

新型高效低谐波绕组设计*

李 超

(安徽皖南电机股份有限公司, 安徽 泾县 242500)

摘 要: 介绍一种新型高效低谐波绕组, 初步分析了该绕组磁势谐波的特点。采用有限元方法进行电磁场分析, 表明新型高效低谐波绕组电机可以有效降低电机谐波, 改善电机磁场分布。通过样机制造和电机试验, 证实了新型高效低谐波绕组电机杂散损耗大幅度减小, 电机温升显著降低。

关键词: 高效低谐波绕组; 磁势谐波; 高次谐波; 杂散损耗

中图分类号: TM 303.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)05-0047-04

Design of New High Efficiency Low Harmonic Winding*

LI Chao

(Anhui Wannan Electric Machine Co., Ltd., Jingxian 242500, China)

Abstract: A new type of high efficiency low harmonic winding was introduced, and the characteristics of the magnetic potential harmonics of this winding were analyzed. The new high efficiency low harmonic winding motor could effectively reduce the high harmonics and improve the magnetic field distribution of motor. Through prototype manufacturing and motor testing, it was proved that the stray loss of the new high efficiency low harmonic winding motor and the temperature rise of the motor decreased significantly.

Key words: high efficiency low harmonic winding; magnetic potential harmonics; high harmonics; stray loss

0 引 言

绕组是构成电机的主要部件, 电机依靠感应于绕组中的电势和通过绕组的电流来产生电磁功率与电磁转矩, 从而达到进行机电能量转换的目的。电机绕组研究的核心内容是其磁势的分布、变化规律及相对大小。谐波分析是有效分析电机绕组磁势的方法。在电机的合成磁势中, 一般均存在高次磁势谐波, 对异步电机的运行性能产生不利影响。磁势谐波建立的谐波磁场使电机定、转子铁心受到交变的磁拉力, 从而产生振动和噪声; 谐波磁场在绕组中产生感应电流, 并各种转速相对于转子旋转而产生表面涡流损耗和磁滞损耗, 使电机损耗增加、效率下降、温度上升; 磁势谐波产生的附加转矩使电磁转矩性能下降。这种影响在普通三相异步电机中尤为明显。为此, 学者

们开展了一系列研究。文献[1]通过短距线圈、双短距线圈、非等元件绕组等来削弱磁势谐波。研究目的是使绕组磁势的基波具有尽可能大的幅值, 而其他谐波含量尽量消减, 幅值越小越好。为减少谐波磁势的影响, 研制出各种低谐波绕组, 如黄坚等^[2]开展了三相适用型正弦分布绕组(正弦绕组, 即不等匝绕组)降低电机损耗的研究, 提出了新型定子绕组分析计算模型(包含绕组方案设计、评判、绕线模尺寸计算等功能), 开发了正弦绕组的设计软件, 样机验证表明, 在降低杂散损耗和起动性能方面达到了预期效果。采用多相电机也可以改善磁势波形, 降低线电压以及提高效率, 抵消高次谐波, 从而减小了噪声和损耗; 最大的优点是空间谐波次数增大, 幅值下降, 转矩脉动减小^[3-4]。本文对多种削弱磁势谐波方法进行研究分析, 设计了一种新型高效低谐波绕组。

* 基金项目: 工信部强基工程项目(TC160A31006)

作者简介: 李 超(1966—), 男, 工程师, 研究方向为电机设计与制造。

1 新型高效低谐波绕组

新型高效低谐波绕组采用多种削弱磁势谐波方法设计,既能消除电机绕组磁势中 5、7、17、19 等次谐波,又能消减其余高次谐波,提高电机的功率和效率,减少电机的发热;不仅基波绕组系数较高,还可以精确调整线圈匝数,又可以节铜降低成本。新型高效低谐波绕组基波绕组系数优于其他低谐波绕组,如正弦绕组,而其他谐波含量消减程度大于正弦绕组。

新型高效低谐波绕组特征之一是采用三相普通正弦绕组削弱磁势谐波方法设计,即将普通 60°相带的三相绕组分成两套:一套采用三角形接法,另一套采用星形接法,两套绕组在空间上彼此相差 30°电角度,最后将其接成延边三角形或星-三角形的典型结构。三相普通正弦绕组也是一种六相绕组^[5],根据交流电机绕组的理论, m 相合成磁势的 ν 次谐波分量为

$$F_{\nu' \pm} = m \frac{\sqrt{2}}{\pi \nu'} k_{dp\nu'} w l k_{\nu' \pm} \quad (1)$$

其中: $k_{\nu' \pm} = \frac{\sin \pi(\nu' \pm 1)}{m \sin \frac{\pi(\nu' \pm 1)}{m}}$, $\nu' = 1, 2, 3, \dots$ 等

整数。

m 相对称绕组由基波电流产生的合成磁势只存在下列次数的谐波: $\nu = \pm(nm \pm 1)$, 在三相 60°相带电机里,由基波电流产生的定子磁势包含 5、7、11、13、17、19 等次谐波,在转子表面引起较大的损耗(涡流损耗和磁滞损耗)。改用新型高效低谐波绕组后,消除了 5、7、17、19 等次谐波。

