

低压大电流车载发电机改善换向研究

安跃军, 周利民, 李文瑞, 安辉, 孙丹

(沈阳工业大学电气工程学院, 110870, 沈阳)

摘要: 为了解决低压大电流车载发电机换向困难和火花等级高的问题,采用非均布和非对称磁极结构、加装非均匀换向极、嵌下具有均压作用的单波绕组和倾斜电刷等措施,以降低换向区磁场和换向电势.应用电磁场有限元方法对车载发电机进行空载和负载内部磁场分析与计算,研究电机内磁力线的分布和气隙磁场波形,结果表明:尽管主磁极极靴和主磁极在空间是不等距分布的,但是主磁极所建立的气隙磁场仍然是对称和均布的,可确保提供适合机电能量转换的媒介空间;通过对比有换向极作用和没有换向极作用时电机内磁场分布和气隙磁场波形,换向极起到了降低换向区磁感应强度的作用,特别是对换向区磁场的细化分析和展示,发现有换向极作用时,换向电势平均降低了42.3%,即有明显改善换向的效果,火花实验也说明换向得到了改善.设计方案可以改善发电机换向条件,降低火花等级,抑制电磁干扰,有利于提高车载电气系统运行稳定性、可靠性和安全性;研究结果为低压大电流车载发电机研制提供技术支持.

关键词: 车载发电机;换向区磁场;换向电势;低压大电流

中图分类号: TM301 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)08-0116-06

Improved Commutation for Low-Voltage High-Current Vehicle Generators

AN Yuejun, ZHOU Limin, LI Wenrui, AN Hui, SUN Dan

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To find a way to improve commutation and decrease the level of spark for low-voltage high-current vehicle generators, non-uniformly distributed and asymmetrically constructed magnetic poles, non-uniform commutating magnetic poles, single wave windings with voltage averaged and oblique brush, are adopted. The distribution of the flux line, the wave of the air gap magnetic field, and analysis inner magnetic field under loaded and unloaded conditions are analyzed respectively with finite element method. The results reveal that the magnetic field induced by the main poles is still symmetric and uniform in spite of the asymmetric structure, so it ensures the provision of suitable medium space for mechanical and electrical energy conversion. The commutating poles are able to decrease the magnetic flux density contrast with the generator without commutating poles according to analysis the curve of the gap magnetic field and the distribution of the inner magnetic field in them. The EMF drops by 42.3% on the average due to the functions of commutating poles, and the spark experiment also shows the improved commutation. This design scheme facilitates commutation, and decreases the spark level and inhibits the electromagnetic interference to heighten the stability, reliability and security of generators.

Keywords: vehicle generator; magnetic field of commutation range; commutating electromotive force; low-voltage high-current

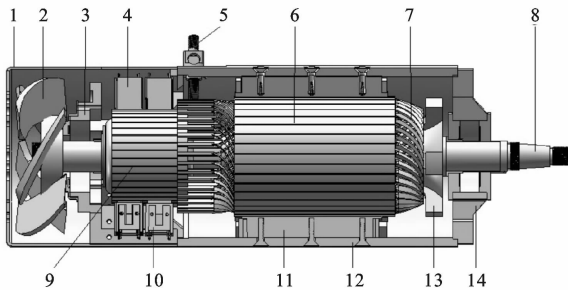
随着装甲车辆技术的发展,攻击火力猛、防御能力强、灵活性好的装甲车辆成为各国关注的重点.采用高性能、高电子化和高灵敏度电气设备来提高车辆性能时,增加了车载发电机的负荷,使原有发电机要经常满载或超载增容运行.装甲车辆发电机通常与发动机直连,空间狭窄,为保证电设备正常工作,发电机增容运行的稳定性、可靠性和安全性对于保障装甲车辆战斗力十分重要.由于直流发电机具有结构简单、稳定性高、成本低廉等特点,在现存装甲车辆中占有不可替代的位置.直流电机运行可靠性、极限功率、最高转速等在很大程度上取决于直流电机换向性能的好坏,改善换向是车载直流发电机正常运行的重要措施.直流电机的换向火花和改善换向一直都是十分重要而又难以量化评价的老问题^[1-4],对改善换向的精细化研究和突破性成果也很少^[5].

