

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.05.018

新型直爪混合励磁爪极电机设计与研究*

杜 飞¹, 姚舜才^{1*}, 安 坤¹, 王 鑫²

(1. 中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘要:针对现阶段爪极电机的易磁饱和、电励磁损耗过高和高速状态下易产生形变等问题,对爪极电机的励磁方式、磁路和运行中的应力进行了分析,提出了一种在爪极电机根部添加永磁体和铁齿环部件实现混合励磁。同时将现阶段爪极电机斜爪结构改为直爪结构的新型直爪爪极电机,利用 Ansoft 软件和 Solidworks 软件对新型电机与传统电机的性能进行了对比分析,同时也对不同转速下电机的应力进行了仿真分析。研究结果表明:新型爪极电机在实现混合励磁的基础上,形成了更高效的磁通路径,同时还具有较高的磁饱和电流和较低的励磁损耗,有较好的输出特性;在机械性能方面,新型爪极电机无论是在何种下都有着更低的应力效果,能满足电机高速运行的要求。

关键词:混合励磁;直爪爪极电机;Ansoft;应力

中图分类号:TM302;TP39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)05-0539-05

Design of a new type of straight claw hybrid excitation claw pole motor

DU Fei¹, YAO Shun-cai¹, AN Kun¹, WANG Xin²

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712000, China)

Abstract: Aiming at the problems of easy magnetic saturation, excessive excitation loss and deformation at high speed in the current stage, the excitation mode, magnetic circuit and running stress of the claw-pole motor were analyzed. The permanent magnet and the iron ring gear were added to the root of the claw pole motor to realize the hybrid excitation. At the same time, the claw claw pole motor claw structure was changed to the new straight claw claw pole motor with straight claw structure, and the new motor and the tradition were realized by Ansoft software and Solidworks software. The performance comparison of the motor was analyzed. At the same time, the stress of the motor at different speeds was simulated and analyzed. The results indicate that the new claw pole motor forms a more efficient flux path on the basis of hybrid excitation, and also has higher magnetic saturation current and lower excitation loss, and has better output characteristics. In terms of mechanical properties, the new claw-pole motor has a lower stress effect regardless of the condition, and can fully meet the high-speed operation of the motor.

Key words: hybrid excitation; straight claw claw motor; Ansoft; stress

0 引 言

爪极电机的转子由两个类似于鸟爪的磁极交错形成,由于这种电机的结构简单、便于制造,使得这种电机具有较大的价格优势,因而被广泛应用于发电机领

域^[1-3],尤其是汽车发电机领域。但是由于漏磁较大,使得爪极电机效率不高,峰值效率在 60% 以下,随着汽车配备的电子产品的日益增多,提高爪极电机的效率显得尤为重要。

现阶段对于提高爪极电机效率的研究,主要集中

收稿日期:2018-11-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61774138)

作者简介:杜飞(1992-),男,河南漯河人,硕士研究生,主要从事电机与电气方面的研究。E-mail:S1607077@st.nuc.edu.cn

通信联系人:姚舜才,男,副教授,硕士生导师。E-mail:yaoshunca@nuc.edu.cn

在采用混合励磁方式降低励磁电流从而降低励磁损耗上。采用混合励磁的爪极发电机转子中至少存在两个磁化源^[4-5]。除了直流励磁磁场外,在转子内放置永磁体形成永磁磁场,从而补偿泄漏磁通和提高转子磁通,提高转矩密度和电机效率。根据设计,混合励磁爪极电机被分为串联混合励磁和并联混合励磁两种励磁方式。文献[6]提出了在两个爪极之间放置一个轴向磁化的圆柱形永磁体与电励磁形成串联结构,但是永磁体的放置破坏了爪极的结构,同时对电励磁的磁通路径产生了负影响;文献[7]提出了另外一种串联方式,在励磁线圈空间内放置轴向充磁的永磁体,但是永磁体的存在减小了励磁线圈的体积,降低了励磁磁场大小;文献[8-9]提出了一种并联式混合励磁方式,在爪极之间的空隙中嵌入了切向磁化永磁体,但是永磁体存在难以固定的问题,特别是在电机进行高速旋转时,永磁体易发生移位。

