

紧凑型变频调速永磁同步电机转子拓扑结构对比分析

吴小夫¹, 韦福东², 吴艳红²

(1. 浙江金龙电机股份有限公司, 浙江 台州 318058;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063)

摘要: 以 1 台 72 槽 6 极内置式变频调速永磁同步电机(VFAS-PMSM)为例, 运用数值法和有限元仿真分析, 从空载反电动势及谐波含量、齿槽转矩波动和损耗等方面对比不同转子拓扑结构对电机电磁性能的影响。另外, 通过考虑径向电磁力对转子应力的影响, 运用数值分析和电磁-结构静力学耦合仿真不同转子拓扑结构时转子铁心的受力及变形情况。通过样机试验, 验证了所设计的内置式 VFAS-PMSM 转子拓扑结构对比分析方法具有一定的指导意义。

关键词: 永磁同步电机; 变频调速; 拓扑结构; 有限元法

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)10-0051-05

doi: 10.12177/emca.2020.127

Comparative Analysis of the Rotor Topological Structure of Compact Variable Frequency Adjustable Speed Permanent Magnet Synchronous Motor

WU Xiaofu¹, WEI Fudong², WU Yanhong²

(1. Zhejiang Jinlong Electrical Machinery Stock Co., Ltd., Taizhou 318058, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Taking a 72-slot 6-pole interior variable frequency adjustable speed permanent magnet synchronous motor (VFAS-PMSM) as an example, the numerical method and finite element simulation analysis are used to compare the influence of different rotor topologies on the electromagnetic performance of the motor from the aspects of no-load back electromotive force, harmonic content, cogging torque fluctuation and loss. In addition, the influence of radial electromagnetic force on the stress of the rotor is considered. The stress and deformation of the rotor core are simulated by numerical analysis and electromagnetic-structural statics coupling. Through the prototype test, the comparison and analysis method of the rotor topological structure of the interior VFAS-PMSM is proved to be of certain guiding significance.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); variable frequency adjustable speed (VFAS); topological structure; finite element method

0 引言

随着工业转型升级的不断发展, 对变频调速

电机提出了节能高效、紧凑化设计要求^[1]。变频调速永磁同步电机(VFAS-PMSM)由于具有功率密度高、效率高、体积小等优点, 将逐步替代

收稿日期: 2020-07-20; 收到修改稿日期: 2020-08-17

作者简介: 吴小夫(1963—), 男, 工程师, 研究方向为机电一体化。

韦福东(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为永磁电机设计。

吴艳红(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电机设计。

变频调速(VFAS)异步电机。为了提高电机功率密度,需要合理设计电磁结构,以提高电磁材料的利用率;另外,相同输出转矩下,电机紧凑化设计会使结构失效风险增大,优化电机结构参数成为紧凑化永磁同步电机(PMSM)设计方向之一^[2]。

目前,邸建忠等^[3]通过应用田口法对内置式V型永磁同步电机齿槽转矩进行优化;蔡土添等^[4]从极弧系数角度出发,分析V型内置式永磁同步电机齿槽转矩,并分析偏心转子对齿槽转矩的影响;胡光伟等^[5]通过对比不同的隔磁桥尺寸,分析内置式PMSM电磁性能和结构强度的影响。

本文通过运用数值法和有限元法对比了2种永磁体拓扑结构转子的电磁特性与结构强度,对比分析不同转子拓扑结构对电机空载反电动势、齿槽转矩、效率损耗的影响及额定运行时转子铁心受力变形情况,并通过样机试验验证了仿真结果的正确性。

1 内置式永磁电机转子拓扑结构建模

紧凑型内置式VFAS-PMSM转子结构空间有限,合理设计永磁体拓扑结构是提高电磁性能、保证结构强度的关键之一^[6]。内置式PMSM转子的永磁体可采用V型拓扑结构或U型拓扑结构,如图1所示。

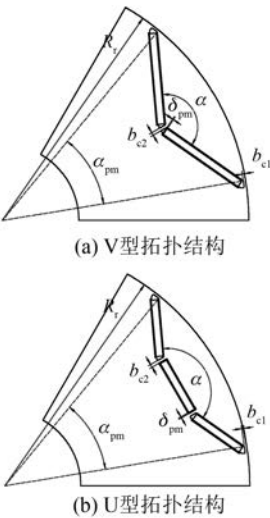


图1 内置式永磁电机转子结构

由图1(a)可知,V型拓扑结构转子的永磁体宽度为

$$b_{m1} = \frac{(R_r - b_{c1}) \sin\left(\frac{\alpha_{pm}}{2}\right) - \frac{b_{c2}}{2}}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \delta_{pm}} \tag{1}$$

