

一种混合励磁同步发电机的气隙磁密分析 及其电压谐波抑制^{*}

宁银行¹, 鲁为华², 赵朝会¹, 刘 闯³

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306; 2. 上海昂电电机有限公司, 上海 201111;
3. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为改善混合励磁同步发电机的气隙磁密分布, 采用三段式气隙长度对转子进行了优化, 对比了优化前后的气隙磁密。为抑制电压谐波, 在完成转子结构优化的基础上, 进一步采用短距、分布电枢绕组以及定子斜槽等措施。最后对样机电压波形进行了实测和质量分析, 结果表明: 采用三段式气隙长度与定子斜槽相结合, 可将电压波形的总谐波失真 (THD) 抑制在 5% 的范围内。此外, 探讨了偏心距法在切向/径向混合励磁电机中应用的可行性, 并对比了分别采用偏心距法和三段式气隙长度法时的气隙磁密。

关键词: 同步发电机; 混合励磁电机; 气隙磁密; 电压谐波抑制

中图分类号: TM 311 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)01-0015-06

Analysis on the Air-Gap Flux Density and Voltage Harmonic Suppression of a Hybrid Excitation Synchronous Generator^{*}

NING Yinhang¹, LU Weihua², ZHAO Chaohui¹, LIU Chuang³

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;
2. Shanghai Angdian Motor Co., Ltd., Shanghai 201111, China;
3. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the air-gap magnetic field distribution of hybrid excitation synchronous generator, a method named three-level air-gap length was introduced to optimize the rotor structure. The air-gap flux densities, before and after optimization based on this method were analyzed and compared. After the rotor structure was optimized, the armature winding scheme with short pitch, distributed arrangement and skewed slots was adopted for a better voltage waveform quality. Then, prototype was tested to analyze its harmonic components of phase voltage with a power analyzer. Experimental results demonstrated that the total harmonic distortion (THD) of voltage could be restrained to the acceptable range (less than 5%) based on the combination of the three-level air-gap length and the stator skewed slots. Finally, feasibility of the eccentric-distance method used in the tangential/radial hybrid excitation synchronous generator was discussed, and the calculation results of air-gap flux density were compared for the eccentric-distance method and the three-level air-gap length method.

Key words: synchronous generator; hybrid excitation motor; air-gap flux density; voltage harmonics suppression

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (50977044, 51377076); 江苏省自然科学基金项目 (BK20151574)

作者简介: 宁银行 (1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为电机设计与控制。

鲁为华 (1981—), 男, 研究方向为电机设计与控制。

赵朝会 (1963—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电机设计与控制。

0 引言

混合励磁发电机在永磁电机基础上发展而来,具有功率密度高、体积小、输出电压可调等优点,克服了永磁发电机功率因数不可调的缺点^[1]。在电动汽车等领域中,混合励磁电机的调速范围宽,通过增磁可满足低速大转矩运行,通过弱磁可满足高转速运行,具有较好的应用前景^[2-3]。

混合励磁电机励磁绕组位于定子上,无刷励磁较为方便,但其一般存在附加气隙,磁阻相对较大^[4]。文献[5-6]研究了一种转子励磁的切向/径向混合励磁同步发电机(T/R-HESG),其中永磁体和励磁绕组均置于转子上,两者为并联磁路。由于T/R-HESG的励磁绕组在转子上,为解决其无刷励磁,文献[7]根据T/R-HESG在零电励磁时气隙中仍有磁通的特点,提出了两级式无刷化励磁方案,相对于航空中常用的三级式发电机^[8-10],简化了结构。

为抑制电压谐波而采取的措施因电机结构的不同而有所不同^[11]。在凸极同步电机中,使极靴宽度和极距的比值控制在0.70~0.75,极靴边缘处的最大气隙与磁极中心处最小气隙之比为1.5;在隐极同步发电机中,通常使励磁绕组节距与极距之比在0.7~0.8范围内。作为一种新型电机,T/R-HESG的转子外圆类似于隐极同步发电机,但是其电励磁绕组分布却类似于凸极同步发电机,针对T/R-HESG的谐波抑制问题,目前尚缺乏系统性的研究。

本文主要研究了T/R-HESG气隙磁密的改善方法及电压谐波抑制问题。首先分析了转子结构优化前的气隙磁密特点,然后采用三段式气隙长度法进行优化,对比了优化前后气隙磁密的改善情况;在完成转子结构优化的基础上,采用短距、分布、斜槽等手段,设计了定子电枢部分;对样机电压波形质量进行了实测。此外,探讨了偏心距法在T/R-HESG中应用的可行性。