同时,还有一部分研究集中在降低爪极电机的端部空间长度上面。通过采用新型绕组的方式,降低绕组的铜耗^[10-11]。特别是引入扁线绕组和发卡式绕组的方式使得电机的绕组端部长度和阻值得到降低。但是引入新绕组不能够完全利用电机的端部空间,仍然会造成电机端部空间的浪费,使得电机的效率不能得到有效提高。

此外,基于爪极电机的特殊结构,电机在高速旋转过程中,在爪极根部产生较大的应力,对电机造成不良影响,现阶段对这方面的研究还欠缺。在工程实践中,主要依靠尽可能增大根部尺寸和减小尖部尺寸的方法来减小应力^[12]。但是这样会增大爪极电机的磁饱和效应,特别是爪极尖部的磁饱和。

基于以上研究,本文将提出一种新型直爪混合励磁爪极电机结构。

1 新型爪极电机结构

1.1 新型爪极电机结构原理

无论是传统爪极电机还是混合励磁爪极电机,电机的转子主要由两个相同的爪极构成。两爪极成交错形式放置于定子和绕组所围成的空间内,同时,电机的两爪极都采用斜爪结构,即爪极的根部极弧系数和厚度都比尖部的要大。励磁绕组线圈放置于电机的轭部空间,电机转子的整体长度要小于端部绕组的长度^[13],为了提高爪极电机功率密度和效率,同时充分利用电机的空间,提出新型直爪混合励磁爪极电机转子设计。新型转子设计示意图如图 1 所示。

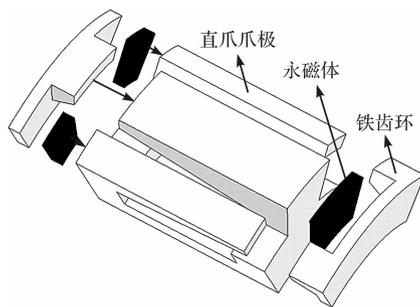


图 1 新型转子结构图

从图 1 可以看出:转子由 3 个不同的转子部件组成,即由直爪构成的两爪极、贴于爪极根部的永磁体和爪极尖部贴合的铁齿环。其中,永磁体另外一面和铁齿环贴合。两直爪采用一体铸造而成。铁齿环和直爪采用相同材料,也采用一体铸造形式。永磁体则采用钕铁硼材料构成,所有的永磁体充磁方向一样,都为轴向充磁。

1.2 新型爪极电机励磁原理

由于新型直爪混合励磁爪极电机在转子上多出了永磁体部件,新型爪极电机比着传统爪极电机多出一个磁场源,同时,新型爪极电机在转子上添加了铁齿环,也对电机的磁通路径进行改善。新型爪极电机的磁通路径示意图如图 2 所示。

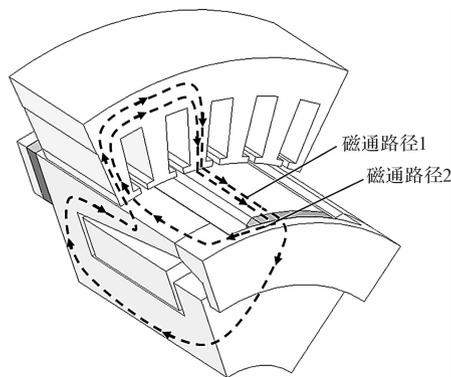


图 2 新型电机磁通路径图

从图 2 可以看出:磁通路径 1 为传统爪极电机主磁通路径,主要由电励磁线圈提供。当励磁线圈通入直流电流时,便会产生轴向磁通,由爪极的轭部出发,经过爪极的靴部和爪极进入气隙,穿过气隙之后进入定子中,然后绕经定子槽轭部和定子齿再次进入气隙。穿过气隙进入到相邻爪极的表面和靴部之中,最终回到转子轭部,从而形成完整闭合回路。磁通路径 2 为新型爪极电机新增的主磁通路径,由永磁体提供。当永磁体进行充磁之后产生轴向磁场,从永磁体‘N’极出发,经过磁环和爪极的表面进入气隙中,穿过气隙之后绕经定子槽轭部和定子齿部再次进入气隙中,最后经由相邻爪极表面最终回到永磁体的‘S’极。

