

感应励磁式无刷同步电机设计与仿真分析

符 慧, 干兴业, 朱姝姝, 刘 闯
(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

摘 要:文中采用了一种感应励磁方式实现径向/切向混合励磁交流发电机的无刷励磁方案, 依靠定子绕组磁场在转子励磁绕组内感应出的交流电流整流来获得同步电机的电励磁电流。文中详细介绍了该电机的结构特点和工作原理, 借助有限元仿真的分析, 得到了电机的空载特性和外特性曲线。仿真结果分析表明: 该电机集成了永磁电机效率高和电励磁电机调磁方便等优点。此外, 相比于传统两级式励磁方式, 该交流发电机的无刷励磁方案使得电机具有结构简单等特点。

关键词:感应励磁; 混合励磁; 同步电机; 无刷

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2014)07-0230-03

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.057

Design and Simulation Analysis of a Brushless Synchronous Machine with Induced-excitation

FU Hui, GAN Xing-ye, ZHU Shu-shu, LIU Chuang
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: An excitation scheme of radial/tangential hybrid excitation brushless ac generator with a kind of induced-excitation is proposed in this paper. The excitation current of synchronous motor is obtained for rectified ac current of rotor exciting windings which is induced by the magnetic field of stator windings. Introduce its configuration characteristics and operation principle. The no-load characteristics and external characteristics are obtained by 2D finite element method. The simulation results indicate that it possesses the advantages of high efficiency of permanent magnet machine and adjustable magnetic of electric excitation machine. In addition, compared with traditional brushless scheme, the kind of motor has many more advantages, such as simple structure.

Key words: induced excitation; hybrid excitation; synchronous motor; brushless

0 引 言

众所周知, 混合励磁同步电机兼备了永磁同步电机体积小、效率高和电励磁同步电机调磁方便等优点, 于20世纪80年代^[1]被提出后便受到了广泛关注, 得以迅速发展, 为新能源发电等领域提供了一条新途径。

但是到目前为止, 已被提出的混合励磁方案^[2-3]的电气性能均不完善, 各种缺陷普遍存在, 如: 磁路附加气隙大、主磁场难以全调节^[4-8]、无刷励磁困难^[9-11]等等。

在HESM的基础上进行无刷化改进, 一种新型切向/径向磁路并联混合励磁同步电机^[12-13]方案被提出。T/R-HESM具有优良的性能, 功率密度更高, 有着广阔的研究发展前景。其励磁绕组线圈在转子上,

采用两级式旋转整流器无刷励磁方案^[14], 具有良好的可控性。但是需要专门励磁机, 给方案带来复杂性。

基于此, 文中采用了一种感应励磁方式实现了径向/切向混合交流发电机的无刷励磁方案。感应励磁就是靠定子绕组磁场在转子励磁绕组内感应的交流电流整流获得同步电机的励磁电流的励磁方式^[15]。该电机在T/R-HESM的基础上重新确定了电枢绕组的分布并且加入定子辅助绕组, 于其中通入直流电后建立恒定磁场, 转子上的励磁绕组在该磁场下感应出励磁电流, 从而实现了无刷化励磁。文中介绍了该电机的基本结构和工作原理, 分析了其电磁场仿真结果, 并利用定子辅助绕组, 实现了该电机的无刷结构。有限元Ansoft仿真得到了空载特性、外特性等曲线, 充分

收稿日期: 2013-09-05

修回日期: 2013-12-12

网络出版时间: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977044)

作者简介: 符 慧(1992-), 女, 研究方向为电力电子与电力传动; 刘 闯, 教授, 博士生导师, 主要从事现代交流调速、航空航天电源系统、超高速电机的研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140424.0812.052.html>

体现了该电机调磁方便、效率较高的优势。

1 方案结构和工作原理

1.1 方案结构

该感应式励磁 HESM 方案的主要特征体现在定子绕组和转子结构上。

图 1 为该混合励磁电机的组成结构图。电枢绕组和定子励磁绕组均置于定子上,通入直流电以工作。转子上安放转子励磁绕组和永磁体。转子的齿形作图示改进,四块永磁体便可嵌入转子槽中并固定。