由图1(b)可知,U型拓扑结构转子的永磁体宽度为

$$b_{m2} = \frac{(R_r - b_{c1}) \sin\left(\frac{\alpha_{pm}}{2}\right) - \frac{\delta_{pm}}{2} - b_{c2}}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) - \delta_{pm} + \frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中: R_r 为转子外径; b_{c1} 为外隔磁桥宽度; α_{pm} 为永磁体极弧宽度; δ_{pm} 为磁钢槽间隙宽度; b_{c2} 为内隔磁桥宽度; α 为永磁体张角。

2种拓扑结构的永磁体体积 V_m 为

$$V_m = 2pn b_m h_m l_{ef} \tag{3}$$

式中: p 为电机极对数; n 为每极永磁体个数; h_m 为永磁体厚度; l_{ef} 为铁心长度。

为了对比2种转子拓扑结构对电机性能的影响,本文提出一种72槽6极PMSM设计方案,保持电机定、转子主要设计参数基本一致,仅改变永磁体拓扑结构,使永磁体用量基本一致,建立有限元仿真模型。电机主要参数如表1所示。2类转子体拓扑结构参数对比如表2所示。

表1 电机主要参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	250
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
极数/槽数	6/72
铁心长度/mm	430
定子外径/mm	445
定子内径/mm	325
转子内径/mm	100
气隙长度/mm	1.4
铁心材料	35WW300
永磁体牌号	NdFeB38UH
极弧系数	0.708 3
永磁体张角/(°)	130

表2 2类转子体拓扑结构参数对比

参数名称	V型结构	U型结构
每极永磁体个数	2	3
永磁体厚度/mm	5.5	5.8
永磁体宽度/mm	62.42	39.41
每极永磁体质量/kg	2.08	2.08
隔磁桥1宽度/mm	1.5	1.5
隔磁桥2宽度/mm	2	2

2 转子拓扑结构对电磁性能的影响

2.1 电机空载特性对比

利用 Ansoft 有限元仿真软件,建立 1/6 模型进行有限元仿真分析,得到空载条件下电磁场磁密云图如图 2 所示。

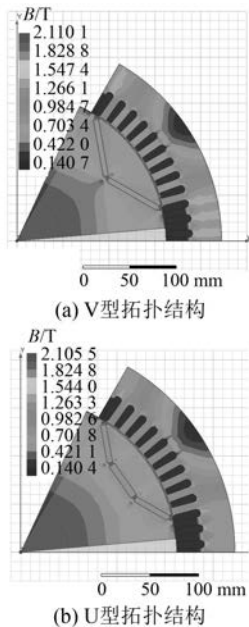


图 2 空载气隙磁密云图

由图 2 可知,V 型结构电机定子齿磁密约为 1.3 T,明显高于 U 型结构电机。转子最大磁密集中在隔磁桥及加强筋处,由于该位置发生饱和,对永磁体漏磁起到限制作用。与 V 型拓扑结构转子相比,U 型拓扑结构转子的加强筋个数增加转子漏磁也会增大。

另外,PMSM 的空载反电动势在理想情况下呈标准正弦波,但是由于转子永磁体拓扑结构及定子铁心开槽的影响,实际的空载反电动势中含有多次谐波,这些谐波会增加电机损耗,降低电机效率,通过分析电机空载反电动势及各阶谐波含量可以作为电机电磁性能的判断依据^[7]。正弦波畸变率 THD 可表示为

THD = \sqrt{\sum_{n=2}^v \left(\frac{G_n}{G_1}\right)^2} \tag{4}

式中:v 为某一特定阶数;G_n 为 n 次谐波分量幅值;G₁ 为基波幅值。

对比分析 2 种转子拓扑结构永磁电机的空载

反电动势波形,可得各次谐波含量分布,如图 3 和图 4 所示。

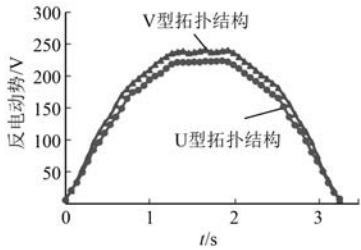


图 3 空载反电动势波形对比

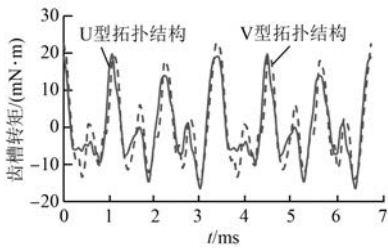


图 4 齿槽转矩对比

由图 3、表 3 可知,V 型拓扑结构和 U 型拓扑结构的空载反电动势有效值分别为 176.37 V 和 164.42 V,谐波畸变率分别为 3.10% 和 4.75%。采用 U 型拓扑结构的内置式 PMSM 的空载反电动势有效值和基波幅值相对较小,但是各阶谐波分量占比及谐波畸变率更低。

