文章编号: 2095-4980(2019)01-0100-05

永磁被动补偿脉冲发电机设计与仿真

陶雪峰1,刘 昆2,侯二永3

(1.航天工程大学研究生院,北京 101400; 2.中山大学 航空航天学院,广东 深圳 518101;3.国防科技大学 空天科学学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:采用永磁励磁、两极两相、被动补偿结构,设计了一台小型补偿脉冲发电机。使用 有限元软件对电机进行空负载电磁特性分析;永磁体采用厚度为12 mm的钕铁硼材料,空载时气隙 最大磁感应强度为0.443 T。在60 000 r/min的设计转速下,单相开路电压峰值为195.4 V,铁心损耗 功率为599 W。对电阻值1 mΩ,电感值1 μH的小阻抗负载分别进行了单相放电、两相并联放电及两 相串联放电仿真,单相放电电流峰值为10.90 kA,脉宽0.78 ms;两相并联放电电流峰值14.64 kA, 脉宽1.1 ms;串联放电电压峰值增至333.7 V,电流峰值为8.59 kA。电机储能大于4 MJ,脉冲功率大 于2 MW, 且结构紧凑,具有较高的能量密度和功率密度。

Design and simulation of a permanent magnet passive compulsator

TAO Xuefeng¹, LIU Kun², HOU Eryong³

(1.Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101400, China;

School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen Guangdong 518101, China;
 College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: A two-pole two-phase passive compulsator is designed, whose magnetic field is built by permanent magnet. The compulsator's no-load and discharge magnetic characteristics are analyzed by using finite element software. The Nd-Fe-B material is adopted as the permanent magnet, in thickness of 12 mm. The maximum magnetic flux density in the air gap is 0.443 T at the no-load state. At the designed rotor speed of 60 000 r/min, the single-phase open circuit peak voltage and the core loss power are 195.4 V and 599 W respectively. The single-phase discharge, two-phase parallel discharge and two-phase series discharge processes are simulated separately, to a small impedance load at 1 m Ω , 1 μ H. The peak value of single-phase discharge current is 10.90 kA, and the pulse width is 0.78 ms. For two-phase parallel discharge, the peak current value and pulse width are 14.64 kA and 1.1 ms respectively. For two-phase series discharge, the peak voltage rises to 333.7 V, while the peak current drops to 8.95 kA. The compulsator's energy storage is greater than 4 MJ, whose pulse power is greater than 2 MW. The alternator has compact structure, high energy and power density.

Keywords: passive compulsator; high speed permanent magnet motor; electromagnetic characteristics; pulsed power supply

补偿脉冲发电机(Compensated Pulsed Alternator, CPA)是一种特殊的同步电机,在放电时通过磁通压缩的方法降低电枢的瞬态电感,能够实现大电流、高功率输出^[1]。

自 1978 年美国 Texas 大学提出补偿脉冲发电机的概念以来,国内外已研制出多种样机,并通过驱动电磁轨 道炮、脉冲激光器、电热化学炮等实验验证了 CPA 作为高功率脉冲电源的独特优势^[2-9]。目前广泛使用的电容储 能脉冲电源通常体积庞大,储能密度难以提高,且循环寿命低;电感储能技术能够实现更高的储能密度,但发展 不够成熟,可靠性低,短期内难以实用化^[10]。补偿脉冲发电机由飞轮储能,能够达到极高的能量及功率密度。 当前,在美国军方的支持下,Texas 大学与 Curtiss-Wright 等公司合作,致力于 CPA 电源系统的小型化和可移动 化,期望能够用于战车、战机等移动作战平台^[1]。

补偿脉冲发电机的类型很多,按补偿方式,可分为被动补偿、选择被动补偿、主动补偿或"无补偿" CPA; 励磁方式包括电励磁(包括自励和他励)、永磁励磁、混合励磁;根据有无铁磁材料可分为铁心或空心 CPA^[11]。补偿脉冲发电机的设计需根据实际情况,权衡负载需求、功率及能量要求、系统质量限制、可靠性等各方面因素综合考量。本文以新概念武器为应用背景,瞄准脉冲电源小型化、轻型化的需求,设计一台高速永磁被动补偿脉冲发电机。

