# 轴向磁场单对极旋转变压器变磁阻原理分析

# 尚静1,徐谦2

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨, shangjing@ hit. edu. cn;2. 电子工业部 上海第二十一研究所, 200233 上海)

**摘 要:**针对单对极结构磁阻式旋转变压器因其磁路缺少补偿,导致偏心等因素对其精度影响较大的问题, 提出一种新结构的轴向磁场一对极磁阻式旋转变压器,其磁路具有补偿优势,从而解决偏心带来的误差问 题.原理样机定子采用激磁绕组与信号绕组所在平面正交设计,转子无绕组且采用斜环状导磁结构设计.采 用磁路解析方法分析表明:改变定转子磁路耦合面积可以改变旋变磁路磁阻;适当选择斜环导磁带形状函数 可优化输出电势函数波形,达到使之呈现正弦变化的目的.针对激磁磁路呈现轴向磁场的特殊性,采用三维 暂态磁场有限元方法对其信号绕组输出电势特性进行了分析,得到与解析分析一致的结论,证明了原理样机 变磁阻原理与结构设计思想的正确性.

关键词: 轴向磁场;磁组式旋转变压器;耦合面积;三维有限元 中图分类号: TM35 文献标志码: A 文章编号: 0367 - 6234(2011)11 - 0070 - 05

# Analysis of the principle of one pair pole axial-flux resistance resolver

# SHANG Jing<sup>1</sup>, XU Qian<sup>2</sup>

(1. Dept. of Electric Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China shangjing@ hit. edu. cn;
 2. Ministry of Electronic industry 21th Academy of Shanghai, 200233 Shanghai, China)

**Abstract**: The mechanical eccentricity makes much more influence on precision of one pair pole reluctance resolver. One pair pole axial flux reluctance resolver with new magnetic structure is put forward, which has compensating character inside its two side air gap. The prototype has both exciting windings and signal windings in its stator, which are vertical to each other. There is no winding in its rotor and one inclined ring is set in it. By using analytical method, the conclusion is got that the resistance of the reluctance resolver is varied by changing its electro-magnetic coupling area. At the same time, by selecting appropriate shape of the inclined ring of rotor, the output sine and cosine signal of the EMF is optimized. To analyze the axial flux through the stator and the rotor, 3D transient FEM is used. The character of the EMF in signal windings is got at the same time. The FEM result agrees well with the analytical result, this will offer us the basic parameters for the further analysis in the future.

Key words: axial flux; reluctance resolver; coupling square; 3D finite element method

旋转变压器以其高精度、高可靠性、防水、防 尘、抗振动、抗强电磁干扰以及能够提供高精度的 位置信息等突出优点,广泛应用于要求可靠性高 的各种位置、速度闭环控制系统中.旋转变压器按 照结构可以分为:传统绕线式转子旋转变压器、磁 阻式转子旋转变压器两大类型.

收稿日期: 2010-11-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977015).

作者简介:尚 静(1968—),女,教授,博士生导师.

励磁绕组在转子上的绕线式旋转变压器必须 带有电刷或者耦合变压器,因此整机机械可靠性 降低.磁阻式旋转变压器因其励磁在定子上,是目 前旋转变压器发展的一个重要方向.其无刷、无耦 合变压器式结构,使其无需维护,与传统转子绕线 式旋变相比,寿命长且运行更为可靠,对机械和电 气噪音不敏感,广泛应用在高温、严寒、潮湿、高 速、高震动等旋转编码器无法正常工作的场合,如 机器人系统、机械工具、汽车、电力、冶金、纺织、印 刷、航空航天等领域.

目前磁阻式旋转变压器常见的变磁阻原理是 通过改变气隙长度从而改变磁阻,其转子多呈现波 纹状凸极式轮廓.我国的电子工业部上海 21 研究 所、日本的多摩川公司、西安微电机研究所对该种 变气隙磁阻式旋转变压器进行较深入研究且已有 批量生产.这种变气隙长度式磁阻旋变的主要产品 为多极结构,原因是通过增加极对数,对于轴系安 装、工艺等原因带来的系统误差产生了空间补偿作 用,使得角度位置测试精度达到或接近绕线式旋变 测试水平<sup>[1-4]</sup>.单对极磁阻式旋转变压器具有结构 简单、可以提供绝对零位等特点,但该种磁阻式旋变 如果做成一对极,由于缺少对称位置磁阻互补性,必 然导致测量精度差、抗系统偏心能力差等问题.