新型高效低谐波绕组采用短距线圈剩下的 11 次和 13 次谐波,可以通过采用“短距比”11/12 来削弱。这样,定子磁势中,除齿谐波之外,只存在次数较高而幅值较小的高次谐波。因此,即使气隙很小,所引起的转子表面损耗也较小。理论计算表明,在其他条件相同的情况下,若认为每极每相槽数目接近无穷大,则三相绕组采用最有利短距比 5/6 时的转子表面损耗,与新型高效低谐波绕组在短距比 11/12 时的转子表面损耗之比为 35:1。由此可见,新型高效低谐波绕组电机的转子表面损耗显著减小,从而有利于提高电机的效率。

新型高效低谐波绕组是 30°相带绕组,相带越狭窄则绕组的分布系数越大,比普通三相 60°相带绕组的大。再加上新型高效低谐波绕组的短距比可取得比三相 60°相带绕组的大很多,因此其短距系数也更大。由此可见,新型高效低谐波绕组的绕组系数高,从而提高了电机有效材料的利用率。

新型高效低谐波绕组参考三相适用型正弦分布绕组的研究,通过将槽内绕组数量适当分配,使槽电流沿铁心表面按正弦规律分布,以降低高次谐波磁势。正弦绕组是非等元件绕组,是一种低谐波绕组,一般采用双层同心式结构,有短节距和整节距等两种基本形式。理论上正弦绕组能够全部消除各相带的各次高次谐波,但由于线圈匝数有限,在实际使用中难以达到理想状况,因此实际的正弦绕组中还是存在着幅值不同的各次高次谐波磁势。正弦绕组是一种高精度绕组,其每极每相槽数的每层导体的平均匝数精度最小可达约 0.1 匝,而普通绕组的仅为 0.5 匝。正弦绕组,如 Y2-225S-4,在同一性能指标下,铁心、每极每相串联导体数和线规相同时,相比普通绕组节铜约 10%。由此可见,正弦绕组不仅可以减小谐波含量,同时可以达到降低电机制造成本的效果。但是正弦绕组在高次谐波低时,基波绕组系数较低;其各槽内导体数量不同,会导致有绕组定子槽内槽满率不同、有绕组定子大线圈与小线圈温差较大。新型高效低谐波绕组吸收正弦绕组设计优点,改善了其基波绕组系数较低的缺点,同时进一步消除各相带的各次高次谐波,优化了绕组气隙磁势波形,达到了精准设计和低成本设计。

新型高效低谐波绕组采用多种方法组合消减定子磁势谐波,优化绕组气隙磁势波形,在一定程度上减小了电机气隙,有效地减少了需要的励磁安匝数从而减少定、转子的损耗和发热,进一步减少了电机总损耗。

2 新型高效低谐波绕组电机验证

2.1 设计电机

为了更好地分析新型高效低谐波绕组,将其与正弦绕组进行对比分析。通过采用相同的结构尺寸的电机,1 台绕组设计成正弦绕组,另 1 台绕组设计成新型高效低谐波绕组,其他部分完全一

致,然后对 2 台电机进行仿真分析。样机参数如表 1 所示。样机绕组示意图如图 1 所示。

表 1 样机参数

参数名称	参数值
电机中心高/mm	315
额定输出功率/kW	160
定子槽数	72
定子外径/mm	520
定子内径/mm	350
铁心长度/mm	400
极对数	4
额定电压/V	380
转子槽数	62
转子外径/mm	347.8
转子内径/mm	110

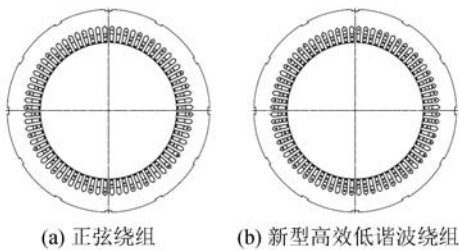


图 1 绕组示意图

2.2 电磁场分析

在有限元软件中建立正弦绕组和新型高效低谐波绕组电磁场 2D 模型图和有限元网格划分,如图 2、图 3 所示。分配材料,添加边界条件,在定子线圈中添加激励,用静态场求解器进行分析,可得空载磁密分布如图 4、图 5 所示。