1 被动补偿脉冲发电机设计方案

电机剖面图如图1所示,其主要结构特点如下:

1) 永磁励磁

国内外已报道的 CPA 样机大多为电励磁。电励磁通常通 过电刷和滑环为励磁绕组供电,增大了功耗和维护难度,限制 了电机转速的进一步提高。采用永磁励磁,可以较大地减轻电 源质量,显著提高电机的最大转速,增大脉冲电源的功率密度, 提高脉冲电源的可靠性。

2) 被动补偿



图 1 电机剖面图

采用导电性良好的铝合金筒固套于转子永磁体表面,一是作为永磁体的护套,二是作为补偿屏蔽筒。当电枢 绕组放电时,补偿筒感应涡流阻止磁通透过转子,磁通被压缩在气隙中,从而使电枢绕组瞬态电感减小。

3) 两相二极

高速电机一般采用一对极或二对极,以减小涡流损耗。本文设计的电机最大转速为 60 000 r/min,选用一对

极结构。采用两相结构,一是能够提高电机功率密度,二是可以有多种脉冲输出形式,便于输出波形调节^[12]。 4)无槽绕组

无槽绕组是指直接粘贴在平滑的定子或转子表面上的绕组,亦称为气隙绕组。无槽绕组有2个优点:一是削 弱了漏电感从而减少了总电感;二是没有齿槽效应,转矩波动小。无槽绕组的主要缺点是电机放电时,产生的切 向力全部由绕组承担,绕组在这种粘贴状态下的机械强度需引起特别注意。此外,无槽绕组的电枢相当于气隙, 导致电机气隙较大,气隙磁密比有槽绕组要小。

5) 端部补偿

CPA 与常规电机最主要的差别是其电枢放电瞬态电感极小, 电枢端部无效部分的导线电感大小将超过有效部分,必须采取一 定的措施使其减小。采用磁通压缩补偿法,用良导体做成回字形 端部屏蔽盒,对电枢端部放电磁场进行屏蔽。电枢放电时,屏蔽 盒内产生涡流,将电枢端部导体产生的磁场压缩在一个极小的空 间内,端部放电磁场得到补偿,电枢电感减小较大。

基于上述总体技术方案,确定的补偿脉冲发电机主要尺寸参数,见表1。

衣 1 电机主安参数	
Table1 Main parameters of the compulsator	
parameters	values
polar number	2
phase number	2
slot number	8
shaft diameter/mm	25
stator inner diameter/mm	71
permanent magnet thickness/mm	12
compensation shield thickness/mm	5
stator thickness/mm	17
sectional area of armature/mm ²	18
effective length of armature/mm	150
rotor moment of inertia/(kg·m ²)	0.224

主1 由却 士 西 会 物

2 空载电磁特性仿真

在转速 60 000 r/min 的条件下对补偿脉冲电机的空载特性进行仿真分析。电机电磁特性涉及到电磁场计算、 电路仿真、转子动力学分析等诸多方面,且电机放电时补偿筒中感应出涡流,其瞬态过程精确建模难度较大。因此,本文使用 Ansys Maxwell 软件进行仿真,可获得包括电感值、磁场分布、电机损耗等结果。在模型准确的前 提下,有限元仿真结果可信度很高,对电机基本性能的评判具有重要意义。

2.1 空载磁场分布

本文电机采用钕铁硼稀土永磁材料励磁,径向充磁,厚度为12mm。永磁体激发的电磁场分布如图2所示, 磁感线被限制在铁心中形成闭合回路。



气隙磁密对电枢感应电压的波形和幅值有直接影响,图3显示了气隙磁密沿周向的分布情况。进一步考察其 径向分量,可见径向磁密分布近似为方波,最大磁感应强度约为0.443T。