在安装空间受到严格限制的情况下,本文采用空间非均布主磁极、主磁极极靴非对称、与主磁极极数不等的换向极排列、换向极极靴非对称、有均压线功能的单波绕组和倾斜电刷等结构,目的就是降低换向电势以改善换向.采用有限元方法,对发电机内电磁场特别是作为机电能量转换媒介的气隙磁场进行计算,针对改善换向的效果,对换向区磁场加以细化分析,以获得改善换向的定量依据.

1 发电机基本结构和特点

本文算例车载发电机主要技术指标:额定功率为 6.5 kW,额定电压为 28 V,额定转速为 2 800 r/min.对火花等级要求是:以转速 6 000 r/min 满载运行时,不超过 1.5 级.车载低电压大电流发电机基本结构如图 1 所示,定子由机座、主磁极、换向极、端盖、电刷装置等组成,转子电枢由转轴、电枢铁心、电枢绕组、换向器和轴承等组成.

发电机 6 个主磁极极靴两侧设计成不对称结



1: 风扇罩; 2: 外风扇; 3: 轴承; 4: 电刷; 5: 接线柱; 6: 电枢;
7: 电枢绕组; 8: 转轴; 9: 换向器; 10: 电刷架; 11: 主
磁极; 12: 机壳; 13: 内风扇; 14: 端盖

图 1 车载发电机基本结构图

构,在确保气隙磁场对称分布的前提下,经电磁场有限元试算,确定其间有、无换向极的两主极轴线夹角为 73°和 47°.受空间限制只设置 3 个换向极,换向极安装在主极间几何中性线上.主极与换向极轴线间夹角为 36.5°,车载直流发电机截面如图 2 所示.

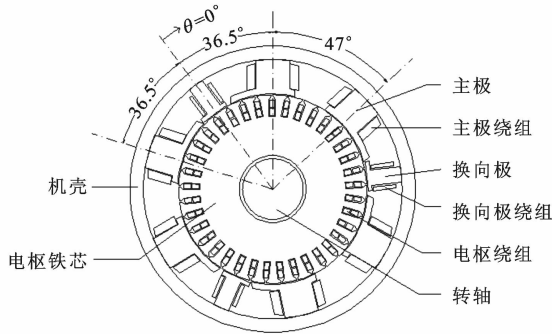


图 2 发电机截面图

为了提高运行可靠性,将 3 个 N 极励磁绕组和 3 个 S 极励磁绕组各串联成一路,首端为 W_1 和 W_2 ,由电压调节器分别给两条励磁支路供电和调节,当其中一条励磁支路发生故障时,另一支路仍然能够建立磁场发电.定子绕组接线展开如图 3 所示,电枢绕组与换向极绕组串联,通过接线柱 R 向蓄电池和负载供给电能,接地电刷盒连接机壳并与车架搭铁构成电气系统的负极.

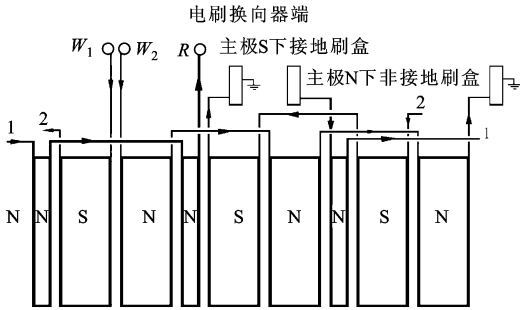


图 3 定子绕组展开接线图

电枢绕组采用左行单波绕组,可以解决定子主极没有空间设置均压线而带来的换向困难问题.为了减轻电刷和换向片接触面上的电流负荷,采用了 6 组 2 列 12 个铜石墨电刷来输出大电流.为了消除运行一段时间后电刷与换向器接触不良甚至卡死引起的供电故障和安全隐患,电刷采用沿发电机旋转方向向前倾斜的方式,如图 4 所示.

