

高效小功率异步启动稀土永磁同步电机设计

文/朱格来¹ 刘辉²

摘要

本文提出了一种工程实用的永磁同步电动机设计方法,通过分析影响永磁电机力能性能的因素,利用 Ansoft 软件进行永磁电机结构的辅助设计,并通过实验测试,确保了设计方案的可靠,对指导永磁电机工程设计具有较大的现实意义。

【关键词】永磁同步电机 力能性能 永磁体计算 Ansoft 结构设计

1 前言

国家发展改革委员会于 2005 年启动了《节能中长期专项规划》十大重点节能工程,其中的一项就是电机系统节能工程。我国对永磁同步电动机的研究起步较晚,但发展迅速。作为一个稀土大国,稀土资源丰富,已探明的稀土储量占全世界稀土蕴藏总量的 80%,稀土永磁技术的研究优势得天独厚,稀土永磁同步电动机正在逐步走向规模化生

产。由于稀土永磁同步电动机结构复杂多样,永磁材料的磁特性为各向异性,使得稀土永磁同步电动机的设计变得比较复杂,计算准确度比较差;另外,设计不当易造成钕铁硼永磁体退磁,影响电机效率。因此研究高效稀土永磁同步电机具有十分重要的意义。

2 永磁同步电机损耗分析

电机损耗是高效永磁同步电动机设计的关键问题之一,电机的损耗主要有铜耗、铁耗、机械损耗和杂散损耗,各种损耗占总损耗的比例随其功率而变化,对于小功率永磁电机而言,其损耗对电机效率影响非常大,其中主要是铜耗与铁耗,而机械损耗和杂散损耗一般都比较小。

2.1 铜耗分析

定子绕组铜耗主要为定子绕组在运行温度下电阻损耗,铜耗 P_{cu} 的计算公式为(1):

$$P_{cu} = mI_1^2 R \quad (1)$$

式中: m 为相数; I_1 为定子直流; R 为定子直流电阻。

2.2 铁耗分析

铁耗包括交变主磁通在定子(或转子)铁心中产生的磁滞损耗和涡流损耗,铁耗 P_{iron} 的计算公式为(2):

$$P_{iron} = P_h + P_e \quad (2)$$

式中: P_h 为涡流损耗, P_e 为磁滞损耗。

铁耗的计算主要由三种方法:经验公式法、测量线圈测电压法与有限元法。采用有限元法可计算出波形齿部和轭部的磁密分布,进而计算其涡流损耗和磁滞损耗。

2.3 机械损耗分析

机械损耗包括轴承摩擦损耗、通风损耗,机械损耗 P_{fw} 近似的计算公式为(3):

$$P_{fw} = kD_r(L_{Fe} + 0.6\tau_p) \frac{n_s}{60} \quad (3)$$

式中: k 为机械损耗系数; D_r 为转子外径; L_{Fe} 为铁心有效长度; τ_p 为电机的极距; n_s 为转速。

2.4 杂散损耗分析

杂散损耗又称附加损耗,是由定子电流和转子永磁体产生的漏磁场及高次谐波磁场,以及由气隙磁场变化而引起的损耗,杂散损耗直接关系到电机效率



的高低，可从削弱谐波入手来减小杂散损耗。

3 提高永磁同步电机效率与功率因数分析

永磁电机的设计关键就是要获得高的效率与较大的功率因数，提高稀土永磁同步电机效率与功率因数的途径较多，但也比较复杂，在提高某一性能的同时，有可能会影响到电动机的其他性能，因此必须综合考虑，并根据动机的实际制造工艺，采取相应的措施，本文主要从以下几个方面来综合考虑。

3.1 降低永磁同步电机的损耗

从第一节分析可知，要降低永磁同步电机的损耗主要是降低其铜耗与铁耗。降低铜耗可选用高性能的永磁材料，永磁体选用高剩磁感应强度、高磁感应矫顽力、高磁能积的稀土永磁钕铁硼材料，采用集中绕组型式以减少导线用量，绕组线圈电阻降低，并增大导体线径和增大槽面积等措施，来降低永磁同步电机的铜耗。降低铁耗，一般采用单位损耗较小的铁磁材料，永磁同步电动机由于采用永磁体励磁，谐波含量比较丰富，因此要减小谐波造成的附加铁耗，铁心材料可选用高性能的硅钢片。

3.2 合理选择气隙长度

虽然稀土永磁同步电动机功率因数受气隙的影响要比普通异步电动机小，但适当加大气隙长度可在一定程度上减小电动机的杂散损耗。因此，为了减小气隙谐波引起的杂散损耗，降低电动