对于电机而言,有效的磁通路径为经过气隙和定

子的这一段磁通路径。新型爪极电机增加的磁通路径2并不需要绕经爪极的轭部和靴部即可完成回路,更多的磁通都流向爪极电机有效磁通路径,新型爪极电机因此具有更高效的磁通路径。同时,由于磁通路径2经过的部件较少,磁动势的损失较小,新型爪极电机能够产生较大的主磁通,使爪极电机的产生较大的输出性能。此外,需要说明的是,在反转运行时,新型电机需要特殊的控制策略才能实现。

1.3 新型爪极电机模型建立

在对爪极电机进行分析时,在对新型爪极电机进行仿真分析时,需要构建三维模型。同时,爪极电机结构成对称形式,因此一对极模型既可代表电机整体结构,在对新型电机进行分析时,只需要电机的六分之一模型即可得出准确结果^[14]。

新型爪极电机主要参数的数值如表1所示。

表1 新型混合励磁爪极电机主要参数

参数	数值
极对数	6
定子外径/mm	144
定子内径/mm	121
转子外径/mm	119.2
转子内径/mm	34
爪极根部厚度/mm	14.2
爪极根部宽度/mm	20.4
爪极尖部厚度/mm	3.8
爪极尖部宽度/mm	10.6

目前,对电机的研究主要采用 Ansoft 软件,但 Ansoft 在三维建模方面存在不少问题,特别是对特殊曲面的处理能力较弱^[15]。因此,为了更准确建立爪极电机的模型,笔者采用专业绘图软件 Solidworks 对爪极电机的转子部分进行建模,而后导入 Ansoft 当中;定子、定子绕组、励磁绕组和转轴部分选择在 Ansoft 中建模。最终将两部分模型进行整合,形成完整的爪极电机模型。

最终形成的六分之一模型如图3所示。

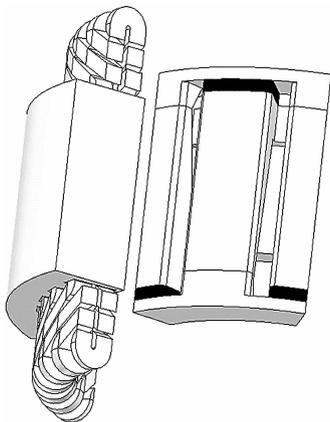


图3 新型爪极电机三维六分之一模型图

2 新型爪极电机性能分析

2.1 额定状况下的电机性能分析

由于新型混合励磁爪极电机不仅在转子上增加了相关组件,同时对转子的结构作了比较大的变动,对新型爪极电机进行性能仿真就显得比较重要。转矩也是衡量电机性能的关键指标,转矩和转矩脉动的大小直接关系到电机输出性能。新型爪极电机在额定状况下的转矩波动图如图4所示。

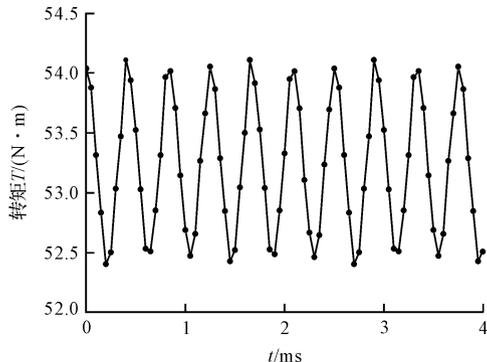


图4 新型爪极电机转矩波动图

从图4可以得出:新型爪极电机转矩呈规律性变化,平均转矩为53.24 N·m,具有较大的转矩输出。转矩波动为1.70 N·m,具有较小的转矩波动,电机平稳性较好。

2.2 与传统电机对比分析

与传统爪极电机相比,新型爪极电机增加了一个固定的磁场源,因此,新型爪极电机不仅具有可调节的磁场,在产生相同磁场情况下,新型爪极电机可以通过较小的励磁电流即可实现。同时,由于新型爪极电机爪极采用直爪结构,增大了爪极电机尖部的尺寸,在一定程度上消除了爪极电机的磁饱和现象,特别是有效缓解了电机在高励磁电流情况下的磁饱和。两种电机在不同励磁电流范围内转矩变化趋势如图5所示。