2 发电机内电磁场分析

2.1 发电机内电磁场描述

由于发电机的结构比较复杂,为了简化电磁场

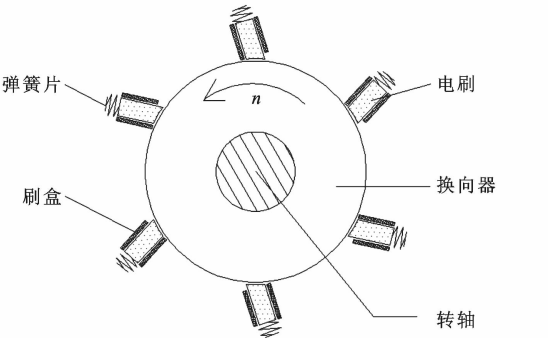


图 4 电刷倾斜位置图

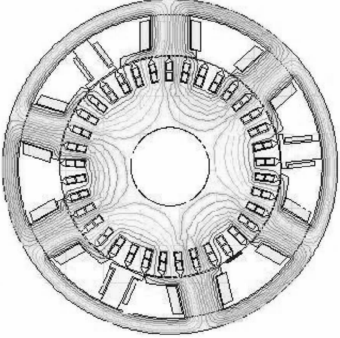


图 6 空载磁力线分布图

计算,现对电机作简化处理^[6-8]:①采用二维电磁场计算;②不考虑涡流效应的影响;③铁心磁导率是各向同性的.

经过简化,发电机内部电磁场可以通过非线性泊松方程、求解区域和边界条件来描述

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right)=J_z \tag{1}$$

求解区域 Ω : 整个剖分区域

边界条件 Γ : 定子外圆边界, $B_n=0$

式中: μ 为磁导率; A_z 为磁矢位 $\mathbf{A}$ 在 z 轴的分量; J_z 为源电流密度的 z 轴分量; Γ 为第一类边界条件; B_n 为定子外圆边界上磁感应强度的法向分量.

有限元法应用于电磁场就是把连续的电磁场问题变为离散问题来求解,电机模型离散化是通过网格剖分来实现的^[4],该发电机剖分图如图 5 所示.

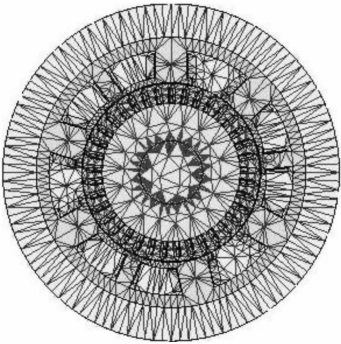


图 5 发电机电磁场分析剖分图

2.2 空载电磁场分析

由于电机磁极结构的不均匀和不对称性,为此需对发电机整体进行建模和电磁场分析.发电机空载运行时,励磁绕组施加励磁电压以建立气隙磁场.为了说明这种非常规主磁极和换向极结构所产生气隙磁场的特性,计算得到空载磁力线分布如图 6 所示.靠近长极靴的一侧磁力线较密集,说明该区域的磁感应强度大.

由图 7 可见,虽然 6 个主极在机座内圆排列不均匀,6 个主极彼此轴线间的机械角度不是 60° 均布,但是气隙磁感应强度过其零点(中性线)之间的间隔仍然为 60° ,即每个主极场域所覆盖的角度仍为 60° ,机械非对称的磁极结构并没有造成电机内部磁场分布不对称.这样不仅解决了换向极空间紧张问题,使换向得到改善,而且没有影响机电能量转换的正常进行.

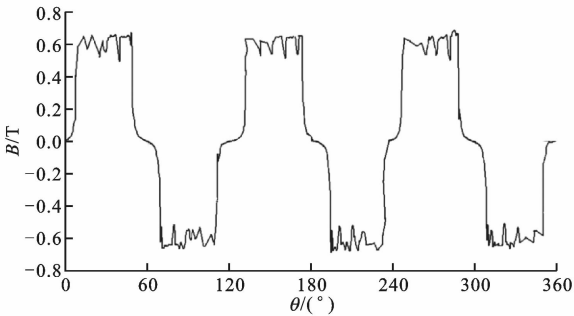


图 7 空载时气隙磁感应强度分布曲线

2.3 负载电磁场分析

发电机负载运行时,电枢反应使气隙磁场发生畸变,造成换向不良而引起电刷火花.为改善换向和减小火花,可以在主磁极间安装换向极.对电枢绕组设定额定电流,电磁场计算建模是按照换向极结构和材质进行的,分别设置换向极绕组电流为 0 和额定电流,得到无换向极作用和有换向极作用时负载磁力线分布,如图 8 和图 9 所示.通过负载电磁场计算,得到无换向极作用和有换向极作用时气隙磁场波形,如图 10 和图 11 所示.