表 3 空载反电动势各阶谐波含量

谐波阶次	V 型拓扑结构/%	U 型拓扑结构/%
1 次	93.19	94.72
3 次	4.15	2.59
5 次	0.67	0.83
7 次	0.69	0.70
9 次	1.20	0.75
11 次	0.10	0.42

2.2 转矩及损耗特性分析

电机电枢铁心开槽及永磁体极弧宽度会影响电机磁场储能变化,使得电枢齿和永磁体间产生作用力,其切向分量被定义为齿槽转矩^[8],可以表示为

T_{cog}(\alpha) = \frac{\pi Z L_a}{4 \mu_0} (R_s^2 - R_r^2) \sum_{n=1}^{\infty} n G_n B_r \frac{n x}{p} \sin(n z \alpha) \tag{5}

式中: Z 为定子槽数; L_a 为铁心长度; R_s 为定子内径; n 为使 $\frac{nZ}{2p}$ 为整数的整数; μ_0 为真空磁导率。

通过有限元仿真分析, 2 种转子结构的齿槽转矩波动如图 4 所示。其中, U 型布局的电机因其气隙磁密相对较低, 齿槽转矩相对较小, 齿槽转矩峰峰值比 V 型布局电机小了约 0.88%。

PMSM 铁耗 P_{Fe} 通常采用 Bertotti 铁耗分析模型:

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_{ec} = k_h f B_m^\alpha + k_e f^2 B_m^2 + k_{ec} f^{1.5} B_m^{1.5} \quad (6)$$

式中: P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; P_{ec} 为附加损耗; k_h 、 α 为磁滞损耗系数; f 为频率; k_e 为涡流损耗系数; k_{ec} 为附加损耗系数。

因为 V 型永磁体拓扑结构永磁电机和 U 型永磁体拓扑结构永磁电机的定子冲片材料和频率一致, 所以电机铁耗仅与磁密有关。通过空载有限元仿真分析可知, V 型永磁体拓扑结构永磁电机磁密略高, 因此铁耗相对较大。

通过有限元仿真分析可知, V 型永磁体拓扑结构永磁电机和 U 型永磁体拓扑结构永磁电机的定子铁耗、转子铁耗、铜耗及效率值如表 4 所示。

表 4 永磁电机电磁性能对比

参数名称	V 型结构		U 型结构	
	数值法	有限元法	数值法	有限元法
铁耗/kW	7.828	7.339	6.956	6.499
效率/%	96.18	95.48	96.43	95.41

由表 4 可知, U 型永磁体拓扑结构永磁电机的铁耗比 V 型永磁体拓扑结构永磁电机低了 11.1%, 效率提高了约 0.25%, U 型永磁体拓扑结构永磁电机的电磁性能更优。

3 转子拓扑结构对结构应力的影响

内置式 PMSM 转子在工作时受到离心力作用, 离心力方向均沿径向向外, 转子所受离心力的表达式为

$$F = \frac{A\rho\omega^2 D^2}{4} \quad (7)$$

式中: A 为转子横截面积; ρ 为转子材料密度; ω 为转子角速度, D 为转子外径。

另外, 电机运行时, 转子会受到电磁场产生的

径向电磁力 F_r 作用, 应力沿径向向外, 表达式为

$$F_r = \frac{B_r^2 - B_s^2}{2\mu_0} A_p \quad (8)$$

式中: B_r 为气隙磁密径向分量; B_s 为气隙磁密切向分量; A_p 为极面积。

转子所受应力为

$$\sigma = \frac{F}{4} = \rho v^2 \quad (9)$$

式中: v 为转子外径处线速度。

转子的强度条件为

$$\sigma \leq \frac{[\sigma]}{S} \quad (10)$$

式中: $[\sigma]$ 为安全系数; S 为材料许用应力。

为了提高转子离心力仿真准确性, 在研究永磁电机转子结构强度分析时, 采用 Ansys Workbench 有限元仿真平台, 建立电磁场及结构应力耦合仿真分析。为了减少运算量, 建立转子 1/6 模型, 模型轴向长度设置为 1 mm。

建立模型时, 对模型进行剖分, 并施加以下边界条件及载荷:

(1) 转子周向对称边界条件设置。在转子 1/6 模型的左右两侧设置周向对称边界条件。

(2) 约束条件。在转子内圆柱面施加圆柱约束条件, 令径向自由、轴向及法向固定。

(3) 接触面设置。内置式永磁电机通常采用磁钢槽内灌胶的方法固定永磁体, 故永磁体和转子铁心间设置为摩擦接触, 摩擦系数取 0.15。

(4) 载荷设置。为了保证仿真结果更贴近实际, 故对转子施加旋转载荷, 并将电磁场仿真结果耦合到转子外圆面。

(5) 材料属性设置。定义转子冲片及永磁体材料属性, 如表 5 所示。

表 5 转子材料属性

材料属性	35WW300	永磁体
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 650	7 450
屈服强度/MPa	390	800
弹性模量/GPa	200	120
泊松比	0.28	0.24