针对上述问题,本文提出一种采用新结构、新 原理的轴向磁场一对极磁阻式旋转变压器.该种 旋转变压器相对于以往旋转变压器具有高可靠 性、高转速、低阻抗、低成本以及能够减小偏心影 响等优点,更加适用于运行条件恶劣的电机伺服 系统.如:应用于航天或航空领域,同时可以提供 绝对位置信号.该种结构的磁阻式旋转变压器磁 阻变化原理并非采用改变气隙长度原理,而是通 过改变定转子之间磁路耦合面积而达到改变磁路 磁阻的目的.

1 磁阻式旋变的分类与磁阻变化原理

### 1.1 整体结构与电磁原理

磁阻式旋转变压器是由定子、转子组成,定子 上同时装有励磁绕组和信号绕组,基本工作原理 是通过改变磁路的磁阻来达到使正余弦绕组的感 应电势幅值跟随转子旋转位置变化呈现正、余弦 规律,从而在信号绕组中产生正、余弦位置电势信 号<sup>[5-7]</sup>.从整体结构以及电磁原理来看,磁阻式旋 转变压器又可以分为不等气隙磁阻式旋转变压器 及本文提出的等气隙磁阻式旋转变压器两类.磁 阻式旋转变压器基本电磁原理如下:

两相绕组轴线位置的磁通值分别为

 $\int \varphi_{\rm s} = f_{\rm m} \lambda_{\rm s} = I_{\rm m} N_{\rm m} \lambda_{\rm s} \sin \omega t \,,$ 

 $l\varphi_{\rm c} = f'_{\rm m}\lambda_{\rm c} = I_{\rm m}N_{\rm m}\lambda_{\rm c}\cos\omega t.$ 

其中, $I_{m}N_{m}$ 为激磁电流安匝数, $\lambda_{s}$ \ $\lambda_{c}$ 为两相信 号绕组磁路磁导.

假若磁路的磁导被设计为正弦函数,则磁路 磁通可以表示为

$$\begin{cases} \varphi_{\rm s} = \Phi_{\rm m} \sin \omega t \sin \theta, \\ \varphi_{\rm c} = \Phi_{\rm m} \cos \omega t \cos \theta. \end{cases}$$
(1)

因此,可以得到两相信号绕组中幅值为位置 正余弦函数的电势信号.

# 1.2 不等气隙磁阻式旋转变压器结构与原理

在上述讨论中,由于旋变的主磁路通常设计 成低饱和状态,磁路的磁阻主要取决于气隙的磁 阻.根据磁导的定义式:

$$\begin{cases} \lambda_{s} = \mu_{0} S_{s} / \delta_{s}, \\ \lambda_{c} = \mu_{0} S_{c} / \delta_{c}. \end{cases}$$
(2)

其中, $S_s/S_c$ 为定子、转子气隙磁路面积, $\delta_s/\delta_c$ 为定子、转子气隙磁路长度.

通常情况下,定子铁心厚度与转子铁心厚度是 相等的或接近相等,即气隙磁路的耦合面积相等, 此时式(2)中若要改变气隙的磁导,通常采用改变 气隙长度的方法.即若保持*S*,*S*。为常数,则

$$\begin{cases} \delta_{\rm s} \propto 1/\sin\theta, \\ \delta_{\rm c} \propto 1/\cos\theta. \end{cases}$$

图1给出了转子采用波纹状铁心结构的多极 不等气隙磁阻式旋变.只要合理优化设计转子波 纹形状,就可以得到较好的正余弦位置信号.同 时,多极变气隙长度磁阻式旋转变压器具有抗偏 心作用,如果转子轴系偏心,则相差 180°机械角 度位置的转子凸极下一个极下磁阻增大、相对另 一个极下磁阻减小,则一相信号绕组总的感应电 势经过叠加后近似保持不变.



