不同绕组结构的旋转变压器输出电压波形与 谐波对比分析

薛力铭,郑 楠

沈阳仪表科学研究院有限公司,辽宁 沈阳 Email: 393379161@qq.com, 13889347062@163.com

收稿日期: 2021年6月1日; 录用日期: 2021年8月30日; 发布日期: 2021年9月6日

摘要

旋转变压器的精度是其重要指标之一,绕组分布形式对其输出电压波形的正弦性影响较大,是决定精度 的主要因素之一。本文通过有限元分析软件Ansoft Maxwell,对一款旋转变压器进行仿真计算,对比分 析双层短距绕组和同心式正弦绕组对旋转变压器输出电压波形正弦性的影响,并进行谐波对比分析,以 更形象、直观的方式说明哪种结构的绕组,可以提高旋转变压器的精度,更适合旋转变压器的设计,为 旋转变压器的设计提供一定的理论基础。

关键词

精度,绕组分布形式,正弦性,谐波分析

Comparative Analysis of Output Voltage Waveform and Harmonic of Resolvers with Different Winding Structures

Liming Xue, Nan Zheng

Shenyang Institute of Instrumentation Science Co., Ltd., Shenyang Liaoning Email: 393379161@qq.com, 13889347062@163.com

Received: Jun. 1st, 2021; accepted: Aug. 30th, 2021; published: Sep. 6th, 2021

Abstract

The accuracy of resolver is one of important indicators. The distribution of windings has a greater

文章引用: 薛力铭,郑楠.不同绕组结构的旋转变压器输出电压波形与谐波对比分析[J].电气工程,2021,9(3):97-104. DOI: 10.12677/jee.2021.93011 influence on the sine of its output voltage waveform, and it is one of the main factors that determine the accuracy. In this paper, a resolver is simulated by finite element analysis software Ansoft Maxwell, to compare and analyze the influence of the double-layer short-distance winding and the concentric sine winding on the sine of the resolver's output voltage waveform, and to compare and analyze the harmonics. In a more visual and intuitive way to explain which structure of the winding, can improve the accuracy of the rotary transformer, more suitable for the design of the rotary transformer, and provides a certain theoretical basis for the design of the resolver.

Keywords

Accuracy, Winding Distribution, Sine, Harmonic Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

正余弦旋转变压器是一种高精度的角度位移传感器,其输出电压波形为转子转角成正余弦关系的电压信号。正余弦旋转变压器具有体积小、可靠性高、精度高、维护简单和使用便利等优点,一般用于武器装备系统中角度解算元件及随动系统位置传感器,特别适用工作于高温、严寒、高振动、潮热等极端恶劣的环境下[1]。

由于旋转变压器主要应用于解析转子的旋转角度,其精度尤为重要,其中装配工艺水平和绕组分布 形式是影响精度的主要因素,现阶段研究旋转变压器主要集中于环境适应性的提高[2],旋转变压器的设 计[3] [4]和仿真方法的研究[5]。

绕组分布形式对旋转变压器的精度起着决定性的作用,直接影响旋转变压器的工作性能,是其核心 部分。绕组的分布形式多种多样,本文对不同的绕组分布形式进行仿真计算,以更形象、直观的方式说 明适合旋转变压器使用的绕组分布形式。

2. 电磁仿真计算

本文以一款旋转变压器为例,进行仿真计算,采用有限元分析软件 Ansoft maxwell 对旋转变压器进行仿真计算,旋转变压器主要参数如表1所列。

表 1. 旋转变压器王安参数				
参数	数值	参数	数值	
激磁电压/V	7	激磁频率/Hz	2000	
定子外径/mm	42	极对数	1	
定子内径/mm	34	定子铁芯长度/mm	10	
气隙/mm	0.4	转子铁芯长度/mm	11	
定子槽数	24	转子槽数	20	

Table 1. Main parameters of resolver 表 1. 旋转变压器主要参数

在工艺条件允许的情况下, 槽数越多越好,为了确保旋转变压器的解析精度,一般使原方绕组消除 5 次和 7 次谐波,副方绕组消除 3 次谐波磁势,因此,原方的槽数大多数为 20 或者 28 的倍数;而副方 槽数大多数为 12 的倍数,本例原方转子槽数为 20 槽,副方定子槽数为 24 槽。

正余弦旋转变压器的绕组分布形式较多,比如三角形分布绕组和梯形分布绕组,虽然绕组的解析精 度较高,但其制造生产的工艺性较低,实际几乎不被采用。双层短距绕组与同心式正弦绕组是正余弦旋 转变压器经常被采用的绕组分布形式。

