

混合励磁永磁发电机的设计与性能分析

王惠军¹ 刘剑峰¹ 刘西全¹ 姚丽² 林岩²

(1.北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

2.丹佛斯(天津)有限公司, 天津 301700)

摘要 为了降低永磁发电机的电压调整率, 本文研究了一种混合励磁永磁发电机。在详细分析其结构与工作原理的基础上, 给出设计该种发电机的设计数学模型。同时, 利用三维有限元软件进行分析。最后, 设计并加工了一台 7.5kW 样机, 从试验结果来看, 通过调节电励磁电流, 气隙磁通具有较好的调节特性, 从而获得较低电压调整率。

关键词: 混合; 永磁; 发电机; 设计

Design and Performance Analysis of Hybrid Excitation Permanent Magnet Synchronous Generator

Wang Huijun¹ Liu Jianfeng¹ Liu Xiquan¹ Yao Li² Lin Yan²

(1. Beijing University of Aeronautics & Astronautics, School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing 100191; 2. Danfoss (Tianjin) Ltd, Tianjin 301700)

Abstract A novel hybrid excitation permanent magnet generator with adjustable air gap flux is investigated. The proposed structure and control principle are described in detail and design equations are completely derived. By using 3-D finite element analysis, the electromagnetic distribution and the performance evaluation are carried out. A 7.5kW prototype generator is manufactured and tested. The calculated data are compared with the experimental data. It is obvious that the proposed structure generator has good regulation characteristic by means of variation of dc field current.

Key words: hybrid; permanent magnet; generator; design

稀土永磁电机由于是永磁体励磁, 没有励磁损耗, 因此效率高于电励磁电机, 而且具有结构简单、可靠性高等一系列优点, 从而在许多工业领域得到了应用。在发电机运行中为了保持电压不变, 需要进行电压调节, 对于永磁发电机来说, 转速的变化或负载电流的变化会造成输出电压的变动, 但由于永磁电机的气隙磁场是由永磁体和磁路磁导决定的, 调节气隙磁场困难而导致电压调节困难, 从而阻碍了永磁发电机的发展和应用^[1-3]。因此开发一种综合这两种电机的优点又能克服其缺陷的发电机——混合励磁永磁同步发电机, 无疑是有意义的。

近年来, 国内外学者对混合励磁发电机结构进行了深入的研究。文献[4]提出了多种交流与直流混合的电机结构, 但其磁路较长, 并且有较大的漏磁通。文献[5-7]提出了各种各样的混合励磁结构, 但结构均都比较复杂。文献[8]提出了一种铁磁极与永

磁磁极交互排列的混合结构, 但由于铁磁极与永磁极长度一样, 导致功率密度较低。

因此, 本文提出了一种气隙磁通可调节的混合励磁发电机结构。这种发电机气隙磁场包括两部分: 主要部分由永磁体建立, 称为永磁主发电机部分; 电压调节所需要的磁场变化部分由辅助的电励磁绕组来实现, 称为辅助发电机或辅助电励磁部分, 两部分共有一套电枢绕组。在深入分析其结构与原理的基础上, 建立了其电磁数学模型。同时, 利用三维有限元分析软件对其磁场分布与调节特性进行研究。最后, 通过一台 7.5kW 的样机的试验结果验证了其结构的合理性。

1 结构及原理

图 1 是提出的混合励磁发电机结构。从该图可以看出, 定子电枢绕组为三相对称绕组。定子被环

形直流励磁绕组分成两部分，定子两段铁心由其外的背轭在机械和电磁上相连接；转子分成 N 极端和 S 极端两部分。每极端由同极性永磁体和铁磁极交错排列，且两端的 N、S 永磁体和铁磁极也相互错开。转子铁心和转轴之间有导磁性能好的转子背轭，用于转子的轴向导磁。当调节直流励磁电流的大小和方向时，合成气隙磁密就会相应地增大或减小。