#### 图1 多极不等气隙磁阻式旋变

图 2 给出了一对极变气隙结构磁阻式旋变示 意图.



#### 图 2 一对极变气隙结构磁阻式旋变

定子可以采用分布短距绕组结构,转子可以 采用两个偏心圆作为转子铁心内圆及外圆轮廓 线.这样的一对极磁阻式旋转变压器可以测得绝 对位置信号.但由于磁路结构缺少补偿性,如果转 子偏心,对测量误差影响很大.因此一对极变气隙 结构磁阻式旋转变压器因磁路结构缺少补偿性而 极少采用.

#### 1.3 等气隙磁阻式旋转变压器基本原理

与上述不等气隙磁阻式旋变原理不同的是, 可以采用不变气隙长度,而改变磁路耦合面积的 方法来实现变磁阻原理.从式(2)可以看出,如果 δ. δ. 是恒量,只需

$$S_{\rm s} = S\sin\theta,$$
  
 $S_{\rm c} = S\cos\theta.$ 

即耦合面积随转子位置角度呈现正弦或余弦 变化,则有

$$\begin{cases} \lambda_{s} = \mu_{0} \frac{S_{s}}{\delta_{s}} = \mu_{0} \frac{S\sin\theta}{\delta_{s}} = \lambda\sin\theta, \\ \lambda_{c} = \mu_{0} \frac{S_{c}}{\delta_{c}} = \mu_{0} \frac{S\cos\theta}{\delta_{s}} = \lambda\cos\theta. \end{cases}$$
(3)

这样就可以得到式(1)的结果,即通过改变 定转子磁场耦合面积而达到改变磁路磁阻的目 的.该种原理的磁阻式旋转变压器为磁阻式旋转 变压器提供了一种新型结构,拓展了磁阻式旋转 变压器的应用范围和领域,本文提出的轴向磁场 变磁阻式旋转变压器就是这样一种以改变磁路耦 合面积为基础的磁阻式旋转变压器.

# 2 一对极轴向磁场磁阻式旋转变压 器结构

本文提出一种通过改变定转子耦合面积而改 变旋转变压器磁阻的轴向磁场磁阻式旋转变压 器.该种旋变的变磁阻原理属于等气隙结构变磁 阻式旋变,因此通过相关磁路设计达到改变耦合 面积的目的.

首先介绍轴向磁场磁阻式旋转变压器的结构 和磁路原理.该种轴向磁场磁阻式旋转变压器与 不等气隙磁阻式旋转变压器主要构成相同,都是 由定子、转子两部分组成.定子上同样缠绕激磁绕 组和两相正交信号绕组,转子上没要绕组.其基本 结构如图3所示.

与不等气隙磁阻式旋变结构不同之处为:

 定子铁心为三段式结构.与传统电机或旋 变不同的是,定子铁心分为上齿铁心、中齿铁心、 下齿铁心三段结构.

2)定子绕组结构不同.不等气隙磁阻式旋变的两相绕组为普通两相正弦绕组或双层短距绕组,激磁绕组同样为普通正弦绕组或双层短距绕组.而轴向磁场等气隙磁阻式旋变定子绕组结构较为特殊.首先激磁绕组与信号绕组所在平面互相正交,为产生轴向磁场提供条件.在图3(c)中,定子激磁绕组水平放置于上齿和下齿之间.信号绕组垂直放置并同时缠绕在上下齿上.

3)具有独特结构的斜环状转子导磁结构.该种旋变的转子结构较为特殊,是由两部分组成的,如图 3(b)所示.其中斜环状铁心为导磁性材料构成的,它作为转子磁路主要构成部分.另一部分为支撑斜环状铁心的轴套部分,其材料为非导磁性材料.