机的振动与噪声，以及便于电动机的装配，其气隙长度往往比同规格的感应电动机的气隙稍微大些。

3.3 选择合适的空载反电势

空载电势是稀土永磁同步电动机关键的参数之一，合理的空载电势取值可以提高电机的效率，降低稀土永磁体的用量。空载电势选取主要应该考虑以下几方面的影响：在较宽的负载变化范围，有较高的功率因数和效率；要满足电机的启动要求；要满足电机的过载要求；永磁体用量要尽量少。

4 永磁同步电机结构设计

永磁同步电动机主要由定子、转子、机座、端盖等部件构成，永磁电机的结构设计主要是定子型号的确定与转子的结构设计，永磁同步电动机的定子一般与三相异步电动机相同，采用同型号的机座即可，由定子铁心和定子绕组构成。

转子主要由永磁体、转子铁心和转轴构成，转子设计是永磁同步电机设计的关键。

4.1 定子结构设计

本次设计的是 5.5KW 的异步启动永磁同步电机，采用 Y132M2-6 型号机座，定子槽型与同容量异步感应电机大致上相同，本设计选用梨形槽，定子冲片结构基本上也相同，此处采用叠片结构。根据异步启动永磁同步电机的需要，定子槽数设定为 36 个，定子每极每相槽数 q 为 (4)：

$$q = \frac{z_1}{2mp} = \frac{36}{2 \times 3 \times 3} = 2 \quad (4)$$

式中： z_1 为定子槽数， $z_1=36$ ； m 为相数， $m=3$ ； p 为极对数， $p=3$ 。

采用短距绕组结构，节距为 $y_1=5$ ，采用了双层叠绕组，每槽导体数 $N_s=20$ ，采用 Y 形连接。

4.2 转子结构设计

异步启动永磁同步电动机同样也能够采用与异步感应电机相类似的转子槽形，这里采用平底槽，槽内注铜形成鼠笼条。永磁体采用内置径向式转子磁路结构，设计成矩形结构放置在转子上，总体结构如图 1 所示。

4.3 永磁体尺寸设计

有了高性能永磁材料，还要充分、合理地利用永磁体。稀土永磁电机中，永磁体尺寸的设计影响到电机的各项性能指标与经济指标，是设计中的关键问题之一。本设计中用永磁体的矩形结构取代通常的瓦片形结构，能降低磁钢材料的加工用量。

永磁电机的体积计算式为 [5]：

$$V_M = 51 \frac{P_N \sigma_0 k_{ad} k_{fd}}{f k_u k_\phi b_{m0} h_{mk} (BH)_{\max}} \quad (5)$$

式中：为电机的额定容量； P_N 为空载漏磁系数； σ_0 为直轴电枢磁势折算系数； k_{ad} 为电机短路时每对极的永磁体磁势为直轴电枢磁势的倍数； k_{fd} 为频率； k_u 为电压系数； k_ϕ 为气隙磁通波形系数；为电机空载时磁感应强度标么值； b_{m0} 为电机短路时永磁体工作点退磁磁场强度标么值； h_{mk} 为永磁体的最大磁能积。

上述公式中有些参数在电机初始设计时不能确定，应用性不强。实际设计中可使用以下几个计算公式 [6]，永磁体磁化方向厚度的计算公式为：

$$h_M = k_h \delta \quad (6)$$

式中：

$$k_h = \mu_r k_m k_s k_\delta \frac{\alpha_p}{\alpha_i (2 - \sigma_0)}$$

为永磁体磁化方向的厚度系数， μ_r 为永磁体的相对磁导率， μ 为安全系数， k_m 为磁路饱和系数， k_s 为卡特系数， k_δ 为极弧系数， α_p 为计算极弧系数， σ_0 为空载漏磁系数； δ 为气隙长度。

永磁体宽度尺寸的计算公式为 (7)：

$$b_M = k_b \tau \quad (7)$$

式中：

$$k_b = \frac{\alpha_p L_{ef}}{l_M}$$

为永磁体的宽度系， L_{ef} 为铁心有效长度， l_m 为永磁体长度； τ 为极距。

永磁体用量（体积）为 (8)：

$$V_M = k_M V_G \quad (8)$$

式中：

$k_M = k_h \alpha_p$ 为永磁体体积用量系数；

$V_G = \pi D_{l1} L_{ef} \delta$ 为电机气隙体积， D_{l1} 为电枢直径。

通过计算并考虑裕量，可得出本电机的永磁体的尺寸为： $h_m=5.5\text{mm}$ ， $b_m=36\text{mm}$ ，采用 35UH 永磁体材料。

4.4 气隙长度选取

永磁同步电动机的气隙长度是一个十分重要的尺寸参数，通常比同容量的感应电动机的气隙长度要大 0.1 ~ 0.3mm，能够有效降低永磁同步电动机的杂散损耗，同时使电机的装配工艺简便化，此处气隙长度取 $\delta=0.5\text{mm}$ 。