双层短距绕组的解析精度较高,而且生产制造工艺性优良,但是在运行的过程中,绕组存在着一定量的谐波磁势。选取合适的绕组每极每相元件数 q 与节距数 y,可以消减和削弱在运行过程中绕组产生的低次谐波磁势,但是一定量的谐波磁势成分依然存在,这些谐波磁势成分所引起的输出正弦和余弦函数误差可达 0.01%~0.07%。由于此绕组形式存在着绕组谐波磁势,再加上由于工艺装配所引起的误差,致使旋转变压器的解析精度受到了一定程度的限制。

同心式正弦绕组是高精度绕组分布形式,可以把各次谐波削弱和消减到非常小的程度,从而使旋转 变压器的解析精度大幅度提升,但是正弦绕组下线困难,其制造生产的工艺性要比双层短距绕组差很多。

正弦绕组是绕组的各元件边沿着定子内径(或转子外径),在槽内按正弦形式分布的同心式绕组。同心 式正弦绕组共有两种分布形式,当绕组的轴线与定子槽的中心线重合时,为第一类分布绕组。当绕组的 轴线与定子齿的中心线重合时,为第二类绕组分布。旋转变压器通常采用第二类正弦绕组分布形式[6][7]。 本文所分析的正余弦旋转变压器采用正弦绕组的第二类绕组分布形式。

下面分别对双层短距绕组和正弦绕组的旋转变压器进行仿真计算,仿真模型如图1所示,其主要由 定子铁芯、转子铁芯、定子绕组和转子绕组组成。



Figure 1. Electromagnetic simulation model of resolver 图 1. 旋转变压器电磁仿真模型

2.1. 双层短距绕组

对仿真模型中的绕组分相、绕组设计、励磁设置、剖分设置、求解设置,设置好相关参数后,进行 仿真计算[8],旋转变压器运行至 30 ms,仿真输出结果如图 2 所示,为双层短距绕组的电压输出波形, 由图中可以看出两相绕组的电压输出波形规律整齐,相位相差 90°,每个波形的周期为 10 ms,正余弦波 形相差 5 ms,呈正余弦函数状态分布,整体波形呈现出菱形形状,波形中每个周期的中部幅值较大,导 致波形整体不平滑,所以正弦性相对较差。

对其电磁场进行仿真分析,当旋转变压器运行至 30 ms 时,旋变的磁场分布云图和磁力线分布云图 如图 3 和图 4 所示,由图中可以看出,定转子轭部磁密最大,可以达到 0.039 T,其余部分磁密较小。磁 力线分布呈两极状态,定子轭部磁力线流通相对较多,与磁场分布云图相符,满足旋转变压器运行时的 磁场分布情况。由此可以得出双层短距绕组的旋转变压器可以输出正余弦电压波形,但是其波形不平滑, 正弦性较差。



Figure 2. Output voltage waveform of double layer short distance winding 图 2. 双层短距绕组输出电压波形



Figure 3. Cloud diagram of magnetic field distribution of double-layer short distance winding 图 3. 双层短距绕组磁场分布云图



Figure 4. Cloud diagram of magnetic field line distribution of double-layer short pitch winding 图 4. 双层短距绕组磁力线分布云图

2.2. 同心式正弦绕组

将定转子重新分相,设置成同心式正弦绕组分布,其余参数不变,设置好相关参数后,再次进行仿 真计算,运行至 30 ms,仿真输出结果如图 5 所示,为正余弦绕组的输出电压波形,波形的周期与双层短 距绕组相同,由此可以看出,不改变其他参数,只改变绕组的分布形式的情况下,只会对输出绕组的输 出电压波形产生影响。与图 2 相对比可以发现,双层短距绕组的正余弦输出电压波形的幅值更大,其顶 部形状更尖一些,不平滑,以至于谐波较多。而同心式正弦绕组的正余弦输出波形其顶部更平缓,形状 更平滑,谐波相对较少,正弦性更好一些,要优于双层短距绕组。



 Figure 5. Output voltage waveform of sine cosine winding

 图 5. 正余弦绕组输出电压波形

对其电磁场进行分析,当旋转变压器运行至 30 ms 时,磁场分布云图和磁力线分布云图如图 6 和图 7 所示,由图中可以看出,定转子轭部磁密最大,可以达到 0.0377 T,其余部分磁密较小。磁力线分布呈两极状态,定子轭部磁力线流通相对较多,与磁场分布云图相符,与双层短距绕组情况相似,磁场感应强度双层短距绕组饱和更为严重,主要是因为其输出电压的幅值较大,能量更高,但是均在合理的范围内。



Figure 6. Nephogram of magnetic field distribution of sinusoidal winding 图 6. 正弦绕组磁场分布云图