图 3 轴向磁场磁阻式旋变结构图

3 一对极轴向磁场磁阻式旋转变压 器变耦合面积变磁阻原理

上述磁阻式旋转变压器转子跟随轴系旋转时,与上下两齿的位置关系呈现周期性,如图4所示.在4(a)中,定转子之间耦合面积最大,磁阻最小,信号绕组的感应电势也达到峰值.

当转子转过 90°时,为如图 3(b)所示位置, 此时转子导磁环与定子缺口处相对,耦合面积最 小,磁路磁阻达到最大值.信号绕组的感应电势达 到最小值.依次往复,经过图 4(c)、(d)所示状 态,再回到 4(a).完成一个机械周期,对于一对极 旋变来讲,同时也完成了一个电周期.

当转子旋转时,图 4(a)中所示模型中,为最 大面积耦合时的情况,即在气隙中转子斜环与定 子上齿、下齿完全耦合.随着转子旋转,耦合面积 发生变化,希望得到如式(3)所示的耦合面积随 转角成正弦函数关系的结论,这样旋变的磁阻随 转角的关系也呈现正弦化关系.可以得到信号绕 组感应电势呈正弦化变化的结论.

转子斜环的曲线形状函数决定了耦合面积的 函数变化值.采用怎样的曲线形状决定该种磁阻 式旋变的精度以及衡量旋转变压器精度的零位误 差、函数误差等量.



(c)反向耦合面积最大

图 4 轴向磁场磁阻式旋变变耦合面积变磁阻原理图

转子采用平行平面与圆柱相贯线的 4 磁阻式旋变耦合面积函数关系推导

最简捷的方法是采用平行平面与圆柱形转子 相交,得到斜环状转子导磁磁环的转子结构.尽管 是平面与圆柱相交,所产生的相贯线仍然为复杂 的三维图形.图5给出了定转子6种相对位置耦 合面积变化的情况.



转子斜环的曲线形状的函数描述决定了耦合 面积随转角变化的函数关系.由于很难给出相贯 线的函数表达式,采用传统磁路解析方法很难进 行推导.而三维电磁场有限元法可以直接建立求 解模型,在分析该种问题上具有一定优势.因此有 关相贯线的描述问题可以直接采用磁场的方式进 行求解.同时,由于旋变涉及的磁场是似稳交变电 磁场,本文采用三维暂态电磁场的有限元方法对 磁场问题直接进行分析研究[8-10].

#### 三维暂态电磁场用于求解轴向磁场 5 磁阻式旋变

由于轴向磁场磁阻式旋变的结构复杂性以及 轴向磁路的非对称性,采用二维有限元很难进行 分析计算,同时转子斜环导磁带复杂形状的函数 描述也较为困难<sup>[8]</sup>.本文直接采用三维暂态电磁 场有限元方法对其磁场进行分析,可以直接、直观 地对激磁绕组磁通路径、信号绕组感应电势波形 等进行分析.

#### 5.1 三维电磁场有限元模型的建立.

以定子两相12槽一对极轴向磁场磁阻式旋 变为例,如图6所示,定子信号绕组采用集中绕组 结构,两相信号绕组在圆周方向在空间呈正交放 置. 激磁绕组呈水平放置. 转子采用平行平面与圆 柱体相贯线作为导磁轮廓线结构.



图 6 3D 有限元模型

采用三维暂态场计算时,需要在活动与静止 模型间设置交接边界,即 band,如图7 所示.同时 在气隙设置上需要进行剖分加密处理.这样在激 磁绕组上加有正弦高频激磁电压后,转动转子所 在轴系,就可以在信号绕组内产生随转子位置呈 正弦变化的交变电势.





(a)含有 band 的剖分图

(b)不含有 band 的剖分图 图 7 3D 有限元模型剖分图

# 5.2 激磁磁场分布及磁通流向结果

在图8所示位置处,磁通流向分布为从上部 耦合齿到转子导磁圆环到相对定子下齿,再从定 子轭部回到定子上部齿轭.在整个磁通路径上,既 有径向磁路又有轴向磁路,因此严格地说可以认 为是混合的磁路结构.