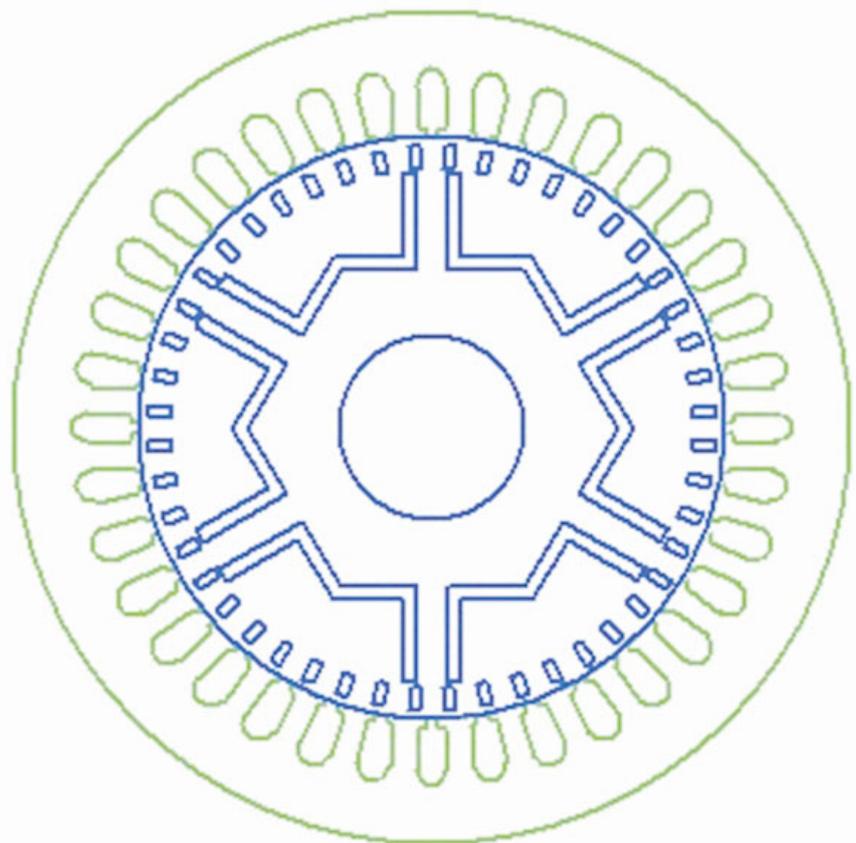


图1 异步启动永磁同步电机结构

5 实验研究与分析

电机试验是新型电机研发过程中的重要组成部分,一款新型电机从设计、制造、试验到应用,试验过程的作用举足轻重,不可或缺。与传统感应电机的相比,永磁电机试验要求具有较大的独特性。通过试验测试系统,依据相关的国家标准和国际先进国家的有关标准,完成永磁同步电动机的空载反电势的测试与负载试验。测得异步启动永磁同步电机的各项性能指标为:效率=0.908,功率因数=0.991,空载反电动势 $E_0=194.2\text{V}$,最大转矩倍数 $T_{\max}=2.723$,起动电流 $I_{st}=127.78\text{A}$,起动电流倍数 $I_{st}^*=12.68$,起动转矩倍数 $T_{st}^*=3.59$,符合永磁同步电机效率高、功率因数高、启动转矩高等要求。

6 结论

本文提出了一种实用的永磁同步电动机的工程设计方法,通过分析提高永磁电机综合性能的措施,利用Ansoft的RMxpert软件进行了永磁电机结构的设计,通过实验分析证明该方法确定的设计方案精确可靠,对指导工程设计具有很大的现实意义。

参考文献

- [1] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [2] Naomitsu Urasaki, Tomonobu Senjyu, Katsumi Uezato. A Novel Calculation Method for Iron Loss Resistance Suitable in Modeling Permanent Magnet Synchronous Motors. IEEE Trans. On Energy Conversion. 2003, 18(1): 41-47.

- [3] Pia Salminen. Fractional Slot Permanent Magnet Synchronous Motors For Low Speed Applications. 2004: 58-60.
- [4] 谢远党. 三相异步电动机杂散损耗的研究 [J]. 江海洋学院学报. 2004, 23(1): 94-98.
- [5] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [6] 王北社, 齐智镭, 王慧勇等. 稀土永磁电机永磁体尺寸的分析 [J]. 东方电机. 2011(4): 10-12.

作者单位

- 1 江西赣州金环磁选设备有限公司
341000
- 2 江西赣州江西理工大学应用科学学院
341000