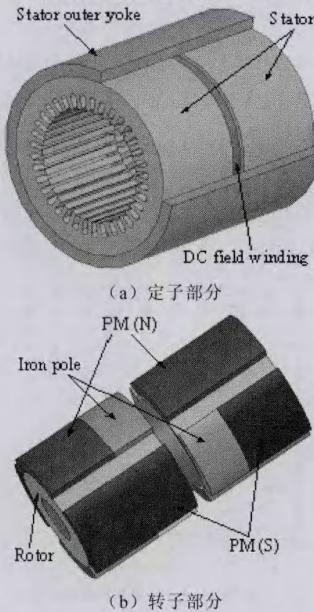


图 1 混合励磁发电机结构

下面将详细分析不同直流励磁电流时，混合励磁永磁同步发电机的磁场分布情况。

1) 当直流励磁电流为零时，气隙磁场只由永磁体产生，此时磁场分布如图 2 所示。

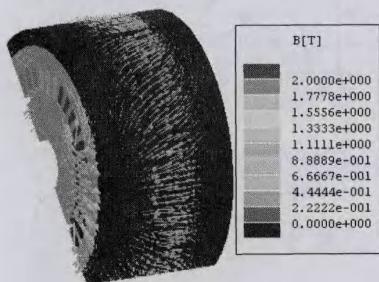


图 2 永磁磁通分布

2) 当直流励磁电流小于零时，同一极端铁磁极磁场方向与永磁体相同。对于定子绕组而言，同一线圈下磁场极性相反，气隙有效磁场减弱。当直流励磁电流大到一定数值时，电励磁磁场与永磁体磁场相等，气隙有效磁场变为零，此时的磁场分布如

图 3 所示。

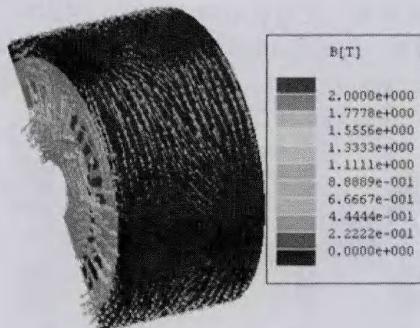


图 3 退磁模式时磁通分布

3) 当直流励磁电流大于零时，同一极端铁磁极磁场方向与永磁体相反。对于定子绕组而言，同一线圈下磁场极性相同，气隙有效磁场增强。当直流励磁电流大到一定数值时，电励磁磁场与永磁体磁场相等，此时的磁场分布如图 4 所示。

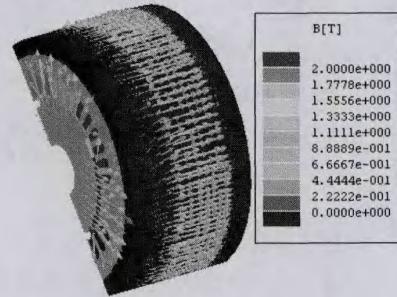


图 4 增磁模式时磁通分布

2 电磁设计

混合励磁发电机的性能特性主要取决于永磁磁场和电励磁磁动势。因此，基于上述结构及原理，本节推导了该种发电机的等效磁路模型，对调节特性进行预测与分析。图 5 是其等效气隙磁通图。从该图可以看出，区域 2 是磁通可调节区域，区域 1 和区域 3 是磁通固定区域。

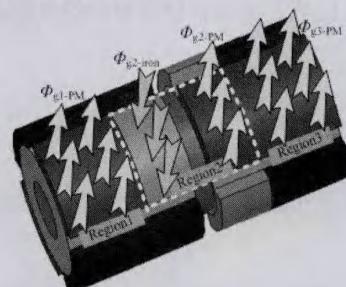


图 5 等效气隙磁通分布

对于区域 1 和 3，其磁路等效可参考常规表贴式永磁发电机。发电机的调节特性主要取决于区域 2，其磁通分为永磁和电励磁两部分。因此，区域 2 的等效磁路如图 6 所示。

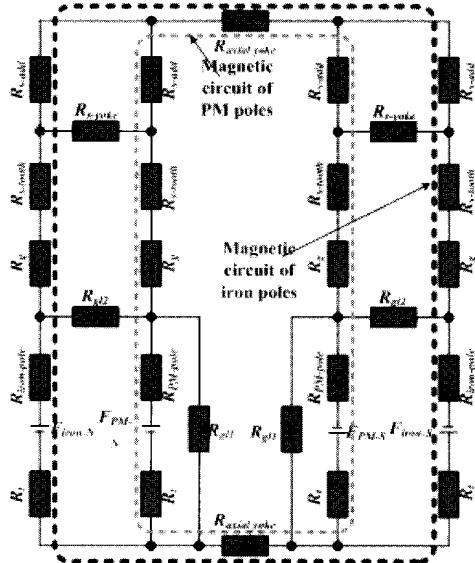


图 6 区域 2 的等效磁路

从图 6 可以看出，区域 2 的永磁磁通 Φ_{g2-PM} 可以表示为

$$\Phi_{g2-PM} = \frac{2F_{PM}}{\left[2\left((R_r + R_{PM-pole}) \| R_{gl} \right) + 2R_g + 2R_s + R_{axial} \right]} \quad (1)$$