由图 5 和图 6 可知, V 型拓扑结构转子和 U 型拓扑结构转子的最大应力发生在内隔磁桥处, 最大应力和最大变形仿真结果如表 6 所示。

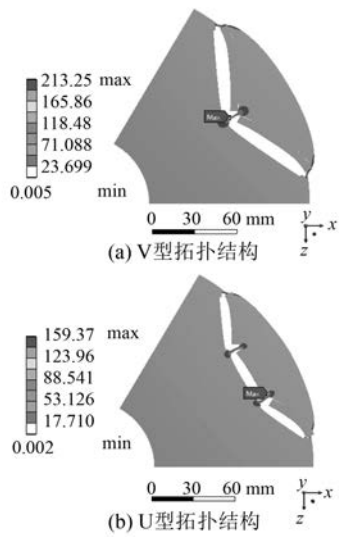


图5 最大应力云图

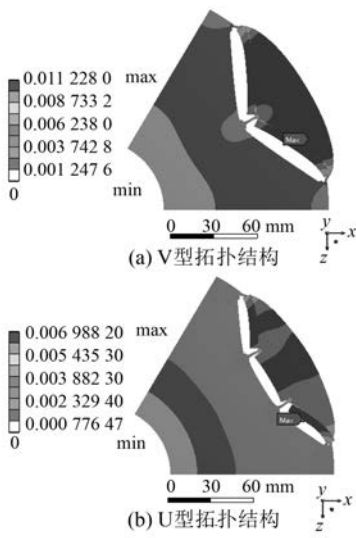


图6 最大变形云图

表6 转子应力仿真数据对比

结构	最大应力/MPa	最大形变/mm
V型结构	213.25	0.011 228 0
U型结构	159.37	0.006 988 2

本文中结构强度安全系数取 1.2,则转子的许用应力为 325 MPa,通过仿真结果可知,2 种类型的转子结构均满足机械强度要求,采用 U 型布局的转子应力远小于 V 型布局的转子应力。

4 样机试验

通过对转子拓扑结构、极弧系数及张角等转子结构参数进行对比分析,综合分析后选择 1 台

280H-6P、3 000 r/min、315 kW 内置式 PMSM 作为样机进行测试。该电机采用 U 型拓扑结构,电磁设计方案及试验数据对比如表 7 所示。

表7 样机数据对比

参数名称	设计值	试验值
额定电流/A	562.76	563.36
铁耗/kW	8.48	7.35
效率/%	95.44	95.70

由表 7 可知,样机试验值与设计值比较接近,误差较小,数值法理论分析和有限元仿真结果较为准确,试验结果达到预期目标。

5 结 语

本文通过数值法和有限元仿真分析法对不同转子拓扑结构的内置式紧凑型 VFAS-PMSM 的电磁特性和机械结构进行对比分析。通过分析可知,U 型拓扑结构的永磁电机转子电磁特性更好,空载反电动势谐波少、齿槽转矩波动小、损耗低、效率高。另外,采用磁固耦合仿真对转子进行静力学分析,考虑到了电机运行过程中,转子受到电磁力的作用,使仿真结果更加准确。与 V 型拓扑结构相比,U 型拓扑结构的永磁电机转子由于隔磁桥多,电机运行时所受到的最大应力和变形更小,结构更加合理安全。为内置式紧凑型 VFAS-PMSM 转子拓扑结构的选择提供了参考。

【参考文献】

[1] 唐任远. 现代永磁电机理论和设计[M]. 北京:机械工业出版社,2016.

[2] 王秀和,杨玉波,丁婷婷,等. 基于极弧系数选择的实心转子永磁同步电动机齿槽转矩削弱方法研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(15): 146.

[3] 邸建忠,韩业鹏,胡文广,等. 内置式 V 型永磁同步电机齿槽转矩优化[J]. 计算机辅助工程 2020,29(1): 19.

[4] 蔡土添,赵国新. 内置式永磁同步电动机齿槽转矩分析[J]. 电机技术,2019(6): 28.

[5] 胡光伟,严欣平,黄嵩,等. 内置式永磁同步电机隔磁桥影响研究[J]. 微电机,2014,47(7): 31.

[6] 王艾萌. 内置式永磁同步电动机的优化设计及弱磁控制研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.

[7] 胡文鸾. 不同转子拓扑结构内置式永磁同步电机性能优化的研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[8] 王秀和. 永磁电机[M]. 2 版. 北京:中国电力出版社,2014.