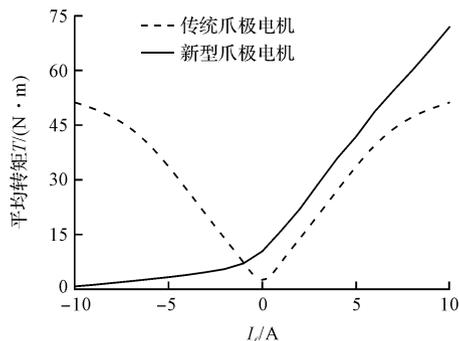


图5 不同励磁电流下两种电机转矩变化

从图 5 可以得出:额定状况下,新型混合励磁爪极电机具有更高转矩,峰值比传统爪极电机转矩高 $8.61 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。通入不同励磁电流时,传统爪极电机转矩只跟励磁电流有关,因此呈对称结构,随着电流值增大而增大。在通入 6 A 电流之前,增大的幅度较为明显, 6 A 时达到磁饱和状态,增大幅度不明显。新型爪极电机由于永磁体存在,在电励磁电流产生磁场与永磁体磁场反相叠加时,随着电流增大,转矩减小。但是减小幅度不明显;正向叠加时,随着励磁电流的增大,转矩增大。当励磁电流为 0 时,此时电机的转矩由永磁体单独提供,大小为 $10.41 \text{ N} \cdot \text{m}$,可以实现自励。此外,由于转子存在额外部件和直爪的结构,相比于传统爪极电机,新型爪极电机在达到励磁电流为 6 A 以后转矩的增长速度并未发生变化,具有不易磁饱和的特性。

3 两种电机应力对比分析

由于爪极电机两爪极的尖部没有受到径向约束,电机在进行工作时,在爪极电机的根部会产生较大的应力作用,工作状态下爪极电机的应力分析也是必需的。

由于爪极电机主要作为发电机使用,电机会在 $20\,000 \text{ r/min}$ 高速状况下运行,在高速下电机的应力分析是重要的分析指标。同时,额定状况下的电机应力分析也是必要的。

两种电机在高速和额定状况下的转子最大应力分布图如图 6 所示。

从图 6 转子最大应力图可以得出:整体而言,新型爪极电机所受应力均比传统爪极电机要小。同时,无论是高速 $20\,000 \text{ r/min}$ 还是额定 $3\,100 \text{ r/min}$ 情况下,两种电机的最大应力位置保持不变,传统爪极电机最大应力位置位于爪极的根部,在高速状况下为 $1\,378 \text{ MPa}$,在额定状况下为 32.35 MPa 。新型爪极电机最大应力位于铁齿环的根部,在高速状况下为 830.66 MPa ,在额定状况下为 19.76 MPa ,均比传统爪极电机的最大应力小。此外,传统爪极电机的应力主要集中于爪极的靴部和爪极根部区域,爪极尖部所受应力较小,而新型爪极电机所受应力主要集中于爪极靴部和爪极尖部,这是由于爪极尖部受到铁齿环的约束,减小了爪极根部应力,加上尖部尺寸较小,易受到应力集中。需要指出的是,爪极尖部所受的应力和铁齿环所受的最大应力可以通过增大尺寸进行改良,增大的尺寸会对电机性能产生正影响,对材料使用量产生负影响。