发电机负载运行时,电枢电流作用产生磁场,并对主极励磁磁场有了反作用,即电枢反应.当电刷处于几何中性线时,电枢磁场只有交轴分量,电机磁场由励磁磁动势和交轴磁动势共同建立.通过负载气隙磁感应强度曲线可以看出,在不考虑饱和影响的前提下,每个主极下的磁场,一半被削弱,一半被加

强,总的磁通量基本不变.交轴电枢反应使气隙磁场发生畸变,如图10所示.

发电机安装换向极后,换向极产生的换向磁场方向与电枢反应磁场方向相反,当换向元件边切割

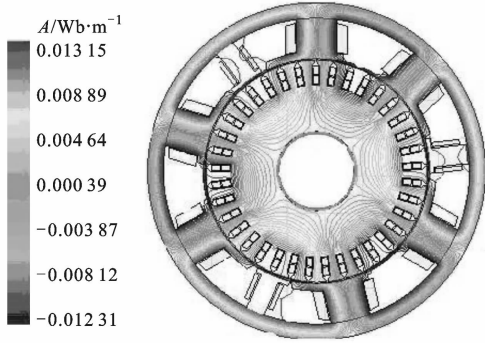


图8 无换向极作用时负载磁力线分布

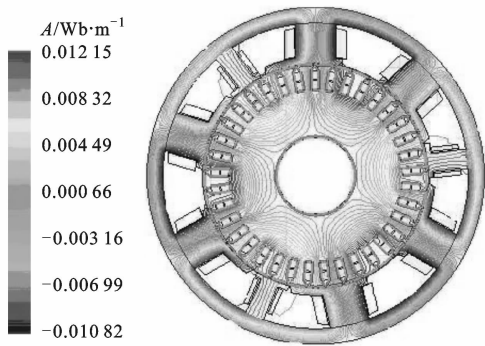


图9 有换向极作用时负载磁力线分布

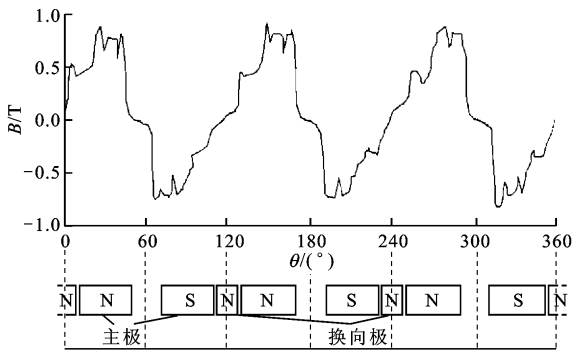


图10 无换向极作用时负载气隙磁感应强度曲线

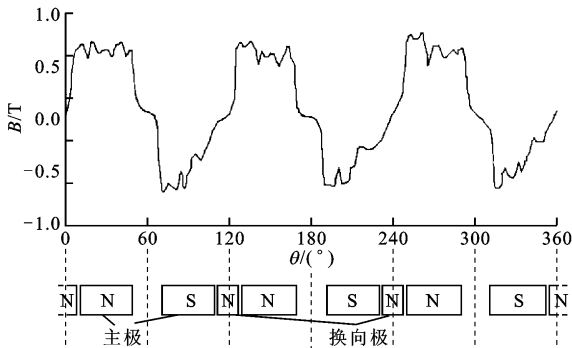


图11 有换向极作用时负载气隙磁感应强度曲线

换向磁场时产生的感应电势正好可以抵消由于交轴电枢反应产生的感应电势^[9-11].换向极绕组与电枢绕组串联,可在任何时刻改善换向电势.在换向极作用下,负载气隙磁感应强度受到换向极磁场的影响,波形更接近空载运行时的气隙磁场波形,见图11.

3 换向电势与火花实验

为了进一步说明改善换向的效果,引用换向区宽度对换向过程进行描述.所谓的换向区宽度就是:在一个槽中,从最先换向的元件边开始换向的瞬间起,到这些元件中最后一个元件边换向结束为止的这段时间内,该槽在电枢表面所转过的弧长称为换向区宽度^[12].换向区宽度^[13]为

$$b_k = t_k \frac{D_a}{D_k} \left(U + \beta + |\epsilon_k| - \frac{2a}{2P} \right) \quad (2)$$

式中: D_k 为换向器直径,本算例为92 mm; D_a 为电枢外径,本算例为118 mm; U 为每槽元件数,本算例为1; β 为电刷覆盖换向片数,本算例为1.2; $2a$ 为并联支路数,本算例为2; $2P$ 为主极个数,本算例为6; ϵ_k 为电机绕组节距缩短系数,本算例为0; t_k 为换向器片距,本算例为7.8 mm.