式中，符号 “ \parallel ” 表示并联关系。 R_r 和 R_s 分别表示转子、定子磁阻。 R_{gl} 是漏磁阻。 R_g 是气隙磁阻。 $R_{PM-pole}$ 和 $R_{iron-pole}$ 分别是永磁体和铁磁极的磁阻。 R_{axial} 是合成的轴向气隙磁阻。 F_{PM} 和 F_{iron} 分别是永磁体及铁磁极产生的磁动势。

$$R_{axial} = R_{s-axial} + R_{r-axial} \quad (2)$$

$$R_{gl} = (R_{gl1} + R_{iron-pole}) \| R_{gl2} \quad (3)$$

永磁体的磁动势及对应的磁通可表示为

$$F_{PM} = h_{pm} H_c \quad (4)$$

$$\Phi_{g2-PM} = B_{g2-PM} A_{g2-PM} \quad (5)$$

因此，区域 2 部分永磁体表面的气隙磁密可表示为

$$B_{g2-PM} = \frac{2h_{pm} H_c}{\left[2\left((R_r + R_{PM-pole}) \| R_{gl} \right) + 2R_g + 2R_s + R_{axial} \right] A_{g2-PM}} \quad (6)$$

基于上述相同原理，区域 2 部分电励磁磁通可表示为

$$\Phi_{g2-iron} = \frac{F_{iron}}{\left[2(R_r + R_{iron-pole}) + 2R_g + 2R_s + R_{axial} \right]} \quad (7)$$

而电励磁磁动势可表示

$$F_{iron} = 2F_{iron-N} = 2F_{iron-S} = N_{field} I_{field} \quad (8)$$

相对应的铁磁极表面的气隙磁通可表示为

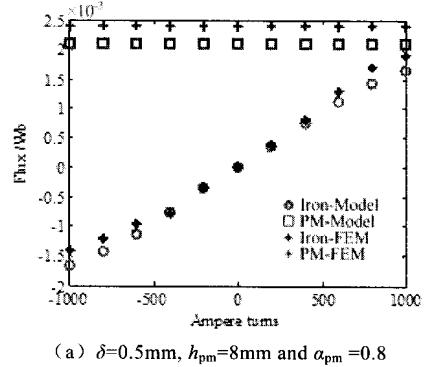
$$B_{g2-iron} = \frac{K_{DC} N_{field} I_{field}}{\left[2(R_r + R_{iron-pole}) + 2R_g + 2R_s + R_{axial} \right] A_{g2-iron}} \quad (9)$$

因此，区域 2 部分总的合成磁通及磁密可表示为

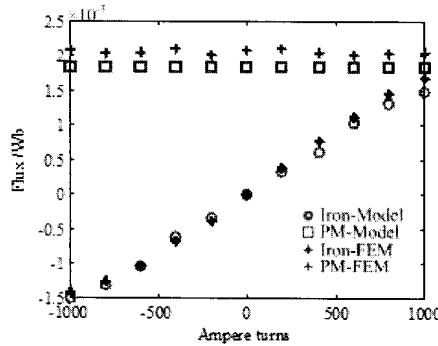
$$\Phi_{g2} = \Phi_{g2-PM} + \Phi_{g2-iron} \quad (10)$$

$$B_{g2} = \frac{\Phi_{g2-PM} + \Phi_{g2-iron}}{A_{g2-PM} + A_{g2-iron}} \quad (11)$$

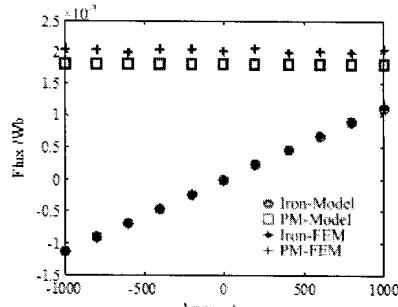
图 7 是 3D 有限元分析和磁路分析模型的结果比较。从该图可以看出，磁路模型的计算值与有限元的计算结果比较吻合。在直流励磁电流发生变化时，永磁体表面的气隙磁通基本保持不变。同时，空载时其调节特性呈线性变化，与前面的分析结论基本一致，从而说明所建立模型的正确可靠。