1 T/R-HESG 结构

T/R-HESG的结构如图1所示。其特点主要体现在转子结构上,转子上有永磁磁势和电励磁磁势两个磁势源。其中,永磁体位于相邻极靴之间,磁化方向如图1所示;电励磁绕组位于转子齿



图1 T/R-HESG 截面图

上,电励磁单方向励磁,N、S为转子磁极极性。

2 T/R-HESG 有限元计算

在本研究中,T/R-HESG为4极,电极为24槽,定子外径为174 mm,定子内径为112.8 mm,转子外径为112 mm,电励磁极身宽度为9 mm,定转子叠厚为95 mm。

2.1 优化前的主极气隙磁密

在Ansoft Maxwell 14中,建立2D模型,等效模型如图2所示。本文关于转子结构对主极气隙磁密影响的讨论,均建立在定子未开槽的前提之上。

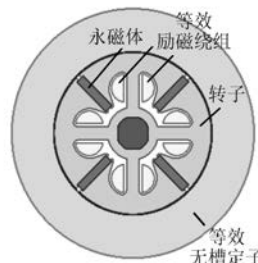


图2 T/R-HESG 的二维等效模型

2.1.1 气隙磁密特点

极弧长度比 a_p (极弧长度与极距的比值)为0.91,每极励磁 F_f 为450安匝时的气隙磁密如图3所示。

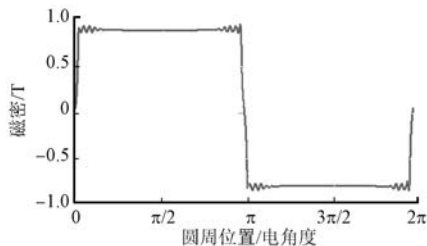


图3 $F_f = 450$ 安匝时的气隙磁密($a_p = 0.91$)

仅改变每极极弧长度,图4、图5所示为 $a_p =$

0.80 时的气隙磁密。其中图 5 是每极励磁 F_t 分别为 0、250、450 安匝时的气隙磁密。

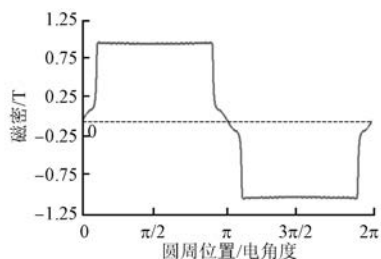


图 4 $F_t=450$ 安匝时的气隙磁密 ($a_p=0.80$)

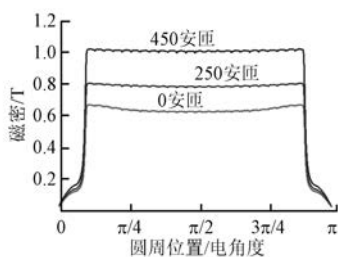


图 5 不同励磁时的气隙磁密 ($a_p=0.80$)

对比图 3~图 5 可看出:(1) a_p 变化时,影响气隙磁密占空比;(2) 励磁变化时,只影响气隙磁密幅值大小,其基本形状近似不变;(3) a_p 变小后,相同励磁磁势所产生的气隙磁密增大。

2.1.2 气隙磁密谐波分析

转子结构优化前,定子未开槽时的气隙磁密近似为方波,极弧尺寸比 a_p 与气隙磁密占空比基本相同。为便于讨论,给出气隙磁密的等效波形,如图 6 所示。

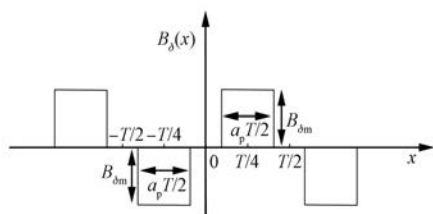


图 6 气隙磁密的等效波形

对图 6 的气隙磁密进行傅里叶分解, $B_g(x)$ 为奇函数,因此只含有奇次谐波。

$$B_g(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1)$$

其中:

$$a_n = 0;$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} B_g(x) \cos \frac{2n\pi x}{T} dx$$

$$(n = 1, 3, 5, \dots) = (-1)^k \frac{4B_{\delta m}}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{a_p}{2}\right)$$

$$(n = 2k + 1, k = 0, 1, 2, \dots)。$$

根据式(1)可知,选择合理的 a_p ,可消去或抑制相应的谐波。对于电机而言,必然是 $a_p \leq 1$,显然在此范围内, a_p 越大,基波和谐波幅值越大。由于 T/R-HESG 的 $a_p \approx 1$,因此 T/R-HESG 的基波和谐波均较大,且谐波与基波的比值近似为 $1/n$,例如 3、5、7 次谐波与基波的比值分别是 0.335、0.198、0.140,如图 7 所示。

