

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.015

内置式永磁同步电机空载气隙磁密研究

陈 荣, 范承志*, 李湾湾

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对内置式永磁同步电机空载气隙磁密引起电机振动和噪声这一问题,以常见的“一”形和“V”形内置式永磁体转子结构为例,运用有限元分析方法,研究了“一”形结构中隔磁桥和永磁体尺寸变化对空载气隙磁场的影响,提出了分段式的“一”形永磁体结构,并对不同分段间隔“一”形结构和不同夹角“V”形结构产生的气隙波形及谐波畸变率进行仿真测试。研究结果表明,“一”形结构内隔磁桥宽度越小,气隙磁密波形正弦性越好,能够改善电机振动症状,减弱噪声;永磁体尺寸有助于提高气隙正弦性;“V”形永磁体夹角变大时,气隙正弦化会有所改善,“V”形结构具有更高的机械强度和凸极率,但气隙正弦化和永磁体利用率有所下降。

关键词:隔磁桥;总谐波失真;谐波畸变率;转子拓扑

中图分类号:TH113.1;TH39;TM306

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1088-04

Research on no-load air gap magnetic density of IPMSM

CHEN Rong, FAN Cheng-zhi, LI Wan-wan

(College of Electrical Engineering, ZheJiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem of vibration and noise caused by harmonic wave in air gap, two kinds of interior permanent magnet rotor structure were discussed. FEM method was introduced to study the influence of magnetic bridge and magnet size on the no-load air gap field. New structure with divided sections was proposed. Different length of interval in ‘一’ shaped structure and angle in ‘V’ shaped structure were analyzed to study the effect on air gap and harmonic distortion. Results show air-gap waveform becomes more sinusoidal when the bridge gets thinner, which helps to reduce vibration and noise. And air-gap waveform performs better with bigger angle in ‘V’ shaped structure. ‘V’ shaped structure has higher mechanical strength and salient rate, but its air-gap gets worse and magnet utilization rate decreases.

Key words: magnetic property; total harmonic distortion (THD); harmonic distortion rate rotor topology

0 引 言

永磁同步电机具有体积小、重量轻、效率高、功率密度大、工艺结构简单等优势,广泛应用于工业生产、交通运输、航空航天及国防工业。但电机本身引起的齿槽转矩会对输出性能造成不可避免的影响,使电机转矩产生波动,出现振动和噪声,限制了其在高精度传动领域的应用,因而降低齿槽转矩是解决该问题的有效途径。

油田抽油机电机周期负载变动较大,传统的异

步电机驱动效率和功率因数都较低,造成电能的浪费严重^[1]。而永磁同步电机结构简单,且能在轻载时具有较高功率因素,因而广泛应用于抽油机驱动系统。

本研究以一台油田用内置“一”型永磁体同步电机为对象,讨论永磁体不同位置结构、尺寸及隔磁桥长度对电机性能的影响,并优化电机转子结构以降低电机振动和噪声。

1 内置式永磁同步电机结构

内置式永磁同步电机的永磁体位于转子内部,电

收稿日期:2015-03-30

作者简介:陈 荣(1991-),男,浙江台州人,主要从事电机本体设计及电机控制方面的研究. E-mail:21310052@zju.edu.cn

通信联系人:范承志,男,副教授,硕士生导师. E-mail:fanchengzhi@zju.edu.cn

机模型如图 1 所示。其较表贴式永磁电机具有更好的抗不可逆退磁能力和机械强度。其不对称磁路产生的磁阻转矩可以提高电机功率密度和弱磁扩速能力^[2-3]。

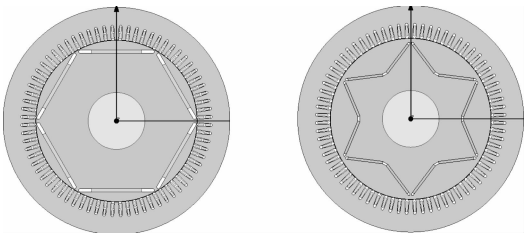


图 1 常见内置永磁体同步电机模型

内置永磁体同步电机磁路结构与永磁体尺寸、位置关系密切,考虑到稀土永磁体成本较高,设计时应尽量提高永磁体利用率。

由于铁心磁导率较高,永磁体磁场容易在转子内部形成回路,一般需要采取相应的隔磁措施以减少漏磁,提高电机的电磁性能^[4]。

文献[5-7]通过对一台 4 极 250 kW 异步起动永磁电机的分析,提出在合适的隔磁桥长度下通过削弱 3 次谐波的方法来优化永磁体靠近气隙时的空载气隙磁密。文献[8]通过对不同转子结构进行电磁计算和机械强度计算,提出带辅助隔磁桥的“V”形转子相比于“一”形和“V”形转子结构具有更好的强度,并通过优化辅助隔磁桥尺寸更好地兼顾了结构强度和电磁性能。