2.2 相电压

两相电枢的相电压曲线如图 4 所示。A、B 两相电压波 形相同,峰值为 195.4 V,相位差为π/2。

2.3 电枢电感

Maxwell 软件可直接计算电枢绕组的自感及互感值。在 三维有限元模型下可计算端部电感的影响,电感计算结果 为: $L_{A}=20.0 \mu H, L_{B}=20.0 \mu H, M_{AB}=0$ 。

可见,正交放置的两相电枢消除了互感,使得各相的放 电相对独立。

2.4 铁心损耗

电机高速旋转能显著提高其功率密度和能量密度,但也 不可避免地带来更多损耗,包括机械损耗、铁心损耗、转子



Fig.4 Open-circuit voltage of armature windings 图 4 电枢绕组开路电压

涡流损耗等^[13]。电机损耗的增加不仅会影响电机效率,若没有良好的散热,温度的升高甚至会导致永磁体退磁。 使用 Maxwell 软件可直接计算定子铁心损耗(包括涡流损耗和磁滞损耗),在 60 000 r/min 常转速下,铁耗功 率为 599 W。可见,高速电机的损耗功率很大。同时,脉冲电机工作在高功率放电状态,要保证系统的安全可靠, 必须设计额外的散热系统^[14]。

3 放电特性仿真

电机放电特性直接决定其能否满足设计需求。两相电机的放电具有多种形式:单相放电、两相串联放电和两 相并联放电、单脉冲放电和连续放电等。以 Ansys Simplorer 软件为平台,使用 Simplorer-Maxwell 联合仿真的方 法,可进行系统级仿真,同时对电磁场、电路、动力学特性进行分析。放电对象设为1mΩ,1 μH 常值阻感负载。

3.1 单相放电分析

以 A 相为例进行单相单脉冲放电仿真。如图 5 所示,单相放电电流峰值为 10.90 kA,脉宽约 0.78 ms,放电 过程转速下降 3.7 r/min。

电枢放电时,补偿筒中会感应出很强的涡流,能够改变电磁场分布,将磁场压缩到气隙中,图6显示了放电过程气隙磁密分布的变化过程。可见,气隙磁密成倍增加,补偿筒起到了良好的屏蔽作用。





Fig.6 Air gap flux density change during discharge 图 6 放电过程气隙磁密变化

3.2 两相并联放电分析

A、B两相先后放电半个周期,总电流即为两相电流之和。 两相电枢不存在电磁耦合,故单相电流波形不变。总电流峰 值可达14.64 kA,脉宽约1.1 ms,放电过程转速下降6.6 r/min。 可见,两相并联放电能够显著提高输出功率,同时增大脉冲 宽度。

3.3 两相串联放电分析

两相绕组串联后总电压会升高,峰值增加至 333.7 V,电 压波形亦发生变化,如图 8 所示。电枢串联放电电流峰值为 8.59 kA,如图 9 所示。

需要指出的是,绕组串联后的阻抗加倍,会对输出电流 产生较大影响。但由于串联后电压升高,输出功率较单相放电仍有提高。



4 结论

本文介绍了一台永磁被动补偿脉冲发电机的设计方案,并对其空负载特性进行了仿真。电机结构简单紧凑, 能够提供峰值功率超过 2 MW 的脉冲电流。两相电枢的设计能够提高放电功率,提供更灵活的波形组合。该电机 具有较高的功率密度和能量密度,可作为小型化的脉冲电源。



图 7 两相并联放电波形

1.0

参考文献:

