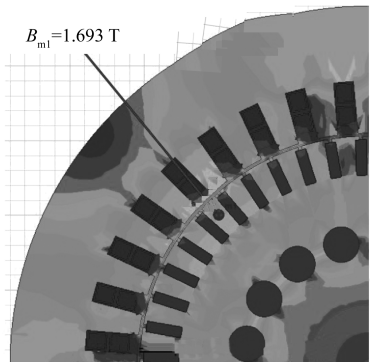


图 7 采用综合优化方案的磁场影响分析

3 试验验证

根据仿真分析结果,以最小化改动原则,对上述的 320 kW 感应电机采取改进措施以降低励磁电流和空载损耗,具体措施为:转子槽型 $h_{s22} \times b_{s22}$ 由 19.10 mm $\times$ 8.85 mm 改为 23.09 mm $\times$ 7.35 mm,同时将转子槽口宽 b_{s02} 由 4.5 mm 变为 2.3 mm。

对改进后的电机进行空载试验,空载电流及空载损耗较改进前均有明显减小,达到预期效果。试验结果如表 4 所示。改进前后电机的空载试验数据曲线,如图 8 所示。

表 4 改进电机的空载试验结果

电压/V	电流/A	功率因数	输入功率/kW
2 400	68.5	0.061 6	17.54
2 300	60.8	0.060 9	14.73
2 000	45.0	0.060 0	9.36
1 610	33.3	0.063 6	5.90
1 150	23.3	0.077 3	3.58

由图 8 可知,改进后感应电机的空载电流和空载损耗明显降低。其中在考核点(116.7 Hz, 2 300 V),励磁电流下降了 2.4 A,空载损耗下降了 0.84 kW,与有限元分析结果基本吻合。改进前,电机实际的铁心饱和系数较大,导致励磁电抗

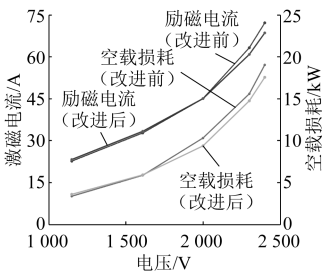


图 8 改进前后电机的空载试验数据曲线

变小,励磁电流增大。

感应电机中,空载磁化电流与满载磁化电流差别不大。负载温升试验表明,在正弦供电和车载变流器供电条件下,改进后电机的定子绕组温升、铁心温度较改进前均有下降。

感应电机搭载变流器现车软件进行地面组合试验,如图 9 所示。图 10 为改进前后电机的特性曲线,可见改进前后电机特性未发生明显变化,且偏差在额定转矩的 $\pm 10\%$,满足车辆运行需求。

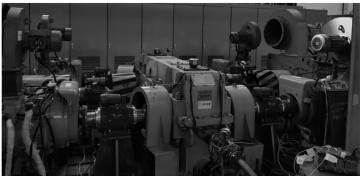


图 9 电机搭载车载变流器的特性试验

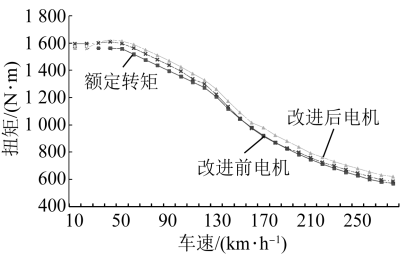


图 10 改进前后电机特性曲线

4 结 语

本文从理论上分析了感应电机转子槽型参数与空载损耗的关联影响。采用 ANSYS RMxpirt 和 Maxwell 2D 软件仿真计算了某 320 kW 感应电机的转子漏抗、励磁电流、空载损耗、磁密分布,分析了不同转子槽型(槽深 $\times$ 槽宽)、转子槽口宽度下,励磁电流和空载损耗的变化规律。试验结果较好地验证了仿真分析的正确性。本文对于深入研究

(下转第 76 页)