2 样机参数

笔者以一台内置式永磁同步电机为例展开研究,其基本参数如表 1 所示。

定子采用传统三相交流电机定子结构,采用短距单层绕组,转子结构采用如图 1 所示。“一”形结构及“V”形结构,保证永磁体用量相同,为减少计算量,本研究取电机的 1/6 模型进行讨论。

表 1 调速永磁同步电机基本尺寸

参数	数值	参数	数值
定子槽数	72	定子外径 D_2 /cm	40
极对数	3	定子内径 D_2 /cm	28.6
永磁体面积	$12.4 \cdot 0.42$	转子外径 D_1 /cm	28.26
永磁体材料	NdFeB35	转子内径 D_{i1} /cm	10
矫顽力/(KA/m)	890	气隙长度/cm	0.17
剩磁密度/T	1.23	轴向长度/cm	21

电机转子结构尺寸参数如图 2 所示。
转子隔磁桥可分为边缘隔磁桥和磁极间隔磁桥,边缘隔磁桥是永磁体到转子外圆的最短距离,磁极间隔磁桥指的是 N 极和 S 极之间的间距,通常隔磁桥宽

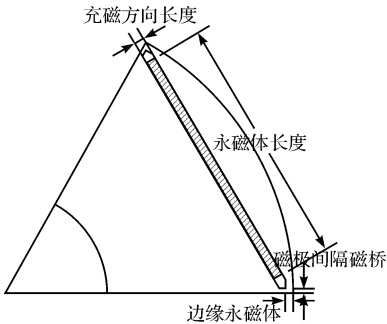


图 2 “一”形永磁体转子基本参数

度越小,该部分的磁阻就越大,即越能限制漏磁,但同时机械强度限制了其不能过小。此外,隔磁桥长度也是一个重要参数。

永磁体尺寸与充磁方向长度及宽度有关,通常来说充磁方向长度通过影响电机的直轴电抗进而影响电机的许多性能^[9-10],而永磁体宽度则会影响向外提供磁通的面积,设计时应尽量使永磁体位于最佳工作点。

3 有限元仿真及结果

本研究在在已建立的物理模型基础上,改变永磁体的位置和隔磁桥的尺寸,采用有限元仿真软件 Ansoft 对电机磁场进行仿真,并经相应处理得到空载气隙磁密波形、气隙基波幅值以及正弦波畸变率随永磁体尺寸变化的曲线。

3.1 边缘隔磁桥对空载气隙磁密的影响

以“一”字形内置永磁电机为例,初定永磁体充磁方向长度为 4.5 mm,永磁体宽度为 115.73 mm,改变永磁体的放置位置,使边缘隔磁桥宽度在 1.5 mm ~ 5 mm之间变化。

气隙磁密 FFT 分析后发现谐波次数比较大的是 3 次、5 次和 23 次。

基波幅值及各次谐波随永磁体位置的变化曲线如图 3 所示。

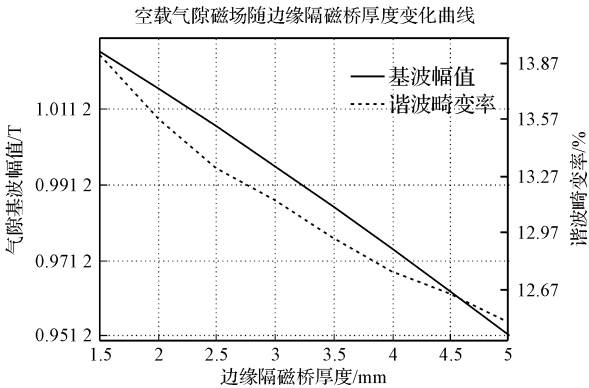


图 3 气隙基波幅值及谐波畸变率与隔磁桥宽度关系

从图 3 中可以看出,气隙基波幅值和谐波畸变率都随永磁体与气隙距离变大而减小,即永磁体较细长时气隙正弦性较好且空载漏磁系数较小。

3.2 磁极间隔磁桥对气隙磁场的影响

保持永磁体尺寸不变,确定“一”形转子结构中边缘隔磁桥宽度为 2 mm,更改 N 极和 S 极间隔磁桥宽度从 4 mm ~ 10 mm 之间变化,结果显示,当磁极间隔磁桥宽度改变时,空载气隙磁场分布基本没有发生变化,这也证明了边缘隔磁桥宽度是电机漏磁的主要决定因素。