图 8 磁通密度矢量三维分布图

### 5.3 信号绕组感应电势波形

两相信号绕组中感应电势波形如图9所示. 从 A、B 两相波形的包络线来看,在理想对称磁路 情况下,时间呈现正交波形.从每一相的波形来 看,其包络线呈现非常好的正弦性.



从计算结果分析来看,采用该种磁路结构的 基本原理是正确的.可以达到改变磁路磁阻的目 的.同时,从图 10 的包络线可知,仍存在谐波,因 此其结构仍存在进行优化的可能性.从表1的谐 波分析结果可知,存在二次、三次、五次等次数谐 波.分析其结果可能是以下原因造成的:

a) 三维电磁场剖分精度不够. 但考虑剖分过 于细致,可能会造成计算量过大、占用机时过多等 结果.

b)采用转子平行平面与圆柱相交的方式虽 然简单但与所要求的正弦包络线之间存在一定误 差,该种误差的消除可以进一步提高信号绕组反 电势的正弦性.



图 10 两相输出电势信号包络线

两相	基波幅 值基数	2 次谐 波比例	3 次谐 波比例	4 次谐 波比例
Sin 相	1.00	0.037 6	0.053 5	0
Cos 相	1.00	0.045 3	0.045 6	0
两相	5 次谐 波比例	6 次谐 波比例	7 次谐 波比例	THD
Sin 相	0.004 0	0.000 6	0.003 7	0.065 6
Sin 相 Cos 相	0.004 0 0.004 4	0.0006 0.0022	0.0037 0.0055	0.0656 0.0647

# 6 结 论

1)提出了一对极变耦合面积磁阻式旋转变 压器的基本磁路结构.

2)从理论上分析了该种旋转变压器的磁路 结构和基本电磁原理,论述了通过调整耦合面积 进行变磁阻设计的可行性. 3)提出了一种简便可行的采用平行平面与 圆柱体相交的构成导磁界面的转子磁路结构.

4)限于磁路结构的复杂性,本文采用三维暂 态电磁场有限元分析方法对该种结构的旋变进行 了电磁场计算与分析.

5)该种旋转变压器磁路结构较为复杂,在结构研究及加工工艺上可能存在一定的难度.转子导磁部分由于不能采用叠片铁心材料,可能导致铁心损耗增加.对材料的选取有一定的要求.

参考文献:

- HOSEINNEZHAD R, BAB-HADIASHAR A, HARDING P. Calibration of resolver sensors in electromechanical braking systems: a modified recursive weighted leastsquares approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3):1052 – 1060.
- [2] SUN Lizhi, SHANG Jing, ZOU Jibin. New absolute rotor-position sensors for inverter-driven motors [C]//Digests of the IEEE International Magnetics Conference. Piscataway, United States: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2005: 488 – 493.
- [3] 孙立志, 陆永平. 适于一体化电机系统的新结构磁 阻旋转变压器的研究[J]. 电工技术学报,1999,14 (1):30-34.
- [4] SUN Lizhi. Analysis and improvement on the structure of variable reluctance resolvers [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2008, 44(8): 18 – 24.
- [5] 邢敬娓, 李勇. 新型磁阻式旋转变压器相关问题研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2007:32-35.
- [6] 徐谦,尚静.一对极等气隙磁阻式旋转变压器的研究 [D].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008:20-25.
- [7] 刘国强,赵凌志,蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元 分析[M].第2版.北京:电子工业出版社,2006: 219-238.
- [8] SHANG Jing, QI Ming, ZOU Jibin. The Analysis of the line-start permanent magnetic synchronous motor basing on the FEM[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006,13(1):12-15.
- [9] SHANG Jing. Structure optimization for brushless DC motor in robot's arms using FEM [C]//Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, United States: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2007: 257 – 261.
- [10] SHANG Jing. The capacitor matching problem in Single phase line-start permanent magnetic synchronous motor
  [C]//Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, United States: Inst of Elec and Elec Eng Computer Society, 2008: 2911 2915. (编辑 杨 波)