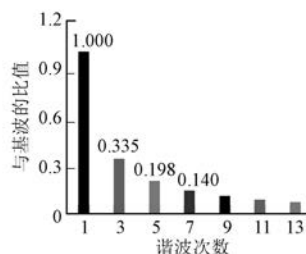


图 7 气隙磁密基波及主要次谐波 (优化前, $F_t=350$ 安匝)

受结构所限,为了固定相邻极靴之间的磁钢, T/R-HESG 应设计在 $a_p \approx 1$ 附近,因此,不宜通过控制 a_p 的大小来实现气隙磁密谐波的抑制。

2.2 主极气隙磁密优化

图 8 所示为优化主极气隙磁密的一种三段式气隙长度法。在每极范围内,取不同的气隙长度,范围①内定子转子间的气隙长度为 $\delta_0 = 0.4$ mm,范围②内的气隙长度为 0.5 mm,范围③内的气隙长度为 0.7 mm。

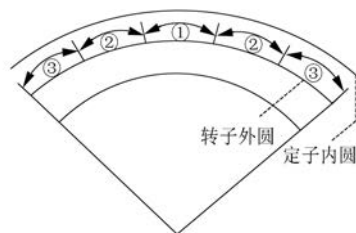


图 8 转子结构的优化

按照三段式气隙长度法优化后,有限元计算的气隙磁密波形如图 9 所示。

采用三段式气隙长度法优化前后的气隙磁密

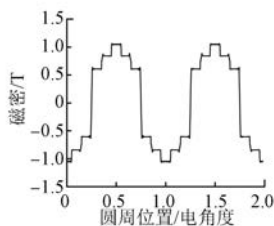


图9 优化后的气隙磁密($F_t=350$ 安匝)

对比如图 10 所示。为便于比较,图 10 中谐波值是实际值与基波的比值。气隙磁密基波幅值约为 1.09 T,优化前后相差不大;优化后,3、5、7、13 次谐波抑制效果明显,而 9 次谐波变化不大。

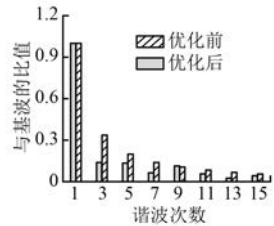


图 10 优化前后气隙磁密对比

3 电压谐波抑制

3.1 电压谐波分析

样机电枢部分采用短距、分布绕组[4 极/24 槽,120°相带,节距为 $5\pi/6$ (以电角度计)],定子为直槽,相电压有限元计算波形如图 11 所示。相电压中 5、7、11、13、19 次谐波相对较大,而 3 次及 3 倍次谐波被较好地消除,这是因为相应次的绕组分布因数为零。需要说明的是,采用上述方案优化结构后,电压波形质量仍难以满足要求,因此须进一步采用定子斜槽措施。

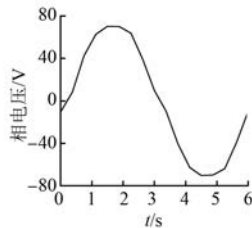


图 11 相电压波形($F_t=350$ 安匝,转速 5 000 r/min)

3.2 定子斜槽的等效处理

采用有限元法直接计算斜槽模型的感应电势,对计算机的要求较高,计算量较大,一般是在轴向上先分成多个直段,然后再将每个直段模型

的计算结果错开一定角度进行等效处理^[12-13],也可以在直槽模型计算结果的基础上,直接乘以相应的斜槽因数进行等效^[11]。

$$k_{skv} = \left[\sin\left(v \frac{c}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) \right] \bigg/ \left(v \frac{c}{\tau} \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

式中: v ——基波和谐波次数;

c ——定子槽扭斜的距离;

τ ——极距。

根据绕组参数和斜槽(样机为 24 槽,4 极,极距为 6 个定子齿距,斜槽跨距 c 为 1 个齿距),计算出绕组的相关因数^[14],如表 1 所示。

表 1 绕组相关因数

基波/谐波	节距因数	分布因数	斜槽因数	绕组因数
1	0.966	0.837	0.989	0.800
3	-0.707	0	0.900	0
5	0.259	-0.224	0.738	-0.043
7	0.259	0.224	0.527	0.031
9	-0.707	0	0.300	0
11	0.966	-0.837	0.090	-0.072
13	0.966	-0.837	-0.076	0.061
15	0.707	0	-0.180	0