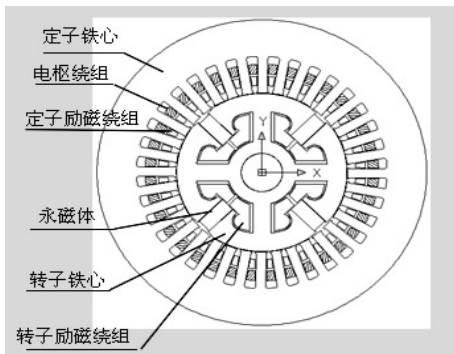


图 1 电机铁心截面图

四组转子励磁绕组 ME1 ~ ME4 相互独立,分别由二极管短接,通过单波整流确保感应出的电流方向不变。

1.2 工作原理

该电机的电励磁绕组包括定子励磁绕组和转子励磁绕组。当定子励磁绕组不工作,即没有通入电流时,永磁磁通在转子铁心形成磁短路环,主磁通不经过气隙。当定子励磁绕组通电时,电机内产生了恒定磁场,磁通路径如图 2(a) 所示。随着转子的旋转,转子励磁绕组在该磁场中产生感应电势,经二极管整流后得到直流励磁电流,使相邻转子齿的极性相反,产生径向磁场;相邻永磁体的极性交替变换,产生切向磁场。该径向磁场与切向磁场的极性相同,在磁路上呈并联连接。磁通路径如图 2(b) 所示。

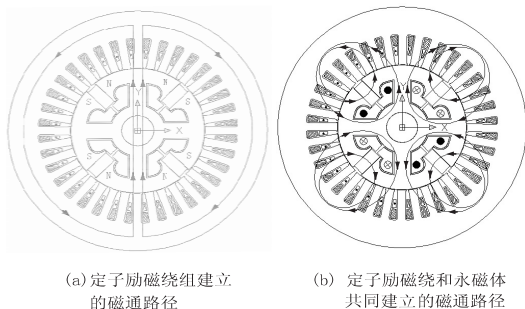


图 2 电机磁通路径

2 电磁仿真

为了验证该电机在结构上是否合理,需采用有限

元分析法(Finite Element Method, FEM),建立该电机系统的近似模型。利用 Ansoft 软件,可得到该电机磁场分布图和一系列静态特性。设计的要求是:电机额定转速为 1 500 r/min,额定输出功率为 1.5 kW,额定输出相电压为 220 V。

由仿真结果可知,当空载且定子励磁电流为 0 A 时,永磁体产生的磁通沿转子铁心闭合,在转子上形成较为饱和的磁场。此外,还有少量磁通会通过气隙沿定子铁心闭合,一般将其定义为“剩磁”,由于它的存在,使得该电机在无励磁时仍能提供一定的输出电压。此时,三相电枢绕组的最大输出剩磁电压为 123 V。

保持电机转速为 1 500 r/min,当定子励磁电流为 6 A 时,转子励磁绕组 ME1 ~ ME4 感应出脉振的励磁电流。每相励磁电流的周期为 40 ms,幅值为 2.6 A。

转子励磁磁场改变了电机的磁场分布,使得永磁磁通改变方向,经过气隙与电励磁磁通叠加,形成主磁场。由于总磁场是由定子励磁恒定磁场、永磁磁场、转子励磁磁场合成而得,故总磁场呈现轻微不对称现象。

通过仿真得到的三相电压波形如图 3 所示。三相空载相电压对称度很高,未受到磁场分布轻微不对称的影响。受到转子励磁磁势的影响,三相相电压有效值为 270 V。

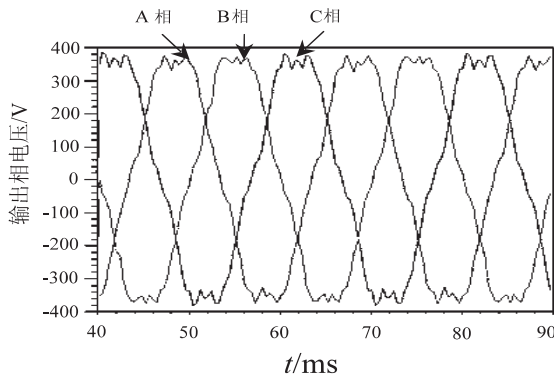


图 3 定子励磁电流 6 A 时的三相空载相电压

当定子励磁电流为 6 A 时,不同转速下的空载特性见图 4。由图可知,随着励磁电流增大,电机铁心磁场逐渐进入饱和状态。当定子励磁电流相同时,转速越高,转子励磁绕组所感应的励磁电流越大,铁芯磁路越容易饱和。

保持发电机额定转速 1 500 r/min,定子励磁电流分别设为 5 A、6 A 和 7 A,多次改变负载大小,即可获得电机的外特性曲线,见图 5。负载越大,电枢反应加强,从而输出电压减小,电压调整率升高,输出功率降低。在额定励磁电流 6 A 的情况下,输出相电压为 225 V,达到了 220 V 的设计要求。电压调整率为 17.3%,而一般交流同步发电机的电压调整率的较高要求为 30%。由此可见,该电机受电枢反应影响较弱。