经计算,本算例换向区宽度 b_k 所对应的角度为 18.9° .

为了观察负载状态有无换向极作用时两主极间对应的换向区磁场的变化,在电枢表面取一段长度为 b_k 的圆弧记为换向区 c ,图12和图13分别为负载状态无换向极作用时有和换向极作用时换向区 c 的 B_{kp1} 和 B_{kp2} 波形.

换向电势 $\sum e$ 是旋转电势 e_k 与电抗电势 e_r 的代数和^[12],即

$$\sum e = \sum e_k + \sum e_r \quad (3)$$

换向元件中旋转电势 e_k 可由式(4)求得

$$e_k = 2N_y B_{kp} l v_a \quad (4)$$

式中: B_{kp} 为换向区平均磁感应强度; N_y 为换向元件匝数; l 为元件边长度; v_a 为电枢表面线速度.

换向电流实际变化规律很复杂,电抗电势 e_r 的瞬时值很难计算,工程中采用平均值 e_{rav} 分析,表达式为

$$e_{rav} = 2N_y \lambda A v_a \quad (5)$$

式中: A 为线负荷,本算例为23 645 A/m; λ 为等效比漏磁导,本算例为5.095 $\mu\text{H/m}$.

设无换向极作用时换向元件中旋转电势为 e_{k1} ,平均电抗电势为 e_{rav1} ,换向电势为 $\sum e_1$,有换向极作用时换向元件中旋转电势为 e_{k2} ,平均电抗电势为

e_{rav2} , 换向电势为 $\sum e_2$, 那么 $\sum e_2$ 、 $\sum e_1$ 的比值为

$$\frac{\sum e_2}{\sum e_1} = \frac{e_{k2} + e_{rav2}}{e_{k1} + e_{rav1}} = \frac{2N_y B_{kp2} l v_a + 2N_y \lambda A v_a}{2N_y B_{kp1} l v_a + 2N_y \lambda A v_a}$$

(6)

在相同运行转速下, N_y 、 l 、 v_a 在无换向极作用和有换向极作用时是一样的, 式(6)可简化为

$$\frac{\sum e_2}{\sum e_1} = \frac{B_{kp2} + \lambda A}{B_{kp1} + \lambda A}$$

(7)

由图 12 和图 13 数值计算得到, 无换向极作用时换向区 c 的 B_{kp1} 为 0.31 T, 有换向极作用时换向区 c 的 B_{kp2} 为 0.048 T, 依式(7)求得 $\sum e_2 / \sum e_1 = 39\%$, 换向电势降低了 61%。