由表 1 可以看出:不含 3 次及 3 倍次谐波;对 5、7、11、13 次谐波虽有抑制,但不能完全消除。

4 样机测试

实测样机时采用的试验系统如图 12 所示。样机为两级式结构,其中 T/R-HESG 作为主发电机:为主发电机实现无刷励磁,采用旋转电枢式交流励磁机。使用日本横河功率分析仪 WT500 对主发电机的相电压进行波形质量分析。

为励磁机提供 0.6 A 的励磁电流,使样机运行在转速 5 000 r/min,带三相对称电阻性负载,

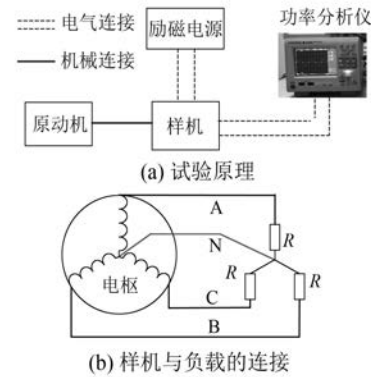


图 12 试验系统

相电压波形如图 13 所示。

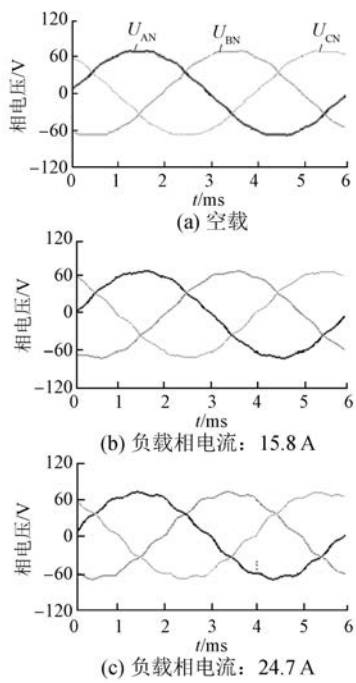


图 13 相电压实测波形 (转速 5 000 r/min)

图 13(c) 中的谐波含量情况如图 14 所示, 主要是 5、7、11、13 次谐波。

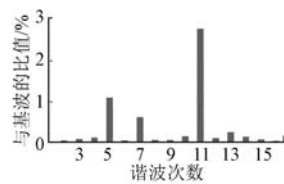


图 14 相电压的主要谐波 ($n=5\,000\text{ r/min}$)

样机运行在 6 000~11 000 r/min, 空载电压的总谐波失真 (THD) 如表 2 所示。可以看出 THD 维持在约 3.7%。励磁磁势不同时, 某次谐波会在小范围内变化。带载时电压的 THD 情况如表 3 所示, 最大值低于 5%。

表 2 空载时不同转速下相电压的总谐波失真				
转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	6 000	9 000	10 000	11 000
频率 f/Hz	233	300	333	366.6
THD/%	3.73	3.77	3.81	3.87

表 3 带载时相电压的总谐波失真 (THD)				
相负载/A	0	7.93	15.8	24.7
THD/%	3.73	3.94	4.31	4.85

5 偏心距法对气隙磁场的影响

偏心距法是在凸极同步电机或永磁同步电机中常采用的谐波抑制方案^[15]。本节探讨该方法在 T/R-HESG 中应用的可行性。偏心距法示意图如图 15 所示。转子结构优化前, 转子外圆圆心为 O , 半径为 R_{ro} ; 偏心距法优化转子结构时, 以 O' 为圆心, 以 R'_{ro} 为半径。定义 $\beta=t/R_{ro}$ 为偏心距系数, 本文中 $R_{ro}=56\text{ mm}$ 。

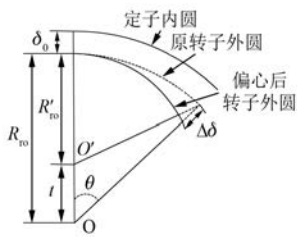


图 15 偏心距法示意

图 16 所示为 β 值对磁密基波幅值的影响, 随着 β 的增大, 基波磁密幅值先增加, 再减小, 在 $\beta=0.03$ 时, 基波幅值最大。

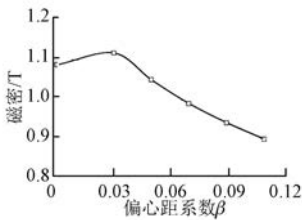


图 16 偏心距系数 β 对气隙磁密基波的影响 ($F_f=350$ 安匝)