3.3 永磁体尺寸优化

本研究在上述“一”形永磁体转子基础上,保持永磁体体积不变,更改永磁体充磁方向长度。

根据经验公式^[11]有:

$$\begin{cases} b_M = (0.5 \sim 0.8) \tau \\ h_M = (0.5 \sim 0.8) \delta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} b_M = (0.5 \sim 0.8) \tau \\ h_M = (0.5 \sim 0.8) \delta \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ —电机的极距, $\tau = \pi D/2p$; δ —电机的气隙长度。

计算得:

永磁体充磁方向长度为 3.5 mm ~ 7 mm;

永磁体宽度应为 72.2 mm ~ 118.7 mm;

改变永磁体充磁方向长度在 4.2 mm ~ 7 mm 范围内变化;

对应的永磁体宽度在 124 mm ~ 74.4 mm 之内变化。

空载气隙磁密基波幅值、气隙平均磁密及正弦波畸变率如图 4 所示。

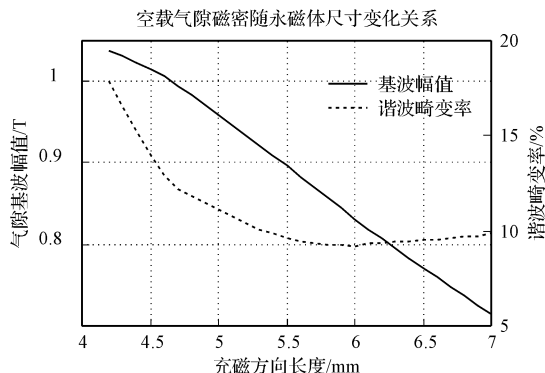


图 4 空载气隙磁密与永磁体充磁方向的关系

由图 4 可以看出,在永磁体体积不变的情况下,增大永磁体充磁方向长度后气隙基波幅值和平均磁密都下降了,而正弦波谐波畸变率在 5.5 mm ~ 7 mm 的充磁方向长度范围内保持稳定并较小,这有利于削弱电机转矩脉动和噪声。

3.4 不同转子拓扑对比

除尺寸外,永磁体的不同位置也会造成气隙磁场分布上的差异,同时也影响气隙磁场的正弦性。下面对不同永磁体结构进行分析。

(1) 分段永磁体

保持“一”形转子结构永磁体充磁方向长度为 4.5 mm,永磁体宽度为 115.73 mm,隔磁桥等其他数据保持不变。本研究将永磁体分成两段,研究永磁体间距与空载气隙磁场分布的关系。

气隙磁密随分段永磁体间距的变化趋势如图 5 所示。

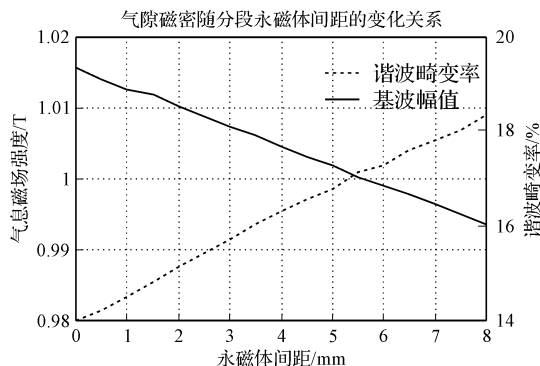


图 5 气隙磁密随分段永磁体间距的变化趋势

从图 5 中可以看出,当分段永磁体间距增大时,气隙磁密基波幅值有细微减小,同时正弦性变差,这是因为分段永磁体降低了聚磁效果。

(2) V 形转子结构

改变永磁体中心到转轴的距离即可将“一”形永磁体转子转变为“V”形永磁体转子,研究了不同夹角对空载气隙磁密的影响。

“V”形永磁体转子基本尺寸参数如图 6 所示。

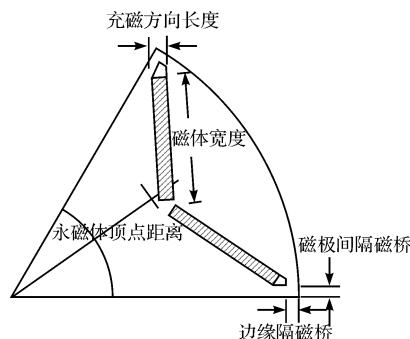


图 6 “V”形永磁体转子基本参数

空载气隙磁场波形幅值、气隙磁场波形平均值及谐波畸变率均如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,当 V 形顶点离开轴心越远时(即永磁体夹角变大),气隙磁场波形幅值和气隙平均