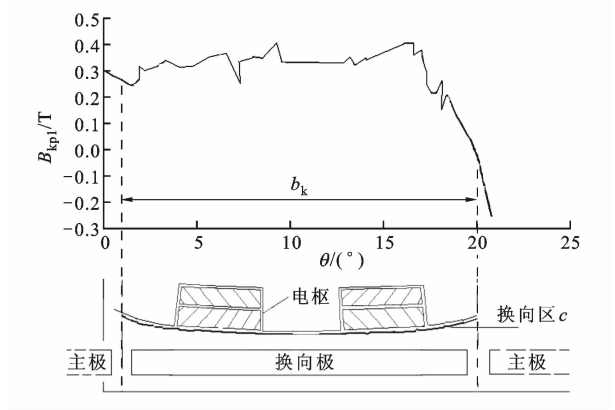


图 12 无换向极作用时换向区 c 的负载磁感应强度曲线

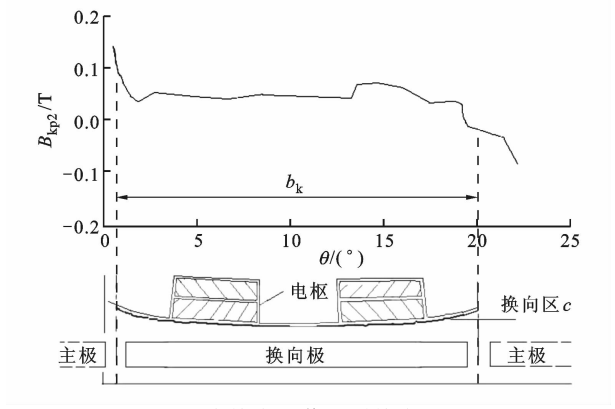


图 13 有换向极作用时换向区 c 的负载磁感应强度曲线

同样, 作为换向区磁场的精细化展示, 图 14 和图 15 分别为负载状态无换向极作用时有换向极作用时, 对应未安装换向极的换向区 d 的 B_{kp3} 和 B_{kp4} 波形。

设无换向极和有换向极作用时的换向电势为 $\sum e_3$ 和 $\sum e_4$, 由图 14 和图 15, 计算得到无换向极

作用时换向区 d 的 B_{kp3} 为 0.338 T, 有换向极作用时换向区 d 的 B_{kp4} 为 0.23 T, 参照式(3)和式(7), 求得 $\sum e_4 / \sum e_3 = 76.4\%$, 换向电势降低了 23.6%。可见, 在只安装半极数换向极的情况下, 换向电势比未安装换向极时平均减小了 42.3%, 有益于改善换向。

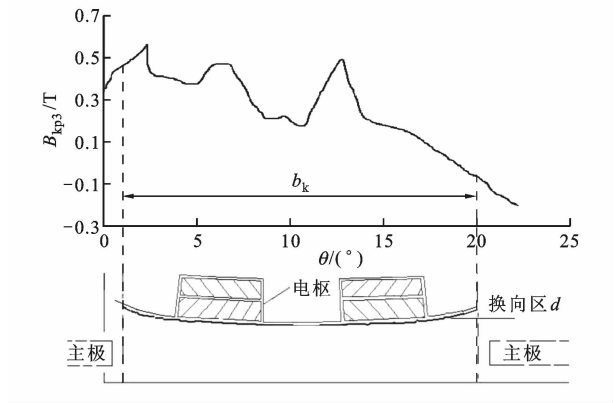


图 14 无换向极作用时换向区 d 的负载磁感应强度曲线

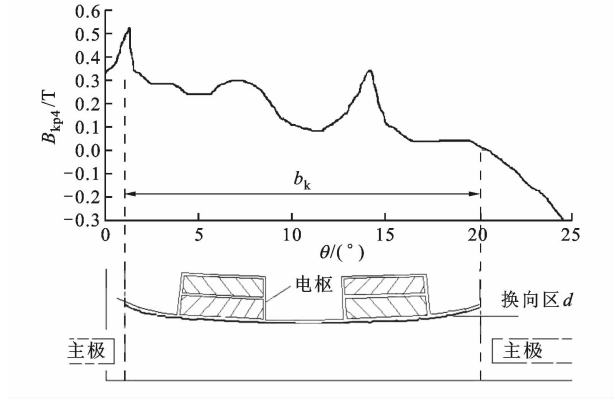


图 15 有换向极作用时换向区 d 的负载磁感应强度曲线

为了考核电机的实际换向火花情况, 对样机在发电电压为 28 V、转速为 6 000 r/min 和负载电流为 235 A (即满载状态运行的火花等级) 的条件下进行实验, 如图 16 所示, 卸掉了被试发电机的风扇罩

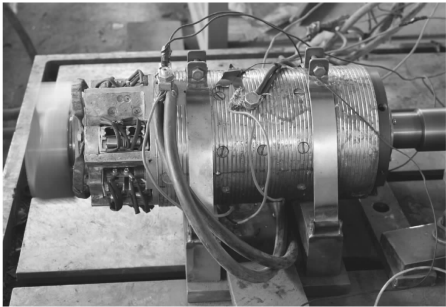


图 16 换向火花实验状态

以利于观察火花.实验发现:在安装了换向极的两主极间的换向区,电刷下没有火花,根据相关标准^[14]可以判断火花等级为1级;在没有安装换向极的两主极间的换向区,轴向并列的两个电刷仅在靠近电枢侧的电刷边缘局部出现断续性微弱的点状火花,判断火花等级为1.25级.至此,车载发电机综合火花等级低于1.25级,完全满足不超过1.5级的技术要求.