(a) $\delta=0.5\text{mm}$, $h_{pm}=8\text{mm}$ and $\alpha_{pm}=0.8$



(b) $\delta=0.5\text{mm}$, $h_{pm}=8\text{mm}$ and $\alpha_{pm}=0.7$



(c) $\delta=0.8\text{mm}$, $h_{pm}=11\text{mm}$ and $\alpha_{pm}=0.7$

图 7 有限元与等效磁路模型的结果比较

3 有限元分析及试验验证

为了准确分析样机的性能, 利用 3D 有限元软件对磁场调节特性进行分析。图 8 是其网格剖分。图 9 是 3 种工作模式下的气隙磁场分布。从该图可以看出, 提出的结构具有较好的磁场调节能力。

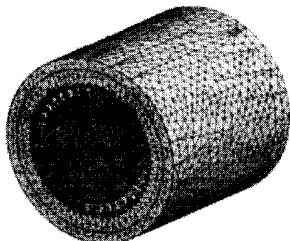


图 8 3D 有限元网格剖分

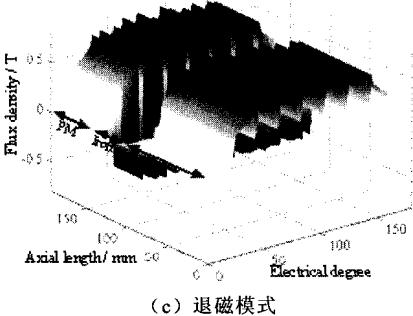
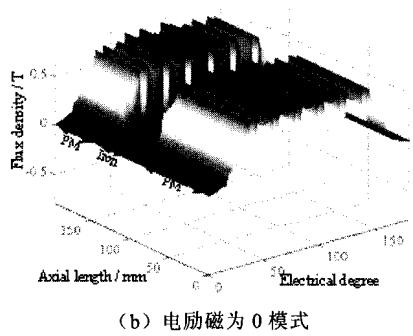
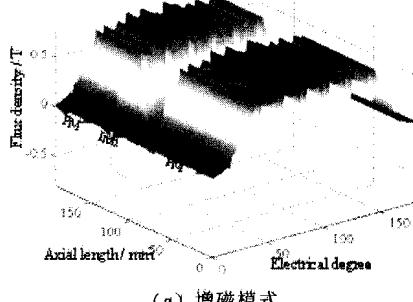


图 9 不同模式下的气隙磁密分布

基于上述理论分析, 开发了一台功率为 7.5kW、4 极混合励磁发电机样机, 表 1 是样机的设计参数。

在试验中, 利用一台 11kW 三相永磁同步电动机作为原动机。为了测量发电机的输入转矩, 在轴连接处安装了一台 100N·m 的转矩测量仪。图 10 是

测试平台。图 11 是样机的测试结果, 从图中可以看出, 样机具有较好的调节特性。

表 1 样机的主要设计参数

设计参数	参数值
定子外径/mm	175
定子背轭厚度/mm	12
气隙长度/mm	0.8
定子槽数	36
直流励磁绕组宽度/mm	13
永磁体轴向长度/mm	112
铁磁极轴向长度/mm	35
永磁体极弧系数	0.81
永磁体厚度/mm	11

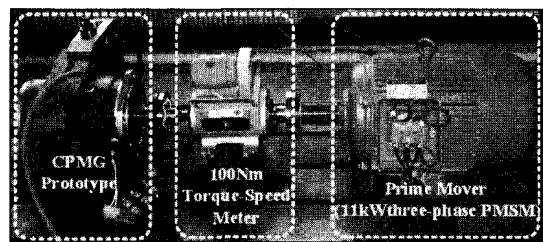


图 10 试验测试平台

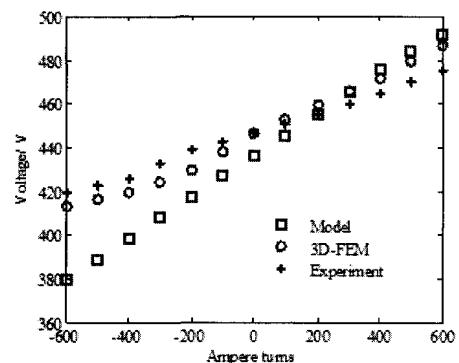


图 11 样机空载时的调节特性

4 结论

本文提出了一种混合励磁发电机结构。在对其结构与原理研究的基础上, 建立了其等效磁路模型。通过 3D 有限元软件, 对其磁场分布及调节特性进行了深入分析。从仿真与试验结果来看, 所提出的结构具有较好的磁场调节能力。