- WU Shaopeng, ZHAO Weiduo, WANG Shaofei, et al. Overview of pulsed alternators[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(7):1078-1085.
- [2] HERBST J,BENO J,OUROUA A,et al. High slew rate power supplies for support of large pulsed loads[C]// IEEE Electric Ship Technologies Symposium(ESTS). Alexandria,VA,USA:IEEE, 2015:446-452.
- [3] 袁培,于克训,黄福勇.用于匹配主动补偿脉冲发电机的脉冲氙灯及其触发电源的分析与设计[J].高电压技术, 2013, 39(1):1-8. (YUAN Pei,YU Kexun,HUANG Fuyong. Analysis and design of the pulsed xenon flashlamp and its trigger power supply used to matchup with the active compensated pulsed alternator[J]. High Voltage Engineering, 2013,39(1):1-8.)
- [4] 刘克富,潘垣,李劲松,等.补偿脉冲发电机为主体电源的电热化学炮系统模拟和试验[J].电工技术学报, 2000,15(2):
 24-28. (LIU Kefu, PAN Yuan, LI Jinsong, et al. System simulations and experiments for electro-thermal chemical guns powered by compensated pulsed alternators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000,15(2):24-28.)
- [5] 李格,刘保华,秦文汀,等. 旋转磁通压缩脉冲发电机驱动电磁轨道炮实验[J]. 核聚变与等离子体物理, 2001,21(1): 38-42. (LI Ge,LIU Baohua,QIN Wenting,et al. Experiments of electromagnetic launchers driven by the passively rotated flux-compressed pulsed alternator[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2001,21(1):38-42.)
- [6] WU Shaopeng, CUI Shumei, SONG Liwei, et al. Design, fabrication and experiment of iron-core passive compulsator[C]// International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: [s.n.], 2009:3544-3548.
- [7] WU Shaopeng, CUI Shumei, SONG Liwei, et al. Design, simulation, and testing of a dual stator-winding all-air-core compulsator[J].
 IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1):328–334.
- [8] WANG Haoze,LIU Kun,YU Xiang, et al. Design, analysis, and testing of a novel permanent magnet compulsator[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015,43(4):1040-1048.
- [9] 袁培,于克训,黄福勇,等.用于高能脉冲激光器直驱式电源系统的主动补偿脉冲发电机的电磁设计与实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2016,36(9):2528-2537. (YUAN Pei,YU Kexun,HUANG Fuyong,et al. Electromagnetic design and experimental analysis of the active compensation pulse alternator for the high-energy pulsed laser direct-drive power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(9):2528-2537.)
- [10] 马伟明,肖飞,聂世雄. 电磁发射系统中电力电子技术的应用与发展[J]. 电工技术学报, 2016,31(19):1-10. (MA Weiming, XIAO Fei,NIE Shixiong. Applications and development of power electronics in electromagnetic launch system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(19):1-10.)
- [11] 陶雪峰,刘昆. 空心补偿脉冲发电机设计与仿真[J]. 电工技术学报, 2018,33(9):1931-1937. (TAO Xuefeng,LIU Kun. Design and simulation of an air-core compulsator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(9):1931-1937.)
- [12] KITZMILLER J R, PAPPAS J A, PRATAP S B, et al. Single and multiphase compulsator system architectures: a practical comparison[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001,37(1):367-370.
- [13] 张宸菥,陈立芳,王维民,等. 高速电动机损耗分析及温度场计算[J]. 电气技术, 2017,18(5):44-50. (ZHANG Chenxi, CHEN Lifang,WANG Weimin, et al. High speed motor loss analysis and temperature field calculation[J]. Electrical Engineering, 2017,18(5):44-50.)
- [14] 朱博峰,肖凯,王昊泽. 基于解析方法和有限元联合仿真方法的补偿脉冲发电机温度场计算[J]. 电机与控制应用, 2015(7):20-25. (ZHU Bofeng,XIAO Kai,WANG Haoze. Temperature field calculation of CPA based on analytical method and combined FEA simulation[J]. Electric Machines & Control Application, 2015(7):20-25.)

作者简介:



陶雪峰(1992-),男,河北省邯郸市人,在 读博士研究生,主要研究方向为飞轮储能脉冲 功率技术.email:taoxuefeng11@sina.cn. **刘 昆**(1965-),男,湖南省邵阳市人,教 授,博士生导师,主要研究方向为磁悬浮飞轮/ 控制力矩陀螺技术、惯性稳定平台技术、磁悬浮 飞轮储能技术.

侯二永(1985-),男,内蒙古自治区丰镇市 人,讲师,主要研究方向为磁悬浮飞轮、磁悬浮 控制力矩陀螺动力学与控制.