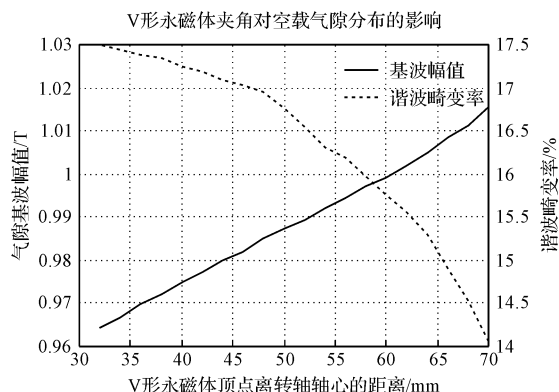


图7 V形永磁体拓扑与空载气隙磁密的关系

值都有明显的提高,而且气隙正弦化也有所改善,因此“一”形转子结构在材料利用上优于“V”形结构,但“V”形结构具有更好的机械结构强度和更高的凸极率^[12-14],更能够适应高速运转时的机械应力。

4 结束语

计算了隔磁桥宽度、永磁体分段和“V”形转子拓扑对空载气隙基波幅值及谐波畸变率的影响。仿真结果表明,充分考虑机械强度情况下选择较小的隔磁桥有利于减少电机漏磁并提高永磁体利用率。在永磁体用料相同情况下,“一”形永磁体结构比“V”形结构具有更高的气隙基波幅值和更好的正弦性,但机械强度和凸极率有待进一步研究。

隔磁桥及永磁体尺寸是永磁电机的磁场设计的关键,合理的选择隔磁桥可以提高永磁体利用率并改善空载气隙磁场正弦性,进而降低电机运行的噪声和转矩波动。

参考文献 (References):

[1] 窦满锋,刘卫国. 高效节能稀土永磁同步电机设计技术研究[J]. 西北工业大学学报,2004,22(3):355-359.

- [2] SOONG W L, ERTUGRUL N. Field-weakening performance of interior permanent-magnet motors[J]. **Industry Applications, IEEE Transactions on**,2002,38(5):1251-1258.
- [3] 冯桂宏,李庆旭,张炳义,等. 电动汽车用永磁电机弱磁调速能力[J]. 电机与控制学报,2014,18(8):55-61.
- [4] 唐任远. 现代永磁电机的理论和设计[M]. 上海:机械工业出版社,2005.
- [5] 何伟军,卢琴芬,叶云岳,等. 大功率异步起动永磁同步电动机空载气隙磁密分析[J]. 机电工程,2008,25(7):55-57.
- [6] 孙耀程,薛文彬,胡勤丰,等. 考虑非线性的永磁同步电机电流环分析[J]. 兵工自动化,2014(14):54-57.
- [7] 吴凤娇,王卫玉,商玉娟,等. 永磁同步电机的混沌模型及其控制器设计[J]. 机电工程技术,2013(12):44-46,67.
- [8] 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):31-34.
- [9] 王广生,黄守道,高 剑. 基于 Ansoft 软件设计分析内置式永磁同步电动机[J]. 微电机,2011,44(2):70-73.
- [10] 杨玉波,王秀和. 永磁体不对称放置削弱内置式永磁同步电动机齿槽转矩[J]. 电机与控制学报,2010,14(12):58-62.
- [11] 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]. 河北:华北电力大学电气工程学院,2010.
- [12] 贾永峰,谷立臣. 基于永磁同步电机驱动定理泵的恒压变量控制系统[J]. 液压气动与密封,2014(9):42-44,76.
- [13] CHAU K T, ZHANG D, JIANG J Z, et al. Design of a magnetic-gear outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles[J]. **Magnetics, IEEE Transactions on**,2007,43(6):2504-2506.
- [14] 王艾萌,卢伟甫. 五种拓扑结构的永磁同步电动机性能分析与比较[J]. 微特电机,2010,38(4):20-23.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

陈 荣,范承志,李湾湾. 内置式永磁同步电机空载气隙磁密研究[J]. 机电工程,2015,32(8):1088-1091.

CHEN Rong, FAN Cheng-zhi, LI Wan-wan. Research on no-load air gap magnetic density of IPMSM[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015,32(8):1088-1091.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>