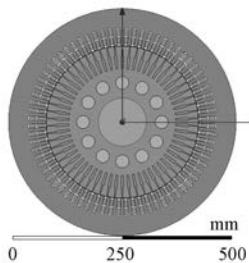


图 2 2D 模型图

图 4、图 5 表明,采用新型高效低谐波绕组设计的电机磁密相比采用正弦绕组设计的电机磁密

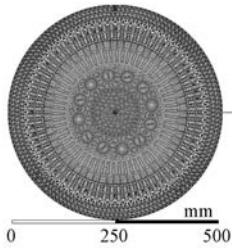


图 3 有限元网格划分

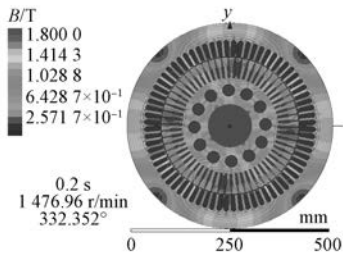


图 4 正弦绕组空载磁密分布图

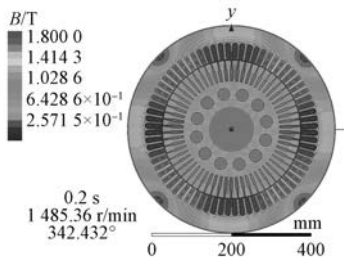


图 5 新型高效低谐波绕组空载磁密分布图

更低,分布更均匀。在实际设计电机时,可在一定程度上缩短铁心。

求取电机径向气隙磁密进行谐波分析。正弦绕组和新型高效低谐波绕组傅里叶分解如图 6、图 7 所示。

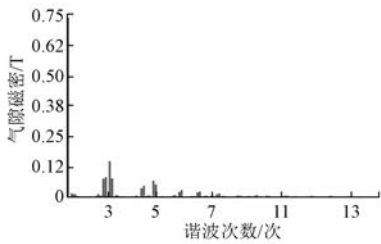


图 6 正弦绕组 FFT 图

对比图 6 和图 7 可知,新型高效低谐波绕组各次谐波幅值明显小于正弦绕组,说明新型高效

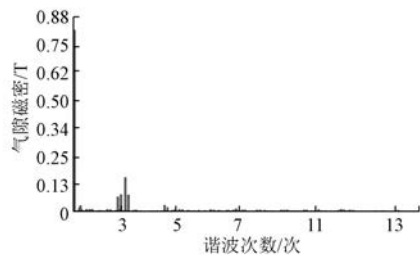


图7 新型高效低谐波绕组 FFT 图

低谐波绕组能有效地削弱绕组产生的高次谐波。

2.3 制造验证

采用2组 YX3-315L1-4 电机进行对比试验验证,电机定子、转子冲片等不变,绕组分别按正弦绕组与新型高效低谐波绕组设计,新型高效低谐波绕组定子铁心长度相比正弦绕组缩短了 20 mm,试验按 GB/T 1032 中的 B 法,结果如表 2 所示。

表 2 YX3-315L1-4 验证数据

绕组 类型	效率/ %	温升/ K	损耗/W		
			铜耗	空载损耗	杂散损耗
正弦 绕组	95.6	56.9	2 287	2 789	1 091
	95.6	58.2	2 423	2 756	980
新型 绕组	96.1	56.5	3 280	2 245	13
	95.8	58.3	3 333	2 264	411

为了进一步验证新型高效低谐波绕组,采用2组 YX3-315S-4 电机进行试验,设定定子、转子冲片等不变,绕组分别按正弦绕组与新型高效低谐波绕组设计,新型高效低谐波绕组定子铁心长度相比正弦绕组缩短了 25 mm,试验按 GB/T 1032 中的 B 法,结果如表 3 所示。

表 3 YX3-315S-4 验证数据

绕组 类型	效率/ %	温升/ K	损耗/W		
			铜耗	空载损耗	杂散损耗
正弦 绕组	96.1	63.6	2 569	3 271	957
	96.0	61.4	2 515	3 216	1 098
新型 绕组	96.5	49.3	2 945	2 909	193
	96.4	50.7	2 835	3 181	191

试验数据表明:新型高效低谐波绕组的电机其杂散损耗相比正弦绕组显著减小,温升也有所降低,说明采用新型高效低谐波绕组设计制造的电机可以有效削弱电机绕组磁势中的高次谐波,降低电机温升,提高电机的功率和效率。

目前,新型高效低谐波绕组已经申请国家专利。

3 结 语

(1) 初步分析了新型高效低谐波绕组,可知其具有结合普通正弦绕组、正弦绕组、短距绕组等低谐波绕组的优点。

(2) 通过有限元分析可知,新型高效低谐波绕组的气隙磁密谐波显著减小,空载磁密下降,说明该绕组能有效削弱电机绕组磁势中的高次谐波。

(3) 通过电机制造试验验证,在铁心缩短的情况下,采用新型高效低谐波绕组制造的电机比采用正弦绕组的电机杂散损耗显著减小,且降低了电机温升,提高了电机效率。

【参考文献】

[1] 许实章.交流电机的绕组理论[M].北京:机械工业出版社,1985.

[2] 黄坚,姚丙雷,顾德军,等.IE4 超超高效率电动机系列产品开发[J].电机与控制应用,2018,45(2): 56.

[3] ROBERTS P C. A study of brushless doubly-fed (induction) machines [D]. Cambridge: University of Cambridge,2005.

[4] AI Y. Novel direct flux and direct torque control of six-phase induction machine with special current wavefotm [D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2006.

[5] 姜孝定.三相异步电动机绕组改接与计算[M].北京:机械工业出版社,1997.

收稿日期: 2018-12-18