参考文献

- [1] N. Naoe, T. Fukami. Trial Production of a Hybrid Excitation Type Synchronous Machine. Proceedings of IEMDC'2001, France. International Academic Publishers, 2001:545-547.

(下转第 40 页)

参考文献

- [1] 周全仁, 张海. 现代电网自动控制系统及其应用[M]. 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 刘健, 倪建立. 配电网自动化新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [3] T. J. E. Miller. 电力系统无功功率控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [4] 王守相, 王成山, 王剑. 配电电容器三相分相优化投切[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 16-20.
- [5] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

(上接第 11 页)

- [2] T. F. Chan, W. Wang and L.L. Lai, "Analysis and Performance of A Permanent-magnet Synchronous Generator Supplying an Isolated Load," *IET Electric Power Applications*, 2010, 4(3):169-176.
- [3] Y. Sugii, M. Yada and S. Koga, "Applicability of various to Electric Vehicle (EV)," *The 13th International Electric Vehicle Symposium*, Osaka, Japan, Oct.13-16, 1996:757-764.
- [4] E. Spooner, S.A. W. Khatab and N.G. Nicolaou, "Hybrid Excitation of AC and DC machine" in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Drives*, London, U.K., Sep.1989:48-52.
- [5] Y. Amara, J. Lucidarme, et al. A New Topology of Hybrid Synchronous Machine. *IEEE Trans. IA*. 2001, 37(5):1273 -128.

(上接第 25 页)

4 结论

(1) 齿槽转矩是永磁通用电机转矩波动的主要原因, 为了减小转矩波动, 可使永磁磁极远离气隙。

(2) 永磁磁极的引入会产生负转矩, 负转矩会减小电机的有效输出转矩, 降低效率, 可以通过引入永磁磁通支路有效消除。

(3) 本文提出的新结构永磁通用电机可以有效减小转矩波动和负转矩, 提高电机效率, 达到 72.97%。

(4) 为了得到高能效的产品, 不只要提高电机本体的效率, 还要注重电机与风扇的匹配。

- [6] Carol.S.Cheng, Dariush.Shirmohammadi. A Three-Phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1995, 10(2): 671-679.
- [7] 王明俊, 于尔铿, 刘广一. 配电系统自动化及其发展[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [8] 王留成. 中性点不接地系统配网三相解耦潮流[J]. 自动化与仪表, 2011, 21(1):135-137.

作者简介

王留成 (1980-) 男, 讲师, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化的教学和科研。

- [6] Z.R. Zhang, Y.G. Yan, S.S. Yang and B. Zhou, "Principle of Operation and Feature Investigation of a New Topology of Hybrid Excitation Synchronous Machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol.44, no.9, pp. 2174-2180, Sep. 2008.
- [7] C.F. Yang, H.Y. Lin, J. Guo and Z.Q. Zhu, "Design and Analysis of a Novel Hybrid Excitation Synchronous Machine with Asymmetrically Stagger Permanent Magnet," *IEEE Trans. Magn.*, vol.44, no.11, pp. 4353-4356, June. 2008.
- [8] J.A. Tapia, F. Leonardi and T.A. Lipo, "Consequent-pole Permanent Magnet Machine with Extended Field-weakening Capability," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39(6), pp.1704-1709, Nov. 2003.

参考文献

- [1] 唐任远等. 现代永磁电机理论与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 王秀和等. 永磁电机. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 陈阳生, 林友仰, 陶志鹏. 无刷直流电机力矩的解析计算. 中国电机工程学报, 1995, 15(4):253-260.
- [4] 魏先林, 付求涯. 基于 MATLAB 解析计算无刷直流电动机的齿槽转矩. 微特电机, 2005, 1(7):15-20.

作者简介

刘伟 (1981-), 辽宁葫芦岛人, 工程师, 主要从事特种电机设计、 仿真工作。