图 17 所示为 β 对 (主要次) 谐波磁密的影响: (1) 在 $\beta<0.06$ 时, 随着 β 的增加, 3 次谐波减小; 在 $\beta>0.06$ 时, 随着 β 的增加, 3 次谐波增加; (2) 随着 β 的增加, 5、7、9 次谐波幅值均下降;

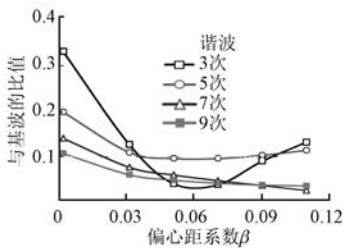


图 17 偏心距系数 β 对气隙磁密谐波分量的影响 ($F_f=350$ 安匝)

(3) 当 $\beta > 0.11$ 时, 因基波下降较大, 不再考虑。综合衡量, $\beta = 0.03$ 时气隙磁密的改善效果较好。

分别采用偏心距法 ($\beta = 0.03$) 和三段式气隙长度, 给出气隙磁密计算结果的对比, 如图 18 所示。图 18 中数值均是各次分量与基波实际值的比值, 其中采用偏心距法时基波实际值为 1.13 T, 采用三段式气隙长度时基波实际值为 1.09 T, 两者相差约 3.7%。同时结合谐波/基波的比值, 可以看出两种方法的谐波抑制效果相差不大。

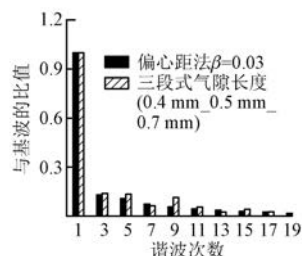


图 18 两种方法下的气隙磁密对比 ($F_f = 350$ 安匝)

在设计大型 T/R-HESG 时, 偏心距法中需要切去较大尺寸的极靴边缘, 不利于固定相邻极靴之间的永磁磁钢, 从这个角度看, 采用阶梯式气隙长度法更具有实际意义。

6 结 语

为了解决 T/R-HESG 的电压谐波问题, 本文分别从气隙磁密改善、绕组的短距和分布处理、斜槽等 3 个方面入手进行了相关试验。试验结果表明, 电压谐波实测成分与理论分析基本吻合, 电压 THD < 5%, 符合设计预期。采用三段式气隙长度法和斜槽等措施相结合, 能够有效解决 T/R-HESG 的电压谐波问题。此外, 探讨了偏心距法在 T/R-HESG 中应用的可行性, 从数值计算结果看, 偏心距法和三段式气隙长度法均可改善气隙磁密波形。

【参考文献】

- [1] PATIN N, VIDO L, MONMASSON E, et al. Control of a hybrid excitation synchronous generator for aircraft applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(10): 3772.
- [2] KAMIEV K, NERG J, PYRHONEN J, et al. Hybrid excitation synchronous generators for island operation [J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(1): 1.
- [3] 朱孝勇, 程明, 赵文祥, 等. 混合励磁电机技术综述与发展展望[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 30.
- [4] 宁银行, 赵朝会, 刘闯. 混合励磁电机的技术现状 & 新进展[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 1.
- [5] 宁银行, 刘闯, 干兴业, 等. 两级式无刷混合励磁同步电机的电磁设计及分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(3): 519.
- [6] NING Y H, LIU C, ZHU S S, et al. Design and finite element analysis of a hybrid excitation synchronous machine [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015, 48(1): 11.
- [7] 朱姝姝, 刘闯, 宁银行, 等. 一种新型混合励磁同步发电机的两级式无刷励磁方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(21): 99.
- [8] GRIFFO A, WROBEL R, MELLOR P H, et al. Design and characterization of a three-phase brushless exciter for aircraft starter/generator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(5): 2106.
- [9] GRIFFO A, DRURY D, SAWATA T, et al. Sensorless starting of a wound-field synchronous starter/generator for aerospace applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(9): 3579.
- [10] 马鹏, 刘卫国, 骆光照, 等. 一种三级式航空无刷同步电机起动控制策略[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(11): 29.
- [11] 汤蕴璆. 电机学(第四版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 145.
- [12] 黄劭刚, 王善铭, 夏永洪. 同步发电机空载电压波形的齿磁通计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 135.
- [13] TENHUNEN A, ARKKIO A. Modelling of induction machines with skewed rotor slots [J]. IEE Proceedings-Electrical Power Applications, 2001, 148(1): 45.
- [14] 刘迪吉. 航空电机学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1992.
- [15] 徐英雷, 李群湛, 王涛. 永磁同步电机空载气隙磁密波形优化[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(4): 513.

收稿日期: 2018-07-02