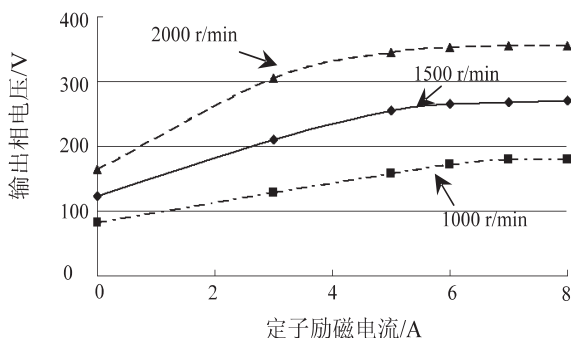


图 4 空载特性曲线

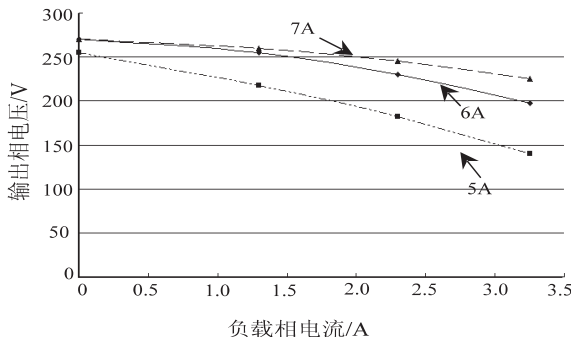


图 5 外特性曲线

保持发电机额定转速 1 500 r/min, 额定电阻性相负载 $97\ \Omega$ 不变, 多次改变励磁电流大小, 可获得电机的调节特性曲线, 如图 6 所示。发现, 在带载情况下, 输出相电压随着空载电压的上升而上升, 当定子励磁电流为 6 A 时, 磁路开始饱和, 再增大定子励磁电流, 输出相电压上升幅度明显下降。

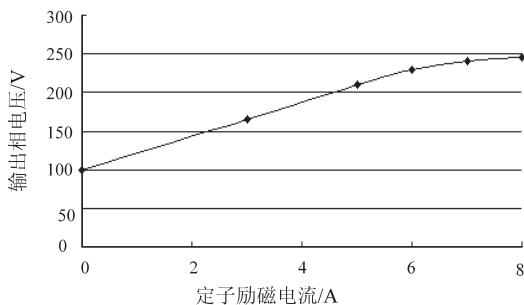


图 6 调节特性曲线

3 结束语

文中采用了一种感应励磁方式实现了径向/切向混合交流发电机的无刷励磁方案。该方案在定子槽内设置定子励磁绕组, 产生稳定的磁场在由二极管短接的转子励磁绕组中感应出励磁电流, 以控制气隙磁密的大小, 实现了无刷化励磁。文中借助 Ansoft 软件对电机进行了电磁仿真, 得到了其磁场分布情况和相关静态特性。由空载特性曲线和调节特性曲线可以看出, 无论是空载还是带载情况下, 输出相电压完全受到定子励磁电流的影响。该种电机特性与传统同步电机相仿。由外特性仿真结果可知, 该电机达到额定转速

下输出功率 1.5 kW, 相电压 220 V 的设计要求; 电压调整率仅为 17.3%, 远低于普通电励磁同步电机。该电机与一般的同步电机相比还具有以下优势:

(1) 无需副励磁机、励磁机, 即可实现转子励磁式混合励磁电机的无刷化励磁。

(2) 普通电励磁感应电机电枢反应较大, 整体输出功率不高。增加永磁体励磁源后, 集成了永磁电机电枢反应小、功率密度高等优点。

(3) 励磁方式简单, 无需配备专门的励磁方式, 现有的励磁调压方法均可运用于该种电机。

综上所述, 该电机采用感应励磁, 解决了转子励磁电机无刷励磁的难题, 并可以很好地控制永磁磁势, 从而控制气隙磁密的大小, 起到了调节电压的目的。由于采用了混合励磁的励磁模式, 克服了传统电励磁感应励磁电机电枢反应大、功率密度低的不足, 因此具有较大的研究价值和市场前景。

参考文献:

- [1] Dou Yiping, Chen Haizhen. A design research for hybrid excitation rare earth permanent magnet synchronous generator [C]//Proc of the fifth international conf on electrical machines and systems. Shenyang, China; IEEE, 2001: 856-859.
- [2] 赵朝会, 秦海鸿, 严仰光. 混合励磁同步电机发展现状及应用前景[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(2): 113-117.
- [3] 黄诚君. 混合磁极电动机高频感应无刷励磁系统的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [4] Chlamers B J, Akmes R, Musaba L. Design and field-weakening performance of permanent-magnet/re reluctance motor with two-part rotor[J]. IEE Pro of Electric Power Applications, 1998, 145(2): 133-139.
- [5] Akemakou A D, Phounsonmbat S K. Electrical machine with double excitation, especially motor vehicle alternator: US, 6147429[P]. 2000-11-14.
- [6] Chan C C, Chau K T, Jiang A Z. Novel permanent magnet hybrid motor for electric vehicles[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1996, 43(2): 331-339.
- [7] Tapia J A, Leonardi F, Lipo T A. Consequent pole permanent magnet machine with field weakening capability[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2003, 39(6): 1704-1709.
- [8] Mizuno T. Basic principle and design of hybrid excitation synchronous machine[C]//Proc of nat conf on industrial application. Japan: [s. n.], 1994: 25-31.
- [9] 徐衍亮, 唐任远. 混合励磁同步电机的结构、原理及参数计算[J]. 微特电机, 2000, 28(1): 16-18.
- [10] Reiter F B, Rajashekar K, Krefta R J. Salient pole generator for belt-driven automotive alternator applications[C]//Proc of the conf on industry applications. Chicago, IL, USA; IEEE, 2001: 437-442.

3.2 流程展示

审批结果的流程查询展示采用 C# 和 VML 来实现。首先从数据库中查询该审批事项需要经历的所有环节,然后从审批实例表中找出目前已经审批过的环节和参与者,然后通过 VML 画出各个环节,根据环节状态分别用绿色表示环节已经审批通过,黄色表示还没有审批的环节,然后设置一个 div 专门用于保存每个环节各个参与者的审批情况,当鼠标移动到环节图形区域时,即时显示审批信息。

4 运行结果

文中在详细设计和分析的基础上,根据系统开发平台的特点进行功能实现,图 4 和图 5 是具有代表性的功能界面。

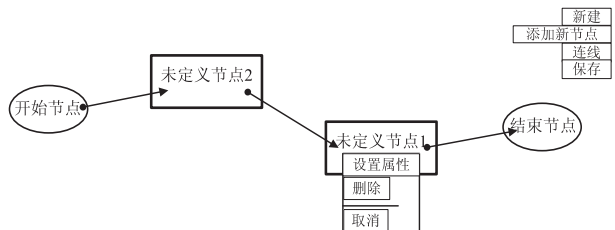


图 4 流程定制界面

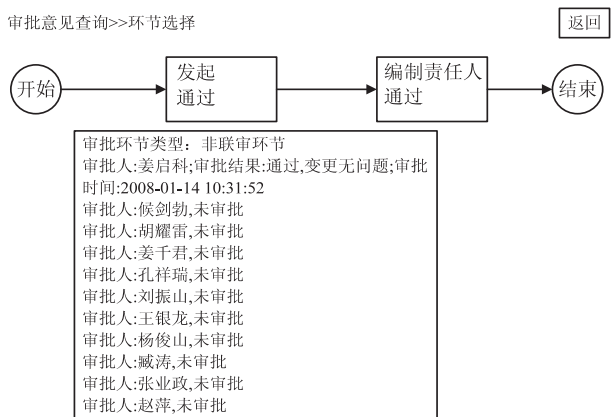


图 5 流程审批界面

5 结束语

文中经过一段时间的研究设计已经完成了企业管理系统的流程定制、修改和流程审批功能的图形化管理功能,从实际应用上对企业管理软件进行了创新。

此外文中研究的工作流是基于 VML 的,在设计和实现的过程中充分利用了 VML 与 HTML 相兼容的特点,把复杂的图形识别交给 JS 处理,用简单的工具实现了页面的图形化操作。同时文中的设计也存在一些不足,还需要不断改进和完善。

参考文献:

[1] 杨杰,刘丹.基于工作流和 B/S 结构的 OA 系统设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2005,29(1):56-59.

[2] 刘志明,王定山.基于工作流技术的中考招生管理系统设计与实现[J].黑龙江科技信息,2011(16):88-88.

[3] 刘美秀,周德珍,李明磊.基于工作流技术的医院综合业务平台的研究[J].医疗装备,2010,23(1):49-51.