4 结 论

对特殊结构低压大电流车载发电机进行电磁场有限元计算分析可见,机械上非对称的磁极结构并没有造成发电机内部磁场分布的不对称,可以确保发电机电能能量转换的正常进行.

在负载状态下,通过对有、无换向极作用时发电机内电磁场计算分析,特别是对换向区磁场精细化展示可见,由于换向极的作用,换向区磁感应强度明显降低,换向电势比无换向极作用时平均减小42.3%,实验火花等级低于1.25级.

研究结果为低压大电流车载发电机的增容研制提供关键技术支持,可有效改善发电机换向、降低火花等级和抑制电磁干扰,提高车载电气系统运行的稳定性、可靠性和安全性.

参考文献:

- [1] 杨克信. 直流电机换向问题的研究[J]. 船电技术, 2003(1):13-16.
YANG Kexin. Research on the commutation of DC motor[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2003(1):13-16.
- [2] 杨克信. 大型直流电机换向问题的研究[J]. 上海大中型电机, 2003(2):15-19.
YANG Kexin. Research on the commutation of large DC motor[J]. Shanghai Medium and Large Electrical Machines, 2003(2):15-19.
- [3] 于福鸿. 调整电刷宽度改善直流电机换向[J]. 长春大学学报, 1999, 9(12):12-14.
YU Fuhong. Adjusting electric brush width and improving commutation of direct current machine[J]. Journal of Changchun University, 1999, 9(12):12-14.
- [4] 王庆春. 直流电机的换向强度准则[J]. 船电技术, 1999(5):19-25.
WANG Qingchun. Standards of reversing strength in DC motor[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 1999(5):19-25.
- [5] 石山, 励庆孚. 直流电机换向火花的数值分析[J]. 电工电新技术, 2010(4):42-45, 60.
SHI Shan, LI Qingfu. Numerical analysis of DC machines commutation spark[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010(4):42-45, 60.
- [6] 曹涛, 刘景林, 李虑怀, 等. 270 V 高压稀土永磁直流电动机磁场分析[J]. 微电机, 2008, 41(9):72-73.
CAO Tao, LIU Jinglin, LI Lühuai, et al. Analysis of electromagnetic field for 270 V high voltage direct current rare earth PM motor[J]. Micromotors, 2008, 41(9):72-73.
- [7] 崔淑梅, 陈钊, 宋立伟. 直流电机换向有限元仿真模型的研究[J]. 微电机, 2011, 44(2):2-5.
CUI Shumei, CHEN Zhao, SONG Liwei. Analysis of the commutation in small DC motors using finite element method[J]. Micromotors, 2011, 44(2):2-5.
- [8] 隋宏亮, 梁得亮, 丁文. 互感耦合开关磁阻电机的等效磁路模型与有限元分析[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4):73-75.
SUI Hongliang, LIANG Deliang, DING Wen. Equivalent magnetic circuit model and finite element analysis of mutually coupled switched reluctance machine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4):73-75.
- [9] 倪红英, 李海峰. 直流电机换向火花的电磁原因解析[J]. 内燃机车, 2011(4):41-44.
NI Hongying, LI Haifeng. Analysis of electromagnetic reason for commutation spark in DC motor[J]. Diesel Locomotives, 2011(4):41-44.
- [10] 林德芳. 提高永磁电机性能的新途径: 辅助磁极的研究[J]. 家用电器科技, 1997(6):13-16.
LIN Defang. A new way to improve performance of permanent magnet motor to the research of supporting pole[J]. Household Appliance, 1997(6):13-16.
- [11] 胡礼源. 牵引电机的换向与改进换向的措施[J]. 电力机车技术, 2002, 25(5):35-38.
HU Liyuan. Commutation of traction motor and its improvement measures[J]. Technology for Electric Locomotives, 2002, 25(5):35-38.
- [12] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010:98-102.
- [13] 游寿康, 朱梅芬. 一般用途小型直流电机电磁计算程序[J]. 电机与控制应用, 1981(1):1-14.
YOU Shoukang, ZHU Meifen. Electromagnetic program of small DC motor[J]. Electric Machines & Control Application, 1981(1):1-14.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1311—2008 直流电机试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(编辑 杜秀杰)