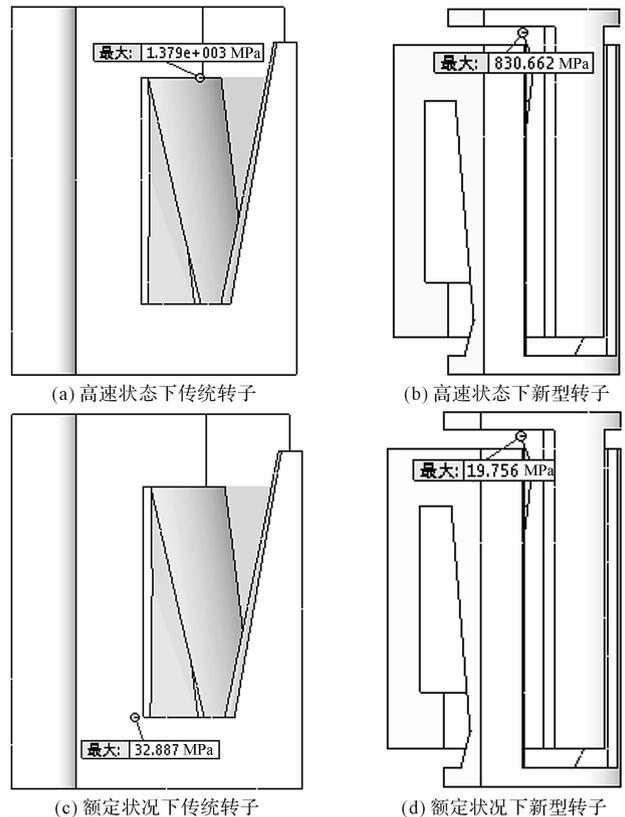


图 6 额定状况下的转子最大应力分布图

4 结束语

针对爪极电机现有的问题,本文提出了一种新型直爪混合励磁爪极发电机,介绍了新型爪极发电机的结构原理和电磁原理,并运用三维有限元软件对新型爪极电机进行了建模分析,同时对爪极电机的电磁和机械性能进行了研究分析。通过分析可以得出以下结论:

新型爪极电机具有良好的转矩特性,转矩波动较小;新型爪极电机通过增加永磁体和铁齿环,可以实现混合励磁效果,且对比传统爪极电机具有更高效的磁通路径,更高的空间利用率和更低的励磁损耗;新型爪极电机通过增加额外组件和采用直爪形状的爪极,使得爪极电机具有更不易磁饱和的特性,在电机运行过程,具有更低的应力效果。

此外,对比传统爪极电机,新型爪极电机可以运行在高速工况下,特别是在 $12\,000 \text{ r/min}$ 转速以上时,新型爪极电机可以正常运行。

参考文献 (References):

- [1] 曹金祥. 车用爪极发电机的发展状况[J]. 山东工业技术, 2016(7):167.
- [2] KAEHLER C, HENNEBERGER G. Transient 3-D FEM computation of eddy-current losses in the rotor of a claw-pole alternator[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40

(2):1362-1365.

- [3] 冯岳. 汽车发电机耐久性综合试验系统研究[D]. 广州:华南农业大学工程学院,2016.
- [4] 姜春辉. 一种混合励磁开关磁通永磁记忆电机结构优化设计[D]. 上海:上海电机学院电气学院,2018.
- [5] NAOE N, FUKAMI T. Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine[C]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, Cambridge: IEEE, 2001.
- [6] REBHI R, IBALA A, MASMOUDI A. MEC-based sizing of a hybrid-excited claw pole alternator[J]. **IEEE transactions on Industry Applications**, 2015,51(1):211-223.
- [7] IBALA A, MASMOUDI A. 3D-FEA based comparison of the features of two hybrid-excited claw pole alternators[C]. International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology, Kuwait City: IEEE,2016.
- [8] 刘金鹏. 基于 Ansoft 的电励磁爪极发电机磁场分析与径向电磁力计算[D]. 成都:西南交通大学电气工程学院,2014.
- [9] MA B, LEI G, ZHU J, et al. Design optimization of a permanent magnet claw pole motor with soft magnetic composite cores [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2018,54(3):1-4.
- [10] JUNG D S, KIM Y H, LEE U H, et al. Optimum design of the electric vehicle traction motor using the hairpin winding[C]. Vehicular Technology Conference, Yokohama: IEEE,2012.
- [11] DAJAKU G, GERLING D. Stator slotting effect on the magnetic field distribution of salient pole synchronous permanent-magnet machines [J]. **IEEE Transactions on Magnetics**, 2010,46(9):3676-3683.
- [12] 乔东伟,王秀和. 新型混合励磁无刷爪极电机磁场调节特性的三维有限元分析[C]. 第11届全国永磁电机学术交流会,沈阳:中国电工技术学会,2011.
- [13] DAJAKU G, LEHNER B, DAJAKU X, et al. Hybrid excited claw pole rotor for high power density automotive alternators[C]. XXII International Conference on Electrical Machines, Lausanne: IEEE,2016.
- [14] 崔天翔,庄圣贤,周娟,等. 基于 Ansoft 的磁电机建模与仿真分析[J]. 微特电机,2018(1):13-15.
- [15] 李卫民,马平平. 新型爪极发电机的电磁分析[J]. 微特电机,2016,44(3):22-24.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