Figure 7. Cloud diagram of magnetic field line distribution of sinusoidal winding 图 7. 正弦绕组磁力线分布云图

3. 谐波分析

一般情况下,对于旋转变压器输入激磁频率的电压,叫做基波。而频率不等于激磁频率电压叫做谐 波,而大于基波频率整数倍的各次分量,通常称为高次谐波。谐波含量的多少对旋转变压器的精度有着 至关重要的影响,所以减少高次谐波的存在,也是旋转变压器设计的重要因素之一,影响高次谐波的主 要因素就是绕组的分布形式。

对上述两种绕组分布情况下得到的正余弦绕组的电压输出波形进行 FFT 变换,对比分析哪种绕组分 布形式谐波含量更少,性能更优。

以输出绕组的 Sin 电压信号为例,得到输出电压信号基波及各奇次谐波示意图,如图 8 和图 9 所示, 各奇次谐波输出电压幅值如表 2 所列。由示意图可以看出,两种绕组分布形式的输出电压均存在着高次 谐波,对旋转变压器的精度都存在着一定的影响,但是随着频率的增加,高次谐波输出电压的幅值越来 越小。其谐波示意图输出电压幅值与上文输出电压波形幅值相对应,证明了其正确性。由表 2 可以看出, 同心式正弦绕组低次谐波输出电压幅值要明显小于双层短距绕组低次谐波输出电压幅值,从第 9 次谐波 开始,随着谐波次数的增加,两种绕组分布形式的输出电压幅值差越来越小,最终接近。



Figure 8. Harmonic diagram of double layer short distance winding 图 8. 双层短距绕组谐波示意图



 Figure 9. Harmonic diagram of concentric sine winding

 图 9. 同心式正弦绕组谐波示意图

	4 1	
次数	同心正弦绕组 Sin 相(V)	双层短距绕组 Sin 相(V)
	5111 /11(*)	5m /11(V)
基波	2.525747565	2.345546778
3 次	0.007286965	0.026566333
5 次	0.003742749	0.008617053
7 次	0.002771318	0.004582705
9次	0.002800436	0.003246807
11 次	0.001750016	0.002309475
13 次	0.001478996	0.001398953
15 次	0.001629752	0.001436726
17 次	0.000972334	0.000999224
19 次	0.000856564	0.000841609
THD 值	0.0038	0.0122

 Table 2. Fundamental and harmonic amplitude

 表 2. 基波和各次谐波幅值

同心式正弦绕组和双层短距绕组的输出电压波形畸变率 THD 分别为 0.38%和 1.22%,同心式正弦绕 组的输出电压波形畸变率要比双层短距绕组的输出电压波形畸变率降低了 68.85%。由此可以看出同心式 正弦绕组是高精度绕组,可以将各次谐波削弱和消除到相当小的程度,使旋转变压器的精度大大提高, 在旋转变压器设计时,同心式正弦绕组是目前首选的绕组分布形式。

4. 结论

本文通过应用有限元分析软件 Ansoft Maxwell 对不同绕组分布形式的旋转变压器进行了仿真计算, 为旋转变压器的仿真计算提供了一定的理论基础。在仿真计算的结果中,同心式正弦绕组输出电压波形 的正弦性要明显优于双层短距绕组输出电压波形的正弦性,更有利于提高旋转变压器的精度。并且通过 对输出电压波形进行 FFT 变换谐波分析,可以得出,同心式正弦绕组的谐波含量和谐波畸变率要明显小 于双层短距绕组的谐波含量和谐波畸变率,同心式正弦绕组是目前首选的绕组分布形式,为旋转变压器 的设计提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 朱青. 无接触旋转变压器[J]. 微电机, 1984(2): 22-27.
- [2] 许兴斗, 王永博, 钱俊阳, 周竞捷, 周奇慧. 轴向窜动旋转变压器的优化设计[J]. 微特电机, 2020, 48(9): 31-33+38.
- [3] 李立娜, 李大超, 袁永杰. 无刷旋转变压器的磁路设计及仿真分析[J]. 微特电机, 2015, 43(8): 53-56.
- [4] 沈训欢, 谷爱昱, 梁国荣. 无接触式旋转变压器的设计及仿真[J]. 防爆电机, 2013, 48(3): 5-9.
- [5] 许兴斗,王永博,周竞捷,周奇慧. 一种旋转变压器电气精度的仿真分析方法[J]. 微特电机, 2020, 48(12): 11-13+18.
- [6] 西安微电机研究所. 控制微电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.
- [7] 上海微电机研究所. 微特电机[M]. 上海: 上海科技技术出版社, 1983.
- [8] 赵博, 张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.