[4] 骆帝勇.基于 VML 的计算机图形学在线学习系统[D].贵州:贵州师范大学,2008.

[5] 徐静.基于工作流的学院管理系统的设计与实现[J].科技信息,2010(32):221-222.

[6] 仰飞.基于 EPC 模型的建筑工程协同项目管理系统的研究与应用[D].长沙:湖南大学,2004.

[7] Berzti A T. Knowledge and workflow systems[C]//Proceedings of 11th international workshop on database and expert systems applications. London:IEEE,2000:1102-1106.

[8] Workflow Management Coalition WfMC-TC-1011. Workflow management coalition specification terminology and glossary[S].2010.

[9] Mohan C. Recent trends in workflow management products, standards and research[J]. Workflow Management Systems and Interoperability,1998,164:396-409.

[10] Chang E, Gautama E, Dillon T S. Extended activity diagrams for adaptive workflow modelling[C]//Proc of ISORC. Magdeburg:IEEE,2001:413-419.

[11] 范玉顺.工作流管理技术基础[M].北京:清华大学出版社,2001.

[12] 赵文,胡文惠,张世琨,等.工作流元模型的研究与应用[J].软件学报,2003,14(6):1052-1059.

[13] 余阳,汤庸,潘茂林,等.时态工作流过程模型及其合理性验证[J].软件学报,2010,21(6):1233-1253.

[14] 杜彦华,范玉顺.基于事件-状态-过程规则的跨组织工作流协同方法[J].计算机集成制造系统,2008,14(7):1342-1348.

[15] 徐轶昊.新型旋转整流器式混合励磁无刷交流同步电机研究[D].南京:南京航空航天大学,2010.

[16] 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):99-104.

[17] 王建民,孟传富.倍极感应励磁同步发电机的电感参数与转子励磁电流[J].电工技术学报,1995(1):48-52.

(上接第 232 页)

[11] Luo Xiaogang, Lipo T A. A synchronous/permanent magnet hybrid AC machine[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2000,15(2):203-210.

[12] 徐轶昊,朱晓琴,刘闯,等.新型切向/径向磁路并联混合励磁同步电机[J].中国电机工程学报,2010,30(36):53-58.

作者: 符慧, 干兴业, 朱姝姝, 刘闯, FU Hui, GAN Xing-ye, ZHU Shu-shu, LIU Chuang
作者单位: 南京航空航天大学, 江苏 南京, 210016
刊名: 计算机技术与发展 
英文刊名: Computer Technology and Development
年, 卷(期): 2014(7)

参考文献(15条)

1. Dou Yiping; Chen Haizhen A design research for hybrid excitation rare earth permanent magnet synchronous generator 2001
2. 赵朝会; 秦海鸿; 严仰光 混合励磁同步电机发展现状及应用前景 2006(02)
3. 黄诚君 混合磁极电动机高频感应无刷励磁系统的研究 2012
4. Chlamers B J; Akmese R; Musaba L Design and field-weakening performance of permanent-magnet/reluctance motor with two-part rotor 1998(02)
5. Akemakou A D; Phounsonmbat S K Electrical machine with double excitation, especially motor vehicle alternator 2000
6. Chan C C; Chau K T; Jiang A Z Novel permanent magnet hybrid motor for electric vehicles 1996(02)
7. Tapia J A; Leonardi F; Lipo T A Consequent pole permanent magnet machine with field weakening capability 2003(06)
8. Mizuno T Basic principle and design of hybrid excitation synchronous machine 1994
9. 徐衍亮; 唐任远 混合励磁同步电机的结构、原理及参数计算 2000(01)
10. Reiter F B; Rajashekar K; Krefta R J Salient pole generator for belt-driven automotive alternator applications 2001
11. Luo Xiaogang; Lipo T A A synchronous/permanent magnet hybrid AC machine 2000(02)
12. 徐轶昊; 朱晓琴; 刘闯 新型切向/径向磁路并联混合励磁同步电机 2010(36)
13. 徐轶昊 新型旋转整流器式混合励磁无刷交流同步电机研究 2010
14. 朱姝姝; 刘闯; 宁银行 一种新型混合励磁同步发电机的两级式无刷励磁方法 2012(21)
15. 王建民; 孟传富 倍极感应励磁同步发电机的电感参数与转子励磁电流 1995(01)

引用本文格式: 符慧. 干兴业. 朱姝姝. 刘闯. FU Hui. GAN Xing-ye. ZHU Shu-shu. LIU Chuang 感应励磁式无刷同步电机设计与仿真分析[期刊论文]-计算机技术与发展 2014(7)