杜飞,姚舜才,安坤,等. 新型直爪混合励磁爪极电机设计与研究[J]. 机电工程,2019,36(5):539-543.

DU Fei, YAO Shun-cai, AN Kun, et al. Design of a new type of straight claw hybrid excitation claw pole motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(5):539-543.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第514页)

通过分析得出:四斜叶桨适用于在高转速情况下混合低浓度非牛顿流体,而在低转速情况下混合高浓度非牛顿流体效果较差。由于流场流动结构并不局限于二维平面,若采用3D-PIV技术进行测量可以对搅拌反应器内液体流动更加精确的描述。

参考文献(References):

- [1] DAPELO D, ALBERINI F, BRIDGEMAN J. Euler-lagrange CFD modelling of unconfined gas mixing in anaerobic digestion[J]. **Water Research**, 2015(85):497-511.
- [2] BAUDEZ J C, SLATTER P, ESHTIAGHI N. The impact of temperature on the rheological behaviour of anaerobic digested sludge [J]. **Chemical Engineering Journal**, 2013(215-216):182-187.
- [3] ESHTIAGHI N, BAUDEZ J, SLATTER P. Rheological behaviour of anaerobic digested sludge: impact of concentration and temperature [C]. Proceedings of the 13th World Congress on Anaerobic Digestion (AD 13), Santiago de Compostela: International Water Association, 2013.
- [4] 张敏革,张吕鸿,姜斌,等. 非牛顿流体搅拌流场的数值模拟研究进展[J]. 化工进展,2009,28(8):1296-1301.
- [5] 杨小林,严敬. PIV测速原理与应用[J]. 西华大学学报:自然科学版,2005,24(1):19-20,36.
- [6] 龚志军,武文斐,赵增武,等. 利用PIV技术研究搅拌槽内的流动特性[J]. 包头钢铁学院学报,2005,23(2):133-136.
- [7] 吴营,闵键,李志鹏,等. 搅拌槽内流动结构的粒子图像测速技术研究[J]. 北京化工大学学报,2007,34(6):561-565.
- [8] 徐立群,倪福生,刘明昊,等. 基于PIV的混磊叶轮内颗粒相对速度场的研究[J]. 流体机械,2017,45(5):6-10.
- [9] 程先明,李志鹏,高正明,等. 涡轮桨搅拌槽内流动及尾涡特性研究[J]. 北京化工大学学报,2009,36(6):16-21.
- [10] 王春林,吕亚云,史亚婷,等. 桨叶式搅拌槽内部流场数值模拟及PIV试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):335-339.
- [11] 王璐璐,周勇军,鲍苏洋,等. 改进型INTER-MIG桨搅拌槽内流场的PIV实验[J]. 过程工程学报,2017,17(3):447-452.
- [12] 张敏革,张吕鸿,姜斌,等. 聚合物溶液搅拌流场PIV测量初步[J]. 化工进展,2011,30(8):1681-1686.

[编辑:李辉]